

分类号：
学 号：20212012002

密 级：公开
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



节水减氮对斜坡滴灌春小麦产量和水氮利用效率的影响

学 位 申 请 人	王子健
指 导 教 师	姜东
申请学位门类级别	农学硕士
学 科、专 业 名 称	作物学
研 究 方 向	作物栽培与耕作学
所 在 学 院	农学院

中国·新疆·石河子
2024年5月

分类号：
学 号：20212012002

密 级：公开
单位代码：10759

石河子大学

硕士学位论文



节水减氮对斜坡滴灌春小麦产量和水氮利用效率的影响

学 位 申 请 人	王子健
指 导 教 师	姜东
申请学位门类级别	农学硕士
学 科、专 业 名 称	作物学
研 究 方 向	作物栽培与耕作学
所 在 学 院	农学院

中国·新疆·石河子
2024年5月

**Effects of water and nitrogen reduction on yield and water and
nitrogen use efficiency of slope drip irrigation spring wheat**

A Dissertation Submitted to

Shihezi University

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

Agriculture

By

Wang Zi-jian

(Crop Yield Theory and Cultivation Technology)

Dissertation Supervisor: Prof. Jiang Dong

May, 2024

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

本人所呈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：王子健 时间：2024年5月20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：王子健 时间：2024年5月20日

导师签名：姜东 时间：2024年5月20日

摘要

【目的】扩大管行比（增加单条滴灌带供应小麦的行数）是新疆滴灌小麦节本生产的重要措施，但由于水分横向运移距离受限，导致大管行比滴灌模式籽粒产量和水分利用效率（WUE）行间异质性增加，远行小麦产量显著降低。当前，构建斜坡滴灌小麦种植模式（将滴灌带置于坡顶，小麦行种植于坡面）不仅被发现可有效促进水分横向运移距离，而且还可能存在进一步节水节氮的潜能。因此，本研究针对斜坡大管行比滴灌模式，开展其最适宜水肥供应的研究，研究结果将为新疆滴灌春小麦高效可持续生产提供技术和理论支撑。

【方法】2021-2023 年在新疆石河子大学教学实验农场进行田间试验，试验品种选择新春 44 号（前期试验筛选出的高产品种）。试验共设置两种斜坡大管行比滴灌模式，分别为 TR6H 和 TR8H（一条滴灌带分别供应 6 行和 8 行小麦，斜坡坡面斜度为 15 度，小麦行距为 10 cm，边行间距 25 cm）；设置 W3（4500 m³ ha⁻¹，为常规灌溉量）、W2（4050 m³ ha⁻¹）、W1（3600 m³ ha⁻¹）三个灌水额度；N3（300 kg N ha⁻¹，为常规施氮量）、N2（270 kg N ha⁻¹）、N1（240 kg N ha⁻¹）、N0（0 kg N ha⁻¹）四个施氮量水平。试验采用以种植模式为主裂区，氮为次裂区，水为副区的裂-裂区试验设计。通过研究分析不同处理下籽粒产量构成，干物质积累与转运，土壤水分时空分布规律，水氮吸收利用效率，筛选出最优的水氮施用量组合，并揭示其机理。

【结果】（1）籽粒产量主要与穗数（相关性 0.86-0.88）和穗粒数（相关性 0.72-0.83）相关，与千粒重关系较小。TR6H 的 W3N2 处理在三年内产量比 W3N3（对照）高出 2.1%-6.3%，TR8H 在 2021 与 2023 年（2022 年无显著差异）的 W3N2 处理比 W3N3 高出 4.2%和 2.2%。最高产的水氮组合分别为：TR6H 模式灌溉定额 4316 m³ ha⁻¹，施氮量 282 kg ha⁻¹；TR8H 模式灌溉定额 4500 m³ ha⁻¹，施氮量 277 kg ha⁻¹。（2）TR6H 的 W3N2、W2N3、W2N2 与 TR8H 的 W3N2 成穗率高，无效分蘖少，在开花期保持了较高的叶面积指数（LAI）和净光合速率（P_n），并保持了较高的干物质积累速率、花后干物质同化量和贡献率，最终干物质积累量保持了较高的水平。（3）W1 灌水额度水分可运移至 TR6H 最远行（27.5 cm），W2 灌水额度水分可运移至 TR8H 最远行（37.5 cm），斜坡模式下近滴灌带行土壤水在灌水后对远行土壤水有补偿作用，在此基础上增加灌水量可延长土壤持续湿润时间，提高产量，但灌水量大的处理土壤耗水量增加，使其灌溉水分利用效率降低了 8.5-14.2%。TR6H 的 W3N2、W2N3、W2N2 与 TR8H 的 W3N2 处理相较于 W3N3 处理提高了水分利用效率（3.2%-10.6%）和氮肥农学利用效率（11.3%-32.8%），并在 TR6H 模式灌溉定额 3967-4169 m³ ha⁻¹，施氮量 273-283 kg ha⁻¹；TR8H 模式灌溉定额 4427-4500 m³ ha⁻¹，施氮量 268-278 kg ha⁻¹ 时达到最佳水氮利用效率。

【结论】（1）适度节水减氮可提高产量、水氮利用效率 and 经济效益。适当减氮后（270 kg N ha⁻¹）无效分蘖减少，并保持了较高的叶面积指数和净光合速率导致干物质积累速率提高，同时斜坡模式下适当减水后（4050 m³ ha⁻¹）水分仍能运移至最外行，花后干物质积累时间无显著降低。（2）综

合考虑产量、水氮利用效率、经济效益，拟合模型，推荐最佳水氮施量分别为：TR6H 模式灌溉定额 $4243 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ，施氮量 279 kg ha^{-1} ；TR8H 模式灌溉定额 $4500 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ ，施氮量 274 kg ha^{-1} 。

关键词：春小麦；斜坡滴灌；节水减氮；干物质；经济效益

Abstract

【 Objective 】 Expanding the pipe-to-row ratio (increasing the number of rows of wheat supplied by a single drip irrigation belt) is an important measure for the cost-saving production of drip irrigation wheat in Xinjiang, but due to the limited lateral transport distance of water, the grain yield and water use efficiency (WUE) heterogeneity between rows in the drip irrigation mode of large pipe row ratio increased, and the yield of long-distance wheat was significantly reduced. At present, the construction of a slope drip irrigation wheat planting model (placing the drip irrigation belt at the top of the slope and planting the wheat row on the slope surface) has been found to not only effectively promote the lateral transport distance of water, but also may have the potential to further save water and nitrogen. Therefore, this study carried out a study on the most suitable water and fertilizer supply for the drip irrigation mode of slope large pipe row ratio, and the results of this study will provide technical and theoretical support for the efficient and sustainable production of drip irrigation spring wheat in Xinjiang.

【 Method 】 From 2021 to 2023, field trials will be conducted in the Teaching Experimental Farm of Shihezi University, Xinjiang, and the test variety will be Xinchun 44 (a high-yielding variety screened in the early test). In the experiment, two drip irrigation modes were set up, which were TR6H and TR8H (a drip irrigation belt supplied 6 rows and 8 rows of wheat respectively, with a slope slope of 15 degrees, a wheat row spacing of 10 cm, and a side row spacing of 25 cm), and three irrigation rates of W3 (4500 m³ ha⁻¹ for conventional irrigation amount), W2 (4050 m³ ha⁻¹) and W1 (3600 m³ ha⁻¹). N3 (300 kg N ha⁻¹ for conventional nitrogen application rate), N2 (270 kg N ha⁻¹), N1 (240 kg N ha⁻¹) and N0 (0 kg N ha⁻¹). The experimental design of split-split zone with planting mode as the main split, nitrogen as the secondary split, and water as the secondary splitting zone was adopted. By studying and analyzing the composition of grain yield, dry matter accumulation and transport, the spatial and temporal distribution of soil moisture, and the absorption and use efficiency of water and nitrogen, the optimal combination of water and nitrogen application rates was screened out, and reveal its mechanism.

【 Result 】 (1) Grain yield was mainly related to spike number (correlation 0.86-0.88) and grain number per spike (correlation 0.72-0.83), but less relationship with 1000-grain weight. The W3N2 treatment of TR6H yielded 2.1%-6.3% higher yields than W3N3 (control) over three years, and the W3N2 treatment of TR8H in 2021 and 2023 (no significant difference in 2022) was 4.2% and 2.2% higher than that of W3N3. The highest yield of water and nitrogen combinations was 4316 m³ ha⁻¹ and 282 kg ha⁻¹ in TR6H and 4500 m³ ha⁻¹ and 277 kg ha⁻¹ in TR8H. (2) The W3N2, W2N3, W2N2 and TR8H of TR6H had high spike formation rate and less invalid tillering, and maintained a high leaf area index (LAI) and net photosynthetic rate (P_n) at the flowering stage, as well as a high dry matter accumulation rate, dry matter assimilation amount and

contribution rate after anthesis, and finally the dry matter accumulation amount maintained a high level. (3) The water of W1 irrigation quota can be moved to the farthest distance of TR6H (27.5 cm), and the water of W2 irrigation quota can be moved to the farthest line of TR8H (37.5 cm), and the soil water of the near-drip irrigation belt in the slope mode has a compensatory effect on the long-distance soil water after irrigation, and increasing the irrigation amount on this basis can prolong the continuous wetting time of the soil and improve the yield, but the water consumption of the soil treated with large irrigation amount increases, which reduces the irrigation water use efficiency by 8.5-14.2%. Compared with W3N3 treatment, W3N2, W2N3, W2N2 and TR8H treatments of TR6H increased water use efficiency (3.2%-10.6%) and nitrogen fertilizer agronomic use efficiency (11.3%-32.8%), and the irrigation rate was 3967-4169 m³ ha⁻¹ and the nitrogen application rate was 273-283 kg ha⁻¹ in TR6H mode. The best water and nitrogen use efficiency was achieved when the irrigation quota was 4427-4500 m³ ha⁻¹ and the nitrogen application rate was 268-278 kg ha⁻¹.

【 Conclusion 】 (1) Moderate water conservation and nitrogen reduction can improve yield, water and nitrogen use efficiency and economic benefits. The ineffective tillering of 270 kg N ha⁻¹ decreased, and the leaf area index and net photosynthetic rate were maintained high, resulting in an increase in the dry matter accumulation rate, while the water could still be transported to the outermost row after appropriate water reduction (4050 m³ ha⁻¹) in the slope mode, and the dry matter accumulation time after flowering was not significantly reduced. (2) Considering the yield, water and nitrogen use efficiency, and economic benefits, the optimal water and nitrogen application rates were recommended as follows: the irrigation quota of TR6H mode was 4243 m³ ha⁻¹, and the nitrogen application rate was 279 kg ha⁻¹. The irrigation rate of TR8H mode was 4500 m³ ha⁻¹, and the nitrogen application rate was 274 kg ha⁻¹.

Key words: Spring wheat; Slope drip irrigation; Water saving and nitrogen reduction; Dry matter; Profit

目录

摘要	I
Abstract	III
目录	V
缩略词表	VII
第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景与意义	1
1.2 国内外研究进展	2
1.2.1 新疆滴灌小麦种植模式的研究进展	2
1.2.2 水和氮对小麦生长发育与产量的调控	3
1.2.3 节水减氮的可行性分析	5
1.3 研究内容与技术路线	6
1.3.1 研究内容	6
1.3.2 技术路线	7
第 2 章 材料与方 法	8
2.1 试验区概况	8
2.2 试验设计	9
2.3 测定项目与方法	11
2.3.1 产量、产量构成和效益	11
2.3.2 植株生长特性指标	12
2.3.3 水氮利用效率	13
2.4 统计分析 & 数据处理	14
第 3 章 结果与分析	15
3.1 节水减氮对产量与产量构成的影响	15
3.1.1 节水减氮对产量的影响	15
3.1.2 节水减氮肥对产量构成的影响	17
3.1.3 基于产量的最佳水氮施量组合	20
3.2 节水减氮对小麦生长特性的影响	22
3.2.1 节水减氮对小麦干物质积累动态的影响	22
3.2.2 节水减氮对干物质转运的影响	27
3.2.3 节水减氮对小麦茎蘖动态与开花期叶面积指数的影响	29
3.2.4 节水减氮对小麦开花期光合速率的影响	33

3.3 水氮利用效率的变化特征	34
3.3.1 节水减氮对土壤水分运移的影响	34
3.3.2 节水减氮对水分利用效率的影响	37
3.3.3 节水减氮对氮素利用效率的影响	39
3.3.4 基于水、氮利用效率的最佳水氮施量组合	41
3.4 节水减氮对经济效益的影响	42
3.4.1 节水减氮对经济效益的影响	42
3.4.2 基于经济效益的最佳水氮施量组合	44
第 4 章 讨论	45
4.1 节水减氮对斜坡滴灌模式下小麦产量及其构成与效益的影响	45
4.2 节水减氮对斜坡滴灌模式下小麦生长特性的影响	46
4.3 节水减氮对斜坡滴灌模式对土壤水分运移及水氮利用效率的影响	48
第 5 章 结论、创新点与展望	50
5.1 结论	50
5.2 论文创新点	51
5.3 展望	51
参考文献	52
附录	59
致谢	62
作者简介	63
导师评阅表	64

缩略词表

英文缩写	英文全称	中文名称
AEN	agronomic efficiency of nitrogen fertilizer	氮肥农学利用效率
CR-DAA	contribution rate of dry matter accumulation after anthesis	花后干物质生产贡献率
DAA	dry matter accumulation after anthesis	花后干物质生产量
ETa	actual evapotranspiration	蒸散量
IWUE	irrigation water use efficiency	灌溉水分利用效率
LAI	leaf area index	叶面积指数
PFPN	partial factor productivity from applied N	氮肥偏生产力
P _n	net-photosynthetic rate	净光合速率
TE-DAB	translocation efficiency of dry matter accumulation before anthesis	花前干物质转运率
TR4	one drip tube serve four rows	1管4模式
TR6	one drip tube serve six rows	1管6模式
TR8	one drip tube serve eight rows	1管8模式
WUE	water use efficiency	水分利用效率

第 1 章 绪论

1.1 研究背景与意义

滴灌技术具有较高水肥利用效率，具有节水节肥的优点（王冀川等，2011），是新疆小麦生产发展的方向。滴灌能随时迅速将水肥输送到植物根系附近，并最大限度的降低水肥在运输过程中的蒸散和渗漏（Skaggs et al., 2010）。然而，新疆目前主推的“1管4”（TR4）滴灌模式毛管用量大，成本偏高。若不计人工成本，滴灌毛管投入成本占到整个物化成本的30%以上（Lv et al., 2019）。前期，吕钊彦（2017）提出通过扩大管行比，即将TR4扩大到“一管6行”（TR6）和“一管8行”（TR8），以此来减少滴灌带投入量，节约生产成本的技术途径。结果显示TR6和TR8显著节约了滴灌带投入成本，但由于大管行比滴灌模式下水分横向运移距离增加，距滴灌带最远行小麦难以获得充足的水肥供应，最终导致TR6和TR8籽粒产量显著降低（张静悟等，2021）。

构建斜坡大管行比模式被发现可以有效促进水分横向运移，优化产量结构。为促进水分横向运移距离，课题组前期构建了斜坡大管行比滴灌种植模式，分别为TR6H和TR8H（滴灌带位于坡顶，小麦位于坡面，一条滴灌带分别供应6行和8行小麦，斜坡坡面斜度为15度，小麦行距为10 cm，边行间距25 cm）（详见图2-2）。前期研究发现，斜坡种植模式能有效促进水肥横向运移，发挥潜在的节水、节肥，优化产量结构的作用。初步试验数据显示，相较于常规大管行比模式TR6和TR8，斜坡种植模式TR6H和TR8H产量能够分别提高4.68%-7.70%和3.86%-7.14%。

斜坡大管行比滴灌模式理论上具有进一步节水节肥的潜能。在滴灌条件下，肥料是随水施入的，因此斜坡大管行比模式在促进水分横向运移的同时，也有利于肥料向远行的供应，这一机制事实上也为进一步节水节氮提供了依据。此外斜坡大管行比滴灌模式是新型滴灌模式，因此其最适宜的水氮策略尚不明确，现阶段仍无法为该种植模式的节本高效生产提高进一步的理论指导，推动其可持续生产。本试验拟通过设置不同减水处理和减氮处理，深入研究该种植模式产量最优、水肥利用率最优、经济效益最优的水氮组合处理，为斜坡大管行比模式的栽培策略的进一步优化提供指导。

综上所述，斜坡模式改变了土壤水氮运移，可以节水减氮，但其水氮策略尚不明确。本试验拟通过设置不同节水减氮处理，通过田间试验结合室内分析实验，揭示不同处理下产量构成，干物质积累与转运，水氮利用效率、土壤水分时空分布规律，筛选出最优水氮施用组合，并阐明内在机制机理，从而为促进新疆滴灌小麦生产的稳产

高效与可持续发展提供重要的理论和实践指导。

1.2 国内外研究进展

1.2.1 新疆滴灌小麦种植模式的研究进展

1.2.1.1 传统种植模式的发展及其存在的问题

滴灌是新疆小麦生产的发展方向（王海琪等，2022）。常规漫灌不仅耗水量大且水分利用效率低（张静悟等，2021），而滴灌作为一种先进的节水灌溉技术，与漫灌相比不仅可以保证更高的作物产量，还可以节约灌溉用水，提高水肥利用效率（Jha et al., 2019），减少温室气体（ N_2O ）排放（Wang et al., 2016; Tian et al., 2017）。其原因是滴灌系统会以极低的速率向根系区域提供水肥，最大限度的降低水肥在运输过程中的蒸散和渗漏（Skaggs et al., 2010），并改变土壤中水分、养分和根系的分布（Li et al., 2018），以促进小麦对水分和营养物质的吸收（Jha et al., 2017）。例如滴灌小麦在深层土壤中具有更大的根系密度，可促进小麦在深层土壤对水氮的吸收和利用（Li et al., 2018），这些研究显示了滴灌在农业可持续发展方面的巨大潜力。

传统滴灌模式难以平衡滴灌成本与产量之间的关系。滴灌小麦为窄行距种植，需采用“1管多”的种植模式（杨建平等，2019），目前新疆小麦主推的是“1管4”滴灌模式（TR4）。同等灌水量同等行间距的情况下，种植小麦行数越多，产量越低（Chen et al., 2015; Lv et al., 2019）。相比于“1管5”、“1管6”和“1管8”滴灌模式，“1管4”滴灌模式下小麦的群体结构最好，干物质积累及产量均具有明显优势（张娜等，2013；张静悟等，2021）。但TR4毛管用量大，成本偏高。若不计人工成本，滴灌毛管投入成本占到整个物化成本的30%以上（Lv et al., 2019）。因此探索低滴灌成本下稳产的滴灌模式，是提高新疆地区小麦种植经济效益的有效途径。

1.2.1.2 滴灌种植模式的改进优化研究现状

为节省滴灌毛管进而提高经济效益，前人不断尝试优化滴灌小麦大管行比种植模式。首先是寻找滴灌模式下适合大管行比种植的小麦品种。于2017-2019年对“1管6”和“1管8”滴灌模式进行了品种筛选和滴灌模式比较试验，发现在“1管6”滴灌模式下，小麦籽粒产量降幅较小并且新春44号籽粒产量高于新春22号（杨建平等，2021；王玉兰等，2020）因此新春44号（张静悟等，2021）和“1管6”滴灌模式更适于新疆滴灌小麦的生产（张龙龙等，2021）。其次是Lv等（2019）人对大管行比滴灌小麦的各行产量进行研究，发现远行植株因常常处于干旱胁迫下，导致远行小麦籽粒产量降低。基于此结果Wan等（2022a）人于2019和2020年对大管行比滴灌模式下小麦的行间距和

边行间距进行了优化。如图 1-1 所示, 研究结果表明在行距为 10 cm 的窄行模式下经济效益最好, 主要在较远的行中表现出较好的土壤水分状况, 并且远行小麦在最远的小麦行中表现出明显的边际效应。从提高产量、水分利用效率和经济效益的角度考虑, 建议在扩大管行比的小麦滴灌系统中采用窄行间距与缩短边行间距相结合的方式。但扩大管行比后单条滴灌毛管出水量增多, 靠近滴灌带的第一行因产生了渍水现象导致减产 (万文亮, 2023)。

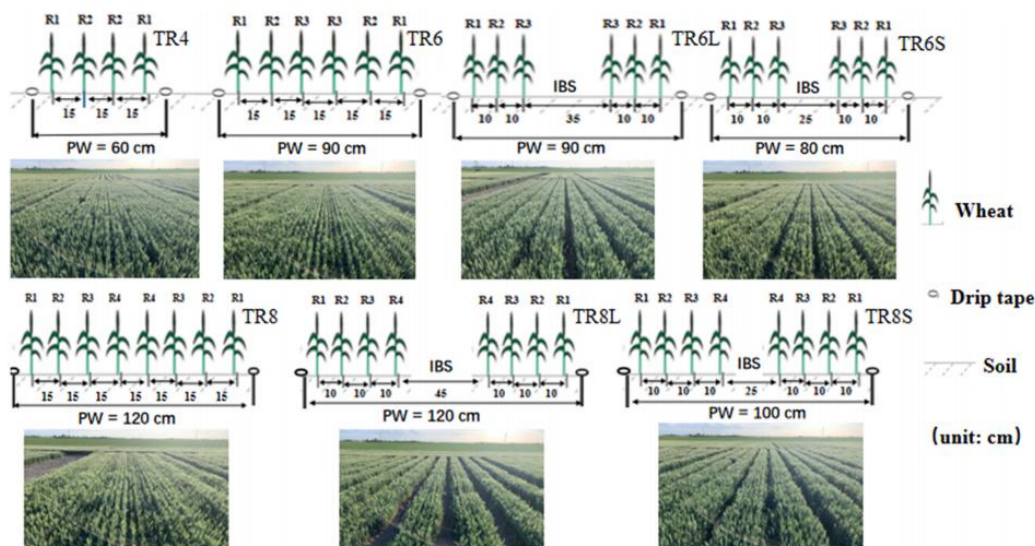


图 1-1 不同滴灌模式示意图 (Wan et al., 2022a)

Figure 1-1 Schematic diagram of different drip irrigation modes

注: “PW”表示播幅, “IBS”表示边行间距, “TR”表示一条滴灌带负责的小麦行数。

Note: “PW” means wide pattern, “IBS” means wide pattern spacing, and “TR” means the number of rows of wheat with drip irrigation tubes.

为解决近行小麦渍水问题并促进灌溉水向远行土壤运移, 进一步减小行间籽粒产量空间差异。基于万文亮 (2023) 的研究结果, 课题组在缩短行间距与边行间距的基础上进行整地起垄, 采用斜坡种植模式来增加水分浸润垂直方向动力和水平扩散效率, 进而加速近行水氮运移并促使远行小麦得以获取更多的水氮。有关斜坡模式的进一步优化正在进行, 目前得出的结论为相较于 10 度坡, 15 度坡更有利于小麦的水分运移, 消减籽粒产量空间差异。新模式下水分可快速运移至边行, 并且通过稳定性 ^{13}C 同位素研究发现大管行比种植模式下的小麦水分利用效率普遍高于传统“1 管 4”滴灌种植模式 (Wan et al., 2022b)。

1.2.2 水和氮对小麦生长发育与产量的调控

1.2.2.1 水分对小麦生长发育产量的调控

作物若长时间处于缺水条件, 其正常的生长发育可能会受到抑制 (冯树林等,

2020)。研究发现水分胁迫促使小麦株高降低, 茎秆变细, 叶面积指数减少, 对光的截获量降低 (Stone et al., 2006)。而小麦灌浆期间绿叶的光合作用是小麦籽粒产量形成的重要因素 (Djanaguiraman et al., 2020)。前人在对春小麦水分调控的试验中发现, 正常供水到重度水分胁迫下春小麦旗叶的叶绿素含量、光合速率逐渐降低 (姜小凤等, 2013)。渍水和旱作处理下, 会缩短作物叶片的光合功能期, 光合速率大幅降低, 加速植株衰老, 进而直接导致作物干物质积累量和产量的大幅下降 (Kazuma et al., 2022; X Song et al., 2020)。但也有研究指出, 花前轻度干旱锻炼可提高旗叶光合能力并维持较高的叶面积从而可以提高花后物质积累 (Cui et al., 2015)。

干物质是光合产物积累的最高形式, 而干物质的积累与转运是获得产量的基础 (刘强等, 2021)。研究表明随着灌水量的增加, 成熟期小麦在穗部的干物质积累量下降, 向营养器官分配的比例增大 (董剑等, 2021)。增加花后干物质积累量与花前干物质转运量, 会增加收获指数 (赵红玉等, 2021)。想要获得高产就必须保持较高的花后干物质生产量 (王玉杰等, 2011)。而 Dong 等 (2011) 研究表明, 在节水条件下, 适当的干旱胁迫可以促进干物质积累。同一品种在不同灌水处理条件下, 其干物质积累向籽粒的转运量表现为与春不灌水和春灌 2 水相比, 春灌 1 水显著提高了 6.80%、29.89% (张胜全等, 2009)。因此, 适量的灌溉可减少同化物在营养器官中的滞留, 促进干物质积转运 (米慧聪等, 2009)。

水分亏缺比其他任何因素都更容易损坏作物的生长, 造成产量的降低 (Wu et al., 2018)。马耕等 (2015) 研究发现, 与全生育期不灌水相比较, 灌 1 水和灌 2 水的小麦籽粒产量分别提高了 16.6% 和 25.6%。干旱在小麦生育前期主要影响小麦的有效分蘖数, 导致小麦单位面积穗数下降, 进而造成不同程度的产量降低; 在生育中期会严重影响穗的分化, 造成穗粒数明显减少 (徐建文等, 2014); 在生育后期影响小麦籽粒最大灌浆速率, 使小麦千粒重降低 (宋霄君等, 2017)。在此时适当灌溉可以促进光合同化物形成, 有利于籽粒灌浆, 提高产量 (宜丽宏等, 2017)。

然而过量灌溉则对产量的提高无益 (陈锐等, 2016)。杨传邦等 (2017) 进行了不同土层测墒补灌处理, 发现对 0-40 cm 土层进行补灌可显著提高籽粒产量和水分利用效率, 但当土层加深至 60 cm 和 80 cm 时, 籽粒产量并无显著增加, 水分利用效率显著降低。此外, 灌水过多还会导致前期营养生长过旺, 增加后期倒伏的风险, 最终籽粒产量降低, 因此灌水过多或过少均不利于小麦籽粒产量形成 (王冀川等, 2011)。

1.2.2.2 氮素对小麦生长发育和产量的调控

氮素对小麦生长发育和农业生产起着至关重要的作用 (Wang et al., 2017)。氮素胁迫下, 叶绿体片层间隙增大, 结构疏松, 叶绿体膨胀, 从而破坏叶绿体的超微结构, 导致叶片捕光能力减弱从而影响光合作用 (郭卫东等, 2009)。Ru 等 (2022) 人认为

在花后，中、高施氮肥较低施提高了叶片光合速率、和瞬时水分利用效率，低施氮处理显著降低了这些参数。此外，缺氮条件下小麦株高、叶面积、根体积、光合速率均降低，根长、根表面积、根冠比均增加，缺氮改变了小麦植株表型（Liu et al., 2020）。

一般增施氮对小麦的生长有积极作用，通常表现增施氮肥后可保持较高的叶面积指数和光合速率，获得较高的干物质积累量（李孟洁等，2015）。Effah 等（2022）研究结果也表明，施氮显著增加了所有生长阶段的光合能力，较高的施氮量保持了较高的光合能力，产生了较高的干物质积累量。但增加施氮量并不总是能够增加产量，当施氮量过多时，氮素积累量反而会下降（Zhang et al., 2018）。NO₃-N 是作物吸收氮素的主要形态（Tang et al., 2013），如不能得到及时有效的同化和利用，反而会影响植株的氮素同化效率和生物量的形成，显著降低作物氮素利用效率（Koprivova et al., 2014）。Zheng 等（2020）研究认为与施氮 240 kg N ha⁻¹ 和 109 kg N ha⁻¹ 相比，施氮量为 180 kg N ha⁻¹ 提高了作物器官氮素转运效率，降低了 60-180 cm 土层土壤硝态氮残留量，对籽粒产量和籽粒蛋白产量无显著降低作用，但提高了氮素利用效率和氮肥偏生产力。

适宜的氮素供应可改善光合特性进而影响氮素利用率，与其他施氮量相比，中施氮量产生的叶绿素含量、光合速率、干物质和谷物产量最高（Effah et al., 2022; Zheng et al., 2021）。此外适宜的氮素还可以通过影响小麦叶面积指数来改善冠层光能截获能力（Acreche et al., 2009），而优质的群体冠层结构可以提高开花期干物质积累量和产量（Meng et al., 2013）。

1.2.3 节水减氮的可行性分析

1.2.3.1 水氮互作效应的理论基础

土壤水分作为氮的载体，对氮的迁移和吸收举足轻重，这使得土壤水氮紧密复杂地联系在一起，其相互作用共同影响作物生长和发育（Gonzalez et al., 2010）。Kunrath 等（2018）人认为水分亏缺对作物氮吸收的影响可分为两个方面：（1）作物生物量的减少导致氮吸收的直接减少；（2）土壤水分亏缺降低土壤有效氮含量，这间接导致氮吸收减少。即水分亏缺会影响土壤有效氮含量，也会影响氮素通过扩散和质流向根系迁移的速率，进而减少根际氮含量，因此适量的水分可增加土壤有效氮含量，有利于根系氮吸收。并且在氮循环的所有阶段，水分都会影响氮的化学形态（Ashraf et al., 2016）。而增施氮肥可增加土壤有效氮含量，促进作物根系及地上部生长，使植株茎叶增长，进而提高作物对水分的吸收、转运和利用，提高 WUE。具体如下：（1）增施氮肥可增加作物产量，使 WUE 明显提高；（2）增施氮肥可增加植株叶面积，减少无效蒸腾，从而提高 WUE；（3）增施氮肥可促进根系生长和吸水能力，提高植物的