

分类号：  
学 号：20222010036

密 级：公 开  
单位代码：10759

# 石河子大学

## 硕 士 学 位 论 文



### 加气滴灌及黄腐酸施加对玉米生长及根区土壤 通气性的影响研究

学 位 申 请 人	郭牧婵
指 导 教 师	王振华 教授
申请学位门类级别	工学硕士
学 科、专 业 名 称	农业工程
研 究 方 向	农业水土工程
所 在 学 院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子  
2025年5月

分类号：  
学 号：20222010036

密 级：公 开  
单位代码：10759

# 石河子大学

## 硕 士 学 位 论 文



### 加气滴灌及黄腐酸施加对玉米生长及根区土壤 通气性的影响研究

学 位 申 请 人	郭牧婵
指 导 教 师	王振华 教授
申请学位门类级别	工学硕士
学 科、专 业 名 称	农业工程
研 究 方 向	农业水土工程
所 在 学 院	水利建筑工程学院

中国·新疆·石河子  
2025年5月

**Effects of aerated drip irrigation and fulvic acid application on maize  
growth and root zone soil aeration**

A Dissertation Submitted to

**Shihezi University**

In Partial Fulfillment of the Requirements

for the Degree of

**Master of Engineering**

By

**Guo mu-chan**

**(Agricultural Engineering)**

Dissertation Supervisor: Prof. Wang Zhen-hua

May, 2025

# 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：郭发婵

时间：2025年5月18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：郭发婵

时间：2025年5月18日

导师签名：



时间：2025年5月18日

## 摘要

**目的:** 为改善新疆地区膜下滴灌造成的玉米根区土壤通气性下降的问题, 并促进玉米增产, 本研究进行了两年大田试验, 旨在探究加气灌溉及黄腐酸施加对膜下滴灌玉米根区土壤通气性的影响, 揭示玉米生理生长、干物质积累、产量形成以及农田碳排放对加气灌溉及黄腐酸施加的响应特征, 为新疆地区的玉米生产提供参考, 为节水灌溉农业的可持续发展提供科学指导和理论依据。

**方法:** 以“丰玉 33”作为玉米供试品种, 在新疆进行为期两年(2023, 2024)的完全随机区组试验。试验设置 2 种灌水方式: 不加气常规膜下滴灌(A0)、加气膜下滴灌(A1)和 4 个黄腐酸施用水平: 不施加黄腐酸(F0)、占尿素施用量 0.25%(F1)、占尿素施用量 0.50%(F2)和占尿素施用量 0.75%(F3), 共 8 个处理, 每个处理设置 3 次重复。

**结果:** (1) 加气滴灌和黄腐酸施加均可显著提高土壤氧气含量、温度和呼吸速率, 降低土壤 pH。然而, 随黄腐酸施加量增加, 土壤氧气含量、温度和呼吸速率均先升后降, 在占尿素施用量 0.50%时达到峰值。其中, 在不施加黄腐酸的条件下, 相较于不加气滴灌, 土壤氧气含量、温度和呼吸速率在加气条件下分别显著升高 15.35%~16.60%、5.23%~7.30%和 54.44%~56.84%; 在不加气条件下, 相较于不施加黄腐酸, 在施加占尿素施用量 0.25%、0.50%和 0.75%的黄腐酸时, 三者分别显著升高 1.81%~3.78%、5.44%~8.84%、2.65%~6.06%(土壤氧气含量), 3.54%~3.99%、8.31%~9.39%、5.10%~5.92%(土壤温度)和 23.16%~26.09%、49.18%~56.26%、45.33%~49.74%(土壤呼吸速率)。值得注意的是, 加气滴灌及黄腐酸施加的联合施用对土壤氧气含量、温度和呼吸速率的提升效果以及对土壤 pH 的降低效果更佳。利用熵权-TOPSIS 法对土壤通气性进行综合评价, 研究认为在加气滴灌的条件下施加占尿素施用量 0.50%的黄腐酸表现最优。

(2) 加气滴灌和黄腐酸施加均可显著增加玉米株高、茎粗、叶面积指数和干物质积累量, 且有利于玉米光合特性的增强。然而, 随黄腐酸施加量增加, 上述指标均先升后降, 在占尿素施用量 0.50%时达到峰值。其中, 在不施加黄腐酸的条件下, 相较于不加气滴灌, 玉米地上部干物质积累量在加气条件下显著增加了 7.05%~28.45%; 在不加气条件下, 相较于不施加黄腐酸, 在施加占尿素施用量 0.25%、0.50%和 0.75%的黄腐酸时, 玉米地上部干物质积累量分别提高了 1.93%~53.77%、10.40%~40.04%和 6.17%~30.55%。值得注意的是, 加气滴灌及黄腐酸施加的联合施用对玉米生长的促进效果更佳, 较仅加气和仅施加黄腐酸分别显著提高了 3.57%~37.06%和 7.11%~27.05%。

(3) 加气滴灌和黄腐酸施加均可显著提升玉米产, 但随黄腐酸施加量增加, 玉米产量先升后降, 在占尿素施用量 0.50%时达到峰值。相较于不加气滴灌, 玉米产量在加气条件下显著增加了 16.97%~34.11%; 在不加气条件下, 相较于不施加黄腐酸, 在施加占尿素施用量 0.25%、0.50%和 0.75%的黄腐酸时, 产量分别显著增加了 9.04%~15.31%、29.65%~35.06%和 19.86%~23.97%。值得注意的是, 加气滴灌及黄腐酸施加的联合施用对玉米产量的提升效果更佳, 较仅加气和仅施加黄腐酸分别

显著提高了 9.57%~40.50%和 19.00%~27.45%。两年间,玉米产量均在加气且施加占尿素施用量 0.50% 的黄腐酸时最高,分别为 17423.51 kg·hm<sup>-2</sup> (2023) 和 20922.86 kg·hm<sup>-2</sup> (2024)。土壤碳排放效率在两年间均随加气措施的采取和黄腐酸施加量的增多而降低,但加气滴灌及黄腐酸施加造成的碳排放效率的降幅远小于其产生的产量增幅。通过对各处理进行综合评价,研究认为在在加气滴灌的条件下施加占尿素施用量 0.50%的黄腐酸为本研究的最优处理。

**结论:** 加气滴灌及黄腐酸施加可以有效提升玉米根区土壤通气性,促进玉米植株生长,提升玉米光合特性并促进玉米干物质积累,从而提升玉米产量,但同时也促进了玉米农田的土壤碳排放。然而,在加气滴灌及黄腐酸施加下,碳排放效率的降幅远小于产量增幅。综合考虑加气滴灌及黄腐酸施加对玉米根区通气性、玉米生理生长、玉米产量和玉米农田土壤碳排放的影响,研究认为加气滴灌和黄腐酸的联合施用对于实现经济效益与环境保护的协同方面有较高的实践意义,具有较好的经济—环境协调性。在加气滴灌的条件下施加占尿素施用量 0.50%的黄腐酸为本研究中的最优处理。

**关键词:** 玉米; 膜下滴灌; 加气灌溉; 黄腐酸; 籽粒产量

## Abstract

**Object:** In order to improve the poor soil aeration in maize root zone caused by mulched drip irrigation and promote maize growth and yield, a two-year field experiment was conducted in this study for investigating the effects of aerated irrigation and fulvic acid application on soil aeration in the maize root zone drip irrigation, and revealing the response characteristics of maize physiological growth, dry matter accumulation, yield, and on-farm carbon emission to aerated irrigation and fulvic acid application, so as to provide a reference for the production of maize under mulched drip irrigation in Xinjiang, and to provide a scientific guideline and a theoretical basis for the sustainable development of water-saving irrigated agriculture.

**Methods:** Taking “Fengyu 33” as the maize test variety, a field experiment with a complete randomized block experimental design was conducted in Xinjiang, China, in 2023 and 2024, involving two irrigation methods (A0: unaerated conventional drip irrigation, A1: aerated drip irrigation) alongside four fulvic acid application rates (F0: 0.00% of urea weight, F1: 0.25% of urea weight, F2: 0.50% of urea weight, F3: 0.75% of urea weight). Consequently, a total of 8 treatments were set up with 3 replications for each.

**Results:** (1) Both aerated drip irrigation and fulvic acid application can significantly increase soil oxygen content, temperature and respiration rate, and reduce soil pH. However, with the increase of fulvic acid application, the soil oxygen content, temperature and respiration rate all increased first and then decreased, reaching a peak at the fulvic acid level of the 0.50% of urea weight. With no application of fulvic acid, the soil oxygen content, temperature and respiration rate significantly increased by 15.35%~16.60%, 5.23%~7.30% and 54.44%~56.84% respectively under aerated drip irrigation compared with those under non-aerated drip irrigation. Under non-aerated drip irrigation, compared with no application of fulvic acid, when fulvic acid accounted for 0.25%, 0.50% and 0.75% of the urea application rate was applied, the soil oxygen content, temperature and respiration rate significantly increased by 1.81%~3.78%, 5.44%~8.84%, 2.65%~6.06% (soil oxygen content), 3.54%~3.99%, 8.31%~9.39%, 5.10%~5.92% (soil temperature) and 23.16%~26.09%, 49.18%~56.26%, 45.33%~49.74% (soil respiration rate), respectively. It is worth noting that the coupling of aerated drip irrigation and fulvic acid has a better effect on increasing soil oxygen content, temperature and respiration rate, as well as reducing soil pH. The entropy weight-TOPSIS method was used to conduct a comprehensive evaluation of soil aeration, suggesting that fulvic acid at 0.50% of the urea application rate under aerated drip irrigation was the optimal in improving soil aeration.

(2) Both aerated drip irrigation and fulvic acid application can significantly increase the plant height, stem diameter, leaf area index and dry matter accumulation of maize, and are conducive to enhancing the photosynthetic characteristics of maize. However, with the increase of fulvic acid application, the above

indicators all increased first and then decreased, reaching a peak at the fulvic acid level of the 0.50% of urea weight. Among them, with no application of fulvic acid, the maize dry matter accumulation in the upper part significantly increased by 7.05%~28.45% under aerated drip irrigation compared with that under non-aerated drip irrigation. Under non-aerated drip irrigation, compared with no application of fulvic acid, when fulvic acid accounted for 0.25%, 0.50% and 0.75% of the urea application rate was applied, the maize dry matter accumulation in the upper part significantly increased by 1.93%~53.77%, 10.40%~40.04% and 6.17%~30.55%, respectively. It is worth noting that the coupling of aerated drip irrigation and fulvic acid has a better effect on promoting maize growth, which is significantly increased by 3.57%~37.06% and 7.11%~27.05% respectively compared with aerated drip irrigation only and fulvic acid application only.

(3) Both aerated drip irrigation and fulvic acid application can significantly increase maize yield. However, with the increase of fulvic acid application, the maize yield increased first and then decreased, reaching a peak at the fulvic acid level of the 0.50% of urea weight. With no application of fulvic acid, the maize yield significantly increased by 16.97%~34.11% under aerated drip irrigation compared with that under non-aerated drip irrigation. Under non-aerated drip irrigation, compared with no application of fulvic acid, when fulvic acid accounted for 0.25%, 0.50% and 0.75% of the urea application rate was applied, the maize yield significantly increased by 9.04%~15.31%, 29.65%~35.06% and 19.86%~23.97% respectively. It is worth noting that the coupling of aerated drip irrigation and fulvic acid has a better effect on increasing maize yield, which is significantly increased by 9.57%~40.50% and 19.00%~27.45% respectively compared with aerated drip irrigation only and fulvic acid application only. During the two years, the highest maize yield was observed at the fulvic acid level of the 0.50% of urea weight under aerated drip irrigation, which were 17423.51 kg·hm<sup>-1</sup> (2023) and 20922.86 kg·hm<sup>-1</sup> (2024), respectively. The soil carbon emission efficiency over the two years decreased with the adoption of aerating and the increasing application of fulvic acid. However, the decrease in carbon emission efficiency caused by aerated drip irrigation and the application of fulvic acid was much smaller than the increase in yield they produced. Through a comprehensive evaluation of all treatments, the study concluded that fulvic acid at 0.50% of the urea application rate under aerated drip irrigation was the optimal treatment for this study.

**Conclusion:** Aerated drip irrigation and fulvic acid application can effectively improve the soil aeration in maize root zone, promote the growth and development of maize plant, enhance the photosynthetic characteristics and promote the dry matter accumulation of maize, thereby increasing maize yield and promoting soil carbon emission. However, under the application of aerated drip irrigation and fulvic acid, the reduction of carbon emission efficiency is much smaller than the increase of yield. Considering the effects of aerated drip irrigation and fulvic acid application on the aeration of maize root zone, physiological growth of maize, maize yield and soil carbon emission of maize farmland, the study concluded that the combined

application of aerated drip irrigation and fulvic acid has high practical significance in realizing the coordination of economic benefits and environmental protection. Fulvic acid at 0.50% of the urea application rate with aerated drip irrigation was the optimal treatment in this study.

**Key words:** maize; mulched drip irrigation; aerated irrigation; fulvic acid; kernel yield

# 目录

摘要.....	I
Abstract .....	III
第 1 章 绪论.....	1
1.1 研究背景及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	2
1.2.1 加气灌溉方式研究进展.....	2
1.2.2 加气灌溉对土壤通气性及作物生长的影响研究进展.....	3
1.2.3 黄腐酸类肥料研究进展.....	5
1.3 拟解决的关键问题.....	7
1.4 研究内容.....	7
1.5 技术路线.....	8
第 2 章 试验材料与方法.....	10
2.1 试验地区概况.....	10
2.2 试验设计.....	10
2.3 测定项目与方法.....	13
2.3.1 气象数据.....	13
2.3.2 土壤氧气含量.....	13
2.3.3 土壤温度.....	14
2.3.4 土壤呼吸速率及土壤碳排放量.....	14
2.3.5 土壤 pH.....	14
2.3.6 玉米生长指标.....	15
2.3.7 玉米光合指标.....	15
2.3.8 玉米产量及土壤碳排放效率.....	15
2.4 数据处理与分析方法.....	16
第 3 章 加气滴灌及黄腐酸施加对玉米根区土壤通气性的影响.....	17
3.1 加气滴灌及黄腐酸施加对玉米农田土壤氧气含量的影响.....	17
3.2 加气滴灌及黄腐酸施加对玉米农田土壤温度的影响.....	19
3.3 加气滴灌及黄腐酸施加对玉米农田土壤呼吸速率的影响.....	20
3.4 加气滴灌及黄腐酸施加对玉米农田土壤 pH 值的影响.....	22

3.5 加气滴灌及黄腐酸施加对玉米农田土壤通气性的综合评价 .....	24
3.6 讨论 .....	25
3.7 小结 .....	26
第4章 加气滴灌及黄腐酸施加对玉米生理生长的影响 .....	28
4.1 加气滴灌及黄腐酸施加对玉米生长形态指标的影响 .....	28
4.1.1 加气滴灌及黄腐酸施加对玉米株高的影响 .....	28
4.1.2 加气滴灌及黄腐酸施加对玉米茎粗的影响 .....	29
4.1.3 加气滴灌及黄腐酸施加对玉米叶面积指数的影响 .....	31
4.2 加气滴灌及黄腐酸施加对玉米光合特性的影响 .....	32
4.3 加气滴灌及黄腐酸施加对玉米地上部干物质积累量的影响 .....	34
4.4 讨论 .....	36
4.5 小结 .....	37
第5章 加气滴灌及黄腐酸施加对玉米产量及土壤碳排放效率的影响 .....	39
5.1 加气滴灌及黄腐酸施加对玉米农田土壤碳排放量的影响 .....	39
5.2 加气滴灌及黄腐酸施加对玉米产量及农田碳排放效率的影响 .....	41
5.3 玉米农田土壤通气性指标、植株生理生长与玉米产量及碳排放效率间的相关关 系 .....	44
5.4 不同处理的综合评价 .....	45
5.5 讨论 .....	46
5.6 小结 .....	47
第6章 结论与展望 .....	50
6.1 结论 .....	50
6.2 展望 .....	51
参考文献 .....	52
致谢 .....	61
作者简介 .....	62
石河子大学硕士研究生学位论文导师评阅表 .....	63

## 第 1 章 绪论

### 1.1 研究背景及意义

新疆位于中国西北干旱区，光照充足，热量丰富，是我国的农业大省之一。然而，新疆强烈的太阳辐射、巨大的蒸散量和不均衡的水资源分布给当地灌溉农业的可持续发展带来了严峻挑战<sup>[1]</sup>。据统计，2023 年全疆用水总量达 560.61 亿立方米，其中农业用水占比高达 91.10%（510.71 亿立方米）<sup>[2]</sup>。而农田灌溉水有效利用系数仅为 0.581，居全国第 14 位（14/32）<sup>[3]</sup>，表明新疆农业节水仍有较大提升潜力。为了有效减少地表水分蒸发损失，提高灌溉水利用效率，兼具良好节水特性和保墒优势的地膜滴灌<sup>[4-6]</sup>已在新疆得到了广泛应用<sup>[7]</sup>。截至 2020 年，新疆膜下滴灌面积已达 244.94 万公顷<sup>[8]</sup>，已成为全球最大的膜下滴灌集中应用区<sup>[9]</sup>。然而，随着膜下滴灌技术大面积应用的实现，一些问题也逐渐显现。例如，膜下滴灌会阻碍土壤与大气间的气体流通<sup>[10]</sup>，同时滴灌精准灌溉的特点也会挤压作物根区土壤的氧气空间<sup>[11, 12]</sup>，降低土壤通气性，导致作物根区氧气供应不足，引发根际缺氧问题<sup>[13]</sup>，进而抑制作物对土壤水分、养分的吸收利用，最终抑制作物的正常生理功能和产量形成<sup>[14, 15]</sup>。

玉米是我国重要的粮食和饲料作物，对我国粮食业和畜牧业的协调发展有重要意义，在我国已被广泛种植<sup>[16]</sup>。新疆凭借其丰富的光照和热量条件，已经成为我国主要的玉米产区之一。然而，随着人口持续增长、社会经济发展以及全球气候变化加剧，粮食安全问题日益突出，中国乃至全球对玉米产量的需求日益增加，如何最大限度地提升有限的耕地的生产能力成为亟待解决的关键问题<sup>[17]</sup>。基于上述情况，为了适应新疆节水农业的发展需求并满足对玉米产量不断增长的迫切要求，必须采取有效措施缓解膜下滴灌造成的土壤通气性降低的现象，在保障节水效果的同时，优化作物根区土壤环境，维持根系正常生理功能，并提高农田生产潜力。

研究表明，加气滴灌技术可以使灌溉水中的溶解氧含量得到显著提高，并将其与空气同步输送至作物根区附近的土壤，优化土体的固、液、气三相比例，有效改善了作物根区土壤的供氧条件和通气状况<sup>[13]</sup>。这一技术不仅增强了作物根系对土壤养分、水分的吸收能力，还能促进作物自身的新陈代谢以及植株整体的生长发育，最终实现作物增产的目的<sup>[18-20]</sup>。然而，需要注意的是，加气措施主要作用于土壤的物理性质的改良，对土壤的化学性质（特别是土壤养分状况）的影响较为有限。

化肥是保障作物高产的重要物质基础。然而，肆意增加氮肥施用量会导致土壤和水

体污染<sup>[21]</sup>，因此，如何优化施肥成为玉米产量和种植效益提高的关键途径。为了协调玉米增产和农业可持续发展的关系，新型肥料已经成为当前农业科学研究的重点方向。黄腐酸作为一种提取自天然腐殖质中的小分子有机物质，拥有易被植物吸收、对人畜无毒害、环境友好等特点，在农业生产中展现出了广阔的应用前景<sup>[22]</sup>。黄腐酸类肥料是一类新兴的有机肥料，已被证实在促进作物生长，提升作物产量和土壤质量改善等方面有显著成效<sup>[23-25]</sup>。然而，需要注意的是，黄腐酸的施用效果与其施加量密切相关，两者之间并非完全成正比，过多施加反而会降低其促进作用。大量研究表明，对作物生长而言，其施用量存在最佳范围，过量施用会导致黄腐酸的贡献降低<sup>[26,27]</sup>。因此，明确新疆膜下滴灌玉米在加气条件下的最佳黄腐酸施用量，是实现玉米高产的关键性研究工作。

现有研究中，加气灌溉试验多集中于盆栽试验或温室试验，大田试验相对缺乏；针对黄腐酸的研究也大多采用叶面喷施或基施方式，通过滴灌系统随水施肥的研究较少；新疆作为我国重要的玉米产区和典型的半干旱地区，膜下滴灌是当地主要的节水灌溉方式之一，然而，关于该地区膜下滴灌玉米的生长发育情况以及农田土壤通气性对加气灌溉和黄腐酸施加的响应规律的研究仍不足。因此，本研究在新疆以玉米为研究对象开展大田试验，系统考察加气滴灌和黄腐酸施加对玉米生理生长、产量形成以及土壤微环境的影响，探究新疆地区膜下滴灌玉米生理生长、产量及土壤通气性对加气灌溉及黄腐酸施加的响应，旨在为今后新疆地区的膜下滴灌玉米生产提供技术参考，并为节水农业的可持续发展提供科学指导和理论支撑<sup>[28]</sup>。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 加气灌溉方式研究进展

自 20 世纪起<sup>[29]</sup>，大量学者投入加气灌溉研究领域，探索改善土壤通气性的可能性和措施<sup>[30-34]</sup>。大量研究表明，加气灌溉可以有效改善作物根区土壤的气体条件，并会对水、肥、热环境造成一定影响，从而促进作物根系吸水吸肥和植株生长，达到增产提质的效果<sup>[18,35-37]</sup>。随着研究的深入和科学技术的进步，加气灌溉技术经历了从简单到复杂、从粗放到精细的发展过程，目前已存在多种加气灌溉方式，较为主流的有机械加气法、化学加气法和水气结合法。

机械加气法是指将空气与水通过气泵或空气压缩机等机械设备<sup>[38]</sup>充分接触，从而增加水中溶解氧浓度的方法。机械加气法操作简单，对土壤的影响小，但成本较高，维修不便，噪音较大且难以适应小规模农田或复杂地形。

化学加气法是一种通过化学增氧剂（如过氧化氢、过氧化钠、过氧化镁等）与水发

生化学反应产生氧气，从而提高水体中溶氧量的加气方式。化学加气法加气效率高，但某些化学物质（如过氧化氢）具有强氧化性，操作不当可能引发安全问题。另外，化学反应可能产生副产物，影响水质或土壤健康，例如，高浓度的过氧化氢（400 ppm）对土壤微生物有毒，会造成土壤肥力下降<sup>[39-45]</sup>。故化学加气法主要用于水产养殖、污水处理或实验室研究等特殊场景，难以应用于大规模农业灌溉或长期需求。

水气结合法多采用文丘里计或微纳米气泡机，在灌水的同时将空气吸入，与水混合一同输送至灌水点<sup>[46-48]</sup>。微纳米气泡曝气技术是一种新型高效的机械加气方式，利用微纳米气泡发生装置对灌溉的水体进行曝气，迅速提高水体中的氧气的含量。但微纳米气泡机设备成本高、能耗大、维护复杂，适合小规模或高精度需求，但不宜于农业灌溉推广。文丘里加气灌溉方式的工作原理基于文丘里效应，利用压差将空气吸入并与水混合。这种物理过程无需外部能量输入，实现了能量的高效利用。文丘里加气灌溉设备结构简单，造价及运行成本低，维修方便，同时，文丘里加气灌溉适应性强，可以根据实际需求设计不同尺寸的文丘里管，能适应各种规模的灌溉系统，其经济性好、节能环保、维护简单等优点，使其成为农业加气灌溉的主流选择。在实际应用中，文丘里加气灌溉也显现出其在农业增产中的卓越性能。尹晓霞等人的研究<sup>[49]</sup>表明加气灌溉能显著提高温室番茄产量；Bhattarai 等<sup>[39]</sup>研究显示，加气灌溉使番茄开花坐果节位提前并增产 21%，在盐渍土条件下更是增产 38%；Shahzad K 等<sup>[50]</sup>设计并优化了文丘里加气灌溉装置，结果表明加气灌溉可以有效提升土壤通气性并促进作物根系发育。

## 1.2.2 加气灌溉对土壤通气性及作物生长的影响研究进展

### 1.2.2.1 加气灌溉对作物根区土壤通气性的影响

土壤通气性是指土壤与大气之间进行气体交换的能力以及土体内部气体扩散的能力<sup>[51]</sup>，土壤通气性不良会导致作物根际缺氧，抑制作物生长发育，导致作物减产<sup>[52]</sup>。除土壤本身理化性质、气象条件外，土壤的通气性还与灌溉、土壤生物活动等因素有关<sup>[53-55]</sup>。土壤温度、土壤呼吸和土壤氧气含量之间相互影响，是反映土壤通气性的重要指标<sup>[56]</sup>。同时，土壤 pH 与土壤氧化还原电位之间密切相关，两者之间往往成负相关关系<sup>[57-58]</sup>，而土壤氧化还原电位是表征土壤通气性的重要指标<sup>[59]</sup>，土壤通气性越好，土壤氧化还原电位也越大<sup>[60]</sup>，故土壤 pH 也可用于判断的土壤通气性状况。大量研究结果显示加气灌溉可以有效提升作物根区土壤通气性。Bhattarai 等<sup>[61]</sup>研究表明，加气灌溉使土壤中溶解氧含量增大了 50.6%；Chen、王振华等研究者<sup>[13,62]</sup>也发现，加气处理可以显著提高作物根区土壤氧气含量和呼吸速率。同时，李元、Lei 等的研究<sup>[63,64]</sup>显示，加气灌溉改善了土壤水气环境，并促进了土壤微生物的数量和多样性。另外，杨彬、韩美琪等研究

者<sup>[65,66]</sup>发现, 加气灌溉可以显著提升土壤温度。以上研究结果说明加气灌溉可以有效改善土壤气热环境, 提高根区土壤呼吸速率, 从而大大改善根区土壤通气性。

### 1.2.2.2 加气灌溉对作物生理生长的影响

作物地上部植株生长状况与根系生长状态密切相关, 而作物根系的正常发育有赖于良好的土壤氧气环境, 对作物根际进行适量通气增氧, 能有效促进植株地上部分的生长发育<sup>[20]</sup>。赵旭等<sup>[67]</sup>研究发现, 加气灌溉可以显著改善番茄根系通气环境, 提高植株的根系活力和吸收能力; 韩勃<sup>[68]</sup>研究发现, 适量通气不仅可以促进水稻根系生长, 并且可以促进植株分蘖和生物量的积累; 另外有大量研究通过对甜瓜、番茄和黄瓜等进行加气滴灌试验表明, 向植物根部通气后其形态指标变化显著, 株高生长速率提高, 单叶扩展面积增大, 叶绿素含量也相应地提高, 显著促进作物的生长发育, 提高植株的生长速率<sup>[69-73]</sup>。这是因为作物植株生理状况与根系生长状态密切相关。研究表明, 根系缺氧易造成脱落酸、乙醇等植物激素的增加<sup>[74,75]</sup>, 导致叶片气孔关闭, 净光合速率下降, 影响 ATP 的产生, 进而影响作物生长。地下加气滴灌有助于增强有氧呼吸过程, 减弱无氧呼吸过程, 提高作物根系的呼吸速率, 有利于矿质营养的吸收和作物光合特性的提高<sup>[76]</sup>。已有研究证实此观点。李元等<sup>[63]</sup>研究发现加气处理下番茄叶片的净光合速率高于不加气处理; 乔建磊等<sup>[76]</sup>研究发现, 在温室进行蓝莓栽培, 加气滴灌条件下其叶片净光合速率和气孔导度明显增大, 叶片胞间 CO<sub>2</sub> 摩尔分数大幅减小; 吴梅等<sup>[19]</sup>研究发现, 加气滴灌可以显著促进玉米光合作用和干物质质量积累, 玉米植株的生长形态指标也有显著提升。以上研究进展均说明加气滴灌通过对土壤通气性的改良促进了作物根系生长, 从而促进其植株的生理生长, 对作物的生长发育有积极影响。

### 1.2.2.3 加气灌溉对作物产量及农田碳排放的影响

大量研究表明加气灌溉和土壤通气性的改善会显著提升作物产量<sup>[13, 19, 29, 33, 41, 67, 71, 73]</sup>, 也有研究表明, 对于含水率较高的重黏土, 向其中注入空气才可缓解作物由于根部缺氧造成的产量损失<sup>[77]</sup>。这是因为加气改善了土壤氧环境和通气性, 增强了作物根系的有氧呼吸过程, 促进了根系吸水吸肥, 从而提高了作物产量<sup>[68]</sup>。同时, 针对不同土壤质地<sup>[62, 72]</sup>、滴头埋深<sup>[41, 72]</sup>、作物类型<sup>[72, 78]</sup>和灌水水平<sup>[39]</sup>的研究均显示出加气灌溉对作物产量的积极影响。Pendergast 等人的研究<sup>[18]</sup>发现采用掺气 12% 的地下滴灌使鹰嘴豆产量显著提高 10%~27%; Abuarab 等<sup>[42]</sup>研究表明, 加气滴灌下玉米产量提高了 2.5%~12.27%; Li 等<sup>[71]</sup>研究发现曝气灌溉能显著增加番茄的果实数量、宽度和长度、产量、维生素 C 及番茄红素量。以上研究说明, 加气灌溉通过改善土壤—作物根系微环境促进了作物根系活动, 进而提高了作物产量。然而, 作物产量与土壤呼吸强度密切相关<sup>[79]</sup>, 而土壤呼吸

速率直接关系到土壤碳排放量<sup>[80]</sup>,故加气滴灌在改善土壤微环境和促进作物增产的同时,也不可避免地造成了农田碳排放量的增多。吴梅<sup>[81]</sup>研究表明,加气滴灌下玉米生育期内农田碳排放总量较不加气常规滴灌显著提高了 7.30%~12.51%。土壤碳排放是温室气体的重要来源,对地球生态系统和全球气候变化有重要影响<sup>[82]</sup>。因此,在研究加气滴灌对作物产量的影响的同时,必须考虑其对农田碳排放效率的影响,以实现经济效益与环境保护之间的协同高效。

### 1.2.3 黄腐酸类肥料研究进展

化肥是实现作物高产的关键。然而,肆意增加氮肥施用量会导致土壤和水污染<sup>[21]</sup>。我国 2022 年化肥施用强度为 298.80 kg·hm<sup>-2</sup>,是国际公认化肥施用安全标准上限的 1.3 倍<sup>[83]</sup>。化肥能快速为植物生长带来所需养分,但长期或过量施用也会导致土壤板结、土壤肥力下降、增产的效果差等问题,甚至会造成生态污染<sup>[84-88]</sup>。寻求更利于作物吸收利用的、更环境友好的肥料是如今全球相关农业科学家们追求的目标。黄腐酸是一种广泛分布于自然界的<sup>[89]</sup>,由植物残体腐解后得到的天然高分子化合物<sup>[90]</sup>。在农业上,黄腐酸主要具有改良土壤、提高肥效、促进植物生理生长、提高作物产量等效果<sup>[91]</sup>。

#### 1.2.3.1 黄腐酸对土壤理化性状的影响

黄腐酸可以增加土壤的表面积,促进阳离子交换,降低重金属生物有效性,从而达到修复土壤的目的。研究发现,黄腐酸可以改良土壤的团粒结构,改善土壤的通透性和稳定性,提升土壤含氧量<sup>[92]</sup>。另外,施加适量黄腐酸可以改善土壤生物环境,提升微生物群落多样性<sup>[93]</sup>,并提高土壤酶的活性,促进有机物的分解,便于植物的吸收利用<sup>[94]</sup>。同时,黄腐酸可以提高土壤养分含量,减少氮挥发,释放速效磷、速效钾,促进植物对土壤养分的吸收利用<sup>[95]</sup>。另外,黄腐酸的官能团多,既可以与酸结合,又可以与碱结合,故对盐碱地改良以及土壤酸碱度调节有积极作用。研究发现,黄腐酸可以通过改变破坏土壤毛管孔隙降低土壤盐分<sup>[96]</sup>,也可以通过螯合、络合土壤中金属阳离子,吸附盐离子达到降低土壤盐分的目的<sup>[97]</sup>。另外,魏红珍<sup>[98]</sup>研究发现黄腐酸钾可以调节土壤 pH,以促进植物的生长。然而,值得注意的是,过量施加黄腐酸会导致土粒聚合吸水膨胀<sup>[99]</sup>,不利于土壤团粒结构的稳定<sup>[100]</sup>。

#### 1.2.3.2 黄腐酸对作物生长发育及养分吸收的影响

研究表明,黄腐酸可以有效促进作物生长及其对养分的吸收利用,提高肥料利用率<sup>[94,99,101,102]</sup>。一方面,施加黄腐酸可以改善土壤通透性和团粒结构并促进土壤养分释放,利于作物吸水吸肥,促进作物生长和产量形成。另一方面,黄腐酸本身作为一种植物生