

分类号：
学 号：20172110028

密 级：请注明密级及保密期限
单位代码：10759

石河子大学

硕 士 学 位 论 文



控光与灌水对滴灌玉米生长与耗水的影响研究

学 位 申 请 人	任作利
指 导 教 师	王振华 教授
	李宁 高级工程师
申 请 学 位 类 别	专业学位硕士
专 业 名 称	工程硕士
研 究 领 域	水利工程
所 在 学 院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子

2020 年 06 月

**Effects of Light Control and Irrigation on Growth and Water
Consumption of Drip Irrigation Maize**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

By

Ren Zu-li

(Hydraulic Engineering)

Dissertation Supervisor: Prof. Wang Zhen-hua

Senior Engineer Li Ning

June,2020

石河子大学学位论文独创性声明及使用授权声明

学位论文独创性声明

本人所提交的学位论文是在我导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。据我所知，除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含其他个人已经发表或撰写过的研究成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中作了明确的说明并表示谢意。

研究生签名：任作利

时间：2020年6月2日

使用授权声明

本人完全了解石河子大学有关保留、使用学位论文的规定，学校有权保留学位论文并向国家主管部门或指定机构送交论文的电子版和纸质版。有权将学位论文在学校图书馆保存并允许被查阅。有权自行或许可他人将学位论文编入有关数据库提供检索服务。有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

研究生签名：任作利

时间：2020年6月2日

导师签名：任作利

时间：2020年6月2日

摘要

目的: 为了研究不同控光与灌水对滴灌玉米生长特性、生理特性、土壤水温变化及玉米耗水规律的影响; 不同控光与灌水量对滴灌生理生长特性及其耗水规律的协同作用, 来调节光照过强对玉米生长产生的光抑制现象。以期为高效节水灌溉, 为控光与灌水对玉米生长和耗水的协同调控提高理论依据, 为现代化农业的发展提供借鉴。为研究气象因素和灌水对膜下滴灌玉米的协同调控提供理论依据, 对现代农业科学种植玉米和指导生产实践具有重要意义。

方法: 本试验设置不同灌水量、不同控光率和不同时段控光三因素大田小区试验, 灌水量设为 3000、3750、4500 和 5250 m³/hm² 四个处理 (分别记为 W1、W2、W3、W4), 不同控光率设为正常光照处理作为对照 CK、轻度遮阴 L1 (20%的遮光率)、中度遮阴 L2 (50%的遮光率) 和重度遮阴 L3 (70%的遮光率), 不同控光时段设为全生育期遮光 F1 (5月1日~9月10日)、抽雄吐丝期遮光 F2 (7月15日~8月1日) 和灌浆至完熟期遮光 F3 (8月1日~9月10日)。共 22 个处理, 每个处理 3 次重复。

结果: (1) 不同灌水条件下各处理之间土壤温差显著 ($P<0.05$), W1L1、W2L1、W3L1、W4L1 处理 0~60 cm 深土壤平均温差在 0.6 °C 左右, 0~30 cm 土层深土壤温度对气温响应明显, 10 cm 土层深的土壤温度日变幅最大, 最大可达 4.8 °C 左右。

(2) 不同控光处理较正常光照处理土壤温度明显下降, W2L1、W2L2、W2L3 处理比 W2LCK 处理 0~60 cm 深平均温度下降了 1.8~2.9 °C, W2L1、W2L2、W2L3 处理之间 0~60 cm 深平均温差在 0.6 °C 左右; W2L1、W2L2、W2L3 处理 10 cm 深处日变幅相对 W2LCK 处理较小, 受气温的影响程度明显减小, 20~30 cm 深处土壤温度日变化较平缓; 不同控光和灌水量各处理在 45~60 cm 深处土壤温度对气温响应不显著, 基本趋于稳定。不同控光和灌水量条件下, 土壤温度的变化均有所滞后, 且随着土壤深度的增加土壤温度的变化也呈现滞后反映, 不同灌水量条件下土层深度每增加 10 cm 土壤温度变化滞后 2 h 左右, 不同控光条件下每 10 cm 滞后 1 h 左右。

(3) 控光条件下玉米叶片叶绿素相对含量响应明显, 控光后玉米叶片叶绿素相对含量 SPAD 值显著增加, 叶绿素荧光参数 $\Phi PSII$ 、 Fv/Fm 和 qP 均升高, NPQ 降低, 且随着控光程度的不断增滴灌玉米生理特性的变化越显著, 恢复正常光照后各处理生理指标逐渐恢复至正常水平。

(4) 滴灌玉米全生育期耗水规律变化表现为, 拔节期和抽雄吐丝期滴灌玉米耗水量达到较高水平, 在苗期和完熟期滴灌玉米耗水量达到较低水平, 滴灌玉米不同生育期耗水规律的变化表现为抽雄吐丝期>拔节期>灌浆期>苗期>完熟期。滴灌玉米耗水量的变化随灌水量的增加而增加, 随着控光程度的增大而减小。不同灌水条件下 L1 控光处理较正常光照处理耗水量降低了 21.59~42.45mm, L2 控光处理较正常光照处理耗水量降低了 39.64~64.16 mm, L2 控光处理较正常光照处理耗水量降低了 58.99~89.00 mm。

(5) 不同控光条件下滴灌玉米干物质的积累及分配和产量及其构成均不同程度减小, 全生育期控光处理后, 滴灌玉米株高、茎粗、叶面积和产量均显著减小, 抽雄吐丝期和成熟期控光对滴灌玉米雌穗变化影响显著, 而对滴灌玉米株高、茎粗和叶面积变化影响不显著。不同生育时期控光对滴灌玉米的生育进程有所影响, 较正常光照条件下, 全生育期控光处理和抽雄吐丝期控光处理均推迟

了滴灌玉米的生育进程，而成熟期控光则提前了滴灌玉米的生育进程。

结论：控光对玉米产量影响显著，控光处理后滴灌玉米产量明显降低，抽雄吐丝期控光对玉米产量影响最为显著，灌水量对滴灌玉米生长与耗水有促进作用，控光能够有效降低滴灌玉米的耗水量。本研究通过不同控光与灌水对滴灌玉米的协同作用，可为大田玉米在新疆光照充足的条件下制定出合理的光照强度与灌水量，为精确灌溉制定精细的灌溉制度提供参考价值。

关键词：玉米；滴灌；弱光胁迫；叶绿素荧光；控光；灌水量；土壤温度；产量

Abstract

Object: In order to study the effect of different light control and irrigation on the growth characteristics, physiological characteristics, soil water temperature changes and corn water consumption law of drip irrigation; different light control and irrigation amount on the physiological growth characteristics of drip irrigation and the water consumption law to adjust the light too strong light inhibition on corn growth. With a view to high-efficiency water-saving irrigation, it provides a theoretical basis for improving the coordinated regulation of light control and irrigation on corn growth and water consumption, and provides a reference for the development of modern agriculture. It provides a theoretical basis for studying the meteorological factors and the cooperative regulation of drip irrigation on corn under drip irrigation, which is of great significance for modern agricultural science to plant corn and guide production practice. In order to study the effect of different light control and irrigation on the growth characteristics, physiological characteristics, soil water temperature changes and corn water consumption law of drip irrigation, different light control and irrigation amount on the physiological growth characteristics of drip irrigation and the water consumption law, to adjust the light too strong light inhibition on corn growth. With a view to high-efficiency water-saving irrigation, it provides a theoretical basis for improving the coordinated regulation of light control and irrigation on corn growth and water consumption, and provides a reference for the development of modern agriculture. It provides a theoretical basis for studying the meteorological factors and the cooperative regulation of drip irrigation on corn under drip irrigation, which is of great significance for modern agricultural science to plant corn and guide production practice.

Methods: In this experiment, three-factor field trials with different irrigation amounts, different light control rates, and different periods of shading were set up. The irrigation amounts were set to 3000, 3750, 4500, and 5250 m³/hm² respectively denoted as (W1, W2, W3 and W4) the different light control is set to normal light treatment as a control CK, mild shading L1 (20% shading rate), moderate shading L2 (50% shading rate) and heavy shading L3 (70% Shading rate), the light control period is set to F1 (May 1 to September 10) during the full growth period, F2 (July 15 to August 1) and grouting to maturity Period F3 (August 1st to September 10th). A total of 22 treatments were repeated 3 times for each treatment.

Results: (1) The soil temperature difference between the treatments under different irrigation conditions was significant ($P < 0.05$). The average temperature difference of the soil from 0-60 cm depth in W1L1, W2L1, W3L1, and W4L1 treatment was about 0.6 °C, and the soil depth was from 0-30 cm. The soil temperature responds significantly to the air temperature. The soil temperature at a depth of 10 cm has the largest daily variation, which can reach a maximum of about 4.8 °C.

(2) The soil temperature of different light control treatments was significantly lower than that of normal light treatment. The W2L1, W2L2, and W2L3 treatments had an average temperature of 1.8-2.9 °C lower than the W2LCK treatment at 0-60 cm depth. The average temperature difference at a depth of cm is about 0.6 °C, the daily variation in the depth of 10 cm treated by W2L1, W2L2, and W2L3 is smaller than

that in the W2LCK treatment, and the effect of temperature is significantly reduced. The daily change of soil temperature in the depth of 20-30 cm is relatively gentle, the soil temperature at different depths of 45-60 cm under different light control and irrigation treatments did not respond significantly to air temperature, and basically stabilized. Under different light control and irrigation conditions, the changes in soil temperature have a lag, and the changes in soil temperature with the increase of soil depth also show a lagging reflection. Under different irrigation conditions, the soil temperature changes by 10 cm per soil layer depth. The lag is about 2 h, and the lag is about 1 h every 10 cm under different light control conditions.

(3) The chlorophyll relative content of corn leaves responded significantly under light control. After light control, the SPAD value of chlorophyll relative content in corn leaves increased significantly, the chlorophyll fluorescence parameters $\Phi PSII$, F_v / F_m , and qP all increased, NPQ decreased, and with the light control The physiological characteristics of corn under drip irrigation increased more and more. The physiological indexes of various treatments gradually returned to normal light levels after normal light was restored.

(4) The change of water consumption law during the whole growth period of drip irrigation corn is as follows: the water consumption of drip irrigation corn reaches a high level during jointing and tasseling, and the water consumption of drip irrigation corn reaches a lower level during seedling and mature periods. The change of water consumption during the growing period was as follows, tasseling stage>jointing stage>filling stage>seedling stage>maturity stage. The change of water consumption of corn under drip irrigation increased with the increase of irrigation water, and decreased with the increase of light control. Under different irrigation conditions, the water consumption of L1 light control treatment was reduced by 21.59-42.45mm compared to normal light treatment, and the water consumption of L2 light control treatment was reduced by 39.64-64.16 mm compared to normal light treatment. The water consumption of L2 light control treatment is reduced by 58.99-89.00 mm compared with normal light treatment.

(5) The accumulation and distribution of dry matter and yield and composition of corn under drip irrigation under different light control conditions were reduced to varying degrees. After light control during the whole growth period, the plant height, stem diameter, leaf area and yield of corn under drip irrigation were significantly reduced. The effects of light control at the silking stage and maturation stage on the male and female ears of drip irrigation were significant, but the plant height, stem thickness and leaf area of drip irrigation were not significantly affected. Light control at different growth stages has an impact on the growth process of drip irrigation corn. Compared with normal light conditions, light control treatment during the whole growth period and light control during the spinning stage delayed the growth process of drip irrigation corn. Advances in the growth of drip irrigation corn.

Conclusion: Light control has a significant effect on corn yield. The yield of corn under drip irrigation is significantly reduced after light control. The light control has the most significant effect on corn yield during the silking stage. The amount of irrigation can promote the growth and water consumption of drip

irrigation corn. Light control can be effective Reduce water consumption for drip irrigation corn. Through the synergistic effect of different light control and irrigation on drip irrigation corn in this study, it can provide reasonable light intensity and irrigation volume for field corn under sufficient sunlight in Xinjiang, and provide reference value for precise irrigation and elaborate irrigation system.

Key words: corn; drip irrigation; low light stress; chlorophyll fluorescence; light control; irrigation amount; soil temperature; yield

目 录

摘 要.....	I
Abstract	III
第一章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.3 研究内容	5
1.4 技术路线	5
第二章 材料与方 法.....	7
2.1 试验区概况	7
2.2 试验设计	8
2.4 测试项目及方法	10
2.5 数据分析	12
第三章 不同控光处理对滴灌玉米生长与耗水的影响.....	13
3.1 不同控光处理对滴灌玉米田间小气候环境的影响	13
3.2 不同光照处理对滴灌玉米生理生长特性的影响	14
3.3 不同光照处理对滴灌玉米土壤水热变化及耗水规律的影响	19
3.4 本章小结	27
第四章 不同灌水处理对滴灌玉米生长及土壤水热变化的影响.....	29
4.1 不同灌水处理对玉米生长特性的影响	29
4.2 不同灌水处理对土壤水热变化的影响	31
4.3 不同灌水量对土壤水分的影响	37
4.4 本章小结	39
第五章 不同控光与灌水量对滴灌玉米生长特性及耗水规律的影响.....	41
5.1 不同控光与灌水量对滴灌玉米生长特性的影响	41
5.2 不同控光与灌水量对滴灌玉米耗水规律的影响	43
5.3 不同控光与灌水量对滴灌玉米生长及耗水的影响	45
5.4 控光与灌水对滴灌玉米协同调控下的工程应用	48
5.5 本章小结	48
第六章 结论与展望.....	50
6.1 结论	50
6.2 展望	51
参考文献.....	52
致谢.....	57
作者简介.....	58

第一章 绪论

1.1 研究背景及意义

新疆位于我国西北边陲，地处亚欧大陆腹地，属于典型的干旱性气候，有丰富的光热资源，日照时间较长积温多，太阳辐射年总量达 $5000\sim 6400\text{ MJ/m}^2$ ，年太阳直接辐射总量达 $2611\sim 4033\text{ MJ/m}^2$ ，占总太阳辐射的 $45\%\sim 65\%$ ，相比于同纬度地区的东北，新疆年太阳辐射总量比东北地区多 $620\sim 840\text{ MJ/m}^2$ ，比长江中下游地区要多 $1250\sim 2090\text{ MJ/m}^2$ 。新疆冬季太阳辐射量仅占全年的 $10\%\sim 16\%$ ，大量的太阳辐射分布在作物生长期，且太阳直接辐射量在 6 月和 7 月达到最大值。新疆是中国日照时长最多的地方之一，常年干旱少雨，年日照率可达 $60\%\sim 75\%$ ，年日照时数可达 $2500\sim 3550\text{ h}$ ，新疆东部地区年均日照时数 3100 h 以上，西部地区年均日照时数 $2500\sim 2900\text{ h}^{[1-4]}$ 。

光照是植物能量的直接来源，光照强度对植物生长发育起着重要作用，植物通过光合作用把光能转化为化学能储藏在体内。光照强度过量或过弱均抑制作物的生长发育，光照强度太强会抑制植物光合作用的进行，甚至对植物光合器官造成损伤。这种由于光能过剩而导致作物光合机构所吸收的光能大于作物正常光合作用所利用的光能，从而引起光逆境现象也称光抑制，使得作物光合作用效率下降^[5-8]。由此可见，新疆太阳资源丰富，太阳辐射强，日照时数远大于中国其他地区。独特的太阳辐射资源使新疆产生独特的农作物，但光能过剩，太阳辐射过强，会使作物光合作用产生光抑制现象。

干旱缺水是一个世界性的问题，中国是世界上缺水较严重的国家之一，尤其是部分干旱半干旱地区，水资源紧缺问题已成为制约农业可持续发展的主要因素之一。我国淡水资源总量较少，人均占有量较世界平均水平相差 $3/4$ 。新疆位于我国的最西北、常年干旱缺水，属于我国典型的干旱缺水地区，新疆年均降雨量仅有 154 mm 左右，仅占全国平均降雨水平的 23% ^[9]，新疆水资源供需及其不平衡。2015 年全疆地表水资源量为 $930.4\times 10^8\text{ m}^3$ ，人均占有量为 3943 m^3 。其农业用水占总用水比率大于灌溉水成为该地区生产的主要限制因素之一，其农业用水占总用水比率大于 90% ^[10]。

玉米是世界第一大农作物，是我国的粮食和经济作物之一，是我国主要食物、饲料、工业原料以及清洁能源的重要原料。玉米在我国的播种面积是农作物播种面积中最大的，总产量位居第二的农作物，种植面积也位居世界第二，仅次于美国^[11]。2016 年全国玉米种植面积达 $3678.6\times 10^4\text{ hm}^2$ ，玉米总产量达 $2.20\times 10^8\text{ t}$ ，占总粮食产量的 35.6% 。2016 年新疆玉米种植面积达 $9.19\times 10^4\text{ hm}^2$ ，占新疆农作物种植面积的 14.78% ，产量达 $663.87\times 10^4\text{ t}$ ，占新疆粮食总产量的 44.54% 。玉米作为我国的粮食作物，在我国的农业生产中，占举足轻重的地位^[12]。

探究滴灌玉米耗水规律对制定合理科学的灌溉制度，达到节水灌溉要求，对我国农业用水缺乏具有重要意义。目前，对作物耗水规律的研究大多集中在作物的种植方式，耕作方式以及灌溉制度等方面，气象因素对作物耗水的影响研究较少。光照是影响作物生长发育的重要因素之一，光照条件的强弱对作物的光合作用、生长发育以及产量均有

一定的影响。目前大多数国内外学者研究了控光处理对作物的生长特性、生理特性以及产量品质的影响,而对不控光条件与灌水量对滴灌玉米生长与耗水的协同调控作用的研究还比较少,本研究以玉米为研究对象,设置不同的控光处理、灌水量处理、不同生育期阶段控光处理,探究不同控光与不同灌水条件对玉米的生长与耗水规律的影响,从而获取最佳的灌水定额和适度的控光强度以及合理的控光时间段,使得滴灌玉米耗水量降低、光照强度影响较小、产量改变不大的最佳控光与灌水梯度,进而为膜下滴灌玉米高效节水灌溉技术提供一定的参考价值,为新疆发展现代化农业,实现精准滴灌提供理论依据和科学指导价值。

因此,探究玉米在不同光照强度下的耗水规律对发展节水农业,缓解我国农业用水紧缺有重要的意义,探究光照与灌水对滴灌玉米的协同作用对高效节水农业具有重要意义,在保证国家粮食安全上发挥举足轻重的作用。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 玉米耗水规律研究进展

作物的耗水量是由作物蒸腾和土壤蒸发两部分组成,它是计算农田水分平衡的重要组成部分,也是农田管理及水资源精缺调控的重要依据。作物的蒸发蒸散量受到很多因素的影响,其中,光照是影响作物水分消耗的重要因素之一,太阳辐射强度越大,光照时长越长,作物的蒸腾作用也就越强,适当适时的降低光照强度有助于提高作物的光合效率,降低作物蒸腾作用,减少作物的耗水量,达到高效节水的作用^[13]。

近年来国内外大量学者对玉米的耗水规律作了大量的研究,玉米耗水的研究大多为不同的种植方式、灌溉方式、灌溉制度等方面研究,而对于不同控光与灌水量条件对膜下滴灌玉米生长与耗水规律协同作用的有关研究还比较少。因此,研究不控光与灌水交互作用下的耗水规律对高效节水的现代农业具有重要意义。玉米耗水量的大小受多种因素影响,玉米耗水量的变化因玉米品种的不同、种植方式不同、生长环境的不同而不同^[14],不同地域玉米耗水量有明显差异。孟凯等研究表明,在我国玉米主产区东北,玉米耗水量为400~500 mm^[15],受季风气候的影响,东北春玉米全生育期耗水量差异较大。辽宁省西部也是春玉米种植的主要地区,曹永强^[16]等的研究表明,在辽宁西北地区从1986年至2007年玉米耗水量的变化情况可以得出,玉米耗水量在为312~498 mm。我国西北地区玉米全生育期耗水量在424 mm左右^[17]。翟超^[18]等人研究表明,不同灌水量情况下2013~2015新疆准噶尔盆地南缘区玉米年耗水量在为202~569 mm,可见干旱地区玉米耗水量受灌溉影响大,唐光木等研究表明,膜下滴灌玉米的最佳灌溉定额为5250~6000 m³/hm²。寇明蕾^[19]等研究表明,轻度、中度、重度亏水处理的玉米耗水量较对照分别减少了11.9%、15.4%、24.4%。曹雪松^[20-22]等研究表明,随着灌水量的增大玉米耗水量随着增大。曹云者^[23]等研究表明,夏玉米全生育期的日需水强度呈抛物线形规律变化,夏玉米耗水量在拔节期达到最大水平。而李凤英^[24]等研究表明,抽雄吐丝期是玉米生长发育与耗水的重要时期,如果水分不足会影响玉米的生长发育从而导致减产。宋常

吉^[25]研究表明,北疆地区青储玉米在拔节期耗水量达到最大水平,抽雄吐丝期耗水强度达到最大水平^[26]。种植方式对玉米耗水量也有显著影响,李全起^[27]等研究表明,沟播和垄作处理均大大增加了土壤水分的消耗量和总蒸散量。杨晓丽^[28]等研究表明在地面灌与膜下滴灌两种灌水方式下抽雄吐丝期干旱处理对玉米耗水影响最大。吕佳雯^[29,30]等研究表明,覆膜种植可以有效降低玉米耗水量。邱新强^[31]研究表明干旱处理有利于夏玉米各生育期耗水量的降低。汪顺生^[32]等研究表明,沟灌种植模式下采用秸秆覆盖处理后玉米耗水规律呈“N”字形变化,分别在抽雄吐丝期与成熟期达到最高水平。塑料地膜覆盖较小麦秸秆覆盖具有更好的保水性,减少了土壤蒸发损失的水分。刘战东^[33]研究表明,不同种植密度处理下,拔节期玉米耗水量达到最大水平,耗水总量在350~400 mm之间。李栋浩^[34]等研究表明,随着种植密度的增加玉米耗水量随之增加。胡铁民^[35-40]等研究表明,覆膜种植有较好的保墒作用,能有效降低玉米耗水量,从而提高玉米的水分利用效率。王磊^[41]等研究表明,平水年覆膜种植玉米耗水量较裸地种植玉米耗水量减小19.2 mm,丰水年覆膜种植和裸地种植玉米耗水量没有显著差异。从以上学者研究结果可见,玉米不同生育期耗水量不同,拔节期至乳熟期为玉米耗水的关键时期,由不同覆盖栽培方式研究可见,覆盖有助于土壤的保湿,可有效降低作物耗水量^[42]。

玉米具有生长发育快,对水分反映敏感,在生长期容易发生水分胁迫^[43,44]。水分在作物生长发育中起重要作用,水分的大小直接影响产量的大小^[44,45]。已有大量学者研究了灌水量对作物耗水了的研究。已有研究表明,在不同灌水量条件下,轻度和中度水分胁迫下玉米蒸腾作用有所降低,玉米全生育期单株蒸腾耗水量分别降低16.3%和36.9%,单株生物量分别降低了17.8%和40.2%^[46]。董平国^[47]等人研究表明,在不同灌溉制下,相同灌溉定额条件下,各处理耗水强度随着灌水时间的变化呈抛物线规律变化。连彩云^[48]等研究表明,玉米阶段耗水量和日均耗水量随灌溉定额的增大而增大,在喷灌条件下,玉米阶段耗水量与日均耗水量随灌溉定额的增大而增大,但当灌溉定额达到一定程度后会减产^[49]。有学者研究了不同种植模式下不同水分下线控制对玉米耗水量的影响,在宽垄种植与常规种植模式下,同一生育期夏玉米的耗水量均随灌水下线的增加而增加,整个生育期耗水规律也表现出相同的变化规律^[50]。一些研究还表明,在田间灌溉、渠道灌溉、管道灌溉和膜下滴灌四种灌水方式下,玉米耗水量在398.47~642.85 mm之间,而膜下滴灌能有效的降低玉米耗水量。

以上国内外大量学者多是研究不同灌水量、不同地域、不同种植方式和不同耕作方式下玉米耗水规律的变化情况。但是,气象条件对玉米耗水量的影响研究较少,气象条件不同对玉米耗水量的变化影响不同。综合现有研究可以发现,进行覆盖措施和合适的灌溉制度可以有效的提高土壤水分利用效率,减少农田水分的浪费,减少玉米的耗水量。由于光照强度是作物蒸腾与光合作用的主要来源,所以研究光照强度对玉米生长发育及耗水规律的影响具有重要意义,以期为高效节水现代农业提供理论依据。

1.2.2 不同控光条件下玉米生长与产量的变化情况

光照是作物生长发育的必需条件之一,作物的光合作用、生长特性、产量及其构成

对光照强弱的响应非常敏感。不同的植物对光的强弱响应不同，其生理生长特性表现出不同的变化规律。国内外有许多学者对不同光照条件下植物的生长发育及产量品质等方面的变化进行了大量研究。虽然他们所用的材料和方法有所不同，但研究结果大体相似。有学者研究发现，遮阴会促进植物的生长，表现为生长速度加快，植株生长茂盛，根系生长发达，叶绿素含量明显增加。还有学者研究表明遮阴是作物产量也有很大提高^[51, 52]。对不同作物而言，每个作物都有一个适宜自己生长发育的光照强度范围，当光照强度太大时，作物会产生光逆境现象，这会影影响作物的生长和发育、降低作物的光合作用，并导致作物的生长速度下降^[7]。Nunes^[53]等研究发现，植物体内光合作用将受到长时间强光照射限制。一些研究还表明，某些特定的补光条件^[54]可以提高幼苗的成活率，这有利于幼苗生长。范叶萍等研究表明，匙叶天南星在 75% 和 50% 的遮阴条件下，幼苗叶绿素含量明显增大，植株高是正常光照条件下的 1.27 和 1.30 倍^[55]。闫晓花^[56]等研究了对黄瓜补光 and 不同光质处理，研究结果表明探究了补光 4 h 条件下黄瓜根系生长最旺盛，这说明适当的补充光照有助于黄瓜根系的生长。崔晓辉^[57]等探究了对甜瓜的补光，得出相同结论，补光有助于甜瓜的生长和产量的提高。韩金星^[58]等人探究了补充光照条件对草莓生长的影响，得出补充光照条件对草莓株高、茎粗，产量和品质有促进作用。可见，某些补充光照条件有利于一些植物的生长，且有助于产量的提高。也有研究表明^[51, 59]，自然条件下的遮荫可以提植物的株高，如橡木和樱桃育苗。Perez^[60]和 Claudia^[61]等研究结果也表明适当的遮光条件下苗木生长更好，如圣栎、雪松等苗木对遮光环境就有着很好的适应性。梁文斌^[62]等研究表明，30% 的遮光和 60% 的遮光条件下短梗大参苗木冠幅生长较正常光照处理更大，其生长并未受到弱光抑制，说明短梗大参有一定的弱光适应能力。孙欣欣^[63]等研究表明，遮荫能够促进胡桃楸生长，遮荫条件下胡桃楸苗高与干物质积累量均有所提高。罗宁^[64]等研究表明，一层遮阳网加快了黄金榕、花斑垂叶榕、乳斑榕苗木的生长速度，但降低了苗木茎、叶、根部含水量。徐玉梅^[65]等研究表明，云南红豆杉苗木在 50% 的遮荫条件下生长最好。孟鹏^[66]等研究表明，遮光条件不影响沙地柏的生长，樟子松的存活率和生长缺受到了弱光的抑制，影响其生长发育。王沅^[67]等研究表明，小麦在小花发育期遮光影响下部小穗的结实数及影响产量。贺明荣^[68]等研究表明，遮光条件下小麦籽粒的灌浆速率有降低现象。由国内外学者的研究结果可得，光照强度的不同、控光材料的不同以及作物不同得出的结论也有所不同。玉米作为 C4 植物，对光照强度的需求相对较大，光能利用效率也较高，光照强度对玉米的生长发育及其重要^[69]，李潮海研究指出遮光对玉米生长发育产生显著影响，遮光处理后，玉米叶片生长变缓，厚度变薄，不同时期遮光对玉米叶面积的影响也不尽相同，遮光处理后玉米生育期有所推迟，遮光对玉米果穗的发育影响显著^[70]。张宏宇^[71]研究表明，拔节至吐丝期遮光处理后，玉米株高和穗位高均有所升高。张吉旺研究表明，不同时期遮光对玉米产量均有不同程度的影响，在花粒期遮光对玉米产量影响最大，苗期遮光对玉米产量的影响最小^[72]。张烈研究表明，孕穗期光照强度不足对玉米产量影响最大，随着遮光程度是增强对产量的影响越大^[73]。

光是作物光合作用的源泉，光的强弱直接影响着作物的光合作用。遮光程度不同、遮光时期不同、试验品种不同等条件不同，光照对其光合作用的影响也不同。张振贤等研究表明，强光下叶绿素体内片层系统减小，但强光下原始光能转换速率较弱光下高^[74]。随着遮光程度的增加，玉米叶片的平均日净光合速率和气孔导度有所增加，蒸腾速率和叶片胞间 CO₂ 浓度有所降低，在 20% 的遮光条件下玉米光合作用最佳。张吉旺^[75]等研究表明，苗期遮光对玉米叶片光合速率影响最小，花粒期遮光对玉米叶片光合作用影响最大^[76]。贾士芳^[77]研究表明，授粉期前后遮光，玉米光合作用下降，玉米干物质及干物质分配的积累均减小，而增加光照强度玉米干物质积累明显增大。崔海岩^[78]等研究表明，遮光处理后，玉米干物质积累和产量均降低，花粒期遮光对玉米产量和干物质的积累量影响最大。贾士芳等^[77]研究表明，遮光后玉米粒重、淀粉含量和体积均有所下降，但脂肪和蛋白质含量有所升高。

1.3 研究内容

1.3.1 不同控光条件对玉米生长与耗水规律的影响

通过分析不同控光条件下滴灌玉米生长、生理特性、土壤水分、温度、玉米耗水规律的变化，研究不同控光条件下滴灌玉米生长与耗水的变化过程。

1.3.2 不同灌水量条件对玉米生长与耗水规律的影响

通过分析灌水量对滴灌玉米生长特性、土壤水分、温度及耗水规律的影响，研究不同灌水量对滴灌玉米生长与耗水的变化过程。

1.3.3 不同光照与灌水量对玉米生长发育及耗水的影响

通过分析不同控光与灌水对滴灌玉米生长特性及耗水规律的影响，研究不同控光与灌水对玉米生长及耗水的变化过程，实现控光与灌水对滴灌玉米生长与耗水的调控作用。

1.4 技术路线

(1) 查阅国内外相关文献资料，提出可研究的问题，确定试验方案，根据试验方案开展大田小区试验，检测并采集试验所需相关数据。

(2) 利用试验所得数据分析研究不同控与灌水对滴灌玉米生长发育特性与耗水规律的影响。

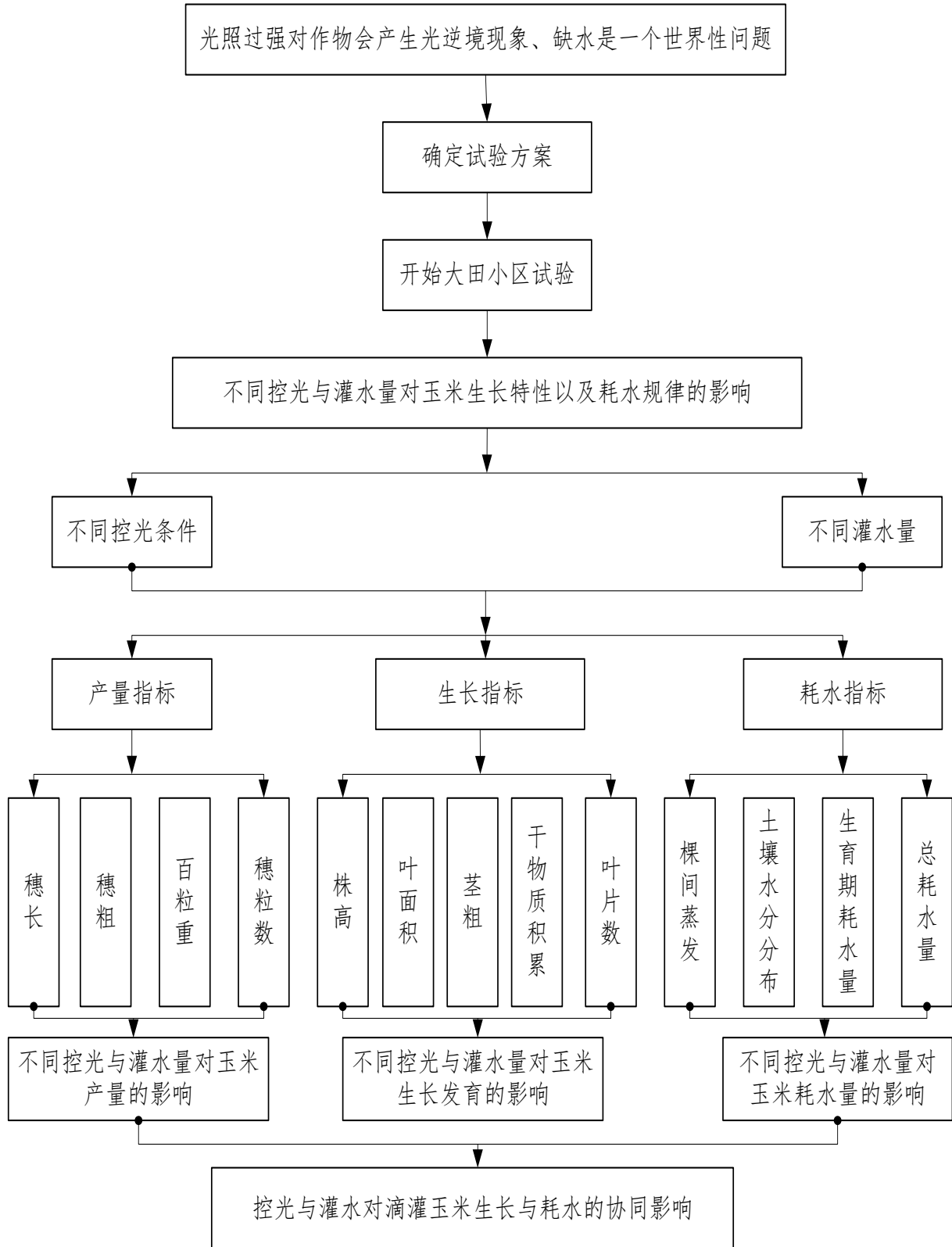


图 1-1 技术路线图

Fig. 1-1 Technical roadmap

第二章 材料与amp;方法

2.1 试验区概况

试验于2018年4月~2018年11月在乌鲁木齐市头屯河区五一农场兵团灌溉中心试验站进行。五一农场位于准葛尔盆地南缘,天山北坡,乌鲁木齐市西郊,距市中心约31 km,东经87°19'52"~87°27'23",北纬43°55'52"~44°03'10"之间。海拔高度520~616 m,南北高差96 m,地势由东南向西北倾斜,平均坡降7.6 ‰。气温属于中温带大陆性半干旱气候区,一年内温度变化幅度大,年平均气温6.5 ℃,≥10 ℃积温3400 ℃。年平均降水228.8 mm,年蒸发量2647 mm,日照2800 h,风向主要是西北风和东南风,无霜期150~160 d,主要灾害性天气有干旱、大风、干热风和霜冻。供试土壤为壤土,玉米播种前用环刀测定土壤容重和田间持水率,见表2-1。



图 2-1 试验区位置

Fig. 2-1 Test area location

表2-1 试验地土壤容重和田间持水率

Table 2-1 Soil bulk density and field water holding capacity

深度/cm	10	20	30	45	60
土壤容重/g·cm ⁻³	1.45	1.41	1.46	1.44	1.42
田间持水率/%	17.89	18.02	17.93	17.86	18.13

试验区气象资料由试验站 Watch Dog 小型气象站观测所得。土壤含水率和土壤温度采用邯郸市丛台益盟电子有限公司生产的 YM-01 智能多点土壤温湿度记录仪观测,观测深度为 10 cm、20 cm、30 cm、45 cm、60 cm,定时测定,每隔 15 分钟记录一次。

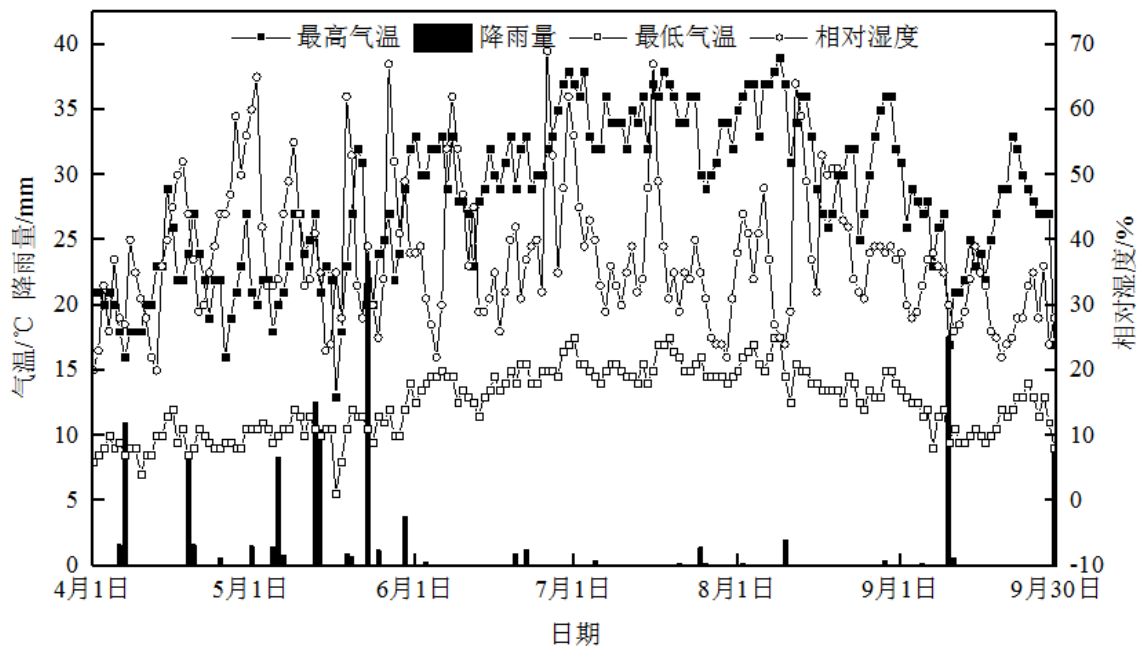


图 2-2 试验站点气象变化

Fig. 2-2 Meteorological changes at the test site

2.2 试验设计

本试验供试玉米品种为新疆主播品种新玉9号，采用1膜2管2行种植方式，滴灌带选用新疆天业公司生产的单翼迷宫式滴灌带，滴孔间距300 mm，滴头流量2.8 L/h。滴灌带间距40 cm，地膜宽70 cm，玉米株距35 cm，地膜间距50 cm。控光小区采用钢管和设计规格的遮阳网（遮光率分别为20%、50%、70%）搭设高2.5 m的遮阴棚，遮阴棚下方留1m高的通风口，确保遮阴棚里小气候环境与外界有良好的气体交换。

试验设置不同灌水量、不同控光率和不同生育时段遮光三个因素，共22个处理，每个处理设三次重复，灌水量设为3000、3750、4500和5250 m³/hm²四个水平（分别记为W1、W2、W3、W4），遮光率设为自然光对照CK、轻度遮阴L1（20%的遮光率）、中度遮阴L2（50%的遮光率）和重度遮阴L3（70%的遮光率），遮光时段设为全生育期遮光F1（5月1日~9月10日）、抽雄吐丝期遮阴F2（7月15日~8月1日）和灌浆至完熟期遮光F3（8月1日~9月10日）。具体试验设置见表2-2。试验小区面积49 m×3.6 m（长×宽）=176.4 m²。施肥量按照当地经验及相关文献^[79,80]，采用N:P:K=1: 0.39: 0.2的比例，尿素270 kg/hm²、磷酸脲105 kg/hm²、硫酸钾60 kg/hm²，每个小区均单独安装施肥罐，每次滴灌1h后将肥料完全溶解于施肥罐，肥随水灌入土壤中，全生育期灌水8次。玉米整个生育期划分为5个阶段，苗期（5月10日~6月11日）、拔节期（6月11日~7月15日）、抽雄吐丝期（7月15日~8月1日）、灌浆期（8月1日~8月21日）、完熟期（8月21~9月10日）。

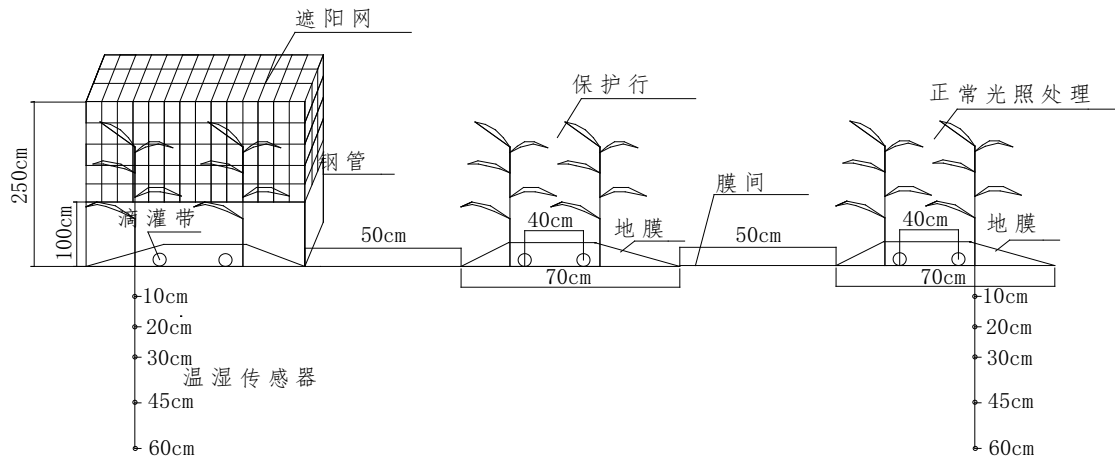


图 2-3 试验布置方式
Fig.2-3 Layout of test

W1LCK	W1LCK	W1LCK
W2LCK	W2LCK	W2LCK
W3LCK	W3LCK	W3LCK
W4LCK	W4LCK	W4LCK
W1L1	W1L1	W1L1
W2L1(L1F1)	L1F2	L1F3
W3L1	W3L1	W3L1
W4L1	W4L1	W4L1
W1L2	W1L2	W1L2
W2L2(L2F1)	L2F2	L2F3
W3L2	W3L2	W3L2
W4L2	W4L2	W4L2
W1L3	W1L3	W1L3
W2L3(L3F1)	L3F2	L3F3
W3L3	W3L3	W3L3
W4L3	W4L3	W4L3

图 2-4 不同处理地块布置方式
Fig. 2-4 Arrangement of different processing plots

表 2-2 试验设置及灌溉制度
Table 2-2 Test setup and irrigation schedule

代码	光照处理	灌溉定额 /m ³ ·hm ⁻²	各生育期灌水量 (m ³ /亩)					灌水次数
			苗期	拔节期	抽雄期	灌浆期	完熟期	
W1LCK		3000	25	50	50	50	25	8
W2LCK	遮光度	3750	31	62	62	62	31	8
W3LCK	0%	4500	37	74	74	74	37	8
W4LCK		5250	44	88	88	88	44	8
W1L1	全生育期 遮光率 20%	3000	25	50	50	50	25	8
W2 L1		3750	31	62	62	62	31	8
W3 L1		4500	37	74	74	74	37	8
W4 L1		5250	44	88	88	88	44	8
L1F2	抽雄吐丝 期遮光 20%	3750	31	62	62	62	31	8
L1F3	灌浆-完 熟期遮光 20%	3750	31	62	62	62	31	8
W1 L2	全生育期 遮光度 50%	3000	25	50	50	50	25	8
W2 L2		3750	31	62	62	62	31	8
W3 L2		4500	37	74	74	74	37	8
W4 L2		5250	44	88	88	88	44	8
L2F2	抽雄吐丝 期遮光 50%	3750	31	62	62	62	31	8
L2F3	灌浆-完 熟期遮光 50%	3750	31	62	62	62	31	8
W1 L3	全生育期 遮光度 70%	3000	25	50	50	50	25	8
W2 L3		3750	31	62	62	62	31	8
W3 L3		4500	37	74	74	74	37	8
W4 L3		5250	44	88	88	88	44	8
L3F2	抽雄吐丝 期遮光 70%	3750	31	62	62	62	31	8
L3F3	灌浆-完 熟期遮光 70%	3750	31	62	62	62	31	8
灌水次数		8	1	2	2	2	1	8

2.4 测试项目及方法

2.4.1 气象数据的采集

本试验站点气象资料由试验站Watch Dog小型气象站观测所得，试验区气象资料主

要包括降雨量、气温、风速、日照时数、湿度等。

2.4.2 土壤含水率的测定

(1) 采用烘干法测定玉米苗期、拔节期、抽雄吐丝期、灌浆期、完熟期土壤质量含水率，土样采取点位于滴灌带下0~60 cm深的土层，在10 cm、20 cm、30 cm、45 cm、60 cm深度各取一个土样，在灌水前后加测土壤含水率。

(2) 采用水温传感器测定，土壤含水率和土壤温度采用邯郸市丛台益盟电子有限公司生产的YM-01智能多点土壤温湿度记录仪观测，观测深度为10 cm、20 cm、30 cm、45 cm、60 cm，定时测定，每隔15分钟记录一次。

2.4.3 玉米耗水量的计算

耗水量按照田间水量平衡公式计算，计算公式为：

$$ET_{1-2} = 10 \sum_{i=1}^n H_i (W_{i1} - W_{i2}) + M + P + K + C \quad (2-1)$$

公式中： ET_{1-2} 为作物阶段耗水量（mm）； i 为土壤层次计数； n 为土层总数； H_i 为第 i 层土壤厚度（cm）； W_{i1} 为第 i 层土壤在某时段始的体积含水率（%）； W_{i2} 为第 i 层土壤在某时段末的体积含水率（%）； M 为时段内灌水定额（mm）； P 为时段内的降雨量（mm）； K 为时段内的地下水补给量（mm）； C 为时段内的排水量（mm）。

由于试验地地下水埋深大于8.0 m，地下水补给量 K 忽略不计， $K=0$ ；由于灌溉没有发生深层渗漏，阶段内排水量 C 忽略不计， $C=0$ 。

耗水模数：某生育期耗水模数为某生育期耗水量除以全生育期耗水量（%）

耗水强度：某生育期耗水强度为某生育期耗水量除以某生育期天数（mm/d）

2.4.4 土壤温度

于滴灌带下埋设曲管水银地温计测定5、10、15、20及25 cm土层土壤温度，分别记录8:00~20:00土壤温度，每隔2 h观测1次，每隔7 d连续观测3 d取平均值。

2.4.5 玉米生理指标的测定

玉米叶片叶绿素含量测定：叶绿素相对含量（SPAD值）采用日本KONICA MINOLTA公司生产的SPAD-502PLUS便携式叶绿素仪测定玉米叶片叶绿素相对含量SPAD值，通过测量叶片在两种波长光学浓度差方式650 nm和940 nm来确定叶片当前叶绿素的相对数量。每个处理选取三株长势良好具有代表性的植株，每株选取下中上三片叶子进行测定取平均值，每隔7d测定一次。

叶片荧光参数测定：叶绿素荧光参数采用德国WALZ公司生产的PAM2500型便携式调制叶绿素荧光仪测量。每个处理选取有代表性的植株3株，每株选取下中上3片成熟的叶子进行测定取平均值，每个生育期测一次。选择晴朗的天气，在零晨3点测量叶片最大荧光产量（ F_m ）和最小荧光产量（ F_o ），在当天上午9:00~20:00期间每个2小时观测一次，测定各时间段的实际荧光产量（ F' ），光下最小荧光产量（ F_o' ），光下最大荧光产量（ F_m' ）。根据所测数据计算： $PSII$ 的最大光量子产量（ F_v/F_m ）、实际光合量子产量（ $\Phi PSII$ ）、非光化学猝灭系数（ NPQ ）和光化学猝灭系数（ qP ）^[81-83]。计算公式如

下:

$$Fv/Fm = (Fm - Fo) / Fm \quad (2-2)$$

$$\Phi PSII = (Fm' - F) / Fm' \quad (2-3)$$

$$NPQ = Fm / Fm' - 1 \quad (2-4)$$

$$qP = (Fm' - F') / (Fm' - Fo') \quad (2-5)$$

2.4.6 生长指标与产量的测定

玉米植株茎粗、株高、叶长和叶宽采用游标卡尺和卷尺测量，每个处理选取三株代表性植株进行挂牌标记，五叶期以后每隔10 d测量一次。

株高：用卷尺测量玉米茎基部至玉米顶部的高度。

茎粗：用游标卡尺测定玉米地上第二节中部茎宽。

叶面积：用卷尺测量玉米叶片叶长和叶宽，叶面积采用长乘宽乘系数法计算（叶面积=叶长×叶宽乘折算系数0.75）

干物质积累量的测定，于玉米苗期~成熟期每隔10 d测一次，每个处理各选3株代表性植株，按茎、叶、雌穗、雄穗分解开，分别称取鲜重，105 ℃杀青后80 ℃烘干，待恒温后称取干重并记录。

玉米产量的测定，待玉米成熟后，每个小区随机采摘30个玉米果穗自然风干，测量其果穗穗长、穗粗、穗行数和行粒数，脱粒后称取千粒重和穗粒重。产量为每个小区实测结果。

穗位系数=穗位高/株高

灌溉水利用效率:计算公式为:

$$iWUE = Y/I \quad (2-6)$$

公式中*iWUE*为灌溉水利用效率；*Y*为玉米产量，kg/hm²；*I*为灌溉定额m³/hm²。

2.5 数据分析

用Microsoft Excel 2013进行数据计算；应用SPSS Statistics 18.0统计软件进行分析，Origin 8.5作图。

第三章 不同控光处理对滴灌玉米生长与耗水的影响

3.1 不同控光处理对滴灌玉米田间小气候环境的影响

试验区的降雨量、气温、风速等气象资料由试验站Watch Dog小型气象站观测所得。试验区灌水量采用水表测定，控光处理下的田间小气候环境采用温湿度仪进行检测温度和湿度的变化，太阳辐射采用辐射表测定。

表3-1为不同光照条件下田间各气象因素的变化，由表3-1可知随着遮光程度的增强，光照强度逐渐减小，气温逐渐减小，相对湿度逐渐增大，风速逐渐减小，CO₂浓度逐渐增大。这是由于控光处理后遮阳网阻挡了一部分太阳辐射，导致田间小气候太阳辐射强度减弱，田间蒸发减小，相对湿度增加，遮阳网阻挡了风对田间小气候的影响和空气的流通，造成风速减小CO₂浓度的增大。

表 3-1 不同光照处理对玉米田间小气候的影响

Table 3-1 Effects of different light treatments on microclimates in corn fields

处理	光照强/ $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	气温/ $^{\circ}\text{C}$	相对湿度/%	风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$	CO ₂ 浓度/ $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$
自然光	1234.56	35.45	50.13	0.86	321.8
遮光率20%	985.36	32.34	52.68	0.72	328.48
遮光率50%	619.23	30.57	56.32	0.63	336.5
遮光率70%	382.41	25.68	63.14	0.58	344.9

图3-1为连续监测不同遮光处理一周的温度日变化，取平均值得出不同控光处理田间小气候环境的气温日变化规律。控光处理后，不同程度的遮阴使田间小环境气温显著下降，由图3-1知，控光后W2L2、W2L3和W2L4处理田间小环境气温较W2L1处理日平均气温分别降低了3%、8.3%、15.3%，由于遮阳网大大阻隔了太阳辐射对土壤的直接照射作用，所以土壤温度对气温的响应程度明显降低。

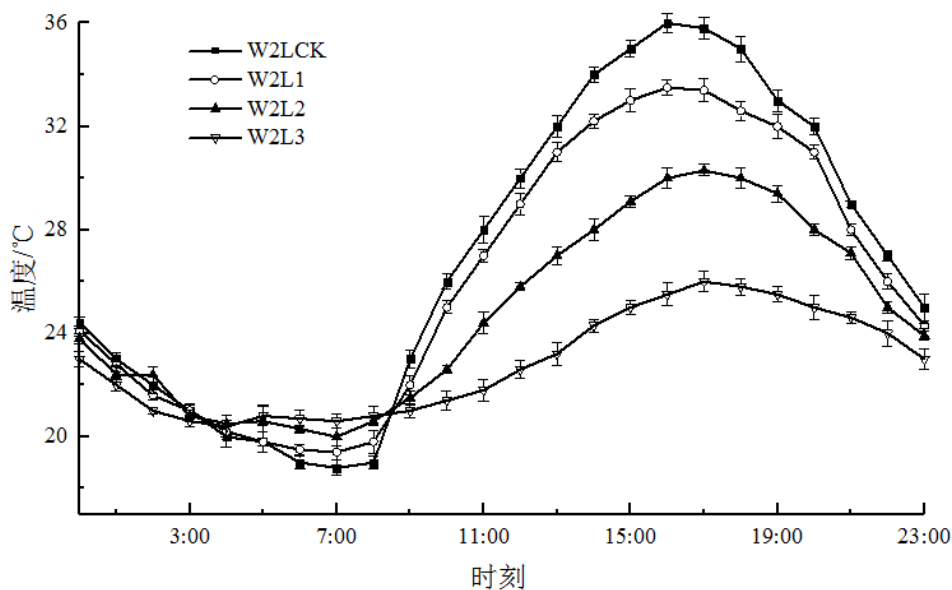


图 3-1 不同控光处理田间小气候环境气温

Fig.3-1 Different light treatments for field microclimate and ambient air temperature

3.2 不同光照处理对滴灌玉米生理生长特性的影响

3.2.1 不同光照强度对玉米叶片叶绿素相对含量 SPAD 值的影响

叶绿素是植物进行光合作用的主要色素，叶绿素含量的高低直接影响植株叶片的光合能力。图3-2为不同光照条件下玉米叶片叶绿素相对含量变化，由图知，遮阴处理后玉米叶片SPAD值迅速升高，恢复自然光照后又降低恢复到正常水平。遮阴后叶片SPAD值与CK差异极显著 ($P<0.01$)，随着遮阴程度的增加，SPAD值增加越大。全生育期遮阴处理L1F1、L2F1、L3F1较W2LCK处理SPAD值苗期分别增加了15.9%、21.4%、25.5%；拔节期分别增加了13.7%、18.8%、23.3%；抽雄吐丝期分别增加了12.7%、18.6%、22.7%；成熟期分别增加了27.9%、34.3%、37.5%。抽雄吐丝期遮阴处理L1F2、L2F2、L3F2较W2LCK处理SPAD值分别增加了37.8%、43.9%、47.9%；成熟期遮阴处理L1F3、L2F3、L3F3较W2LCK处理SPAD值分别增加了35.7%、38.3%、47.8%。抽雄吐丝期不同程度的遮阴后SPAD值增加幅度较全生育期遮阴SPAD值增加幅度分别高了25.1%、25.3%、25.2%。全生育期内成熟期叶绿素相对含量下降显著，由于成熟期遮阴延迟了玉米生育进程，所以成熟期遮阴后玉米叶片叶绿素相对含量明显高于自然光照射处理。

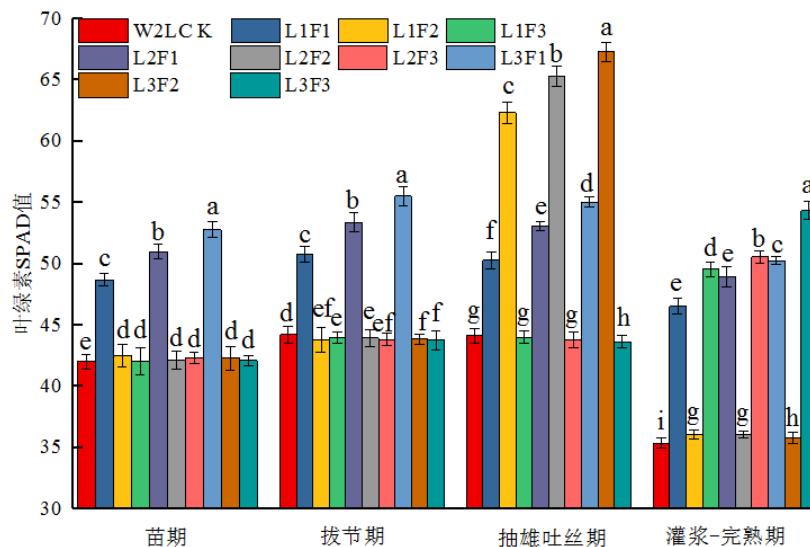


图 3-2 不同光照处理玉米叶片叶绿素相对含量变化

Fig.3-2 Changes of chlorophyll relative content in maize leaves treated with different light treatments

注：不同小写字母表示同一参数不同处理之间的显著性差异 ($P<0.05$)，下文同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between the different treatments of the same parameter ($P<0.05$), the same below.

3.2.2 不同光照强度对玉米荧光参数 $\Phi PSII$ 、 Fv/Fm 、 NPQ 和 qP 的影响

$\Phi PSII$ 表示PSII光化学能量转换的有效量子产量，反映的是PSII实际光化学效率。表3-2为不同光照条件下玉米叶片PSII实际光化学效率 $\Phi PSII$ 的变化，由表可知，遮阴后玉米叶片 $\Phi PSII$ 升高，这是由于遮阴减弱了光照强度，玉米过剩光能减弱的原因， $\Phi PSII$ 的升高反映了在弱光条件下，玉米叶片能把光能更好的用于光合作用，恢复自然光照后 $\Phi PSII$ 又下降至正常光照水平。全生育期遮阴后玉米叶片 $\Phi PSII$ 呈先升高后降低的趋势，

抽雄吐丝期达到最大值。全生育期遮阴处理L1F1、L2F1、L3F1较W2LCK苗期 $\Phi PSII$ 分别增大了35.9%、67.1%、84.1%，拔节期分别增大了28.8%、56.7%、85.5%，抽雄吐丝期分别增加了28.3%、38.7%、70.8%，灌浆期分别增加了31.2%、38.3%、76.7%。抽雄吐丝期遮阴处理L1F、L2F2、L3F2较W2LCK玉米叶片 $\Phi PSII$ 分别增加了29.7%、65.9%、72.2%；灌浆期遮阴处理L1F3、L2F3、L3F3较W2LCK叶片 $\Phi PSII$ 分别增加了25%、42%、71.3%。可见遮阴处理 $\Phi PSII$ 较对照显著增大 ($P<0.05$)，且遮阴程度越大 $\Phi PSII$ 增加越大，遮阴后随着时间的推进 $\Phi PSII$ 增大程度有所减弱。

表 3-2 不同光照处理下玉米的 PSSII 实际光化学效率 $\Phi PSII$ 变化Table 3-2 Changes of PSII Actual Photochemical Efficiency $\Phi PSII$ of Maize under Different Illumination

处理	$\Phi PSII$			
	苗期	拔节期	抽雄吐丝期	灌浆期
W2LCK	(0.353±0.032) de	(0.361±0.014) d	(0.367±0.002) d	(0.352±0.011) c
L1F1	(0.48±0.012) c	(0.465±0.021) c	(0.471±0.004) c	(0.462±0.011) b
L1F2	(0.314±0.019) e	(0.356±0.065) d	(0.476±0.008) c	(0.29±0.011) c
L1F3	(0.32±0.014) de	(0.362±0.08) d	(0.359±0.001) d	(0.44±0.014) b
L2F1	(0.59±0.014) b	(0.566±0.019) b	(0.599±0.029) b	(0.487±0.008) b
L2F2	(0.32±0.014) de	(0.357±0.052) d	(0.609±0.015) ab	(0.336±0.011) c
L2F3	(0.36±0.018) d	(0.355±0.018) d	(0.347±0.002) d	(0.5±0.79) b
L3F1	(0.65±0.015) a	(0.67±0.053) a	(0.627±0.004) a	(0.622±0.16) a
L3F2	(0.342±0.022) de	(0.365±0.015) d	(0.634±0.008) a	(0.297±0.011) c
L3F3	(0.338±0.012) de	(0.353±0.018) d	(0.363±0.005) d	(0.603±0.011) a

F_v/F_m 表示光系统PSII的原初最大荧光效率，反映PSII反应中心最大光能转换率，是衡量植株光合性能的重要指标， F_v/F_m 越大说明植株的光能利用潜力越大。表3-3为不同光照处理玉米叶片 F_v/F_m 的变化，由表可知，遮阴对玉米叶片 F_v/F_m 影响显著 ($P<0.05$)，遮阴后叶片 F_v/F_m 较CK增加显著，遮阴程度越大影响越大，全生育期遮阴处理L1F1、L2F1、L3F1较W2LCK苗期玉米叶片 F_v/F_m 分别增加了6.6%、12.6%、14%；抽雄吐丝期遮阴处理L1F2、L2F2、L3F2较W2LCK玉米叶片 F_v/F_m 分别增加了5.5%、12.2%、15.1%；灌浆期遮阴处理L1F3、L2F3、L3F3较W2LCK玉米叶片 F_v/F_m 分别增加了4.5%、11.2%、13%，说明玉米PSII光反应中心的光能转化效率和潜在活性随遮阴程度增加而提高。恢复自然光照后叶片 F_v/F_m 降低至正常水平趋于稳定。 F_v/F_m 下降，说明弱光胁迫下玉米PS II原初光化学活性受到抑制。

表 3-3 不同光照处理下玉米的 PSSII 原初光能转化效率 F_v/F_m 变化Table 3-3 Changes of Primary Light Energy Conversion Efficiency F_v/F_m of PSSII in Maize under Different Illumination

处理	F_v/F_m			
	苗期	拔节期	抽雄吐丝期	灌浆期
W2LCK	(0.742±0.029) c	(0.747±0.024) c	(0.745±0.016) c	(0.741±0.018) bc
L1F1	(0.791±0.016) bc	(0.796±0.012) b	(0.788±0.014) b	(0.778±0.016) b
L1F2	(0.735±0.025) c	(0.741±0.018) c	(0.786±0.015) b	(0.738±0.021) bc
L1F3	(0.743±0.028) c	(0.748±0.018) c	(0.744±0.016) c	(0.775±0.018) bc
L2F1	(0.836±0.011) ab	(0.837±0.019) ab	(0.834±0.012) a	(0.828±0.014) a
L2F2	(0.746±0.018) c	(0.742±0.021) c	(0.836±0.012) a	(0.744±0.015) bc
L2F3	(0.738±0.022) c	(0.745±0.021) c	(0.741±0.012) c	(0.824±0.011) a
L3F1	(0.846±0.012) a	(0.855±0.015) a	(0.849±0.015) a	(0.842±0.018) a
L3F2	(0.739±0.025) c	(0.742±0.022) c	(0.858±0.019) a	(0.735±0.021) c
L3F3	(0.744±0.026) c	(0.748±0.025) c	(0.738±0.019) c	(0.838±0.016) a

植株叶绿素荧光猝灭分为非光化学猝灭 (NPQ) 和光化学猝灭 (qP)，非光化学猝灭系数 NPQ 表示叶绿素耗散过剩能量的一种途径，表3-4为不同光照处理玉米叶片非光化学猝灭系数 NPQ 变化，遮阴后玉米叶片 NPQ 降低，较CK差异显著 ($P<0.05$)，由表知，遮阴程度越大 NPQ 越小，全生育期遮阴处理L1F1、L2F1、L3F1较W2LCK苗期 NPQ 下将了21.1%、37.2%、57%，拔节期降低了26%、42.4%、57.5%，抽雄吐丝期降低了21.1%、57.4%、59.1%，灌浆期降低了21%、36.2%、56.4；抽雄吐丝期遮阴处理L1F2、L2F2、L3F2较W2LCK NPQ 降低22.2%、41.6%、60.3%；灌浆期遮阴处理L1F3、L2F3、L3F3较W2LCK NPQ 降低了17.1%、31.8%、54.2%。可见随着光照强度的减弱，玉米光能利用效率提高，热耗散减小。

表 3-4 不同光照处理下玉米的非光化学猝灭系数 NPQ 变化Table 3-4 Non-photochemical Quenching Coefficient NPQ Changes of Maize under Different Illumination

处理	NPQ			
	苗期	拔节期	抽雄吐丝期	灌浆期
W2LCK	(1.198±0.172) a	(1.334±0.107) a	(1.227±0.182) a	(1.188±0.186) a
L1F1	(0.945±0.021) b	(0.987±0.046) b	(0.967±0.074) b	(0.938±0.059) ab
L1F2	(1.193±0.123) a	(1.356±0.132) a	(0.954±0.022) b	(1.192±0.124) a
L1F3	(1.203±0.038) a	(1.345±0.162) a	(1.212±0.124) a	(0.926±0.033) ab
L2F1	(0.752±0.025) c	(0.755±0.106) bc	(0.735±0.022) bc	(0.757±0.033) bc
L2F2	(1.201±0.041) a	(1.375±0.176) a	(0.716±0.022) cd	(1.198±0.115) a
L2F3	(1.211±0.041) a	(1.368±0.025) a	(1.44±0.169) a	(0.762±0.021) bc
L3F1	(0.514±0.036) d	(0.566±0.132) c	(0.501±0.026) d	(0.517±0.046) c
L3F2	(1.222±0.032) a	(1.346±0.132) a	(0.486±0.041) d	(1.202±0.223) a
L3F3	(1.214±0.029) a	(1.337±0.244) a	(1.331±0.111) a	(0.512±0.082) c

光化学猝灭系数 qP ，反映PSII反应中心的开放程度，由表3-5知遮阴后 qP 明显升高

较CK差异显著 ($P<0.5$), 恢复自然光照后降低至正常水平。全生育期遮阴处理L1F1、L2F1、L3F1较W2LCK苗期 qP 升高了29.2%、82%、96.6%, 拔节期升高了28.6%、82.6%、91.5%, 抽雄吐丝期升高了29.2%、81.7%、91.4%, 灌浆期升高了33.4%、82%、95.6%; 抽雄吐丝期遮阴处理L1F2、L2F2、L3F2较W2LCK处理 qP 升高了26.3%、83.8%、92.8%; 灌浆期遮阴处理L1F3、L2F3、L3F3较W2LCK处理 qP 升高了36%、82.5%、97.3%。可见遮阴后PSII反应中心开放程度增大, 玉米叶片吸收的光能用于光合作用的比例增加。

表 3-5 不同光照处理下玉米的光化学猝灭系数 qP 变化Table 3-5 Changes of photochemical quenching coefficient qP of Maize under different light treatments

处理	qP			
	苗期	拔节期	抽雄吐丝期	灌浆期
W2LCK	(0.413±0.025) d	(0.426±0.025) c	(0.421±0.033) c	(0.413±0.026) d
L1F1	(0.534±0.025) c	(0.548±0.024) b	(0.544±0.031) b	(0.551±0.032) c
L1F2	(0.412±0.015) d	(0.417±0.021) c	(0.532±0.018) b	(0.428±0.022) d
L1F3	(0.398±0.024) d	(0.422±0.019) c	(0.415±0.024) a	(0.562±0.022) c
L2F1	(0.752±0.022) b	(0.778±0.014) a	(0.765±0.021) a	(0.752±0.019) b
L2F2	(0.406±0.021) d	(0.411±0.031) c	(0.774±0.022) a	(0.431±0.019) d
L2F3	(0.389±0.028) d	(0.424±0.045) c	(0.418±0.019) c	(0.754±0.029) b
L3F1	(0.812±0.029) a	(0.816±0.022) a	(0.806±0.019) a	(0.808±0.014) ab
L3F2	(0.414±0.022) d	(0.431±0.035) c	(0.812±0.014) a	(0.438±0.029) d
L3F3	(0.408±0.024) d	(0.419±0.018) c	(0.427±0.041) c	(0.815±0.018) a

3.2.3 不同光照强度对玉米生长特性的影响

表3-6为不同遮阴条件下玉米生长性状变化, 全生育期遮阴玉米茎粗、株高降低, 处理L1F1茎粗降低不显著, 处理L2F1、L3F1降低显著 ($P<0.05$); 抽雄吐丝期遮阴和成熟期遮阴对玉米茎粗和株高影响不显著, 处理L1F1、L2F1、L3F1较W2LCK株高分别降低了9.3%、14.2%、23.6%; 全生育期遮阴处理L1F1、L2F1穗位高增加显著 ($P<0.05$), L3F1处理变化不明显, L1F1、L2F1处理较W2LCK穗位高分别增高了30.6%、12.6%, 由于抽雄吐丝期之后玉米茎粗、株高和穗位高已基本确定, 所以抽雄吐丝期遮阴穗位高增加不显著, 成熟期遮阴对玉米穗位高影响不明显; 全生育期遮阴玉米片叶长增长、叶宽减小显著 ($P<0.05$), 处理L1F1、L2F1、L3F1较W2LCK叶长分别增长了3.3%、7.8%、17.9%, 叶宽分别减小了8.7%、27.1%、30%。全生育期遮阴玉米叶片面积减小显著 ($P<0.05$), 抽雄吐丝期和成熟期遮阴对叶片叶面积影响不显著, 全生育期遮阴处理L1F1、L2F1、L3F1较CK叶面积分别减小了5.6%、21.4%、17.5%。

表 3-6 不同光照处理玉米生长指标变化

Table 3-6 Changes in corn growth indicators under different light treatments

处理	茎粗/cm	株高/cm	穗位高/cm	叶长/cm	叶宽/cm	叶面积/cm ²
W2LCK	2.65±0.21ab	245±7.07a	111±7.07cd	89±1.55de	10.3±0.15ab	687.52±15.2ab
L1F1	2.33±0.16bc	222±8.48b	145±5.65a	92±1.41cd	9.4±0.16d	648.6±13.7b
L1F2	2.66±0.29ab	248±9.89a	130±5.65ab	88±1.62ef	10.5±0.21a	693±18.3a
L1F3	2.88±0.19ab	251±7.07a	110±8.48cd	90±1.69cde	9.8±0.19cd	661.5±15.5ab
L2F1	2.05±0.15c	210±7.07b	125±9.89bc	96±1.55b	7.5±0.22e	540±18.6c
L2F2	2.79±0.26ab	244±8.48a	120±5.65bc	93±1.83bc	9.5±0.12d	662.62±13.9ab
L2F3	2.91±0.29a	255±7.07a	115±5.65bc	88±1.69ef	10.3±0.16ab	679.8±14.9ab
L3F1	1.95±0.15c	187±7.07a	97±7.07d	105±1.27a	7.2±0.18e	567±16.9c
L3F2	2.63±0.21ab	250±7.07c	117±8.48bc	85±1.86f	10.2±0.18abc	650.25±15.7b
L3F3	2.84±0.21ab	247±11.31a	111±8.48cd	89±1.69de	10±0.15bc	667.5±16.5ab

图3-3为玉米干物质积累分配,由图知,遮阴对玉米干物质积累量影响显著($P<0.05$)。较W2LCK全生育期遮阴处理L2F1、L3F1植株干物质积累量极显著降低($P<0.01$),抽雄吐丝期遮阴玉米干物质积累降低极显著($P<0.01$),成熟期遮阴玉米干物质积累降低显著($P<0.05$)。全生育期遮阴处理L2F1和L3F1对玉米干物质积累影响最大,茎、叶和雌穗较CK分别降低了39.3%、22.7%、70.6%和60.1%、26.6%、81.7%,可见全生育期遮阴随着遮阴程度的增强,主要对玉米茎和果穗的积累影响最显著。抽雄吐丝期遮阴主要影响玉米雌穗的积累,处理L1F2、L2F2、L3F2雌穗干重较W2LCK分别降低了68.7%、76.3%、74.8%,抽雄吐丝期遮阴对玉米茎和叶的积累没有显著影响。由图知,不同程度的遮阴均不同程度的降低了玉米干物质积累,但遮阴主要影响玉米果穗在植株干物质分配中的比重,且随遮阴程度增大,果穗所占比重越小。

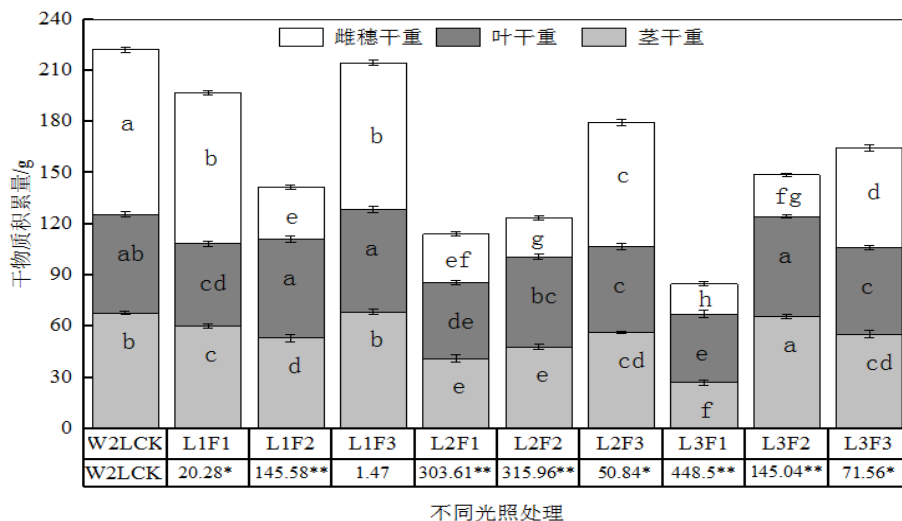


图 3-3 不同光照处理玉米干物质积累

Fig.3-3 Dry matter accumulation of corn treated with different light treatment

注: *表示显著差异 ($P<0.05$), **表示极显著差异 ($P<0.01$); 同列数值后不同字母表示处理间显著差异 ($P<0.05$), 下同。

Note: * indicates significant difference ($P < 0.05$), ** indicates extremely significant difference ($P < 0.01$); different letters after the same column value indicate significant difference between treatments ($P < 0.05$), the same below.

由表3-7可以看出, 遮阴后玉米穗长、穗粗、穗行数、行粒数、千粒重和产量均低于对照, 且随着遮阴程度的增强降低程度越大。全生育期遮阴和抽雄吐丝期遮阴玉米果穗减小显著 ($P<0.05$), 而成熟期遮阴对玉米果穗大小影响不显著, 但成熟期遮阴玉米千粒重显著减小 ($P<0.05$)。全生育期遮阴处理L1F1、L2F1、L3F1较W2LCK产量分别降低了19.5%、55.2%、79.5%; 抽雄吐丝期遮阴处理L1F1、L2F1、L3F1较W2LCK产量分别降低了32.6%、72.6%、87.8%; 成熟期遮阴处理L1F1、L2F1、L3F1较W2LCK产量分别降低了27%、29.5%、46.7%。可见全生育期遮阴和抽雄吐丝期遮阴对产量影响最显著。

表 3-7 不同光照处理下处玉米产量及其构成

Table 3-7 Maize yield and its components under different light treatments

处理	穗长/cm	穗粗/cm	穗行数	行粒数	千粒重/g	产量/(kg·hm ⁻²)
W2LCK	19.2±0.84a	5.71±0.15a	17.8±0.70a	38.5±0.41a	334.5±8.0a	8740±169.7a
L1F1	17.8±0.56ab	4.26±0.12c	16.2±0.56ab	36.1±0.98bc	327.5±5.3a	7030±168.2b
L1F2	16.6±0.57bc	3.55±0.10d	15.8±0.56b	34.2±0.56c	288.2±4.3c	5890±155.5d
L1F3	18.9±0.74a	5.66±0.10a	17.8±0.84a	37.8±0.70ab	289±4.3c	6372±107.4c
L2F1	12.5±0.55d	3.59±0.09d	13.4±0.56c	25.5±0.63d	303.5±5.9b	3914±96.1f
L2F2	15.7±0.56c	3.08±0.07e	12.2±0.84cd	19.3±0.73e	270.5±5.3d	2394±114.5g
L2F3	18.7±0.60a	5.54±0.12ab	17.5±0.98ab	37.3±0.62ab	249.5±3.8e	6156±165.4cd
L3F1	10.1±0.98e	3.03±0.09e	11.6±0.70d	18.5±0.98e	221.5±5.7f	1786±50.9h
L3F2	16.2±0.42c	2.88±0.08e	8.7±0.56e	19.3±0.66e	168±5.9h	1064±86.2i
L3F3	19±0.70a	5.33±0.11b	17.5±0.98ab	38.1±0.84ab	184.5±6.0g	4658±83.4e

3.3 不同光照处理对滴灌玉米土壤水热变化及耗水规律的影响

3.3.1 不同光照处理对土壤温度的影响

根据表3-8可知, 不同控光处理均对土壤温度有影响, 由于控光处理均造成玉米田间小气候的变化, 使得遮阳网下田间气温均显著降低, 所以不同程度、不同时期控光处理均导致玉米田间土壤温度降低。控光后0~60 cm土层土壤平均温度较CK均显著降低 ($P<0.05$), 全生育期控光处理L1F1较W2LCK处理0~60 cm土层土壤平均温度降低0.86~2.66 °C, L2F1 较W2LCK处理0~60 cm土层土壤平均温度降低1.36~3.23 °C, L3F1 较W2LCK处理0~60 cm土层土壤平均温度降低1.69~3.81 °C; 抽雄吐丝期控光处理L1F2较W2LCK处理0~60 cm土层土壤平均温度降低2.3 °C, L2F2较W2LCK处理0~60 cm土层土壤平均温度降低2.67 °C, L3F2较W2LCK处理0~60 cm土层土壤平均温度降低3.01 °C; 灌浆至完熟期控光处理L1F3较CK处理0~60 cm土层土壤平均温度降低0.46~1.38 °C, L2F3较W2LCK处理0~60 cm土层土壤平均温度降低1.51~2.02 °C, L3F3 较W2LCK处理0~60 cm土层土壤平均温度降低1.99~2.66 °C。

表 3-8 不同光照处理下 0~60cm 土壤平均温度 单位: °C
 Table 3-8 Average soil temperature from 0-60 cm under different light treatment Unit: °C

处理	播种后天数/d							
	15	30	45	60	75	90	105	120
W2LCK	21.7±0.041a	23.56±0.05a	25.07±0.051a	25.61±0.055a	24.38±5.808a	23.04±0.05a	22.24±0.158a	22.21±0.037a
L1F1	20.84±0.050b	21.74±0.05b	22.41±0.055b	23.39±0.07b	22.11±0.051b	21.68±0.055b	21.28±0.052b	21.78±0.052b
L1F2	21.66±0.051a	23.52±0.075a	25.16±0.05a	25.52±0.064a	22.08±0.061b	23.07±0.055a	22.22±0.077a	22.18±0.061a
L1F3	21.71±0.085a	23.58±1.126a	25.09±0.058a	25.57±0.08a	24.41±1.799b	21.66±0.056b	21.31±0.081b	21.75±0.07b
L2F1	20.34±0.105c	21.22±0.1bc	21.84±0.063c	22.93±0.67c	21.73±0.111b	21.05±0.06c	20.65±0.11b	20.77±0.11c
L2F2	21.71±0.124a	23.6±0.2a	25.09±0.115a	25.57±0.07a	21.71±0.124b	23.02±0.128a	22.34±0.011a	22.16±0.06a
L2F3	21.77±0.150a	23.54±0.102a	25.12±0.151a	25.55±0.202a	24.44±0.15ab	21.02±0.11c	20.56±0.15b	20.78±0.12c
L3F1	20.01±0.151d	20.86±0.105c	21.26±0.105d	22.58±0.151c	21.33±0.11b	20.41±0.085d	20.27±0.051dc	20.32±0.11d
L3F2	21.77±0.11a	23.53±0.101a	25.11±0.1a	25.59±0.151a	21.37±0.051b	23.11±0.151a	22.22±0.151a	22.24±0.15a
L3F3	21.81±0.1a	23.5±0.2a	25.14±0.15a	25.55±0.25a	24.4±0.2ab	20.38±0.075d	20.24±0.17c	20.22±0.1d
双因素方差分析 (<i>F</i> 值检验)								
L	0.05	0.043	0.03	0.021	0.077	0.356	0.426	1.125
F	29.999**	77.706**	97.148**	121.047**	78.191**	15.223**	0.426	1.125
L*F	123.472**	25.634**	955.580**	98.189**	3.274*	482.614**	42.395**	231.096**

从全生育期来看,正常光照与控光条件下玉米大田0~60 cm平均土壤温度差异极显著 ($P<0.01$),处理W2LCK与W2L21、W2L2、W2L3温差可达1.8 °C、2.3 °C、2.9 °C左右。从图3-4可以看出,玉米生育前期,处理W2LCK与W2L1、W2L2和W2L3的温差要比后期大,8月之前W2LCK处理与W2L1、W2L2和W2L3处理差异性极显著($P<0.01$);随着时间的推进,W2LCK与W2L1、W2L2和W2L3处理的温差呈递减趋势,差异性显著 ($P<0.05$)。处理W2LCK全生育期呈斜率-0.045线性变化,而控光处理以斜率为-0.014呈线性变化;全生育期W2L1处理温度变化主要是由玉米生长造成的,除了气温的变化,玉米叶面积的不断增大是影响土壤积温变化的主要原因;W2L1、W2L2、W2L3处理不同程度的做了遮阴处理,遮阳网很大程度的减弱了太阳辐射,使得田间小气候环境和大气温度日变幅减小,导致玉米叶面积对土壤温度的影响减弱。控光处理后,玉米大田土壤温度整体减小,全生育期土壤温度变化平缓,变化趋势比较稳定。

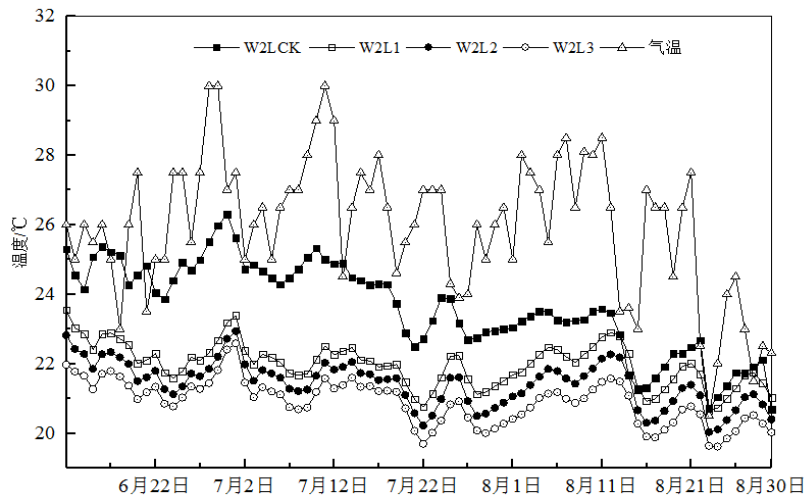


图3-4 不同控光条件下0~60cm深土壤平均温度变化

Fig.3-4 Variation of 0-60cm deep soil mean temperature under different light control conditions

图3-5为7月8日不同控光条件下不同深度的土壤温度日变化规律,从图中可以看出,不同控光条件下随着控光程度和土壤深度的增加,相比不同灌水量处理土壤温度变化特征有所不同。由图知,同一灌水量不同控光条件下土壤温度按处理W2L1、W2L4、W2L3、W2L2依次递减,W2L1处理温度明显比W2L2、W2L3和W2L4处理高,10 cm深处W2L1处理比W2L2、W2L3和W2L4处理的土壤日最高温分别升高了6.75 °C、5.7 °C、4.57 °C,说明遮阴处理对土壤温度影响明显,而W2L2、W2L3和W2L4处理之间土壤日最高温温差较小,分别为1.05 °C、1.03 °C。不同控光程度下10 cm深处土壤温度日变化幅度较大,且温度上升下降相比于W2L1处理都比较缓和,20、30 cm深处土壤温度日变化趋势平缓且变幅不大,45、60 cm深度土壤温度趋于稳定几乎不受太阳辐射的影响。

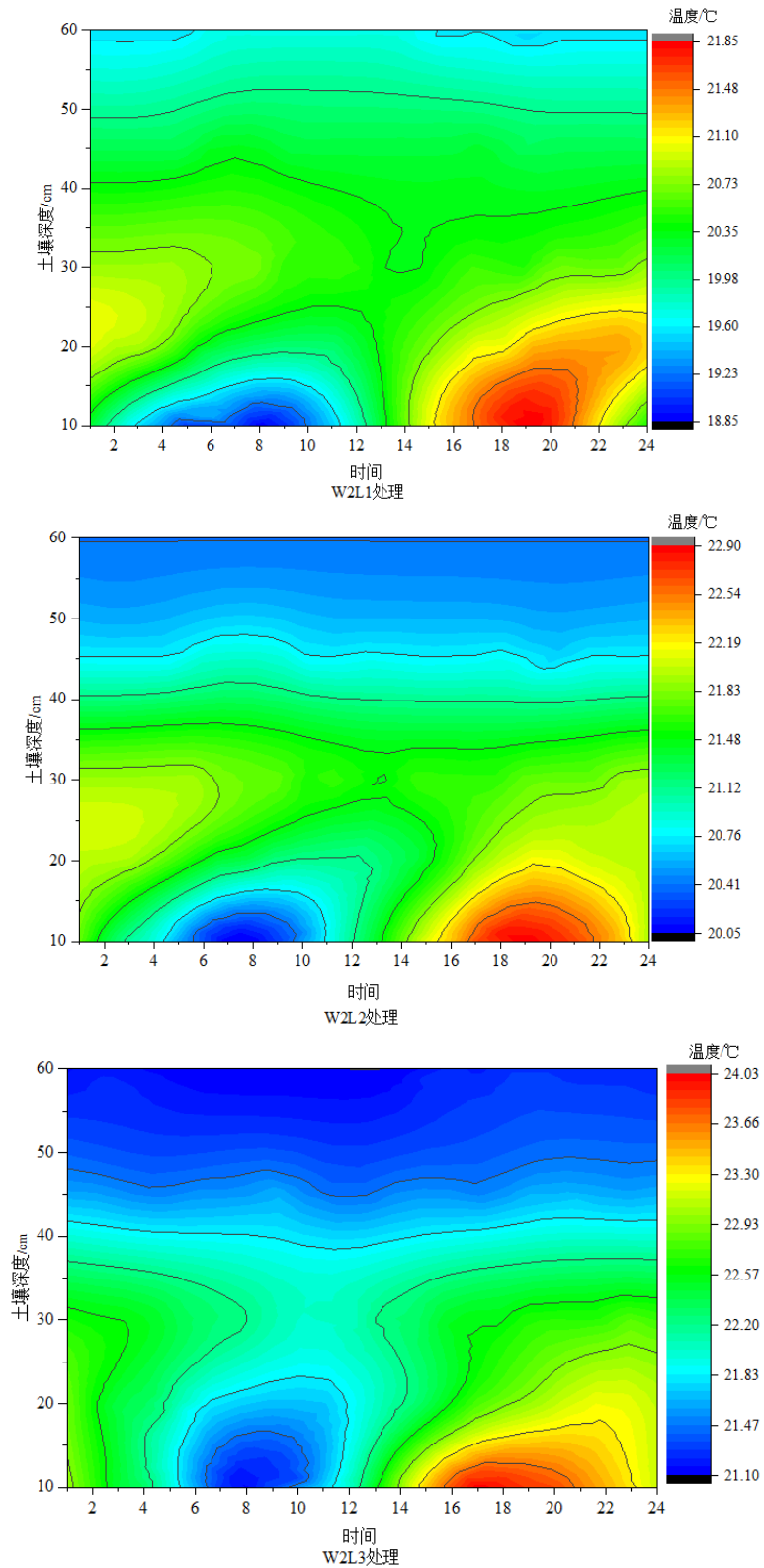


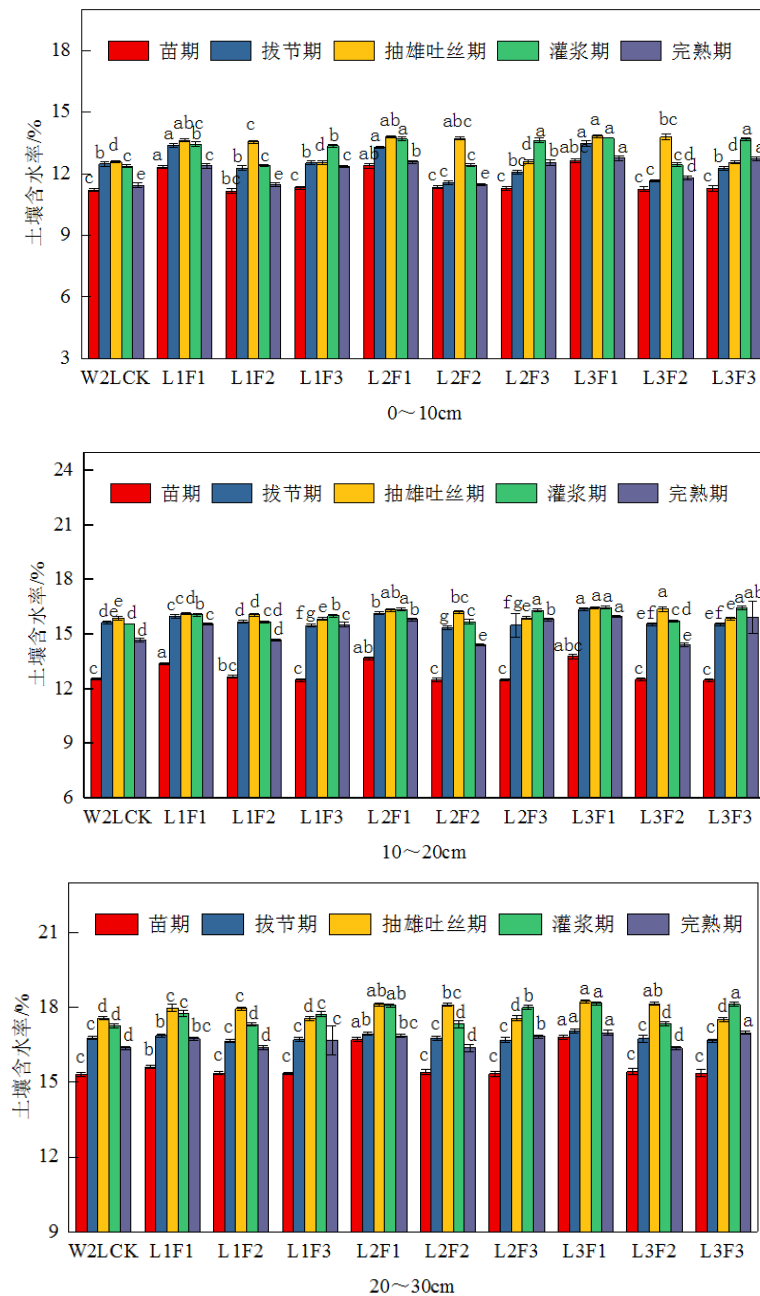
图 3-5 7月8日不同控光条件下不同深度土壤温度日变化

Fig. 3-5 Diurnal variation of soil temperature with different light control and different depths on July 8

3.3.2 不同光照处理对土壤含水率的影响

图3-6为不同控光条件下0~60 cm不同土层各生育期土壤含水率变化规律，由图可

知,不同处理全生育期土壤含水率变化规律相似,随着生育期的推进均表现为先增大后减小的规律,均在抽雄吐丝期和灌浆期土壤含水率达到最高水平;不同处理土壤含水率随着土层深度变化趋势相似,均表现为随着土层深度的增加土壤含水先增大后减小的变化规律,均在40~50 cm深处土壤含水率达到较大水平。控光处理后由于遮阳网的遮挡,控光后减小了棵间蒸发,降低了玉米耗水量,导致同一时期土壤含水率较正常光照处理有所增加,通过方差分析,控光处理较正常光照处理土壤耗水率变化显著 ($P<0.05$)。全生育期控光处理L1F1、L2F1、L3F1较正常光照处理W2LCK表现为随着遮光程度的增强土壤含水率均有所增大。



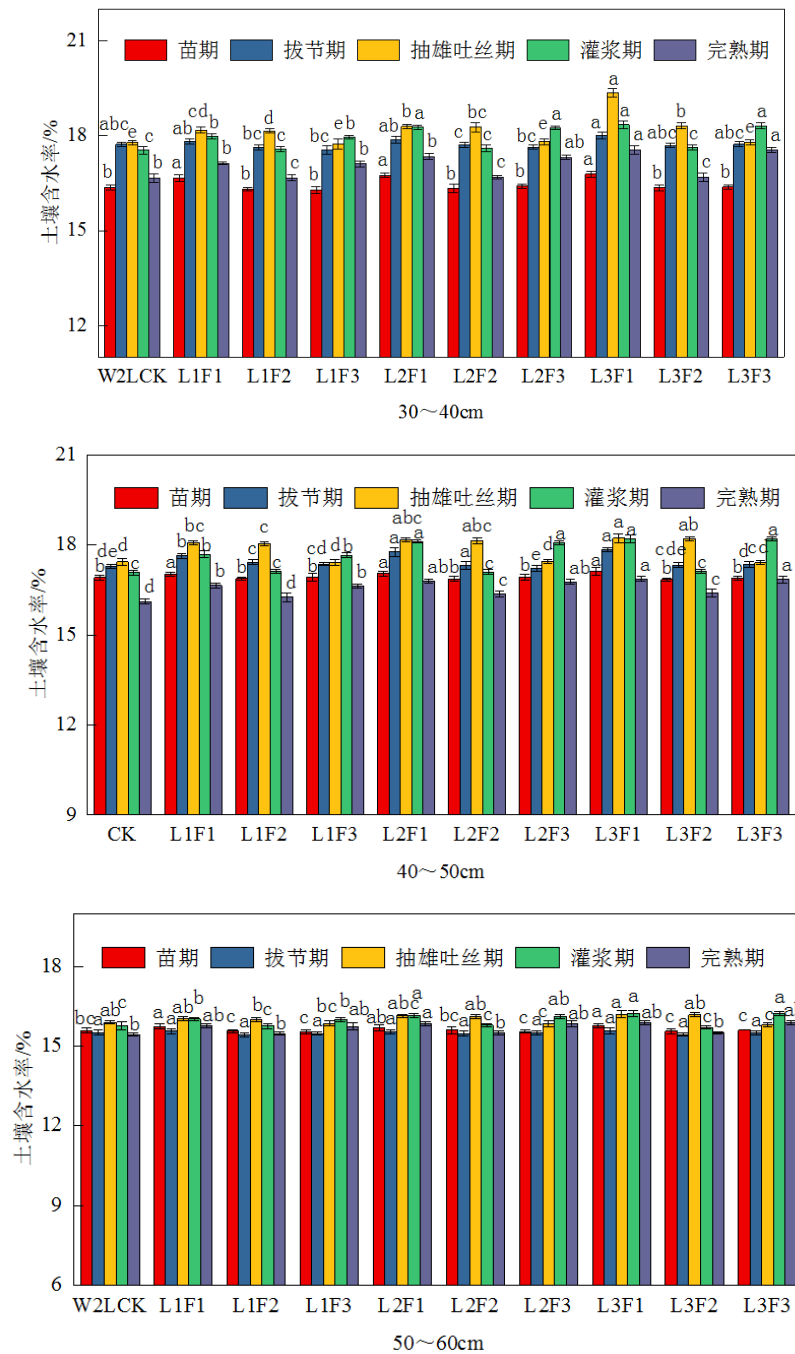


图 3-6 不同控光处理不同土层土壤含水率的变化

Fig. 3-6 Changes of soil water content in different soil layers under different light control treatments

控光处理不但降低了土壤温度，减小了土壤温度变化幅度，而且减小了玉米棵间蒸发，对玉米大田土壤含水率的变化也有所影响。图3-7为不同控光处理下玉米大田0~60 cm深土壤含水率的变化。从图中可以看出，各处理在0~40 cm土壤含水率随深度增大而增大，40~60 cm土壤含水率略有减小。控光条件下，W2LCK、W2L1、W2L2和W2L3处理在0~40 cm土壤含水率变化剧烈，各处理差异显著 ($P < 0.05$)，各处理变化幅度分别为5.5 %、5.2 %、4.3 %和3.8 %；W2L1、W2L2、W2L3处理较W2LCK处理土壤含水率分别增大了5.1 %、11.2 %、14.4 %。控光处理主要影响0~40 cm的土壤含水率变化，

对40~60 cm的土壤含水率变化影响较小,控光程度越大,对土壤含水率的影响越大,土壤含水率的波动性越小。

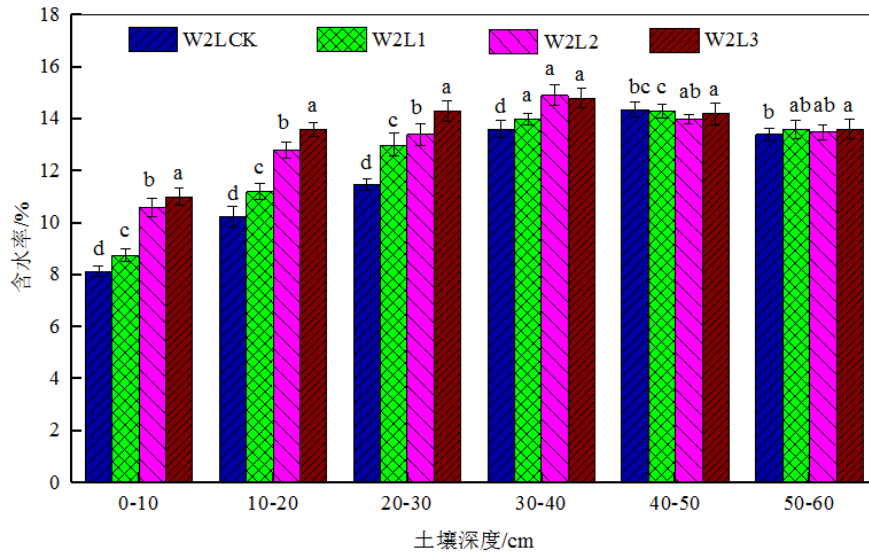


图 3-7 不同光照条件下土壤含水率的变化

Fig. 3-7 Changes of Soil Moisture Content under Different Illumination Conditions

3.3.3 不同光照处理对滴灌玉米耗水规律的影响

作物耗水量是反映作物生长过程中对水分的消耗程度,表 3-9 为不同控光条件下,玉米各生育期的耗水变化。从表中可以看出,不同处理滴灌玉米在不同生育期的耗水量抽雄吐丝期>拔节期>灌浆期>苗期>完熟期,在玉米整个生育期中,拔节期和抽雄吐丝期耗水量达到较高水平,各处理分别平均达到 98.33 mm、116.73 mm,在苗期和完熟期作物耗水量均较低,各处理苗期平均耗水量为 44.437 mm,完熟期平均耗水量为 37.189 mm,因为在苗期玉米植株较小,叶面积指数较小,作物耗水量主要是有于棵间蒸发造成,而玉米实际耗水量较小,而在完熟期玉米已逐渐干枯,耗水量较小。全生育期控光处理 L1F1 苗期、拔节期、抽雄吐丝期、灌浆期和完熟期分别较自然光照处理 W2LCK 耗水量减少了 2.89、4.66、5.98、5.96、2.1 mm; L2F1 较 W2LCK 分别减少了 5.73、11.88、7.94、9.85、4.24 mm; L3F1 较 W2LCK 分别减少了 7.89、17.02、11.99、15.08、7.01 mm。抽雄吐丝控光处理 L1F2、L2F2、L3F2 分别较 W2LCK 处理耗水量降低了 5.24、6.14、9.58 mm。灌浆至完熟期控光处理 L1F3 分别较处理 W2LCK 耗水量减少了 5.7、1.84 mm; L2F3 较 W2LCK 分别降低了 8.7、3.11 mm; L3F3 较 W2LCK 分别减少了 11.46、6.52 mm。通过方差分析,控光处理较自然光照处理作物耗水量变化显著 ($P<0.05$),控光处理不仅降低了作物棵间蒸发,且影响玉米的生长发育,导致控光处理后玉米耗水量均显著降低。

表 3-9 不同控光处理对滴灌玉米耗水量的影响

Table 3-9 Effects of different light control treatments on water consumption of drip irrigation corn

处理	耗水量/mm					
	苗期	拔节期	抽雄吐丝期	灌浆期	完熟期	全生育期
W2LCK	51.25±0.35ab	102.44±0.62a	121.56±0.79a	98.74±0.46a	48.85±0.20ab	422.84±1.18a
L1F1	48.36±0.50c	97.78±1.10d	115.58±0.82b	92.78±0.10b	46.75±0.13bc	401.25±0.35e
L1F2	50.68±0.96ab	100.56±0.79bc	116.32±0.45b	99.74±1.01a	47.97±1.37ab	415.27±0.38b
L1F3	52.51±0.72a	102.01±0.01ab	120.44±0.62a	93.04±0.05b	47.01±0.014abc	415.01±0.01b
L2F1	45.52±0.73d	90.56±0.79e	113.62±0.87cd	88.89±0.25cd	44.61±0.86d	383.2±0.28f
L2F2	52.47±0.66a	99.86±1.21c	115.42±0.59bc	97.74±1.04a	49.12±0.16a	414.61±0.86b
L2F3	50.86±1.21ab	103.02±0.02a	122.03±0.04a	90.04±0.05c	45.74±1.04cd	411.69±0.97c
L3F1	43.36±0.50e	85.42±0.59f	109.57±0.80e	83.66±0.93e	41.84±1.18e	363.85±0.20g
L3F2	49.62±0.86bc	101.56±0.79abc	111.98±1.38d	98.42±0.59a	48.02±0.02ab	409.6±0.84d
L3F3	51.74±1.04a	100.11±0.15c	120.78±0.23a	87.28±0.39d	42.33±0.46e	402.24±0.33e

表3-10为不同控光条件下滴灌玉米各生育期耗水模数的变化，作物耗水模数是指作物某生育期耗水量占全生育期耗水量的比例，反映作物对水分的响应程度。从表中可知，滴灌玉米各生育期耗水模数变化规律与滴灌玉米各生育期耗水量变化规律相同，表现为抽雄吐丝期>拔节期>灌浆期>苗期>完熟期，在抽雄吐丝期耗水模数达到最高水平，各处理平均耗水模数为28.92%，说明滴灌玉米在抽雄吐丝期间需水量最大。在完熟期耗水模数达到最低水平，各处理平均为11.44%，是因为完熟期灌水量小，玉米已成熟耗水量较小。不同生育期作物耗水模数差异显著（ $P<0.05$ ），而同一生育期不同处理之间耗水模数差异不大，同一生育期不同处理之间耗水模数相差0.07~2.77%。

表 3-10 不同控光处理对滴灌玉米各生育期耗水模数的影响

Table 3-10 Effects of different light control treatments on water consumption modulus of drip irrigation corn at various growth stages

处理	耗水模数/%					
	苗期	拔节期	抽雄吐丝期	灌浆期	完熟期	全生育期
W2LCK	12.12	24.23	28.75	23.35	11.55	100.00
L1F1	12.05	24.37	28.80	23.12	11.65	100.00
L1F2	12.20	24.22	28.01	24.02	11.55	100.00
L1F3	12.65	24.58	29.02	22.42	11.33	100.00
L2F1	11.88	23.63	29.65	23.20	11.64	100.00
L2F2	12.66	24.09	27.84	23.57	11.85	100.00
L2F3	12.35	25.02	29.64	21.87	11.11	100.00
L3F1	11.92	23.48	30.11	22.99	11.50	100.00
L3F2	12.11	24.79	27.34	24.03	11.72	100.00
L3F3	12.86	24.89	30.03	21.70	10.52	100.00

表3-11为不同控光条件下滴灌玉米不同生育期耗水强度变化规律。从表中可知，控光处理后滴灌玉米耗水强度变化显著（ $P<0.05$ ）。不同控光条件下抽雄吐丝期作物耗水强度达到最大水平，各处理平均耗水强度为7.795 mm/d；苗期耗水强度达到最低水平，各处理平均耗水强度为1.649 mm/d，而耗水量和耗水模数均为完熟期达到最低水平，是

由于完熟期生育期天数小于苗期，所以耗水强度苗期最低。

表 3-11 不同控光对滴灌玉米各生育期耗水强度的影响

Table 3-11 Effect of different light control on water consumption intensity of drip irrigation corn

处理	耗水强度 mm.d ⁻¹					
	苗期	拔节期	抽雄吐丝期	灌浆期	完熟期	全生育期
W2LCK	1.70±0.01ab	2.92±0.04a	8.10±0.14a	4.93±0.05a	2.44±0.05a	3.52±0.02a
L1F1	1.61±0.03bc	2.79±0.12ab	7.70±0.01b	4.63±0.04b	2.33±0.03ab	3.34±0.05b
L1F2	1.68±0.04ab	2.87±0.09a	7.75±0.07b	4.98±0.12a	2.39±0.12a	3.46±0.08ab
L1F3	1.75±0.07a	2.91±0.01a	8.02±0.04a	4.65±0.07b	2.35±0.07a	3.45±0.07ab
L2F1	1.51±0.02cd	2.58±0.12bc	7.57±0.09bc	4.44±0.05bc	2.23±0.04abc	3.19±0.07c
L2F2	1.74±0.07a	2.85±0.07a	7.69±0.12b	4.88±0.11a	2.45±0.09a	3.45±0.08ab
L2F3	1.69±0.05ab	2.94±0.05a	8.13±0.05a	4.50±0.14bc	2.28±0.11abc	3.43±0.04ab
L3F1	1.44±0.07d	2.44±0.05c	7.30±0.11d	4.18±0.11d	2.09±0.12c	3.03±0.04d
L3F2	1.65±0.02bc	2.90±0.14a	7.46±0.09cd	4.92±0.02a	2.40±0.07a	3.41±0.01ab
L3F3	1.72±0.02ab	2.86±0.08a	8.05±0.07a	4.36±0.06cd	2.1165±0.02bc	3.3±0.07b

3.4 本章小结

光照是植物光合作用的基础，植物的生长离不开光照，光照的强弱直接影响植物的生长、分化和发育^[84]。本试验通过对光照强度和不同生育期光照强度的控制研究了光照强度对玉米生长发育的影响。研究表明，弱光胁迫下玉米叶片叶绿素相对含量SPAD值增加，已有研究表明，在遮光条件下，集光色素蛋白在光合单位中的相对含量会增加，从而导致结合态叶绿素增加，同时降低了叶绿素的降解和光氧化^[85]，所以遮阴后叶绿素的相对含量会增加。当恢复自然光照后叶片叶绿素相对含量SPAD值开始降低，降至正常水平范围内趋于稳定，与史振声等研究结果一致^[86]。

前人研究表明，作物光合作用吸收的能量主要用于光化学猝灭 qP 、非光化学猝灭 NPQ 和荧光发射 $F^{[87]}$ ， Fv/Fm 表示PSII光能转换效率，该指标用来研究逆境胁迫对植物光合效率的影响， Fv/Fm 的减小程度说明植物在逆境胁迫下光合作用的损害程度， Fv/Fm 越大，表明原初光能转换效率越高^[88, 89]。本试验研究结果表明，遮阴处理后玉米叶片的荧光参数 $\Phi PSII$ 、 Fv/Fm 和 qP 均随光照强度的减弱而增大，说明弱光条件下玉米光合能力提高，能将吸收的光能更好的利用，玉米对弱光照射有一定的适应性。遮阴后玉米叶片非光化学猝灭系数 NPQ 减小，且随遮光程度的增大降低程度越大，而 NPQ 表示作物吸收的光能以热能散失的部分， NPQ 减小说明遮阴后玉米PSII以热形式散失的能量少，光能用于光化学反应的部分多，说明遮阴提高了玉米的光能利用效率。

已有研究表明，光照不足时作物光合作用下降，干物质积累减小，产量降低^[90, 91]，本试验研究结果表明，弱光胁迫下玉米产量显著减小，遮光率越大玉米生长特性及产量影响越大，不同时期遮阴对玉米的影响有所不同。全生育期遮阴干物质积累减少及显著，茎粗、株高和穗粒数都显著减小；抽雄吐丝期遮阴主要影响玉米花穗的发育，所以抽雄吐丝期遮阴对玉米株高、茎粗及叶面积没有显著影响，但玉米果穗的穗粗、穗长和穗粒数都显著减小；成熟期遮阴后玉米提前衰老、坏死，玉米生育进程被提前了，主要影响

玉米粒的饱满程度，玉米果穗大小和穗粒数变化不显著，千粒重减小显著，株高、茎粗及叶面积变化不显著。不管是遮阴程度的改变还是不同生育期遮阴，都不同程度的降低了玉米产量，各处理产量大小为W2LCK>L1F1>L1F3>L2F3>L1F2>L3F3>L2F1>L2F2>L3F1>L3F2，史建国研究表明遮阴处理的产量较对照(自然光下)分别降低了59.4%、79.0%、60.6%^[92]，可见玉米产量受光照强度影响显著。不同程度遮阴和不同生育期相比，抽雄吐丝期遮阴对玉米减产的影响更为严重。

控光处理后玉米冠层温度、冠层相对湿度均与正常光照有显著变化，由于遮阳网的遮挡，减小了田间小气候的太阳辐射。导致控光处理后田间小气候气温显著降低，玉米棵间蒸发减小。相同灌水量条件下控光处理土壤含水率有所增加，土壤温度有所减小。在一定时段内控光处理较正常光照处理土壤含水率的变化量有所增大，土壤耗水量显著减小，且控光后滴灌玉米的耗水量随控光程度的增加逐渐减小。

正常光照条件下，土壤温度升高和降低的日变化幅度较大，控光条件下土壤温度日变化幅度相对平缓，控光后只有10 cm深处土壤温度日变化明显，且相对于正常光照下10 cm处土壤温度的变幅也大大减弱，20 cm以下深处更是日变化微弱，控光使得田间土壤温度变化较缓和，温度日突变不明显。正常光照条件下土壤含水率小的处理要比土壤含水率大的处理土壤温度日变幅稍大。这是由于土壤含水率小的土壤较干燥，土壤中含有大量气体，导致土壤热导率和土壤热容较小，这种土壤升温 and 降温都比较快，对气温的响应较明显，日出后气温迅速升高土壤温度也跟着升高，夜间气温降低土壤温度紧跟降低；土壤含水率大的土壤较湿润，土壤所含气体较少，透气性差，土壤热容和热导率较大，对气温的响应较迟缓，土壤温度的升高和降低较缓慢，且土壤温度达到日最高温的时刻有所滞后；而控光条件下，控光处理后遮阳网隔断太阳辐射对田间的直接影响，改变了田间小气候环境，使田间小气候的温度比外界明显降低，减小了棵间蒸发，增大了土壤含水率，从而降低了土壤温度，控光后遮阳网下的田间小气候温度日变幅也减弱，所以控光处理10 cm深处的土壤日变化较明显，20 cm、30 cm深处变化较小。控光处理后，土壤温度平均降低了2~4 °C，与正常光照处理差异极显著 ($P<0.01$)，控光各处理土壤平均温差0.8 °C左右，控光处理后只有10 cm深处的土壤温度日变幅较大，20~30 cm深处日变化平缓。控光程度越大，土壤温度日变化越小，土壤含水率越大，土壤日平均温度越小。灌水前后土壤温度变化剧烈，灌水前一天和后一天温差在4 °C左右。

第四章 不同灌水处理对滴灌玉米生长及土壤水热变化的影响

4.1 不同灌水处理对玉米生长特性的影响

表4-1为不同灌水量条件下滴灌玉米各生长特性的变化情况。从表中可知，随着灌水量的增加玉米株高逐渐增大，W1灌水水平与W2、W3、W4灌水水平玉米株高变化差异显著 ($P<0.05$)，W2、W3、W4灌水水平之间株高变化差异不显著。玉米茎粗是反应玉米抗倒伏能力的重要指标之一，在W1、W2、W3、W4灌水水平下玉米茎粗变化差异显著 ($P<0.05$)，表现为W1LCK<W2LCK<W3LCK<W4LCK。玉米叶长、叶宽、叶片面积均随灌水量的增大而增大，W1灌水水平下叶片面积与W2、W3、W4灌水水平下大小差异显著 ($P<0.05$)，W2、W3、W4灌水水平之间变化差异不显著。

表 4-1 不同灌水条件下滴灌玉米生长特性的变化

Table 4-1 Changes in growth characteristics of drip irrigation corn under different irrigation conditions

处理	株高/cm	茎粗/cm	叶长/cm	叶宽/cm	叶面积/cm ²
W1LCK	232±1.41b	2.57±0.028d	88±1.13c	8.5±0.14c	561±16.54c
W2LCK	245±2.12a	2.65±0.014c	89±1.06c	10.3±0.16b	687.52±19.56b
W3LCK	246±1.41a	2.71±0.014b	92±1.13b	10.6±0.11b	731.4±16.71b
W4LCK	248±0.70a	2.78±0.021a	101±0.42a	10.9±0.02a	825.67±1.32a

表4-2为不同灌水量条件下滴灌玉米叶片叶绿素相对含量SPAD值的变化情况。叶绿素相对含量SPAD值是反应叶片绿度大小的指标，从表中可得知，不同灌水量处理下滴灌玉米叶片叶绿素相对含量随玉米生育进程的推进呈现先增大后减小的变化趋势，在拔节期和抽雄吐丝期达到最大值，滴灌玉米在苗期和拔节期生长迅速，叶绿素相对含量也迅速增长，于拔节期和抽雄吐丝期达到最大水平，最大可达43.66，在完熟期叶片叶绿素相对含量达到最小水平，在完熟期玉米逐渐趋于成熟，叶片基本停止生长并趋于干枯，该时期叶片叶绿素相对含量SPAD值基本趋于最小值，最小可达33.56与最大值相差10.1。同一生育期条件下，滴灌玉米叶片叶绿素相对含量随灌水量的不同而存在差异，变化规律总体呈SPAD值随灌水量的增大而增大（即W1LCK<W2LCK<W3LCK<W4LCK）。

表 4-2 不同灌水条件下玉米叶片叶绿素相对含量 SPAD 值的变化

Table 4-2 Changes in SPAD values of chlorophyll relative content in corn leaves under different irrigation conditions

处理	苗期	拔节期	抽雄吐丝期	灌浆期	完熟期
W1LCK	41.12±0.21c	42.16±0.01d	42.24±0.01b	41.03±0.04b	33.56±0.02b
W2LCK	42±0.16b	42.43±0.01c	42.36±0.01b	41.12±0.21b	34.7±0.12ab
W3LCK	42.55±0.01a	43.25±0.03b	43.23±0.49ab	42.02±0.28a	35.56±0.04ab
W4LCK	42.78±0.02a	43.66±0.04a	43.52±0.02a	42.12±0.01a	36.01±0.01a

作物干物质的大小标志着作物生长发育的好坏，图4-1为玉米地上部分干物质的积累量，不同部位干物质的累积量反映玉米干物质积累的分配情况，从图中可以看出，玉米干物质的累积分配主要表现为茎干重>雌穗干重>叶片干重，不同灌水量处理茎干重较叶片干重相差39.1~39.7 g，不同灌水量处理茎干重较雌穗干重相差28.4~29.77 g。不

同灌水量处理玉米干物质积累量表现为随着灌水的增大玉米干物质积累量增大，W1灌水水平下干物质积累量较W2、W3、W4灌水水平干物质积累差异显著 ($P<0.05$)，W2、W3、W4灌水水平之间玉米干物质积累量有差异但不显著。随着灌水的增加，W2LCK、W3LCK、W4LCK处理较W1LCK处理雌穗干重分别增加了7.4、8.43、9.29 g；叶片干重分别增加了7.25、8.1、8.52 g；茎干重分别增加了6.73、7.66、7.92 g。通过对各灌水量处理的对比分析，玉米各器官干物质积累量均随灌水量的增加而增加。

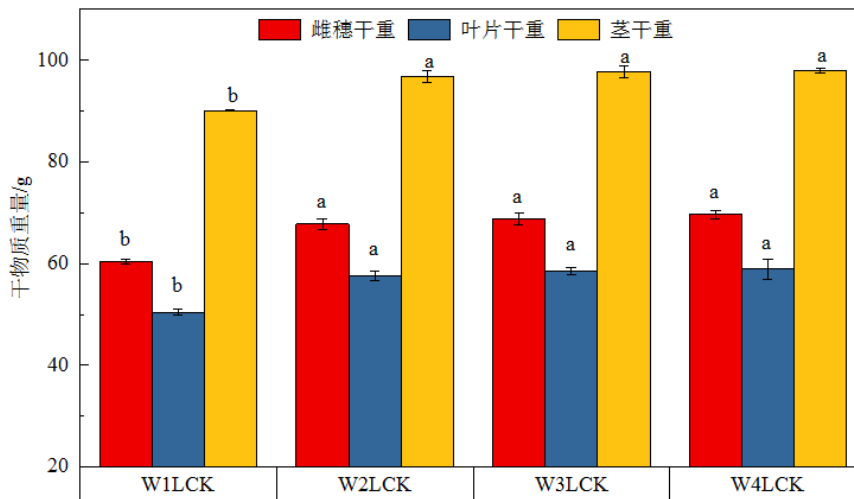


图 4-1 不同灌水处理玉米干物质重量变化

Fig. 4-1 Changes in dry matter weight of corn under different irrigation treatments

表4-3为不同灌水处理对滴灌玉米产量的影响及产量构成因素的影响，从表中可以得出，不同灌水量处理后玉米产量构成因素穗长、穗粗随灌水量的增加而增大；穗行数、穗粒数及千粒重随灌水量的增加先增大后略微有所减小。产量的外在直观表现形式为穗长和穗粗，W2、W3、W4灌水水平下较W1灌水水平下穗长与穗粗大小差异变化显著 ($P<0.05$)，W2LCK、W3LCK、W4LCK随灌水量的增加变化不显著，说明灌水量达到一定程度后增加灌水量对滴灌玉米穗长和穗粗的影响不大。穗行数、穗粒数及千粒重在W1、W2、W3灌水水平下随灌水量的增加而增加，在W4灌水水平下有所减小，且W2、W3灌水水平下穗行数、穗粒数及千粒重变化差异不显著 ($P>0.05$)。不同灌水处理玉米的生长发育不同，各处理之间玉米产量差异显著 ($P<0.05$)，由表可知，玉米产量与灌水量不成正比，且各灌水处理玉米产量差异显著 ($P<0.05$)，在W2灌水水平下玉米的产量最高，最高可达8740 kg/hm²，W1灌水水平下玉米产量最低，最低为8103.6 kg/hm²，最高产量与最低产量相差636.4 kg/hm²。

表 4-3 不同灌水处理玉米产量及构成的变化

Table 4-3 Changes in yield and composition of corn under different irrigation treatments

处理	穗长/cm	穗粗/cm	穗行数	穗粒数	千粒重/g	产量/kg·hm ⁻²
W1LCK	17.4±0.28b	5.22±0.02b	16.4±0.01c	603.52±15.2c	306.7±0.28d	7103.6±84.8d
W2LCK	19.2±0.84a	5.71±0.15a	17.8±0.70ab	685.3±12.7a	334.5±0.9b	8740±169.7a
W3LCK	19.7±0.28a	5.85±0.07a	17.9±0.07a	692.73±22.3a	336.1±0.14a	8732.6±72.6b
W4LCK	19.9±0.14a	5.86±0.08a	17.6±0.11b	668.8±21.4b	324.4±0.56c	8476.2±102.3c

4.2 不同灌水处理对土壤水热变化的影响

4.2.1 灌水前后土壤温度变化

由于全生育期灌水8次，而土壤10 cm深处温度受外界因素影响最显著，日变化最明显，所以选取W1L1处理7月1日灌水前一天和后一天10 cm深处土壤温度变化进行对比分析。从图4-2可以看出灌水前一天和后一天土壤温度差异极显著 ($P<0.01$)，灌水前，土壤比较干燥，含水率低，土壤的通气性较好，土壤热容量和导热率小，这种土壤对气温响应明显，在太阳辐射下土壤容易被加热；灌水后，土壤含水率增大，土壤通气性能不良，热容量大，所以灌水后土壤温度明显下降。灌水前土壤温度日变幅可达 $5.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，灌水后日变幅仅 $2.95\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，灌水前后土壤日平均温差为 $2.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，从图4-2可以看出，灌水前土壤温度的升高和降低幅度大，灌水后温度的升降较平缓。可以看出，土壤温度日变幅的大小，主要取决于土壤通气能力的大小，土壤含水率越大，土壤导热率越大，土壤温度的变化较缓和，反之，当土壤含水率较小，土壤通气性好，其热容和导热率小，则土壤温度升高与降低变化明显。

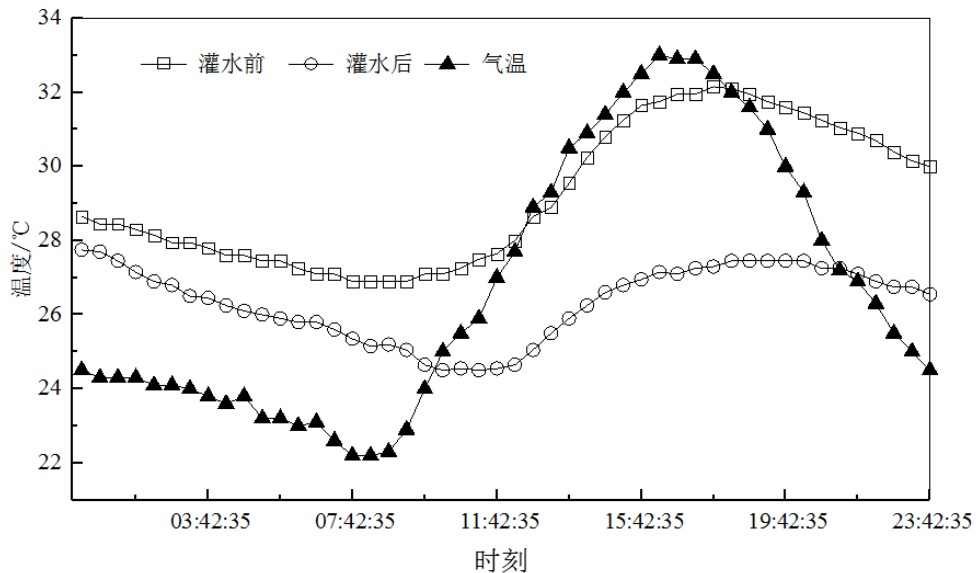


图 4-2 7 月 3 日灌水前后 10cm 深处土壤温度日变化

Fig.4-2 Daily variation of soil temperature in the depth of 10cm before and after irrigation in July 3th

4.2.2 不同灌水量条件下土壤温度的变化

上述研究表明，控光处理主要影响 $0\sim 40\text{ cm}$ 土层的土壤含水率变化，因此对玉米全生育期 $0\sim 40\text{ cm}$ 土壤含水率和土壤温度的变化规律进行分析如图4-3所示。从图中可以看出土壤温度与土壤含水率呈负相关关系，土壤含水越大土壤温度越小， $0\sim 30\text{ cm}$ 土壤温度受土壤含水率的影响较大， 40 cm 深的土壤温度变化幅度较小。

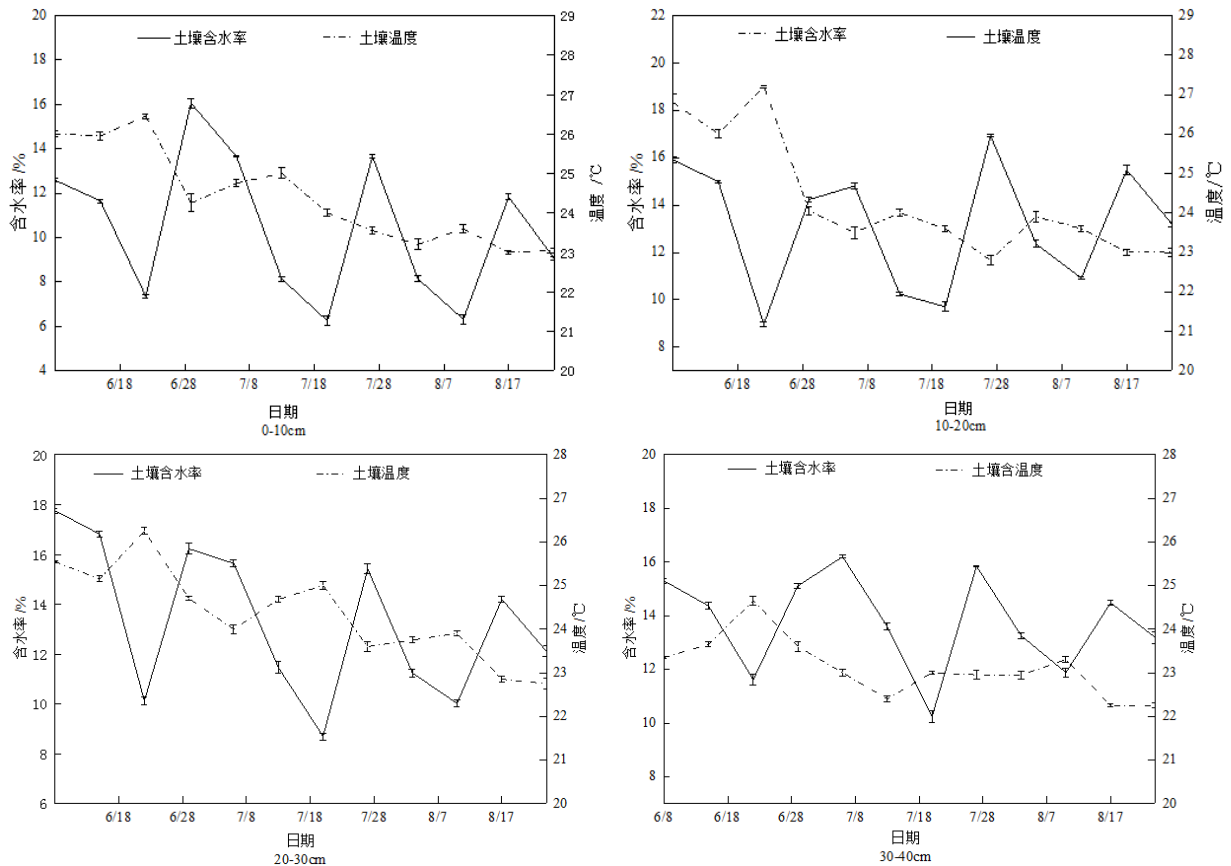


图 4-3 不同深度土壤温度与土壤含水率的变化关系

Fig. 4-3 The relationship between soil temperature and soil water content at different depths

6月12日至8月30日不同灌水量下玉米大田0~60 cm深土壤平均温度变化规律如图4-4所示,由图可知,随着灌水量的递增各处理平均温度 $W1L1 > W2L1 > W3L1 > W4L1$,灌水量越大,土壤含水率越大,土壤温度就越小, $W2L1$ 、 $W3L1$ 和 $W4L1$ 处理较 $W1L1$ 处理分别降低了2.4%、4.1%、5.9%。在7月之前,由于气温的升高,以及玉米植株小、叶片较少、叶面积较小,地面受太阳辐射直接作用强,太阳能转换成热能积累于土壤,所以前期0~60 cm深土壤平均温度有略微升高现象,随着时间的推移,玉米植株生长茂盛,叶面积增大,削弱了太阳辐射对土壤的直接作用,平均温度总体以斜率为-0.39的趋势缓慢下降。

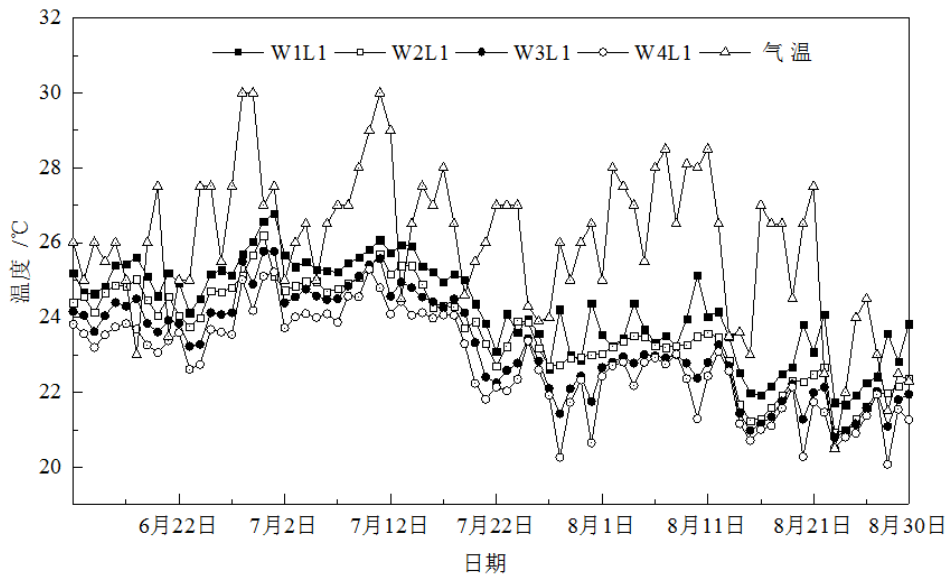
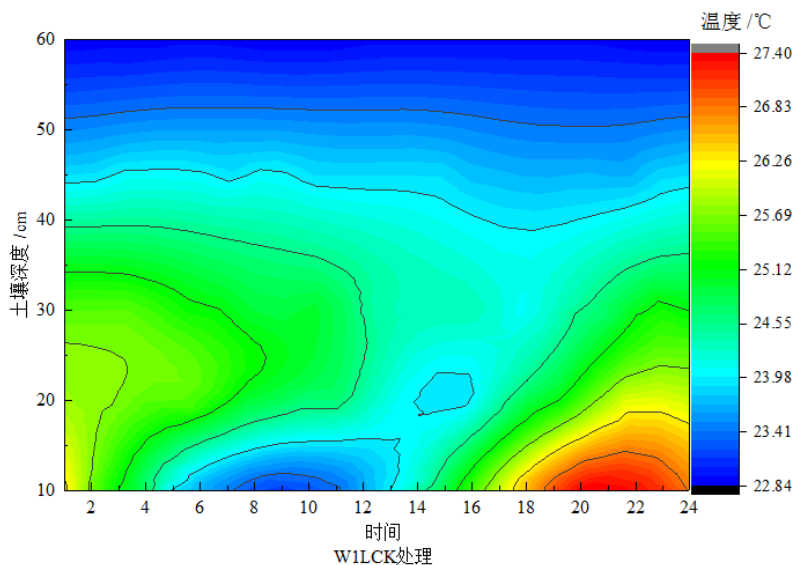


图 4-4 不同灌水量条件下 0~60cm 深土壤平均温度变化

Fig.4-4 Average temperature change of 0-60cm deep soil under different irrigation conditions

图4-5为7月8日不同灌水量条件下不同深度的土壤温度日变化规律，由图可以看出，10、20和30 cm深的土壤温度日变化呈单峰变化，45、60 cm深处土壤温度基本趋于稳定，无明显变化。11:00~16:00土壤温度处于升温过程，随着灌水量的递增，土壤温度升高速率减小。不同灌水梯度W1、W2、W3、W4处理，在同一土壤深度随着灌水量的增大，土壤含水率增大、土壤温度降低。10 cm深处各处理之间最高温度温差依次为1.25 °C、0.7 °C、0.5 °C，20 cm深处各处理之间最高温温差依次为1 °C、-0.3 °C、0.75 °C，30 cm深处各处理之间最高温温差依次为0.2 °C、0 °C、0 °C，可以看出除了处理W1L1与W2L1最高温温差较大外，W2L1、W3L1和W4L1之间温差都较小，且随着灌水量的增大温差逐渐减小。从图中可以看出，W1L1处理10 cm和20 cm深处的土壤温度日变幅较大，30 cm深处日变化趋势较平缓，W2L1、W3L1和W4L1处理10 cm深处的土壤温度日变化幅度较大，20 cm和30 cm深处日变化趋势较平缓。



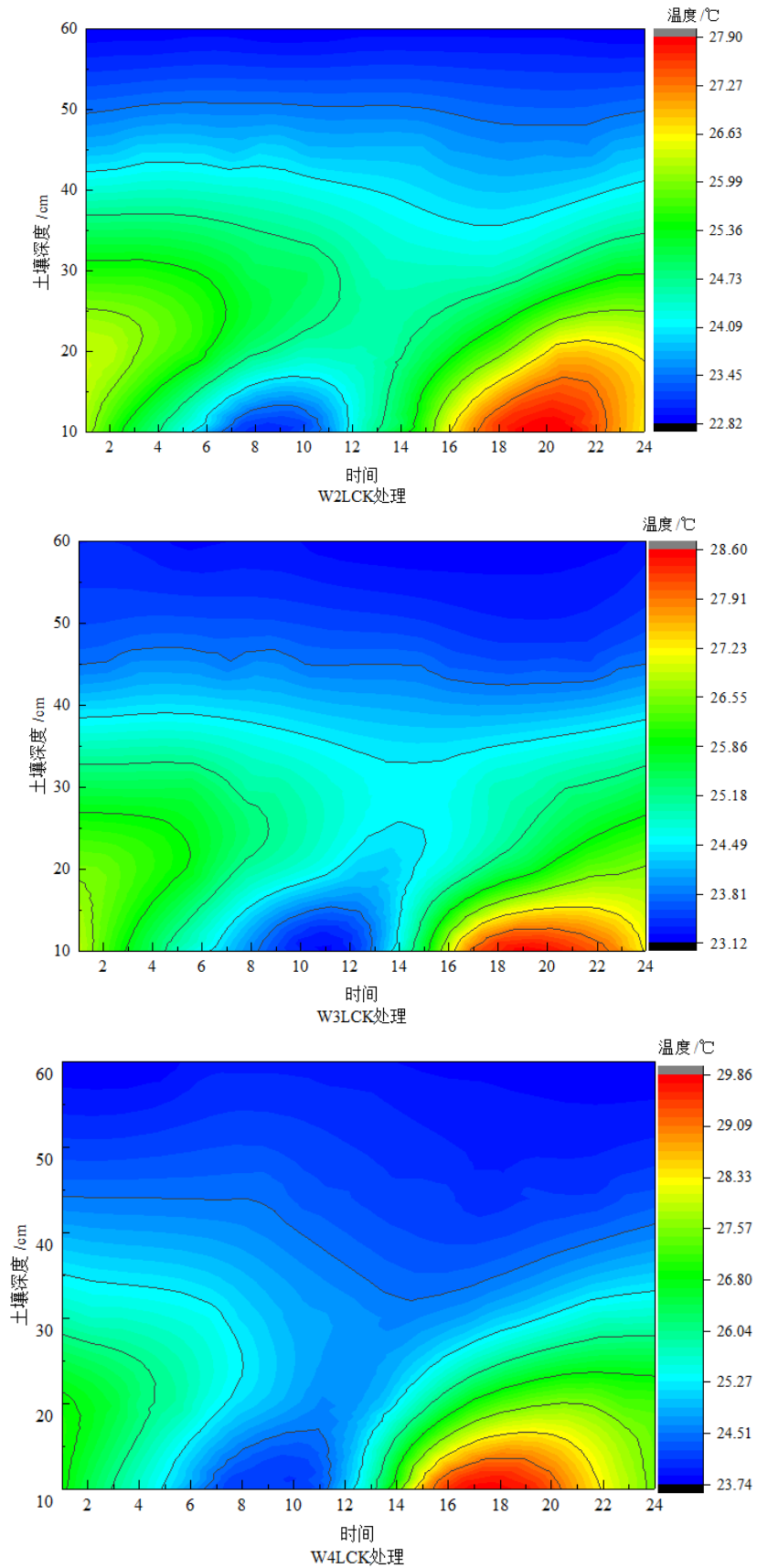


图 4-5 7 月 8 日不同灌水量不同深度土壤温度日变化

Fig.4-5 Daily variation of soil temperature at different depths of irrigation in July 8th

土壤温度随着灌水量和控光程度的增加出现较气温滞后的现象，另外，不同灌水量和不同控光程度下土壤温度随着土壤深度的增加也出现明显滞后现象。控光处理后10 cm和20 cm深处土壤温度日变化受气温影响最大，30 cm深处土壤温度日变化微弱，45~60 cm深处土壤温度基本趋于稳定，故以7月8日各处理10 cm和20 cm深处土壤温度日达到最高温的时刻分析见表4-4，7月8日当天最高气温出现在16:00，W1L1、W2L1、W3L1、W4L1处理在10 cm深处最高温较当日最高气温分别滞后1 h、2 h、3 h、4 h左右；在20 cm深最高温较当日最高气温分别滞后2 h、4 h、5 h、6 h左右，W2L2、W2L3、W2L4处理在10cm深处最高温较当日最高气温分别滞后3 h、2 h、1 h左右；在20 cm深处最高温较当日最高气温分别滞后4 h、3 h、2 h左右。用0:00~23:00整点温度拟合各处理10 cm、20 cm深处土壤温度日变化特征曲线，无论是不同灌水量条件还是不同控光条件下，不同深度土壤温度日变化按一元三次函数曲线变化，见表4-4。

表 4-4 不同灌水量和控光条件下不同深度土壤温度变幅特征

Table 4-4 Variation Characteristics of soil temperature at different depths under different irrigation and light control conditions

处理	深度 /cm	最高温度 /°C	出现时间	拟合函数	相关系数
W1L1	10	29.85	17: 00	$y = -0.00614x^3 + 0.24175x^2 - 2.47862x + 31.50077$	$R^2 = 0.90511$
	20	27.6	18: 00	$y = -0.00185x^3 + 0.08884x^2 - 1.1337x + 29.2195$	$R^2 = 0.87434$
W2L1	10	28.6	18: 00	$y = -0.00293x^3 + 0.12566x^2 - 1.33768x + 27.53361$	$R^2 = 0.91844$
	20	26.6	20: 00	$y = -1.11539x^3 + 0.0218x^2 - 0.42523x + 26.90068$	$R^2 = 0.89236$
W3L1	10	27.9	19: 00	$y = -0.00244x^3 + 0.11474x^2 - 1.33195x + 28.2833$	$R^2 = 0.82576$
	20	26.9	21: 00	$y = 5.16706x^3 - 9.42029x^2 - 0.24723x + 26.85205$	$R^2 = 0.91372$
W4L1	10	27.4	20: 00	$y = -0.00193x^3 + 0.09494x^2 - 1.15008x + 27.40771$	$R^2 = 0.95733$
	20	26.15	22: 00	$y = 0.00101x^3 - 0.02063x^2 - 0.03126x + 25.95399$	$R^2 = 0.90654$
W2L2	10	21.85	19: 00	$y = -0.00177x^2 + 0.07358x^2 - 0.74609x + 21.2139$	$R^2 = 0.93208$
	20	21.35	20: 00	$y = -3.6915x^3 + 0.02255x^2 - 0.32495x + 21.55348$	$R^2 = 0.90961$
W2L3	10	22.9	18: 00	$y = -0.00166x^3 + 0.07225x^2 - 0.78151x + 22.78473$	$R^2 = 0.90961$
	20	22.15	19: 00	$y = 2.98122x^3 + 0.0068x^2 - 0.16695x + 22.24472$	$R^2 = 0.7693$
W2L4	10	24.03	17: 00	$y = -0.00165x^3 + 0.07094x^2 - 0.76951x + 24.00623$	$R^2 = 0.83779$
	20	23.25	18: 00	$y = -4.23439x^3 + 0.02647x^2 - 0.38665x + 23.45376$	$R^2 = 0.94117$

用SPSS对不同处理不同深度土壤日平均温度进行相关性分析,从表4-5可以看出,同一光照条件下,各处理随着灌水量的递增,对土壤温度的影响程度也递增,但各处理之间温差梯度逐渐减小。不同程度的遮阴处理对土壤温度都较大,但控光后各处理只有10 cm深处土壤温度日变化幅度较大,可见控光处理对土壤对气温响应影响较大。

表 4-5 不同灌水量与控光条件下不同深度不同处理日平均温度变化 单位: °C

Table 4-5 Variation of average daily temperature under different irrigation and light controlled conditions at different depths Unit: °C

深度	W1L1	W2L1	W3L1	W4L1	W2L2	W2L3	W2L4
10cm	26.83aA	25.89aB	25.49aC	25.18aC	20.28bF	21.55bE	22.70aD
20cm	26.14bA	25.43bB	25.55aAB	25.04bB	20.65aD	21.62abD	22.44bC
30cm	25.19cA	25.08cA	24.97bAB	24.81cB	20.70aE	21.72aD	22.41bC
45cm	24.28dA	23.79dB	23.74cB	23.83dB	20.14cE	20.85cD	21.58cC
60cm	23.81eA	23.19eB	22.86dB	22.88eB	19.63dD	20.40dD	21.16dC

表 4-6 各同处理 0~60cm 深土壤日平均温度 F 值检验

Table 4-6 F test of daily average temperature of 0-60cm deep soil in the same treatment

处理	W1L1	W2L1	W3L1	W4L1	W2L2	W2L3	W2L4
W1L1	0	212.878**	408.013**	632.465**	1342.85**	1450.49**	5417.916**
W2L1		0	74.624*	359.395**	1111.286**	1178.716**	7179.902**
W3L1			0	903.616**	1052.195**	1108.934**	8510.843**
W4L1				0	970.105**	1004.928**	7559.879**
W2L2					0	19.352*	158.024**
W2L3						0	74.992*
W2L4							0

4.3 不同灌水量对土壤水分的影响

图4-6为不同灌水条件下0~60 cm不同土层土壤贮水量的变化,土壤贮水量的大小是衡量土壤保水能力和持水能力的大小。从图中可以看出,土壤贮水量全生育期的变化总体呈播种期至苗期明显降低,后期随生育期的推进先增后减的变化趋势,抽雄吐丝期土壤贮水量达到最大值。不同灌水量处理之间土壤贮水量整体呈随灌水量的增大土壤贮水量增大的规律(即W1LCK<W2LCK<W3LCK<W4LCK)。由于播种前灌了出苗水,播种期土壤贮水量较高,在播种至苗期灌水少,播种期至苗期有明显的下降趋势,随着生育期的推进,玉米植株生长旺盛,耗水量大,灌水次数也增加,所以苗期至拔节期土壤贮水量明显上升,抽雄吐丝期达到最高水平,灌浆至完熟期玉米逐渐成熟,耗水量逐渐减弱,灌水次数也有所减少,后期土壤贮水量呈现缓慢下降的趋势。

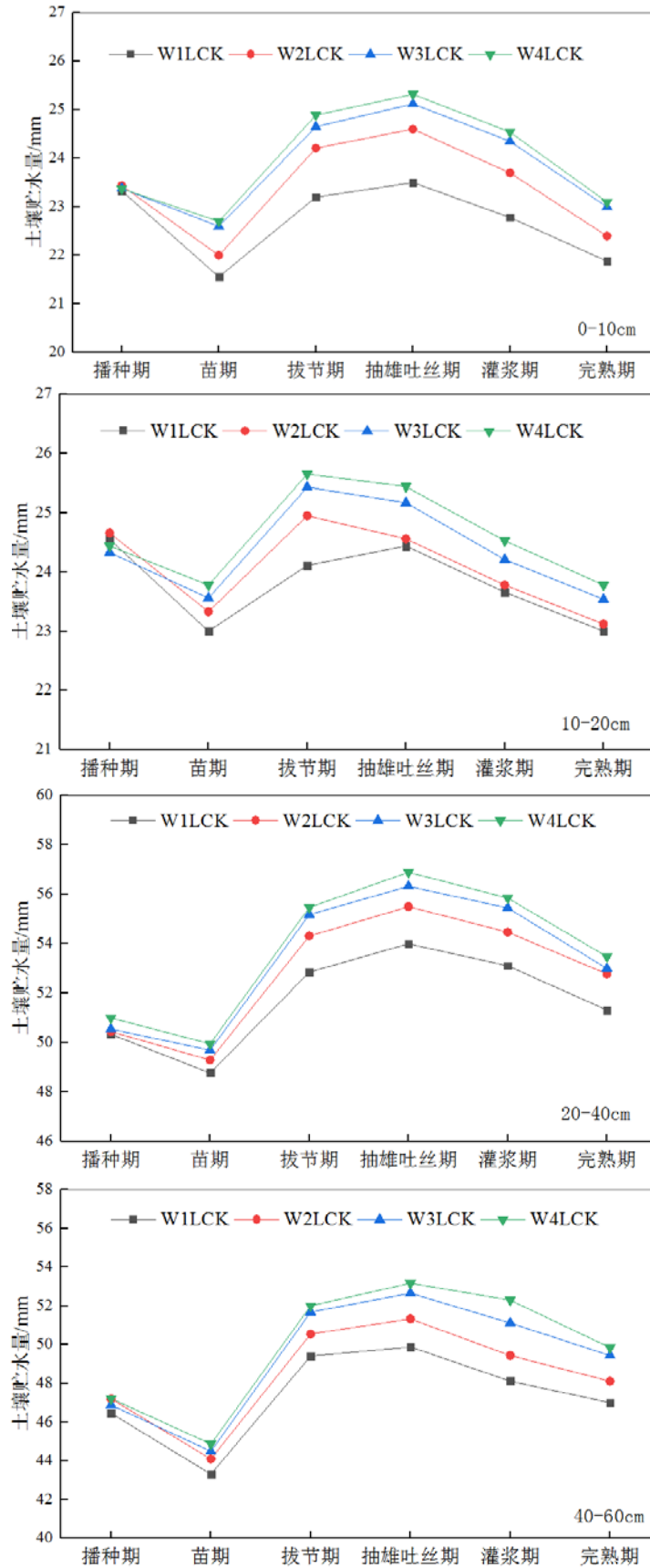


图 4-6 不同灌水量条件下不同土层土壤贮水量的变化

Fig. 4-6 Changes in soil water storage in different soil layers under different irrigation conditions

4.4 本章小结

不同灌水量条件下,玉米全生育期0~60 cm深的土壤平均温度变化在7月之前有微升趋势,一方面是由于,前期玉米植株较小,叶片数量少,对土壤覆盖率小,受太阳辐射直射强度大,土壤积温多;另一方面是由于5~7月气温的升高。7月以后土壤平均温度有所下降,一方面是由于随着时间的推移植株生长茂盛,叶片数量增多,对地面的覆盖率增大,阻碍了太阳辐射对土壤直射^[93];另一方面是由于玉米拔节期至以后生育期需水量大,增加灌水次数,导致土壤含水率增加,土壤温度降低。同一灌水量条件下,控光与不控光处理之间0~60 cm深土壤平均温差可达到1.8~2.9 °C,各同控光处理之间土壤温差不大,各处理平均土壤温差为0.6 °C左右,控光后玉米全生育期土壤平均温度变化平缓,没有明显上升下降趋势。玉米全生育期内遮阴处理大大影响了田间小气候环境,使得控光各处理小气候环境温度明显降低,且遮阳网减小了太阳辐射对土壤的直射作用,导致土壤对气温的响应程度变小。

土壤温度与作物生长发育的关系极为密切,作物种子的发芽和根系生长发育都需要一个适宜的温度,土壤温度的高低直接影响作物种子发芽,根系的生长。膜下滴管玉米拔节期根系主要分布于0~20 cm土层,抽穗灌浆期主要分布于0~40 cm土层,成熟期主要分布于0~60 cm^[94]。所以,研究土壤温度的变化规律有助于调节土壤温度,使玉米主根系生长的土层温度达到最适宜生长的水平。本文试验结果表明,土壤含水率的不同和光照强度的不同都对0~30 cm深度的土壤温度有明显影响。土壤含水率与土壤温度呈负相关,这与前人研究结果一致^[95],这是因为土壤热导率和热容量直接影响土壤日变化,当相等的热量进入土壤后,热容量大的土壤,其温度升高幅度小,热容量小的土壤,其温度升高的幅度大^[96-98]。土壤的比热容主要取决于土壤中水分和气体的含量,而土壤含水率大时土壤所含气体就小。所以当土壤含水率的增大,土壤温度随之下降。

膜下滴灌灌水量少,节约用水,地膜具有保温作用,有助于种子发芽和生长发育,且地膜能够使土壤中的水分循环与土壤与地膜之间,减少了棵间蒸发,滴灌仅湿润作物根区范围土壤,水滴直接渗入作物根部,所以膜下滴灌不仅节约农田用水,而且能将水肥适时适量的供到作物根区。所以,膜下滴管膜下土壤微环境对作物生长有直接作用,研究外界因素对作物根区土壤的影响具有重要意义。以上不同控光和灌水量条件下玉米大田土壤温度全生育期变化和日变化规律表明,灌水量和控光对土壤温度都有明显的影响,特别是灌水前后和控光处理后土壤温差很大。孙贯芳等研究表明膜下滴灌较地面灌溉(黄灌、井灌)对气温变化响应迅速^[99],灌溉水源不同,水的温度也不同,滴灌后对土壤温度的影响也不同,土壤温度变化影响作物生长。

作物在不同生长阶段对水量和土壤温度的需求不同,灌水量、水源温度、光照强度的改变都会影响土壤温度的变化,从而影响作物的生长发育。研究不同灌水量对土壤温度的影响,对探索适宜玉米生长的水温有重要作用;控光是对持续阴天的一种模拟,研究控光对玉米田地土壤温度的影响,为阴天灌溉调节适宜的水温提供理论依据,通过对玉米不同控光 and 不同灌水量处理实验研究,研究水光对玉米生长与水分利用效率的协同

调控，为调节玉米大田土壤温度，使玉米根系生长在适宜温度有重要意义。

灌水量对土壤0~30 cm深处的温度影响较大，随着灌水量的增大，土壤温度对气温的响应程度降低，土壤含水率与土壤温度呈负相关。

灌水、灌水量和光照强度不同对土壤温度都有显著影响，前人对水源温度及灌水量对土壤温度的影响做过大量研究，但对光照强度对土壤温度的影响研究较少，所以对于灌水与光照对大田土壤温度变化规律的影响还需进一步研究，研究灌水量、水源温度、光照强度对大田土壤温度的相互作用，结合计算机数值模拟，分析土壤温度日变化、全生育期变化下作物生长发育的变化，从而调节土壤水、肥、热，优化膜下滴灌水肥一体化制度。本研究为以后指导实践和田间管理提供了理论依据。

第五章 不同控光与灌水对滴灌玉米生长特性及耗水规律的影响

5.1 不同控光与灌水量对滴灌玉米生长特性的影响

表5-1为不同灌水与控光条件下玉米各生长指标的变化,从表中可以看出,同一灌水条件下随着遮光程度的增强,玉米叶长逐渐增长,茎粗、株高、穗位高、叶宽随遮光程度的增强而逐渐减小;同一遮光条件下,随着灌水量的增加,玉米各生长指标逐渐增大。通过双因素方差分析,同一遮光条件下不同灌水量对玉米茎粗、株高、穗位高、穗位系数、叶长、叶宽影响不显著($P>0.05$),对叶面积的影响显著($P<0.05$);同一灌水量条件下不同控光处理对玉米各生长指标的影响极显著($P<0.01$);不同灌水量与控光对玉米各生长指标影响极显著($P<0.01$)。

表 5-1 不同控光与灌水条件下滴灌玉米各生长指标的变化情况

Table 5-1 Variations of growth indicators of drip irrigation corn under different light control and irrigation conditions

处理	茎粗/cm	株高/cm	穗位高/cm	叶长/cm	叶宽/cm	叶面积/cm ²
W1L1	2.24±0.02cd	218±1.41b	144.5±5.65a	89±1.01f	8.9±0.11b	594.1±18.87b
W2L1	2.33±0.16c	222±8.48ab	145±5.65a	92±1.41e	9.4±0.16a	648.6±13.7a
W3L1	2.56±0.03b	224±2.12a	145.5±7.07a	93.5±0.89de	9.6±0.08a	673.2±15.00a
W4L1	2.88±0.02a	225±2.26a	146±4.32a	94±1.12de	9.7±0.14a	683.8±20.25a
W1L2	1.87±0.05h	208±3.12d	125±4.94b	94.4±1.06de	7.2±0.17e	509.7±13.84de
W2L2	2.05±0.15f	210±7.07cd	125±9.89b	96±1.55cd	7.5±0.22de	540±18.6cd
W3L2	2.12±0.07ef	211±1.41cd	126±5.66b	98.5±0.21bc	7.7±0.13cd	568.8±14.53bc
W4L2	2.21±0.01de	213±2.86c	125.5±6.22b	99.5±1.14b	7.9±0.09c	589.5±14.73b
W1L3	1.74±0.05i	186±5.41e	98.5±5.14c	100±1.41b	6.5±0.16f	487.5±17.50e
W2L3	1.95±0.15gh	187±7.07e	97.0±4.38c	105±1.27a	7.2±0.18e	567±16.9bc
W3L3	2.04±0.08fg	189±3.65e	97.5±3.78c	106.5±1.07a	7.4±0.21de	591.1±15.22b
W4L3	2.11±0.06ef	190±4.44e	98.0±5.77c	107±1.35a	7.5±0.09de	601.8±19.30b
双因素方差分析 (F 值检验)						
W	2.98	0.12	0.01	1.17	0.69	4.06*
L	17.7**	330.17**	172.22**	47.62**	87.13**	13.52**
W*L	101.62**	100.64**	18.48**	50.01**	115.35**	26.44**

图5-1为不同控光与灌水条件下滴灌玉米干物质在不同器官中的分配变化,由图知,L1光照处理下玉米干物质分配表现为雌穗干重>茎干重>叶干重;L2和L3光照处理下玉米干物质分配表现为叶片干重>茎干重>雌穗干重。L1、L2、L3控光处理下玉米干物质分配的变化表明,随着控光强度的增大,玉米各器官的干物质积累量均呈减小趋势变化,且控光程度对玉米雌穗干重影响最大,随着控光程度的增强,玉米雌穗干物质积累量变化极显著($P<0.01$);随着遮光程度的增强,L2控光条件下玉米雌穗干重、叶片干重、茎干重较L1控光处理分别降低了5.35~21 g、2.1~4.87 g、55.62~60.69 g;L3控光条件下玉米雌穗干重、叶片干重、茎干重较L1控光处理分别降低了18.58~34.55 g、8.09~15.65 g、66.54~71.76 g。控光条件下,不同灌水量对玉米干物质积累量的影响不大,W1灌水处理与W2、W3、W4处理玉米干物质积累差异显著($P<0.05$),W2、W3、W4

灌水处理之间玉米干物质积累量变化差异不显著。

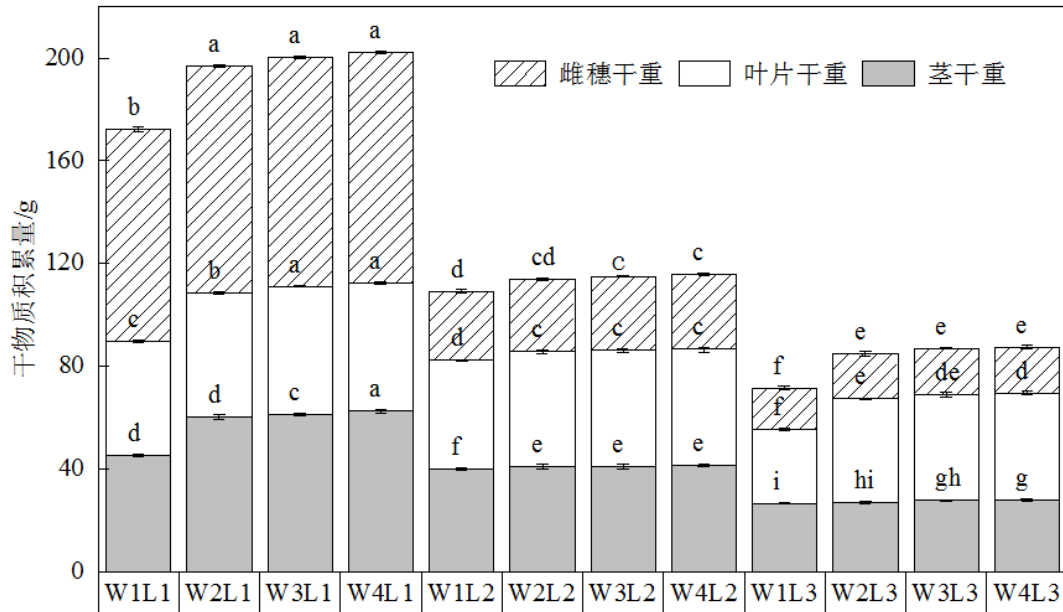


图 5-1 不同控光与灌水条件下玉米干物质积累情况

Fig. 5-1 Dry matter accumulation in corn under different light control and irrigation conditions

表5-2为不同灌水与控光条件下滴灌玉米产量及其产量构成的变化情况，从表中可以看出，灌水量相同的情况下，滴灌玉米产量及其产量构成随遮光程度的增加逐渐减小，遮光程度越强对滴灌玉米产量及其产量的构成影响越大，通过双因素方差分析同一灌水量不同控光处理玉米产量及其构成差异极显著 ($P < 0.01$)。控光程度相同的情况下，滴灌玉米穗长、穗粗、穗行数、行粒数、穗粒数随灌水量的增大逐渐增大，千粒重和产量随灌水量的增大呈先增大后减小的变化趋势，通过双因素方差分析同一控光条件下，不同灌水量对滴灌玉米产量及其产量的构成影响不显著 ($P > 0.05$)，而不同灌水与控光条件下各处理玉米产量及其产量的构成变化差异极显著 ($P < 0.01$)。不同控光处理L1与L2、L3处理产量分别相差3002~3196 kg/hm²、5131~5345 kg/hm²，不同灌水处理W1与W2、W3、W4处理产量分别相差108~222 kg/hm²、120~332 kg/hm²、4~102 kg/hm²。从不同控光与灌水各处理玉米产量变化可以看出，光照强度对玉米产量的影响比灌水量对玉米的影响更大。

表 5-2 不同灌水与控光对滴灌玉米产量及其构成的影响

Table 5-2 Effects of different irrigation and light control on yield and composition of corn under drip irrigation

处理	穗长/cm	穗粗/cm	穗行数	行粒数	千粒重/g	产量/kg·hm ⁻²
W1L1	16.5±0.68c	4.02±0.03b	14.4±0.28b	34.4±0.45b	316.8±9.61abc	6808±70.41b
W2L1	17.8±0.56bc	4.26±0.12a	16.2±0.56a	36.1±0.98a	327.5±5.32ab	7030±168.22a
W3L1	18.4±0.42ab	4.38±0.11a	16.7±0.27a	36.8±1.13a	331.4±1.97a	7140±87.62a
W4L1	19.7±0.58a	4.41±0.01a	16.8±0.32a	37.2±0.28a	330.8±5.27a	7132±101.23a
W1L2	11.1±0.66ef	3.42±0.03de	13±0.33c	24.1±0.84d	298.2±11.59c	3806±68.89c
W2L2	12.5±0.55de	3.59±0.09cd	13.4±0.56c	25.5±0.63cd	303.5±5.91c	3914±96.12c
W3L2	13.4±0.54d	3.63±0.06c	13.6±0.42bc	26.2±0.28c	307.7±10.88bc	3944±79.85c
W4L2	13.8±0.42d	3.7±0.14c	13.7±0.28bc	26.8±1.13c	308.6±12.16abc	3939±95.12c
W1L3	9.7±0.44f	2.98±0.18f	10.8±0.42e	17.3±0.42f	219.9±13.65d	1677±76.28d
W2L3	10.1±0.98f	3.03±0.09f	11.6±0.70d	18.5±0.98ef	221.5±5.7d	1786±50.91d
W3L3	10.8±0.74f	3.12±0.02f	12±0.70d	19.1±0.84e	223.4±7.25d	1797±80.46d
W4L3	11.2±0.65ef	3.24±0.05ef	12.2±0.28d	19.7±0.98e	222.1±6.49d	1790±78.66d
双因素方差分析 (F 值检验)						
W	0.53	0.34	0.68	0.13	0.04	0.01
L	95.45**	130.91**	68.29**	409.06**	337.20**	4391.52**
W*L	59.10**	62.16**	60.62**	206.45**	48.93**	1528.58**

5.2 不同控光与灌水量对滴灌玉米耗水规律的影响

表5-3为不同控光与灌水量条件下各处理玉米各生育期阶段耗水量的变化情况。从表中可以看出,不同处理玉米在各生育阶段耗水量均呈随生育进程的推进先增大后减小的变化趋势,均在抽雄吐丝期玉米耗水量达到最高水平;同一生育期阶段各处理玉米耗水量变化规律表现为,随着灌水量的增大玉米耗水量增大,随着遮光强度的增大玉米耗水量减小。不同控光处理L1与L2、L3处理全生育期耗水量分别相差18.05~21.71 mm、37.40~46.55 mm,不同灌水量处理W1与W2、W3、W4处理全生育期耗水量分别相差78.23~87.38 mm、147.94~156.18 mm、219.81~227.37 mm。从全生育期玉米耗水量大变化可以看出控光可以有效的降低玉米耗水量。

表 5-3 不同控光与灌水处理滴灌玉米各生育期耗水量的变化情况

Table 5-3 Changes of water consumption in different growth periods of drip irrigation corn under different light control and irrigation treatments

处理	耗水量/mm					
	苗期	拔节期	抽雄吐丝期	灌浆期	完熟期	全生育期
W1L1	40.14	77.35	85.72	81.45	38.36	323.02
W2L1	48.36	97.78	115.58	92.78	46.75	401.25
W3L1	59.44	115.51	123.64	114.63	57.74	470.96
W4L1	68.78	133.32	145.52	128.87	66.34	542.83
W1L2	38.74	72.65	83.28	69.96	36.68	301.31
W2L2	45.52	90.56	113.62	88.89	44.61	383.20
W3L2	55.57	108.87	119.54	110.11	55.55	449.64
W4L2	64.42	127.36	141.42	124.42	64.42	522.04
W1L3	37.52	68.66	80.08	65.56	24.65	276.47
W2L3	43.36	85.42	109.57	83.66	41.84	363.85
W3L3	52.86	103.38	116.63	107.23	52.55	432.65
W4L3	63.11	121.63	138.42	119.34	61.34	503.84

表5-4为不同控光与灌水处理滴灌玉米不同生育期阶段耗水模数的变化规律。从表中可以看出,不同处理不同生育期阶段玉米耗水模数同玉米耗水量变化规律相似,表现为随着生育进程的推进滴灌玉米耗水模数呈先增大后减小的变化趋势,抽雄吐丝期达到最大水平。

表 5-4 不同控光与灌水处理滴灌玉米各生育期耗水模数的变化情况

Table 5-4 Changes of water consumption modulus of different growth periods of drip irrigation corn under different light control and irrigation treatments

处理	耗水模数/%					
	苗期	拔节期	抽雄吐丝期	灌浆期	完熟期	全生育期
W1L1	12.43	23.95	26.54	25.22	11.88	100.00
W2L1	12.05	24.37	28.80	23.12	11.65	100.00
W3L1	12.62	24.53	26.25	24.34	12.26	100.00
W4L1	12.67	24.56	26.81	23.74	12.22	100.00
W1L2	12.86	24.11	27.64	23.22	12.17	100.00
W2L2	11.88	23.63	29.65	23.20	11.64	100.00
W3L2	12.36	24.21	26.59	24.49	12.35	100.00
W4L2	12.34	24.40	27.09	23.83	12.34	100.00
W1L3	13.57	24.83	28.97	23.71	8.92	100.00
W2L3	11.92	23.48	30.11	22.99	11.50	100.00
W3L3	12.22	23.89	26.96	24.78	12.15	100.00
W4L3	12.53	24.14	27.47	23.69	12.17	100.00

表5-5为不同控光与灌水量处理滴灌玉米各生育期阶段耗水强度的变化情况。从表中可知,不同处理各生育期阶段玉米耗水强度变化规律一致,均表现为抽雄吐丝期>灌浆期>拔节期>完熟期>苗期,这是由于玉米生长特性、土壤蒸发及灌水量的变化所导致,抽雄吐丝期和灌浆期玉米生长旺盛、蒸腾量大、灌水次数增加,因此抽雄吐丝期和灌浆

期耗水强度达到较高水平。各处理之间玉米耗水强度表现为随灌水量的增加耗水强度增大，随遮光强度的增强耗水强度减小，这是由于灌水量的增大促进玉米的生长，从玉米干物质积累量的变化可知灌水量越大玉米干物质积累量越大，也就说明灌水量越大植株生长越茂盛，耗水量越大；而遮光处理后，遮光抑制玉米生长发育，降低了玉米蒸腾量，且遮光处理减小了玉米棵间蒸发，所以随着控光强度的增强玉米耗水强度减弱。

表 5-5 不同控光与灌水处理滴灌玉米各生育期耗水强度的变化情况

Table 5-5 Changes in water consumption intensity of different growth periods of drip irrigation corn under different light control and irrigation treatments

处理	耗水强度 $\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$					
	苗期	拔节期	抽雄吐丝期	灌浆期	完熟期	全生育期
W1L1	1.34	2.21	5.71	4.07	1.92	2.69
W2L1	1.61	2.79	7.70	4.63	2.33	3.34
W3L1	1.98	3.30	8.24	5.73	2.89	3.92
W4L1	2.29	3.81	9.70	6.44	3.32	4.52
W1L2	1.29	2.08	5.55	3.50	1.83	2.51
W2L2	1.51	2.58	7.57	4.44	2.23	3.19
W3L2	1.85	3.11	7.97	5.51	2.78	3.75
W4L2	2.15	3.64	9.43	6.22	3.22	4.35
W1L3	1.25	1.96	5.34	3.28	1.23	2.30
W2L3	1.44	2.44	7.30	4.18	2.09	3.03
W3L3	1.76	2.95	7.78	5.36	2.63	3.61
W4L3	2.10	3.48	9.23	5.97	3.07	4.20

5.3 不同控光与灌水量对滴灌玉米生长及耗水的影响

图5-2为不同灌水量、不同控光程度及不同时段控光条件下滴灌玉米地上部分干物质积累量及干物质分配情况，作物干物质质量及干物质分配影响作物产量的大小。由图可知，滴灌玉米干物质积累量随灌水量的增加而增加，W2、W3、W4灌水处理较W1灌水处理玉米干物质积累量增加显著，而W2、W3、W4灌水处理之间干物质积累量增加不显著，但略有增加。不同时段控光对滴灌玉米干物质积累量的影响程度表现为，全生育期控光>抽雄吐丝期控光>灌浆至完熟期控光，控光处理一定程度抑制了玉米生长，全生育期控光处理后玉米生长缓慢，植株生长较差，因此全生育期控光对玉米干物质积累量的影响最大；抽雄吐丝期控光处理后造成玉米授粉严重受损，雌穗干物质积累量显著降低 ($P<0.05$)，抽雄吐丝期控光处理L1F2、L2F2、L3F2较正常光照处理W2LCK玉米干物质积累量分别减小了80.84、8.58、73.46 g；灌浆至完熟期控光对玉米干物质积累量的影响主要是，控光后玉米植株干枯时间推迟，对玉米籽粒饱满度造成影响，灌浆至完熟期控光处理L1F3、L2F3、L3F3较正常光照处理W2LCK玉米干物质积累量分别减小了7.92、42.81、57.74 g，因此灌浆期至完熟期控光处理对滴灌玉米干物质积累影响较小。控光程度对滴灌玉米干物质积累的影响表现为随控光程度的增强玉米干物质积累减小越严重。

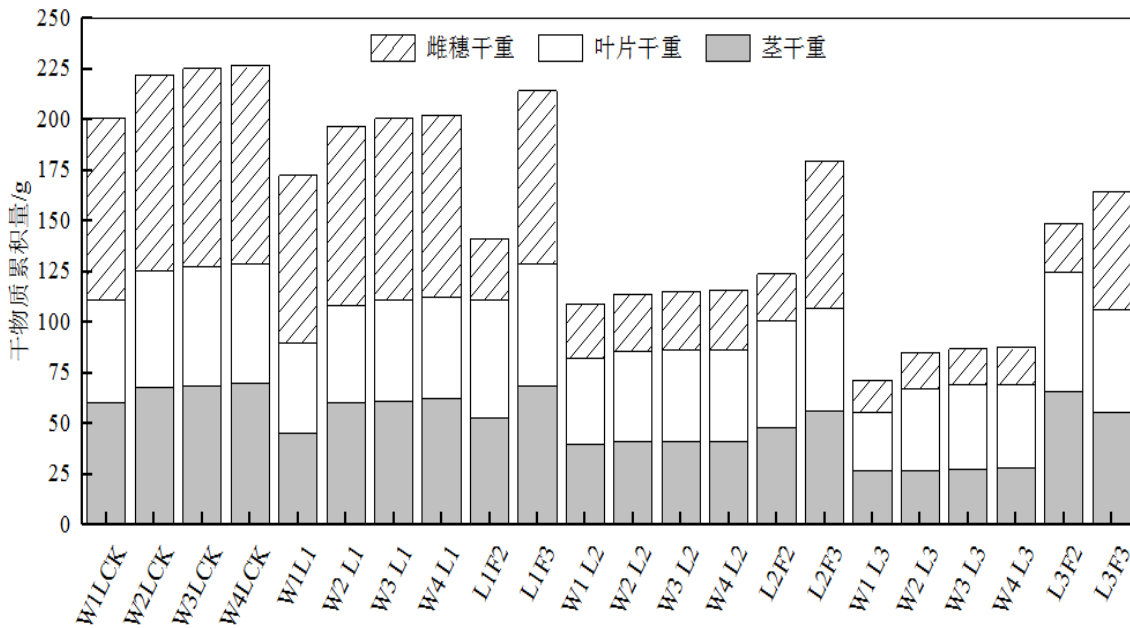


图 5-2 不同灌水与控光对玉米干物质积累量及分配的影响

Fig. 5-2 Effects of different irrigation and light control on dry matter accumulation and distribution in corn

图5-3为不同灌水量、不同控光程度及不同时段控光条件下滴灌玉米全生育期耗水量及平均耗水强度的变化情况，耗水量的大小反映玉米生长过程中消耗水分的多少。由图可知，不同处理玉米全生育期耗水量的变化同全生育期耗水强度的变化规律一致，总体呈随灌水量的增大玉米全生育期耗水量、耗水强度增大；随控光程度的增强玉米全生育期耗水量、耗水强度减小。全生育期控光处理W1L1、W2L1、W3L1、W4L1分别较正常光照处理W1LCK、W2LCK、W3LCK、W4LCK玉米全生育期耗水量减小了42.45、21.59、25.82、28.29 mm；W1L2、W2L2、W3L2、W4L2分别较正常光照处理W1LCK、W2LCK、W3LCK、W4LCK玉米全生育期耗水量减小了64.16、39.64、47.14、49.08 mm；W1L3、W2L3、W3L3、W4L3分别较正常光照处理W1LCK、W2LCK、W3LCK、W4LCK玉米全生育期耗水量减小了89.00、58.99、64.13、67.28 mm。抽雄吐丝期控光处理L1F2、L2F2、L3F2较正常光照处理W2LCK玉米全生育期耗水量分别减小了7.57、8.23、13.24 mm。灌浆至完熟期控光处理L1F3、L2F3、L3F3较正常光照处理W2LCK玉米全生育期耗水量分别减小了7.83、11.15、20.60 mm。通过对比分析得，抽雄吐丝期控光与灌浆至完熟期控光玉米全生育期耗水量相差不大，由此知适当的控光处理能适当的降低玉米耗水量。

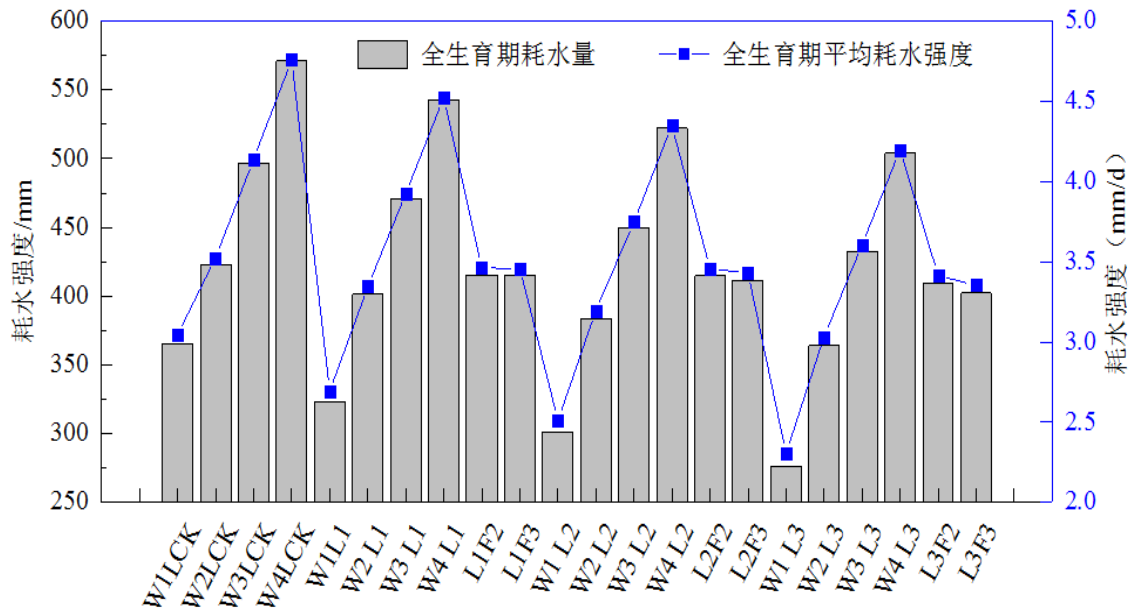


图 5-3 不同灌水与控光对玉米耗水量及耗水强度的影响

Fig. 5-3 Effects of different irrigation and light control on water consumption and water intensity of corn

图5-4为不同灌水量、不同控光程度及不同时段控光条件下滴灌玉米产量及水分利用效率的变化情况，玉米产量大小直接影响经济效益，产量对玉米种植至关重要。从图中可以得出，控光处理均不同程度的减小了玉米产量，控光程度越强玉米产量降低越严重。灌水量大小对玉米产量的影响表现为，正常光照处理下玉米产量随灌水量的增加先增大后稍有减小，控光处理后灌水量对玉米产量的影响较小。全生育期控光处理W1L1、W2L1、W3L1、W4L1分别较正常光照处理W1LCK、W2LCK、W3LCK、W4LCK玉米产量减小了295.6、1710、1592.6、1344.2 kg/hm²；W1L2、W2L2、W3L2、W4L2分别较正常光照处理W1LCK、W2LCK、W3LCK、W4LCK玉米产量减小了3297.6、4826、4788.6、4537.2 kg/hm²；W1L3、W2L3、W3L3、W4L3分别较正常光照处理W1LCK、W2LCK、W3LCK、W4LCK玉米产量量减小了5426.6、6954、6935.6、6686.2 kg/hm²。抽雄吐丝期控光处理L1F2、L2F2、L3F2较正常光照处理W2LCK玉米产量分别减小了2850、6346、7676 kg/hm²。灌浆至完熟期控光处理L1F3、L2F3、L3F3较正常光照处理W2LCK玉米产量分别减小了2368、2584、4082 kg/hm²。

从图5-4中可以看出，同一光照条件下，滴灌玉米水分利用效率的变化规律均呈随灌水量的增大滴灌玉米水分利用效率减小。但是在正常光照处理条件下，W1LCK和W2LCK处理随灌水量的增大水分利用效率变化不显著，W1LCK和W2LCK处理随灌水量的增大产量增加显著。在控光处理下，随灌水量的增大滴灌玉米水分利用效率减小明显，这是由于控光处理下玉米产量受灌水量的影响没有正常光照处理下灌水量对玉米产量的影响大。总体来说，不同处理下滴灌玉米水分利用效率随灌水量的增加的变化与产量随灌水量增加的变化基本一致。

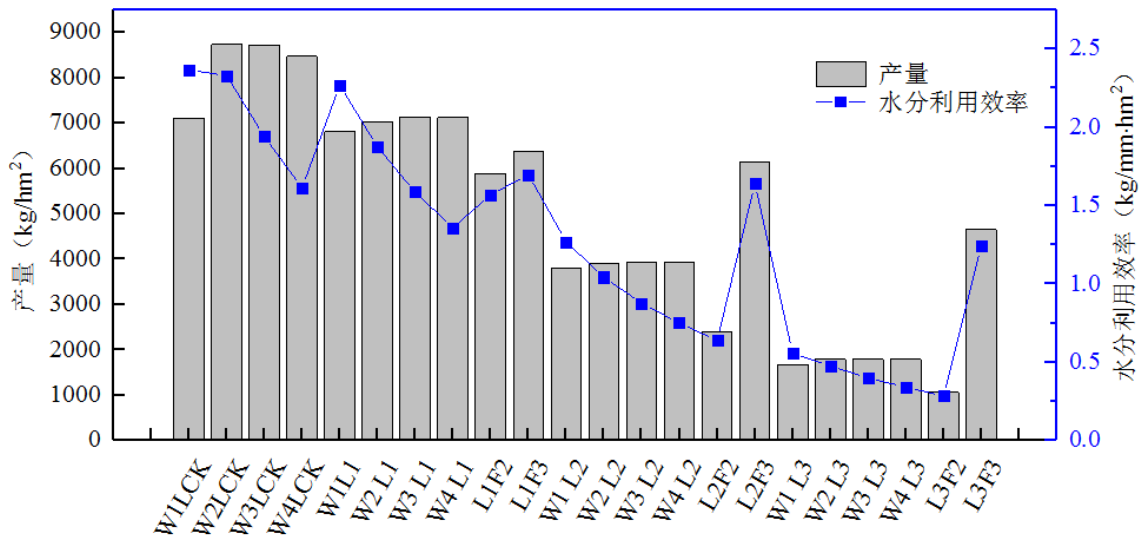


图 5-4 不同灌水与控光对玉米产量及水分利用效率的影响

Fig. 5-4 Effects of different irrigation and light control on maize yield and water use efficiency

5.4 控光与灌水对滴灌玉米协同调控下的工程应用

通过本试验研究表明，不同控光与灌水量条件下滴灌玉米的最优灌溉制度如下：

表 5-6 不同灌水量条件下滴灌玉米的最优灌溉制度

Table 5-6 Optimal Irrigation System of Drip Irrigation Maize under Different Irrigation Conditions

灌溉定额 (m ³ /亩)	各生育期灌水量 (m ³ /亩)					灌水次数	灌溉方式
	苗期	拔节期	抽雄吐丝期	灌浆期	完熟期		
250	31	62	62	62	31	8	膜下滴灌

表 5-7 对玉米影响较小的控光时段与遮光率

Table 5-7 Light control period and shading rate with little effect on corn

控光时段	遮光率%	灌溉定额 (m ³ /亩)	灌水次数	灌溉方式
灌浆至完熟期	20%	250	8	膜下滴灌

5.5 本章小结

不同控光与灌水对滴灌玉米的生长发育具有明显影响，且控光程度越强对滴灌玉米的生长发育及耗水影响越严重。滴灌玉米株高、茎粗、叶宽均随控光程度的增强而减小，叶长却随控光程度的增强而增长，控光处理后玉米叶片表现为细长生长，但叶片面积仍随控光程度的增强而减小，说明不同程度的控光对滴灌玉米的生长特性都有抑制作用，弱光不利于滴灌玉米的生长。同一控光条件下，玉米各生长指标均随灌水量的增大而增大，在正常光照条件下，灌水量对玉米生长的促进作用较大，控光条件下，玉米生长特性随灌水量的增大变化较小。这是由于正常光照条件下，玉米生长旺盛，耗水量大，对水的需求也就大，随着灌水量的增大，滴灌玉米的生长特性对灌水量的响应也大；控光条件下，由于弱光对玉米生长的抑制，玉米生长较差，耗水量有所减小，且控光降低了玉米棵间蒸发，土壤含水了较正常光照条件下较大，因此控光条件下灌水量对玉米生长特性的影响相比正常光照下较小，由此可得通过调节灌水量来调节弱光对滴灌玉米造成

的影响是行不通的。

由于玉米株高、茎粗、叶面积能一定程度反映玉米生长状况，玉米的生长状况决定了其干物质累积量的大小，所以不同控光与灌水对滴灌玉米干物质的累积量的影响基本和对生长特性的变化规律一致，但不同生育期阶段控光对玉米干物质累积量的影响有所不同，表现为全生育期控光>抽雄吐丝期控光>灌浆至完熟期控光，总体而言灌浆期以后弱光对玉米的生长影响相对较小。

作物耗水规律对对农业生产实践具有重要意义。通过不同灌水量、不同控光程度和不同生育期阶段控光对玉米耗水规律影响的研究，研究表明灌水量对滴灌玉米的耗水量影响显著 ($P<0.05$)，灌水量越大玉米耗水量越大，控光处理可以减小玉米耗水量，L1控光处理较正常光照处理滴灌玉米全生育期耗水量减少21.59~42.45 mm，L2控光处理较正常光照处理滴灌玉米全生育期耗水量减少39.64~64.16 mm，L3控光处理较正常光照处理滴灌玉米全生育期耗水量减少58.99~89.00 mm。可见控光处理能适当减少滴灌玉米耗水量且控光程度越大耗水量降低越多。

产量的大小直接影响经济收入的多少，高出产多收入是农业种植的目标，本文研究表明，增加灌水量有助于产量的提高，但增加灌水量会减小作物的灌溉水利用效率，控光处理后可以减小玉米的耗水量，本试验控光条件下不同灌水量对玉米产量的影响不显著，因此要得出控光条件下滴灌玉米的最佳灌水量还需进一步研究。尽管控光可降低滴灌玉米耗水量，但控光后产量均有不同程度的减少，从不同生育期时段控光处理可以看出，灌浆期至完熟期控光对产量的影响最小。

第六章 结论与展望

6.1 结论

本试验在兵团灌溉中心试验站开展，供试品种为新疆主品种“新玉9号”，进行大田小区试验，本试验研究了不同灌水量（W1: 3000 m³/hm²、W2: 23750 m³/hm²、W3: 4500 m³/hm²、W4: 5250 m³/hm²），不同控光程度（L1: 20%遮光度、L2: 50%遮光度、L3: 70%遮光度），不同生育期阶段控光（F1: 全生育期控光、F2: 抽雄吐丝期控光、F3: 灌浆至完熟期控光），三因素对玉米生长特性及耗水规律的影响，根据试验数据分析得到以下结论：

(1) 控光处理对滴灌玉米生理指标的影响，控光处理后叶绿素的相对含量SPAD增加，当恢复正常光照后叶片叶绿素相对含量SPAD值开始降低，至正常水平范围内趋于稳定。控光处理后玉米叶片的荧光参数 $\Phi PSII$ 、 F_v/F_m 和 qP 均随控光强度的增强而增大，说明弱光促使玉米光合能力提高，提高对光能的利用，表明玉米对弱光照射有一定的适应性。控光后玉米叶片非光化学猝灭系数 NPQ 减小，且随控光程度的增大降低程度越大， NPQ 的减小说明控光提高了玉米的光能利用效率。

(2) 控光后W2L2、W2L3和W2L4处理田间小环境气温较W2L1处理日平均气温分别降低了3%、8.3%、15.3%，控光条件下土壤温度日变化幅度相对平缓，控光后只有10 cm深处土壤温度日变化明显，且相对于正常光照下10 cm处土壤温度的变幅也大大减弱，20 cm以下深处更是日变化微弱，控光使得田间土壤温度变化较缓和，温度日突变不明显。控光处理后，土壤温度平均降低了2~4 ℃，与正常光照处理差异极显著（ $P<0.01$ ），控光各处理土壤平均温差0.8 ℃左右，控光程度越大，土壤温度日变化越小，土壤含水率越大，土壤日平均温度越小。灌水前后土壤温度变化剧烈，灌水前一天和后一天温差在4 ℃左右。

(3) 不同灌水量条件下，玉米全生育期0~60 cm深的土壤平均温度变化在7月之前有微升趋势，同一灌水量条件下，控光与不控光处理之间0~60 cm深土壤平均温差可达到1.8~2.9 ℃，各控光处理之间土壤温差不大，各处理平均土壤温差为0.6 ℃左右，灌水量对土壤0~30 cm深处的温度影响较大，随着灌水量的增大，土壤温度对气温的响应程度降低，土壤含水率与土壤温度呈负相关。

(4) 不同处理滴灌玉米在不同生育期的耗水量表现为，抽雄吐丝期>拔节期>灌浆期>苗期>完熟期，在玉米整个生育期中，拔节期和抽雄吐丝期耗水量达到较高水平，在苗期和完熟期作物耗水量均较低。耗水量随灌水量的增大而增大，随控光程度的增大而减小。不同灌水条件下L1控光处理较正常光照处理耗水量降低了21.59~42.45 mm，L2控光处理较正常光照处理耗水量降低了39.64~64.16 mm，L3控光处理较正常光照处理耗水量降低了58.99~89.00 mm。

(5) 不同控光与灌水对滴灌玉米生长特性的影响为，灌水量的增加促进玉米的增长，随灌水量的增加玉米株高、茎粗等各生长指标及产量也不同程度的增加，但随着控光

程度的增强灌水对玉米生长发育的影响有所减弱,不同生育期阶段控光对玉米的影响程度表现为全生育期控光>抽雄吐丝期控光>灌浆至完熟期控光。在正常光照处理W2灌水水平下玉米的产量最高,最高可达8740 kg/hm²,全生育期控光处理较正常光照处理减产19.6~79.5%,抽雄吐丝期控光处理较正常光照处理减产32.6~87.8%,灌浆至完熟期控光处理较正常光照处理减产27~46.7%,不同控光程度与不同时段控光对玉米生长和产量均有影响,全生育期控光和抽雄吐丝期控光对产量影响最显著,灌浆至完熟期控光对产量影响相对较小。

6.2 展望

本文基于大田小区实验,通过对实验数据分析,探究了不同灌水量、不同控光程度、不同生育期阶段的控光,对滴灌玉米生长特性、光合特性、玉米耗水规律、土壤水温的变化及产量的影响,为高效节水灌溉提供一定的理论基础,通过灌水与控光对玉米的协同调控,来实现光照不足对玉米生长及产量造成的影响。要实现灌水与控光对玉米的协同调控还需大量的试验研究,本文对此研究还远远不足。因此,对后期的研究有以下展望:

(1) 由于时间因素,本研究仅做了一年数据,为了试验数据与试验结果更可靠,还需增加试验年限。

(2) 通过本文研究表明,控光条件下灌水量对玉米生长及产量影响不大,所以后期研究应考虑是否降低灌溉定额,重设灌水梯度,研究控光条件下灌水量对玉米生长及产量的具体影响程度。

(3) 为研究不同生育期时段对玉米生长的影响,应设置更加均匀,密度更大的控光时段,以期实现灌水与控光对玉米生长耗水的协同调控。

(4) 本文控光处理设置均为全天遮光,为探究光照对玉米影响的日变化,后续需增设一天不同时间段的控光处理,研究日光照变化对玉米的影响,以期对玉米生长的精细调控。

参考文献

- [1] 王秀琴, 傅玮东, 段维, 等. 新疆太阳高度和辐射能分布特征研究[J]. 中国农学通报, 2015, 031(33): 261-268.
- [2] 刘佳, 何清, 刘蕊, 等. 新疆太阳辐射特征及其太阳能资源状况[J]. 干旱气象, 2008, 26(04): 61-66.
- [3] 冯刚, 李卫华, 韩宇, 等. 新疆太阳能资源及区划[J]. 可再生能源, 2010, 28(03): 133-139.
- [4] 彭冬梅, 陈鹏翔, 张旭, 等. 基于卫星遥感的新疆地表太阳总辐射估算[J]. 干旱气象, 2019, 037(02): 322-330.
- [5] Powles, S B. Photoinhibition of Photosynthesis Induced by Visible Light[J]. 1984, 35(01): 15-44.
- [6] Long S P, Humphries S, Falkowski P G. Photoinhibition of Photosynthesis in Nature[J]. 1994, 45(01): 633-662.
- [7] 许大全, 张玉忠. 植物光合作用的光抑制[J]. 植物生理学报, 1992, 28(04): 237-243.
- [8] 赵爽, 王琦, 李艳红, 等. 植物生理与分子生物学[J]. 植物生理学报, 2007, 43(02): 384-390.
- [9] 马瑛. 新疆高效节水灌溉面积发展现状分析[J]. 新疆水利, 2016, (05): 14-17.
- [10] 王振华, 杨培岭, 郑旭荣. 膜下滴灌系统不同应用年限棉田根区盐分变化及适耕性[J]. 农业工程学报, 2014, 30(04): 98-107.
- [11] 王树圆. 玉米在我国畜牧业中的地位和作用[J]. 中国农业信息, 2014, (4S): 252-252.
- [12] 潘校成. 玉米高产种植技术及推广的重要意义[J]. 农业开发与装备, 2019, 206(02): 173-181.
- [13] 王会肖, 刘昌明. 作物光合、蒸腾与水分高效利用的试验研究[J]. 应用生态学报, 2003, 14(10): 1632-1636.
- [14] Suyker A E, Verma S B. Interannual water vapor and energy exchange in an irrigated maize-based agroecosystem[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2008, 148(03): 0-427.
- [15] 孟凯, 张兴义. 东北北部黑土区玉米耗水特征的分析[J]. 玉米科学, 1996, (03): 66-67.
- [16] 曹永强, 张亭亭, 常静, 等. 辽西北玉米耗水特征及其与降水和气温的关系[J]. 水利水电科技进步, 2014, 34(3): 7-11.
- [17] Kang S, Gu B, Du T, et al. Crop coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration of winter wheat and maize in a semi-humid region[J]. Agricultural Water Management, 2003, 59(03): 239 - 254.
- [18] 翟超, 周和平, 赵健, 等. 北疆膜下滴灌玉米年际需水量及耗水规律[J]. 中国农业科学, 2017, 50(14): 2769-2780.
- [19] 寇明蕾, 王密侠, 周富彦, 等. 水分胁迫对夏玉米耗水规律及生长发育的影响[J]. 节水灌溉, 2008, (11): 21-24.
- [20] 曹雪松, 李和平, 郑和祥, 等. 不同灌水量对饲料玉米耗水特性和生物量的影响[J]. 节水灌溉, 2016, (01): 16-22.
- [21] 刘玉洁, 李援农, 潘韬, 等. 不同灌溉制度对覆膜春玉米的耗水规律及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(06): 67-72.
- [22] 路振广, 邱新强, 杨静敬, 等. 不同灌水定额条件下夏玉米生长发育及耗水特性分析[J]. 节水灌溉, 2012, (12): 46-50.
- [23] 曹云者. 夏玉米需水及耗水规律的研究[J]. 华北农学报, 2003, 18(2): 47-50.
- [24] 李凤英, 黄占斌. 夏玉米水分利用效率的时空变化规律研究[J]. 西北植物学报, 2000, 20(6): 1010-1015.
- [25] 宋常吉, 郑旭荣, 王振华, 等. 北疆滴灌复播青贮玉米耗水规律初步研究[J]. 节水灌溉, 2012, (8): 19-22.
- [26] 李涛, 白静. 大田玉米膜下滴灌推广应用研究[J]. 节水灌溉, 2012, (09): 34-40.

- [27] 李全起. 不同种植模式下冬小麦夏玉米耗水特性研究[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2006.
- [28] 邱新强, 路振广, 张玉顺, 等. 不同生育时期干旱对夏玉米耗水及水分利用效率的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(27): 68-75.
- [29] 吕佳雯. 耕作及覆膜方式对高产春玉米耗水规律及水分利用的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2013.
- [30] 刘琦. 利用 AquaCrop 模型模拟覆膜春玉米耗水和产量[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015.
- [31] 汪顺生 王康三. 沟灌种植下秸秆覆盖对夏玉米耗水特性及产量的影响[J]. 河南农业科学, 2016, (07): 18-23.
- [32] 刘战东, 肖俊夫, 南纪琴, 等. 种植密度对夏玉米形态指标、耗水量及产量的影响[J]. 节水灌溉, 2010, (09): 12-18.
- [33] Li F M, Wang P, Wang J, et al. Effects of irrigation before sowing and plastic film mulching on yield and water uptake of spring wheat in semiarid Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Management, 2004, 67(02): 77-88.
- [34] 李栋浩, 姜雪连, 佟玲, 等. 种植密度对制种玉米根冠生长及耗水量的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2014, (12): 1091-1097.
- [35] 胡铁民, 栾元利, 王增丽, 等. 覆膜畦灌条件下制种玉米需水规律及优化灌溉制度研究[J]. 中国农村水利水电, 2016, (06): 19-22.
- [36] 李强, 王琦, 张恩, 等. 生物可降解地膜覆盖对干旱灌区玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2016, 30(09): 155-159.
- [37] 张喜英, 陈素英, 裴冬, 等. 秸秆覆盖下的夏玉米蒸散、水分利用效率和作物系数的变化[J]. 地理科学进展, 2002, 21(06): 583-592.
- [38] 王同朝, 李小艳, 李仟, 等. 秸秆覆盖和土壤水分互作对夏玉米水分利用效率及产量的影响[J]. 河南农业大学学报, 2014, 48(03): 280-287.
- [39] 王罕博, 龚道枝, 梅旭荣, 等. 覆膜和露地旱作春玉米生长与蒸散动态比较[J]. 农业工程学报, 2012, 28(22): 88-94.
- [40] 何增国, 杨慧林, 黄少学, 等. 不同覆膜方式对玉米产量和节水保墒的影响[J]. 土壤与作物, 2017, (02): 113-118.
- [41] 王磊, 樊廷录, 赵刚, 等. 地膜覆盖对不同株型春玉米产量和水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(01): 16-20.
- [42] Li Y S, Wu L-H, Zhao L-M, et al. Influence of continuous plastic film mulching on yield, water use efficiency and soil properties of rice fields under non-flooding condition[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 93(02): 370-378.
- [43] 刘祖贵, 陈金平, 段爱旺, 等. 夏玉米叶片生理特性与生态因子间关系的研究[J]. 杂粮作物, 2006, 26(04): 288-292.
- [44] 张丛志, 张佳宝, 赵炳梓, 等. 作物对水分胁迫的响应及水分利用效率的研究进展[J]. 节水灌溉, 2007, (05): 1-6.
- [45] 郭晓维, 赵春江, 康书江, 等. 水分对冬小麦形态、生理特性及产量的影响[J]. 华北农学报, 2000, 15(04): 40-44.
- [46] 陈倩倩, 范阳阳, 郝影宾, 等. 不同土壤水分含量对玉米气孔发育过程和蒸腾耗水量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(03): 75-79.
- [47] 董平国, 王增丽, 温广贵, 等. 不同灌溉制度对制种玉米产量和阶段耗水量的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2014, 32(09): 822-828.
- [48] 连彩云, 马忠明, 曹诗瑜, 等. 有限供水对河西绿洲灌区玉米耗水量及产量的影响[J]. 中国农村

- 水利水电,2013, 3(01): 55-60.
- [49] 王海瑞, 吕志远, 汤鹏程, 等. 喷灌条件下不同灌溉施肥对玉米耗水和产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(003): 72-77.
- [50] 汪顺生, 刘东鑫, 王康三, 等. 不同沟灌方式对夏玉米耗水特性及产量影响的模糊综合评判[J]. 农业工程学报, 2015, 31(24): 89-94.
- [51] Potter M J. Treeshelters improve survival and increase early growth rates[J]. Journal of Forestry, 1988, 86(8): 39-41.
- [52] Frearon K, Weiss N D. Improved growth rates with tree shelters[J]. Quart J For, 1987, 81(3): 184-187.
- [53] M Antonieta Nunes, J D Cochicho Ramalho, M Adelaide Dias. Effect of Nitrogen Supply on the Photosynthetic Performance of Leaves from Coffee Plants Exposed to Bright Light[J]. Journal of Experimental Botany, 1993, 44(44): 893 - 899.
- [54] 张婷婷, 蒋明, 张宋智, 等. 补光对几种针叶树幼苗生长影响试验研究[J]. 甘肃林业科技, 2011, 36 (02): 22-24.
- [55] 范燕萍, 余让才, 郭志华, 等. 遮荫对匙叶天南星生长及光合特性的影响[J]. 园艺学报, 1998, 25 (03): 63-67.
- [56] 闫晓花. 补光时间及光质对温室黄瓜幼苗生长及光合特性的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016.
- [57] 崔晓辉. LED 补光对薄皮甜瓜幼苗生长及果实品质的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2017.
- [58] 韩金星, 董坤, 韩金酉, 等. 补光对日光温室草莓植株长势及产量品质的影响[J]. 中国农业信息, 2016, 20(10): 123-124.
- [59] Frearson K, D W N. Improved growth rates with tree shelters[J]. Quart J For, 1987, 81(3): 184-187.
- [60] Pérez J, Kliewer W M. Effect of shading on bud necrosis and bud fruitfulness of Thompson Seedless grapevines[J]. American Journal of Enology & Viticulture, 1990, 41(2): 168-175.
- [61] Claudia González-Salvatierra, Ernesto Iván Badano, Joel Flores, et al. Shade shelters increase survival and photosynthetic performance of oak transplants at abandoned fields in semi-arid climates[J]. Journal of Forestry Research, 2013, 24(01): 23-28.
- [62] 梁文斌, 聂东伶, 吴思政, 等. 遮荫对短梗大参苗木光合作用及生长的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 34(02): 413-419.
- [63] 孙欣欣. 遮荫对胡桃楸和紫椴苗木形态和生理的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2013.
- [64] 罗宁. 不同遮荫强度对几种苗木生长的影响[J]. 林业调查规划, 2006, (05): 25-27.
- [65] 徐玉梅, 张劲峰, 景跃波, 等. 不同遮荫度对云南红豆杉苗木生长量影响试验研究[J]. 林业调查规划, 2010, (02): 32-35.
- [66] 孟鹏. 低养分基质下沙地柏和樟子松苗木对遮荫的响应[J]. 生态学杂志, 2017, 36(11): 3190 - 3198.
- [67] 王沅, 田正国, 邱泽生, 等. 小麦小花发育不同时期遮光对穗粒数的影响[J]. 作物学报, 1981, (03): 157-163.
- [68] 贺明荣, 王振林, 高淑萍, 等. 不同小麦品种千粒重对灌浆期弱光的适应性分析[J]. 作物学报, 2001, 27(05): 640-644.
- [69] 刘贤赵. 土壤水分与遮阴对作物水分利用的影响机理与效应研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2001.
- [70] 李潮海, 赵亚丽, 杨国航, 等. 遮光对不同基因型玉米光合特性的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(06): 1259-1264.
- [71] 张宏宇, 齐华, 谢友荣, 等. 弱光胁迫对不同耐密型玉米茎秆抗倒伏能力及产量的影响[J]. 玉米科学, 2017, 25 (01): 75-81.

- [72] 张吉旺, 董树亭, 王空军, 等. 遮荫对夏玉米产量及生长发育的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(04): 657-662.
- [73] 张烈. 玉米不同基因型耐密、耐阴、耐瘠特性及遗传相关研究[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2001.
- [74] 张振贤, 郭延奎, 邹琦, 等. 遮荫对生姜叶片显微结构及叶绿体超微结构的影响[J]. 园艺学报, 1999, 26(02): 96-100.
- [75] 张吉旺, 吴宏霞, 董树亭, 等. 遮荫对夏玉米产量和品质的影响[J]. 玉米科学, 2009, (05): 130 - 135.
- [76] 李潮海, 栾丽敏, 王群, 等. 苗期遮光及光照转换对不同玉米杂交种光合效率的影响[J]. 作物学报, 2005, 31(03): 381-385.
- [77] 贾士芳, 李从锋, 董树亭. 弱光胁迫影响夏玉米光合效率的生理机制初探[J]. 植物生态学报, 2010, 034(12): 1439-1447.
- [78] 崔海岩, 靳立斌, 李波. 遮荫对夏玉米茎秆形态结构和倒伏的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(17): 3497-3505.
- [79] 张洪昌, 巩春霞. 玉米科学施肥[J]. 科学种养, 2018, 152(08): 36-38.
- [80] 陈祥, 同延安, 杨倩. 氮磷钾平衡施肥对夏玉米产量及养分吸收和累积的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2008, (06): 23-26.
- [81] 张阿宏, 齐孟文, 张晔晖, 等. 调制叶绿素荧光动力学参数及其计量关系的意义和公理化讨论[J]. 核农学报, 2008, 22(06): 909-912.
- [82] BilgerW, BjörkmanO, 1990. Photosynth. Res. Res, 25: 173-185.
- [83] GentyB, BriantaisJ-M, BakerNR, 1989. Biochim. Biophys. Acta. 900: 87-92.
- [84] 胡阳, 李洁, 高静, 等. 光强和光质对植物生长发育的影响[J]. 内蒙古农业大学学报, 2009, 30(04): 296-303.
- [85] 张云, 夏国华, 马凯, 等. 遮荫对莖叶紫金牛光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J]. 应用生态学报, 2014, 25(07): 1940-1948.
- [86] 史振声. 遮荫胁迫对不同耐阴性玉米叶绿素含量的影响[J]. 玉米科学, 2013, 21(04): 55-63.
- [87] 师生波, 张怀刚, 师瑞, 等. 青藏高原春小麦叶片光合作用的光抑制及 PSII 反应中心光化学效率的恢复分析[J]. 植物生态学报, 2014, 038(04): 375-386.
- [88] 王一, 张霞, 杨文钰, 等. 不同生育时期遮荫对大豆叶片光合和叶绿素荧光特性的影响[J]. 中国农业科学, 2016, 049(11): 2072-2081.
- [89] 陈梅, 唐运来. 低温胁迫对玉米幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响[J]. 内蒙古农业大学学报, 2012, 33(03): 28-32.
- [90] 吴亚男. 遮荫对春玉米物质生产及产量形成的影响[J]. 玉米科学, 2015, 23(01): 97-102.
- [91] 贾士芳, 王空军, 张吉旺, 等. 弱光胁迫对玉米产量及光合特性的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(11): 2456-2461.
- [92] 李彩斌, 郭华春. 耐弱光基因型马铃薯在遮荫条件下的光合和荧光特性分析[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(08): 1181-1189.
- [93] 赵引, 毛晓敏, 段萌, 等. 覆膜和灌水量对农田水热动态和制种玉米生长的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49(08): 275-284.
- [94] 王军, 李久生, 栗岩峰, 等. 滴灌玉米根系生长动态对灌水量响应的试验研究[J]. 排灌机械工程学报, 2018, 36(10): 925-930.
- [95] 张治, 钟瑞森, 胡和平, 等. 新疆膜下滴灌棉田生育期地温变化规律[J]. 农业工程学报, 2011, 9(01): 44-51.

- [96] 杨雅红. 土壤温度的日变化及影响因子分析[J]. 土壤, 2016, 48(3): 581-587.
- [97] Li R, Hou X, Jia Z, et al. Effects on soil temperature, moisture, and maize yield of cultivation with ridge and furrow mulching in the rainfed area of the Loess Plateau, China[J]. Agricultural Water Management, 2013, 116(1): 101-109.
- [98] Zhao H, Wang R Y, Ma B L, et al. Ridge-furrow with full plastic film mulching improves water use efficiency and tuber yields of potato in a semiarid rainfed ecosystem[J]. Field Crops Research, 2014, 161: 137-148.
- [99] 孙贯芳, 杜斌, 任中生, 等. 内蒙古河套灌区不同灌溉模式对土壤温度及盐分的影响[J]. 节水灌溉, 2016, 246(02): 33-36.

致谢

我的硕士生涯已至谢幕时刻，回首大学生活，百感交集，但心中最多的还是感谢。

时光匆匆如流水，转眼便是大学毕业时节，从2017年入学开始，到现在研究生生涯即将结束，三年的学习之路转眼而逝，三年说长不长，说短不短，但总体来说这三年是精彩的，在学习生活中有开心，有艰辛、有挫折与磨难也有不如意，但在导师、同学们的帮助与关心下，这三年是快乐的，在此毕业之际，谨向所有关心、帮助、指导我的人表示最诚挚的感谢与最美好的祝愿。

首先感谢我的导师王振华教授，感谢王老师三年来对我的关心与教导，感谢王老师对我研究方向的确定，试验方案的指导，试验工作开展的支持以及小论文、大论文的悉心指导与修改。三年来，导师悉心的指导与教诲使我不仅学到了丰富知识，还学到了很多做人做事的道理，使我受益匪浅，在此，特向我敬爱的导师表示衷心的感谢与祝福。

感谢我的爸爸妈妈，为我读书升学费去多少心血，为我操劳熬过多少不眠之夜，如今已是年迈白发，焉得谖草，言树之背，养育之恩，无以回报，你们永远健康快乐是我最大的心愿。

同时还要感谢团队李文昊师哥，从入学以来对我学习生活等方面的帮助。在试验期间，特别要感谢一起在试验站做过实验的小伙伴杨文杰、贾浩、贾哲诚，我们一起度过了一段难忘的时光，同时还要感谢侯裕生师哥、张继峯师哥、窦允清师哥、赵娣师姐、王凤娇师姐在我试验方案、试验开展中的指导。感谢同门蒋宇新、赵志华、王逍遥在三年来的关怀，三年一起快乐的玩耍。同时还要感谢团队里其他师哥师姐、师弟师妹在三年内的帮助与陪伴，三年来和你们一起度过了一段难忘的时光，很高兴也很快乐，在这里祝愿大家学业有成、前程似锦、生活愉快。

任作利

2020年于新疆·石河子

作者简介

任作利，男性，生于1993年1月，籍贯甘肃礼县。2016年毕业于兰州交通大学博文学院水利水电工程专业，获工学学士学位。2017年考入石河子大学水利建筑工程学院攻读研究生，专业为水利工程，研究方向为节水灌溉理论与技术。


在学期间主要参加的研究项目

1. 第十二师滴灌葡萄作物(kc)值及灌溉制度研(BTJSSY-201812)
2. 第十二师滴灌葡萄作物(kc)值及灌溉制度研(BTJSSY-201912)
3. 第十二师灌溉水利用系数测算项目

在学期间发表的文章

1. 任作利, 王振华, 李文昊, 张继峰, 杨文杰, 贾哲诚, 丁怀军, 李宁. 不同控光与灌水量对滴灌玉米田间土壤温度变化规律的影响[J]. 西北农业学报, 2019, 28(06): 961-971.
2. 任作利, 王振华, 张继峰, 杨文杰, 陈潇洁, 贾哲诚. 弱光胁迫对滴灌玉米叶绿素荧光及生长特性的影响[J]. 玉米科学.

石河子大学硕士研究生学位论文 导师评阅表

研究生姓名	任作利	学制	三年
专业	水利工程	研究方向	节水灌溉理论与技术
<p>学术评语:</p> <p>论文试验在新疆生产建设兵团灌溉中心试验站进行,通过大田小区试验,研究了不同控光程度、不同阶段控光 and 不同灌水量因素对滴灌玉米生长生理特性及耗水规律的影响。通过对滴灌玉米土壤水分、温度、玉米的生长特性(株高、茎粗、叶面积、产量及其产量构成)、光合特性(玉米叶片叶绿素相对含量、叶绿素荧光参数)的检测分析,来说明不同控光与灌水对滴灌玉米生长与耗水的影响。</p> <p>论文紧紧抓住了新疆独特的气候条件,新疆位于我国西北边陲,地处亚欧大陆腹地,属于典型的干旱性气候,有丰厚的光热资源,日照时间较长,积温多,中国日照时长最多的地方之一,常年干旱少雨,结合这个大背景,论文以新疆滴灌玉米为研究对象,结合国内外大量文献,开展了控光与灌水对滴灌玉米生长与耗水的影响研究,论文选题具有现实研究背景,结合生产实际,研究目的明确,研究内容充实,论证充分,论文结构基本合理,表达基本准确,数据分析严谨,试验结果对滴灌玉米高效节水灌溉提供一定的理论指导,可为大田玉米在新疆光照过强的条件下制定处合理的光照强度与灌水量,为精确灌溉制定精细的灌溉制度提供参考价值。</p> <p style="text-align: right; margin-top: 20px;">指导教师签字: </p> <p style="text-align: right; margin-top: 10px;">2020年6月2日</p>			