

滴灌施肥条件下氮去向及其对土壤环境影响的研究进展

刘瑞, 王星辰, 束良佐*, 檀兴燕, 刘一 (淮北师范大学生命科学学院, 资源植物生物学安徽省重点实验室, 安徽淮北 235000)

摘要 就滴灌施肥条件下不同施肥策略对肥料利用率、气态氮损失及对土壤环境的影响 3 个层次, 根据文献对该领域的成果进行了总结, 并对其发展前景进行了分析。

关键词 滴灌施肥; 水氮耦合; 氮去向; 淋洗; 次生盐渍化

中图分类号 S274.1; Q945.78 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2018)15-0024-04

Research Progress on Nitrogen Fate and Its Effect on Soil Environment under Drip Fertilization

LIU Rui, WANG Xing-chen, SHU Liang-zuo et al (Key Laboratory of Plant Resources and Biology of Anhui Province, School of Life Science, Huaibei Normal University, Huaibei, Anhui 235000)

Abstract According to the literatures existed, this paper summarized the existing achievements of this field and analyzed it's development prospect from three aspects, including the use ratio of fertilizer, the volatilization of gaseous nitrogen, and the influence of the soil environment under the condition of different drip fertilization strategies.

Key words Drip fertilization; Water and nitrogen coupling; Fate of nitrogen; Leaching; Secondary salinization

氮素是作物生长发育过程中所必需的营养元素, 可以显著影响作物产量和品质。土壤中的氮素可以直接被农作物吸收, 也可以无机氮形态或有机结合形态在土壤剖面中残留, 或者通过其他各种途径损失。无机氮素损失的途径主要有气态氮的挥发损失、硝态氮的淋洗、径流、侧渗等^[1], 还有一部分氮素可被农作物直接吸收利用, 这也是氮去向中最为重要的部分。氮肥是世界上施用量较大的肥料之一, 而我国是世界上生产和消费氮肥最多的国家, 氮肥用量超过 2 500 万 t, 占我国化肥总用量的 60%, 占全球氮肥用量的 30%^[2], 但我国氮肥利用率却很低, 据统计当季氮肥利用率仅 30% ~ 35%, 农田氮素损失率达到了 30% ~ 50%, 每年因各种途径导致的氮素损失约 900 万 t, 价值 400 亿元^[3]。而农民为了追求高产, 提高经济效益, 又过量投入氮素, 同时不注意水资源的稀缺性, 盲目进行大水灌溉, 造成水肥资源的大量浪费, 而且土体中残留的过量氮素又随着大水淋洗而下移, 容易对环境造成污染。我国又是一个水资源紧缺、水旱灾害频繁并且水资源利用率低的国家, 但节水意识不强, 农村普遍水资源利用率只有 40% 左右^[4], 为了农业的可持续发展, 应大力发展节水灌溉技术, 以提高作物对水氮资源的利用率。

滴灌技术是在 20 世纪 70 年代得到迅速发展的一种节水灌溉技术, 而滴灌施肥技术的出现使得灌溉和施肥的理论及方法发生革命性的变化, 成为一种全新的灌溉和施肥技术^[5-6]。目前已有很多学者在棉花、玉米等作物上进行了研究和试验。新疆在 1996 年将滴灌技术应用在棉花生产中, 并结合覆膜栽培形成了膜下滴灌技术, 在 2004 年滴灌面积发展到全国的 80% 以上^[7-8]。而对玉米的膜下滴灌研究发现, 膜下滴灌提高了肥料的利用率, 大大降低了田间劳动的劳动量和劳动强度, 节约了地表空间, 提高了土地利用效率, 显

著增加了玉米产量, 并使得土壤生态效益得到改善, 降低了土壤污染^[9]。Papadopoulos^[10]研究表明, 滴灌条件下可以通过不同的施肥方式, 如肥料的种类、水氮比等有效地提高水氮的利用率, 节水节肥, 并可以控制土壤中无机氮的含量, 减少淋洗以减轻对地下水的污染。合理的灌溉施肥策略能显著提高水肥利用率, 在节水节肥的同时增加作物产量。而对滴灌施肥条件下氮去向的规律研究, 有助于了解作物的生长规律并以此作为参考施用氮肥, 提高产量, 减少其对环境的污染。目前, 国内外对滴灌施肥条件下氮素的迁移及其利用率等方面进行了较为全面的研究, 笔者在此对其进行了综述, 以期今后的相关研究提供基础。

1 滴灌施肥对氮吸收利用的影响

氮素在作物生产发育中占有非常重要的地位, 是土壤肥力中最为重要的因素, 因此提高氮素的利用率是农业生产中的重要管理目标^[11]。滴灌施肥技术将作物生产中的灌溉与施肥这 2 个重要技术融为一体, 将肥料溶解在水中, 准确地将肥液施入作物根部附近土壤, 在不降低作物产量的前提下, 提高氮素利用率, 显著降低了氮素的淋溶损失和氮肥消耗量^[12]。Hebbar 等^[13]研究发现, 滴灌能显著提高氮肥利用率, 而植株根系总量在滴灌条件下显著高于畦灌, 这为节水增产提供了可能^[14]。Coston 等^[15]研究 N 肥的施入方式对桃树的效果发现, 滴灌施肥量仅为土壤施肥量的 1/4 ~ 1/2 时, 桃树叶片含 N 量和径粗的增加量即可达到土壤施肥效果, 表明滴灌可节约 N 肥 25% ~ 50%。

现阶段我国氮肥的利用率普遍偏低, 侯振安等^[8]根据灌水施肥时段的分配设计了 4 种不同施氮策略: ①清水 - 肥液 - 清水, 平均分配 (W - N - W); ②清水 - 肥液, 平均分配 (W - N); ③肥液 - 清水, 平均分配 (N - W); ④全部灌肥液 (N - N)。试验结果表明, 第 3 种策略 (N - W) 下的施肥方式可显著促进棉花根系吸收氮素, 增加产量, 并减少其在土壤中的残留量。因此, 即便在膜下滴灌条件下, 不同的灌溉施肥策略也可以显著影响氮素利用率, 生产中应采用合理的施肥策略以提高氮素利用率。

基金项目 国家自然科学基金项目 (31572202)。

作者简介 刘瑞 (1993—), 男, 安徽枞阳人, 硕士研究生, 研究方向: 植物生理生态学。* 通讯作者, 教授, 博士, 硕士生导师, 从事环境植物学方面的研究。

收稿日期 2018-03-16

邢英英等^[16]研究发现,温室番茄滴灌施肥技术能够达到高产优质和高效的目的,其中高水中肥下能获得较高的产量和氮肥利用率以及较低的土壤硝态氮含量;低水中肥处理下能获得优质的果实和较大的水分利用效率。于舜章^[17]研究发现,滴灌施肥能够在节水 21.0%~27.1%、节肥 3.7%~49.5% 条件下,使得黄瓜产量增加 9.9%~17.6%。刘宏平等^[18]分析表明,不同肥力土壤的供氮量应控制在不同的范围,对于已经连续大量施用氮肥的农田,应适当减少当季氮肥施用量,以降低土壤中较高的无机氮总量;而对于低肥力或砂质棉田,为保证氮素在棉花生育期的充足供应,氮肥施用量应适当提高到 225~270 kg/hm²;中肥力棉田中的施氮量应控制在 180~225 kg/hm²。

马丽娟等^[19]应用¹⁵N 同位素示踪方法的田间试验表明,适量的咸水灌溉可以提高棉花的产量,但微咸水和淡水对棉花产量影响差异不大;适当的盐分不但不会导致作物产量的降低,甚至可以对植物吸收氮素有促进作用,但当土壤中盐分过多即咸水灌溉时,会产生竞争效应,从而抑制植物吸收氮素,明显影响棉花生产,导致减产,并且盐分在土壤剖面的积累可能会危害作物生长,因此,适量的咸水滴灌,即微咸水灌溉方式可以提高氮素的利用率,但不可过量。李培岭等^[20]研究滴灌棉田氮素利用率表明,在根系分区交替滴灌策略下,灌水量和施氮量对氮肥利用率的影响显著,并且在达到满足棉花生长的一定氮素需求时,继续增加施氮量和灌水量对植物吸收氮素没有显著的促进作用,其中最有利于提高棉花对氮肥利用率的施氮方式是中氮高水耦合。侯振安等^[8]研究表明,不同滴灌施肥策略对棉花吸收氮素的影响显著,即可以对氮素利用率和棉花产量产生显著影响。因此,研究可以显著提高土壤氮素利用率的合理灌溉施肥策略不仅可以减少资源浪费,改善环境,并且可以提高产量,具有重要的意义。

2 滴灌施肥对气态氮挥发的影响

挥发损失是氮去向的重要途径^[21],可以显著影响氮肥利用率,而气态氮又是重要的温室气体,可能导致臭氧层破坏,造成严重的环境污染问题。气态氮的损失包括地上部分的损失和土壤中的挥发损失,影响植物氨态氮和氮氧化物挥发的因素包括内在因素和环境因素,内在因素主要指作物品种和作物个体发育进程;环境因素主要指施氮水平、温度、空气湿度和光照强度等,并且 CO₂ 浓度也会影响植株 N₂O 的排放,氮素挥发损失的主要途径有呼吸作用、蒸腾作用、蛋白质水解等^[22]。

土壤气态氮挥发主要包括 NH₃ 挥发和 NO_x 挥发,氨挥发主要是由于土壤中有机氮被微生物分解转变成氨态氮而挥发,氮氧化物的挥发主要是由于反硝化过程中硝酸盐被还原成氮氧化物和氮气而挥发损失。氮氧化物的形成主要有 2 个机制:化学反硝化(好气条件下)和生物反硝化(缺氧条件下),其中生物反硝化占主要地位。土壤气态氮的挥发量大小受多种因素的影响,并且有文献表明,长期施用氮肥的土壤,氨挥发损失会明显减少^[23-24]。土壤 pH 也可以影响

氨挥发损失,并与 pH 大小成正比,但也有试验表明碱性土壤在滴灌条件下氨挥发损失量明显低于漫灌^[25]。Suddick 等^[26]在加利福尼亚南部的扁桃仁果园的研究发现,地下滴灌施肥比地表滴灌施肥能够减少 7.5% 的 N₂O 排放。Kennedy 等^[27]在加州露地番茄的研究结果也表明,与漫灌相比,滴灌减少了 70% 的 N₂O 排放,并且滴灌比漫灌减少 N₂O 排放主要是由于滴灌灌溉量低于漫灌,滴灌后土壤湿润模式与漫灌不同,反硝化反应导致的 N₂O 排在滴灌和漫灌模式下分别为 4.96 和 11.44 kg/hm²,在滴灌条件下,硝化反应是 N₂O 的主要来源,而漫灌条件下 N₂O 则主要来源于反硝化反应。因此,采取合理的灌溉施肥方式可明显降低土壤氨挥发损失。

3 滴灌施肥下氮素的运移及其对土壤环境的影响

氮素进入土壤后,未被植物和微生物吸收的氮素会在土壤剖面残留进而影响土壤环境,尤其是铵态氮硝化形成的硝态氮的累积。在滴灌施肥方式不当时会发生淋洗,严重污染地下水,并且土壤剖面氮的累积和盐渍化等现象会造成严重的土壤环境问题^[28]。滴灌条件下不同施肥方式对土壤盐分布无明显影响,但对于氮素在土壤中的分布影响显著^[29]。因此研究滴灌施肥对土壤环境的影响,可以为作物生长发育提供更好的生长环境。

3.1 氮素在土壤剖面的残留 土壤中的氮素主要以铵态氮和硝态氮 2 种形式存在。铵态氮带正电荷容易被土壤吸附,导致其移动性差,并且在土壤可以通过硝化作用转化成硝态氮,因而滴灌施肥对其影响较小。而硝态氮极易溶于水,流动性较强,滴灌施肥时较容易分布在上层土壤,累积在湿润锋附近^[12]。

Li 等^[30]对滴灌条件下氮素运移分布规律的试验研究表明,硝态氮易随水流运动,施肥结束时,硝态氮在湿润体边缘出现累积现象,若系统管理不当,极易造成硝态氮淋失。栗岩峰等^[31]通过滴灌施肥灌溉系统运行方式和施肥频率对番茄根区土壤氮素研究发现,在滴头的周围,硝态氮易随水流运动,并在湿润土体的横向边缘产生累积;随着施肥次序向前推移,硝态氮向湿润土体边缘扩散的运移愈加明显;剖面内的硝态氮总量随着施肥频率的降低而降低;施肥频率对硝态氮空间分布的影响随着施肥次序的前移逐渐增大。Khan 等^[32]以 KBr 为溶质在田间研究了点源情况下滴头流量、灌水量和溶液浓度对水分和溶质分布的影响,结果表明,径向水分和溶质基本一致;在垂向,初始浓度大时,水分和溶质运移基本一致,初始浓度小时,水分的运动比溶质运移超前,即在湿润体边缘没有溶质积累。Bar-Yosef^[33]对滴灌条件下黏土和砂土中水分、NO₃⁻ 和 P 的分布进行了试验研究,结果表明,对黏土而言,灌水结束后,湿润体边缘有 NO₃⁻ 的累积,而湿润体内部 NO₃⁻ 浓度小于灌溉水中 NO₃⁻ 的浓度;砂土中也存在类似现象,不同的是,土壤溶液中的 NO₃⁻ 的浓度没有明显小于灌溉水中 NO₃⁻ 的浓度,这主要是因为砂土中有机质很少,几乎不存在反硝化现象。Zhang 等^[34]利用计算机模型 Hydrus 2D/3D 模拟表面点源滴灌的硝酸盐分布情况发

现,滴灌施肥前灌水对硝酸盐的分布无显著影响,但滴灌施肥后灌水可导致硝酸盐累积于湿润锋附近。

3.2 硝态氮的淋洗 由于硝酸盐与土壤胶体带电性相同,因此不利于土壤对 NO_3^- 的吸附,而未被及时利用的硝态氮是不容忽视的土壤氮素资源,一方面,它在土壤植物体系氮素营养中发挥着重要的作用;另一方面,它如果没有及时被作物吸收利用,在气候湿润或大量灌溉条件下,容易发生淋洗损失,甚至进一步迁移至地下水,成为地下水硝酸盐污染的重要来源^[35-38]。影响硝态氮淋洗量的因素主要有施氮量、灌水量、灌溉水盐度以及它们两者和三者之间的交互作用。

杨梦娇等^[39]对滴灌施肥条件下硝态氮在不同土层的分布规律进行了研究,结果表明,当灌水量一定时,施氮量越大,溶液浓度越大,下层土壤硝态氮含量较低,导致土壤中的浓度峰下降速率增大,加剧了硝态氮淋洗损失程度;当氮肥一定时,灌水量不足会增加硝态氮在土壤中的积累量,使得硝态氮溶液继续向下层土壤运移;而常规灌水条件下硝态氮在不同土层纵向减少量低于低水处理。习金根等^[40]用室内土柱模拟法研究了滴灌施肥条件下不同种类氮肥在土壤中的淋溶和转化特点,指出氮素淋溶和转化受氮肥种类和土壤质地的影响显著;在淋洗的氮素形态中,主要是尿素态氮,其次是硝态氮,氨态氮的淋洗量最小。Chaney^[41]和 Liang 等^[42]对6种不同施肥量对冬小麦收获后土层中残留硝态氮含量的影响进行了研究,结果发现,土壤中的硝态氮残留量随施肥量的增加而升高,但并不是简单的线性相关;采用最佳经济施肥量时,土壤中残留硝态氮的含量与不施肥处理差异性较小。Sun 等^[43]和 Soto 等^[44]通过 EU-Rotate-N 模型对温室黄瓜和番茄氮素代谢进行模拟,表明灌水方法和施肥量的投入显著影响土壤中硝酸盐的残留。Badr 等^[45]和周博等^[46]研究得出,滴灌使番茄根区土壤中磷的流动性高于沟灌,肥料利用效率也高于沟灌;调整 N、P、K 比例并减少其用量的配方施肥处理能显著降低硝态氮、有效磷和速效钾在土壤中的过量累积,降低了土壤盐分累积。因此,适宜的滴灌施肥措施是减少硝态氮淋洗、提高氮肥利用率的重要措施。

3.3 对土壤环境的其他影响 滴灌施肥条件下灌水量相对较少,并且局部湿润土壤,土壤环境相对协调,有利于土壤中有机氮的矿化,但容易导致硝态氮在表层土壤的累积^[25]。Wang 等^[47]和 Zhang 等^[48]研究表明,交替滴灌下,根区土壤一直处于相对频繁的干湿交替状态,有利于提高土壤微生物活性和代谢,加速了土壤有机质的矿化速率,改变了土壤中的碳氮比,促使土壤中的氮元素集中到根系表面,有利于根系和作物对氮的吸收和利用,提高了氮肥利用率。另外,滴灌土壤的干湿交替还能增强养分活化,促进土壤耕作层细菌、放线菌和真菌生长^[49-50];与沟灌相比,滴灌土壤的保湿性好,未改变土壤微生物群落结构,但显著提高革兰氏阳性细菌和真菌数量^[51]。陈宁等^[52]研究也表明,膜下滴灌能显著提高土壤中细菌和放线菌的数量,与常规畦灌相比,分别提高 45.25% 和 79.48%,滴灌还能显著增大 B/F 值,改善土

壤中微生物比例,使土壤向病害发生轻的“细菌型”土壤转化。

土壤酶是由微生物、动植物活体分泌物及动植物残骸产生的生物活性物质,具有生物化学催化活性,能够参与土壤中许多重要的生物化学反应过程,并且在土壤养分循环、养分有效态转化过程以及植物生长发育所需养分供给过程中起到重要的作用^[53-54]。许多学者研究表明,地下滴灌根际土壤微生物生物量、脲酶、磷酸酶等随灌水量的增加呈先升高后下降的趋势;地下滴灌显著提高土壤有效磷,原因可能是促进微生物生长,提高了磷酸酶活性^[55-57]。窦超银等^[58]对重度盐碱地覆膜滴灌利用过程中土壤酶活性变化研究得出,覆膜滴灌种植不仅可以提高土壤酶活性,而且滴灌土壤的酶活性、枸杞生育期内土壤酶活性的提高均随滴灌年限的增加而增大,此外,相对不作处理的撂荒地土壤酶活性的减小,覆膜滴灌种植降低了自然条件对土壤酶活性的不利影响。

4 总结

(1)滴灌施肥条件下,合理的滴灌施肥策略能促进作物对氮素的吸收,降低土壤中氮挥发损失,减少资源浪费,显著提高氮肥利用率,并且在一定程度上实现高产、优质、高效的目的。

(2)滴灌施肥条件下对氮素在土壤中的分布影响显著,硝态氮易随水流动,最终累积在湿润锋附近。土壤中的硝态氮,一方面易被植物吸收利用;另一方面,因施氮量、灌水量、灌溉水盐度等因素影响,易发生淋洗,进入地下水,造成地下水的环境污染。而合理的滴灌施肥策略能减少硝态氮的淋洗,降低环境污染。

(3)滴灌施肥有利于提高土壤中微生物活性和代谢,改善土壤中的微生物比例,提高土壤中的土壤酶活性,促进土壤中养分循环、养分有效态转化以及植物生长发育所需养分供给过程。

5 展望

滴灌施肥条件下,氮素去向及其对环境的影响是一个复杂的过程,当前对这一问题还需从以下几个方面进行研究。

(1)我国当前的灌溉主要还是以地面灌溉为主,而氮肥的损失是不可避免的,因此,滴灌施肥的推广以及如何优化滴灌施肥策略,减少氮肥损失,提高氮肥利用效率是今后不得不考虑的方向。

(2)滴灌施肥条件下,氮素的去向是受多方面的综合影响,因此,在实际运用中,要综合考虑多方面的因素,减少氮肥资源的浪费,降低对环境的污染。

(3)当前信息技术的发展十分迅速,应将滴灌施肥与信息技术相结合,根据土壤养分以及土壤环境的具体监测情况,来进行精准灌溉,精准施肥,打破我国传统的施肥灌溉模式,降低农业成本,促进我国精准农业的发展。

参考文献

- [1] 陈怀满,朱永官,杨曦. 环境土壤学[M]. 北京:科学出版社,2006:141-151.
- [2] 李生秀. 控释肥料志在提高利用率[J]. 中国农资,2005(4):48-50.

- [3] ZHU Z L, CHEN D L. Nitrogen fertilizer use in China-Contribution to food production, impacts on the environment and best management strategies [J]. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 2002, 63(2/3): 117-127.
- [4] 陆小龙. 论我国水资源可持续发展与充分利用[J]. *现代经济信息*, 2012(9): 10-11.
- [5] 李久生, 张建君, 薛克宗. 滴灌施肥灌溉原理与应用[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2003.
- [6] ZHOU J B, XI J G, CHEN Z J, et al. Leaching and transformation of nitrogen fertilizers in soil after application of N with irrigation; A soil column method[J]. *Pedosphere*, 2006, 16(2): 245-252.
- [7] 徐飞鹏, 李云开, 任树梅. 新疆棉花膜下滴灌技术的应用与发展的思考[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(1): 25-27.
- [8] 侯振安, 李品芳, 龚江, 等. 不同滴灌施肥策略对棉花氮素吸收和氮肥利用率的影响[J]. *土壤学报*, 2007, 44(4): 702-708.
- [9] 崔景学. 玉米膜下滴灌技术的推广与应用[J]. *东北水利水电*, 2016, 34(5): 54-56.
- [10] PAPAPOPOULOS I. Nitrogen fertigation of trickle-irrigated potato [J]. *Fertilizer research*, 1988, 16(2): 157-167.
- [11] 肖丽, 侯振安, 龚江, 等. 不同滴灌施肥方式对盐渍土棉花生长和氮素吸收的影响[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2008, 26(4): 427-430.
- [12] 孙泽东, 马兴华. 滴灌施肥对作物生长及土壤氮素特征影响的研究进展[J]. *中国农业科技导报*, 2016, 18(5): 164-170.
- [13] HEBBAR S S, RAMACHANDRAPPA B K, NANJAPPA H V, et al. Studies on NPK drip fertigation in field grown tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) [J]. *European journal of agronomy*, 2004, 21(1): 117-127.
- [14] 肖艳, 陈清, 王敬国, 等. 滴灌施肥对土壤铁、磷有效性及番茄生长的影响[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(9): 1322-1327.
- [15] COSTON D C, PONDER H G, KENWORTHY A L. Fertilizing peach trees through a trickle irrigation system [J]. *Communications in soil science and plant analysis*, 1978, 9(3): 187-191.
- [16] 邢英英, 张富仓, 张燕, 等. 滴灌施肥水肥耦合对温室番茄产量、品质和水分利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(4): 713-726.
- [17] 于舜章. 山东省设施黄瓜水肥一体化滴灌技术应用研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2009, 20(6): 173-176.
- [18] 刘宏平, 田长彦, 马英杰. 滴灌棉田氮肥用量对土壤无机氮的动态影响[J]. *土壤*, 2007, 39(4): 599-603.
- [19] 马丽娟, 侯振安, 闵伟, 等. 适宜咸水滴灌提高棉花水氮利用率[J]. *农业工程学报*, 2013, 9(14): 130-138.
- [20] 李培岭, 张富仓. 根系分区交替滴灌下水氮耦合对棉花氮素利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(S1): 112-116.
- [21] ROELCKE M, LI S X, TIAN X H, et al. In situ comparisons of ammonia volatilization from N fertilizers in Chinese loess soils [J]. *Nutrient cycling in agroeco systems*, 2002, 62(1): 73-88.
- [22] 王世敬, 曹宏鑫, 段筱香, 等. 农作物的气态氮损失[J]. *植物生理学通讯*, 2006, 42(4): 741-746.
- [23] 董文旭, 胡春胜, 张玉铭. 华北农田土壤氨挥发原位测定研究[J]. *中国生态农业学报*, 2006, 14(3): 46-48.
- [24] 董文旭, 胡春胜, 张玉铭. 不同施肥方式对尿素 NH_3 挥发的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2005, 23(2): 76-79.
- [25] 马腾飞, 危常州, 王娟, 等. 不同灌溉方式下土壤中氨挥发损失及动态变化[J]. *石河子大学学报(自然科学版)*, 2010, 28(3): 294-298.
- [26] SUDDICK E C, STEENWERTH K, GARLAND G M, et al. Discerning agricultural management effects on nitrous oxide emissions from conventional and alternative cropping systems; A California case study [M]//GUO L, GUNASEKARA A, MCCONNELL L, et al. Understanding greenhouse gas emissions from agriculture management. Washington DC: ACS Symposium Series, 2011: 203-226.
- [27] KENNEDY T L, SUDDICK E C, SIX J. Reduced nitrous oxide emissions and increased yields in California tomato cropping systems under drip irrigation and fertigation [J]. *Agriculture, ecosystems & environment*, 2013, 170: 16-27.
- [28] 姬景红, 张玉龙, 张玉玲, 等. 灌溉方法对保护地土壤有机氮矿化特性的影响[J]. *土壤学报*, 2009, 46(5): 869-876.
- [29] 侯振安, 李品芳, 吕新, 等. 不同滴灌施肥方式下棉花根区的水、盐和氮素分布[J]. *中国农业科学*, 2007, 40(3): 549-557.
- [30] LI J S, ZHANG J J, REN L. Water and nitrogen distribution as affected by fertigation of ammonium nitrate from a point source [J]. *Irrigation science*, 2003, 22(1): 19-30.
- [31] 栗岩峰, 李久生, 李蓓. 滴灌系统运行方式和施肥频率对番茄根区土壤氮素动态的影响[J]. *水利学报*, 2007, 38(7): 857-865.
- [32] KHAN A A, YITAYEW M, WARRICK A W. Field evaluation of water and solute distribution from a point source [J]. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 1996, 122(4): 221-227.
- [33] BAR-YOSEF B. Trickle irrigation and fertilization of tomatoes in sand dunes; Water, N, and P distributions in the soil and uptake by plants [J]. *Agronomy journal*, 1977, 69: 486-491.
- [34] ZHANG J J, LI J S, ZHAO B Q, et al. Simulation of water and nitrogen dynamics as affected by drip fertigation strategies [J]. *Journal of integrative agriculture*, 2015, 14(12): 2434-2445.
- [35] 吕卫光, 余廷园, 诸海涛, 等. 黄瓜连作对土壤理化性状及生物活性的影响研究[J]. *中国生态农业学报*, 2006, 14(2): 119-121.
- [36] JU X T, KOU C L, ZHANG F S, et al. Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: Comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain [J]. *Environmental pollution*, 2006, 143(1): 117-125.
- [37] ZHANG W L, TIAN Z X, ZHANG N, et al. Nitrate pollution of groundwater in northern China [J]. *Agriculture, ecosystems & environment*, 1996, 59(3): 223-231.
- [38] RICHTER J, ROELCKE M. The N-cycle as determined by intensive agriculture-examples from central Europe and China [J]. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 2000, 57(1): 33-46.
- [39] 杨梦娇, 吕新, 侯振安, 等. 滴灌施肥条件下不同土层硝态氮的分布规律[J]. *新疆农业科学*, 2013, 50(5): 875-881.
- [40] 习金根, 周建斌, 赵满兴, 等. 滴灌施肥条件下不同种类氮肥在土壤中迁移转化特性的研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2004, 10(4): 337-342.
- [41] CHANEY K. Effect of nitrogen fertilizer rate on soil nitrate nitrogen content after harvesting winter wheat [J]. *The journal of agricultural science*, 1990, 114(2): 171-176.
- [42] LIANG B C, MACKENZIE A. Changes of soil nitrate-nitrogen and nitrification as affected by nitrogen fertilizer on two Quebec soils [J]. *Journal of environmental quality*, 1994, 23(3): 521-525.
- [43] SUN Y, HU K L, FAN Z B, et al. Simulating the fate of nitrogen and optimizing water and nitrogen management of greenhouse tomato in North China using the EU-Rotate_N model [J]. *Agricultural water management*, 2013, 128: 72-84.
- [44] SOTO F, GALLARDO M, GIMÉNEZ C, et al. Simulation of tomato growth, water and N dynamics using the EU-Rotate_N model in Mediterranean greenhouses with drip irrigation and fertigation [J]. *Agricultural water management*, 2014, 132: 46-59.
- [45] BADR M A, ABOU HUSSEIN S D, EL-TOHAMY W A, et al. Nutrient uptake and yield of tomato under various methods of fertilizer application and levels of fertigation in arid lands [J]. *Gesunde pflanzen*, 2010, 62(1): 11-19.
- [46] 周博, 陈竹君, 周建斌. 水肥调控对日光温室番茄产量、品质及土壤养分含量的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(4): 58-62.
- [47] WANG Z Y, LIU Z X, ZHANG Z K, et al. Subsurface drip irrigation scheduling for cucumber (*Cucumis sativus* L.) grown in solar greenhouse based on 20 cm standard pan evaporation in Northeast China [J]. *Scientia horticulturae*, 2009, 123(1): 51-57.
- [48] ZHANG Z, HU H C, TIAN F Q, et al. Soil salt distribution under mulched drip irrigation in an arid area of northwestern China [J]. *Journal of arid environments*, 2014, 104(4): 23-33.
- [49] BORKEN W, MATZNER E. Reappraisal of drying and wetting effects on C and N mineralization and fluxes in soils [J]. *Global change biology*, 2009, 15(4): 808-824.
- [50] LIU S H, KANG Y H. Changes of soil microbial characteristics in saline-sodic soils under drip irrigation [J]. *Journal of soil science and plant nutrition*, 2014, 14(1): 139-150.
- [51] DANGI S R, ZHANG H H, WANG D, et al. Soil microbial community composition in a peach orchard under different irrigation methods and postharvest deficit irrigation [J]. *Soil science*, 2016, 181(5): 208-215.
- [52] 陈宁, 孙凯宁, 王克安, 等. 不同灌溉方式对茄子栽培土壤微生物数量和土壤酶活性的影响[J]. *土壤通报*, 2016, 47(6): 1380-1385.
- [53] BURNS R G. *Soil enzymes* [M]. London: Academic Press, 1978: 1-33.
- [54] 叶协锋, 杨超, 李正, 等. 绿肥对植烟土壤酶活性及土壤肥力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(2): 445-454.
- [55] 李华, 贺洪军, 李腾飞, 等. 不同地下滴灌制度下黄瓜根际微生物活性及功能多样性[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(8): 2349-2354.

合因素确定。在扁豆生产实践中,种植密度过高对植株个体生长不利,从而影响到群体效应;种植密度过低又影响单位面积的经济效益。该试验表明,试验中 2 个品种帮达早红边、交大绿宝均可半直立密植栽培,其中帮达早红边的密度

最好确定在 30 000 株/hm² 左右,交大绿宝的密度可适当高些,以 37 500 株/hm² 左右为宜。因此,生产上播种密度的安排要和品种各自的遗传特性相结合,同时要综合考虑当地的气候、土壤、肥水、栽培管理等综合因素。

表 1 不同密度处理对 2 个品种生物性状的影响

Table 1 Effects of different density treatments on the biological characters of two lentil cultivars

品种 Cultivar	密度 Density treatment 株/hm ²	播种期 Sowing date	出苗期 Emergence date	始花期 Initial flowering date	荚果大小 Pod size	抗虫性 Insect resistance	抗病性 Disease resistance	商品率 Commodity rate//%
帮达早红边	45 000(B ₁)	06-20	06-24	07-17	小	弱	弱	80
Bangdazao-	37 500(B ₂)	06-20	06-24	07-15	大	中	强	90
hongbian(A ₁)	30 000(B ₃)	06-20	06-24	07-15	大	强	强	90
交大绿宝	45 000(B ₁)	06-20	06-24	08-26	小	弱	弱	75
Jiaodalubao(A ₂)	37 500(B ₂)	06-20	06-24	08-25	大	中	弱	98
	30 000(B ₃)	06-20	06-24	08-25	大	强	中	98

表 2 不同密度处理对 2 个品种产量的影响

Table 2 Effects of different density treatments on the yields of two lentil cultivars

品种 Cultivar	密度处理 Density treatment 株/hm ²	小区平均产量 Average plot yield//kg	折合产量 Converted yield//kg/hm ²	名次排列 Rank
帮达早红边	45 000(B ₁)	14.89 dc	33 865.35	6
Bangdazaohongbian(A ₁)	37 500(B ₂)	17.33 bBC	39 413.70	3
	30 000(B ₃)	19.81 bAB	45 052.80	2
交大绿宝	45 000(B ₁)	15.62 cdC	35 517.75	5
Jiaodalubao(A ₂)	37 500(B ₃)	22.35 aA	50 813.25	1
	30 000(B ₆)	16.23 cdC	36 912.45	4

(2) 进一步加强密植试验研究。该试验中 2 个品种株型均为紧凑型,在生长前期可不搭架,后来随着枝蔓的伸展,再采取搭架措施,以增加枝叶间的通风透光性、提高结荚率、增加产量。因此,在后续的研究中要降低生产成本,需继续加强半直立扁豆品种以及直立扁豆(不需搭架)品种的筛选,特别要加强直立扁豆的高产栽培技术研究,以进一步增加经济效益。

参考文献

- [1] 刘志权,徐晓敏,沈海波,等. 高密度栽培条件下玉米剪叶处理对产量构成的影响[J]. 玉米科学,2009,17(6):74-75,81.
- [2] 黄玉范. 大豆 1.1 米大垄窄行密植栽培可获高产[J]. 中国农村小康科技,2010(1):34.
- [3] 李洪,王斌,李爱军,等. 玉米株行距配置的密植增产效果研究[J]. 中国农学通报,2011,27(9):309-313.
- [4] 周玉乾,寇思荣. 甘肃耐密玉米品种种植密度研究[J]. 农业科技通讯,2011(5):34-36.
- [5] 董树亭,胡昌浩. 玉米不同株型品种的高产潜力及群体光合特性研究[J]. 作物杂志,1993(2):34-36.
- [6] 张永科,孙茂,张雪君,等. 玉米密植和营养改良之研究Ⅲ. 玉米营养和产量的相关分析[J]. 玉米科学,2006,14(3):129-132.
- [7] 张永科,孙茂,张雪君,等. 玉米密植和营养改良之研究 I. 密度对玉米产量和营养的效应[J]. 玉米科学,2015,13(3):87-90.

- [8] 张永科,孙茂,张雪君,等. 玉米密植和营养改良之研究Ⅱ. 行距对玉米产量和营养的效应[J]. 玉米科学,2006,14(2):108-111.
- [9] 马国武. 小垄双条密植栽培对大豆产量及效益的影响[J]. 现代农业科技,2011(3):62.
- [10] 热合曼·胡加木尼亚孜. 棉花高密度栽培技术分析[J]. 北京农业,2016(4):46-47.
- [11] 马玲,杨常新,黄灵丹,等. 高密度栽培下不同设施樱桃番茄品质和产量差异研究[J]. 安徽农业科学,2017,45(22):38-39,139.
- [12] 张瑛. 美国玉米生产概况及高产栽培技术[J]. 杂粮作物,2000,20(3):10-13.
- [13] 王淑宏,赵祥. 大豆小垄窄行密植机械化栽培技术与效益分析[J]. 农机使用与维修,2010(2):111.
- [14] RAHMAN M, HOSSAIN M, ANWAR P, et al. Plant density influence on yield and nutritional quality of soybean seed[J]. Asian journal of plant sciences, 2011, 10(2):125-132.
- [15] 贾树均. 棉花高密度高产栽培技术[J]. 北京农业,2013(9):15.
- [16] 林海波,沈铁恒. 棚室葡萄高密度栽培技术[J]. 种子世界,2017(9):57-58.
- [17] 赵庆阳,常宗堂,段兴民. 塑料中棚早春西葫芦高密度栽培对产量和产值的影响[J]. 西北园艺,2003(1):9-10.
- [18] 丁国强,吴寒冰. 彭泽青扁豆大棚高密度栽培技术[J]. 长江蔬菜,2009(21):21-22.
- [19] 胡燕琳,姚陆铭,徐永平,等. 扁豆密植栽培技术研究[J]. 中国农学通报,2012,28(1):264-268.
- [20] 彭友林,万海清,胡南云,等. 特早熟扁豆品种种植密度与追肥试验[J]. 中国蔬菜,1996(6):32-33.

(上接第 27 页)

- [56] WANG Y S, ZHANG Y L. Soil inorganic phosphorus fractionation and availability under greenhouse subsurface irrigation[J]. Communications in soil science and plant analysis, 2012, 43(3):519-532.
- [57] ZORNOZA R, GUERRERO C, MATAIX-SOLERA J, et al. Assessing the effects of air-drying and rewetting pre-treatment on soil microbial bio-

mass, basal respiration, metabolic quotient and soluble carbon under Mediterranean conditions [J]. European journal of soil biology, 2007, 43(2):120-129.

- [58] 窦超银,康跃虎,万书勤,等. 覆膜滴灌对地下水浅埋区重度盐碱地土壤酶活性的影响[J]. 农业工程学报,2010,26(3):44-51.