

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.032

基于¹⁵N示踪技术的不同灌水方案玉米追肥氮素去向研究

张忠学^{1,2} 陈帅宏^{1,2} 陈鹏^{1,2} 刘明^{1,2} 尚文彬^{1,2}

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 农业部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要: 为了揭示不同灌水方案下玉米对追肥氮素的吸收利用情况, 利用¹⁵N示踪技术, 以大田试验数据为基础, 研究了不同灌水方案下成熟期玉米对追肥氮素的吸收利用率以及在地上部各器官中的分配状况, 同时研究了玉米收获后追肥氮素在土壤中的残留情况和最终的损失率。结果表明: 不同灌水方案下玉米地上部分氮素总积累量的8.14%~13.21%来自于追肥氮素, 各处理之间差异显著($P < 0.05$), 其中籽粒中追肥氮素积累量占植株积累追肥氮素总量的47.90%~74.40%。不同处理下成熟期玉米植株追肥氮素吸收率为19.16%~64.72%, 其中籽粒的追肥吸收率为11.29%~47.17%。植株积累的追肥氮素在各器官中的分配比例差异较大, 其中, 47.95%~74.40%分布在籽粒中, 10.50%~27.73%分布在叶片中, 3.02%~9.48%分布在茎秆中, 5.22%~15.53%分布在穗轴中, 苞叶中仅占0.53%~2.35%。在玉米生育前期灌水量过大而后期缺水会对植株吸收追肥氮素以及氮素向籽粒中再分配产生不利影响, 同时单次灌水量过大产生氮素的淋溶损失, 造成资源的浪费和环境的污染。玉米收获后有8.81%~24.89%的追肥氮素残留在土壤中, 随灌水次数的减少, 单次灌水量增加, 追肥氮素残留率逐渐减小。综合考虑产量和追肥氮素利用率, 得出符合研究区玉米节水、高产、高效要求的灌水方案为全生育期灌溉定额 $800\text{ m}^3/\text{hm}^2$, 灌水次数为4次(苗期、拔节期、抽雄期、灌浆期), 研究结果可为东北地区玉米生产提供理论支持及数据参考。

关键词: 玉米; 同位素示踪技术; 氮素利用; 氮肥残留率; 氮肥损失率

中图分类号: S124⁺.2; S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)12-0262-11

Fate of Maize Topdressing Nitrogen under Different Irrigation Schemes Based on ¹⁵N Tracer Technology

ZHANG Zhongxue^{1,2} CHEN Shuaihong^{1,2} CHEN Peng^{1,2} LIU Ming^{1,2} SHANG Wenbin^{1,2}

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China

2. Key Laboratory of Effective Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to reveal the absorption and utilization of topdressing to maize under different irrigation schemes, ¹⁵N tracer technology was used based on field test data, the ratio of absorption and utilization to topdressing was analyzed and the distribution of fertilizer nitrogen in the upper parts of maize under different irrigation schemes, and the residue in the soil and final loss rate of nitrogen after harvest were studied. The results showed that 8.14%~13.21% of total nitrogen accumulation in maize aboveground parts came from topdressing under different irrigation schemes, there was a significant difference between the treatments ($P < 0.05$). Among them, topdressing nitrogen accumulation in the grain accounted for 47.90%~74.40% of the total topdressing accumulation. The nitrogen recovery rate of top dressing was 19.16%~64.72% under different treatments, and the recovery rate of grain topdressing was 11.29%~47.17%. The proportion of topdressing nitrogen in different organs was different, the distribution of 47.95%~74.40% was in grain, 10.50%~27.73% was in leaves, 3.02%~9.48% was in stem, 5.22%~15.53% was in spike axis, and only 0.53%~2.35% was in coating. In the early stage of maize growth, the irrigation amount was too large and the water shortage in the later period would have a negative effect on the absorption of nitrogen in the plant and the redistribution of nitrogen to the grain. At the same time, the amount of single irrigation was too large, resulting in the leaching loss of nitrogen, waste of resources and pollution of environment. After harvest, there were 8.81%~24.89% topdressing nitrogen residue in the soil. With the decrease of irrigation

收稿日期: 2018-07-04 修回日期: 2018-07-29

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2014BAD12B01)

作者简介: 张忠学(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: zhangzhongxue@163.com

frequency and increase of single irrigation amount, the nitrogen residue rate of topdressing was decreased gradually. Considering yield and fertilizer utilization ratio, the irrigation scheme which met the requirements of water saving, high yield and high efficiency in this area was 800 m³/hm² of irrigation quota and four times of irrigation (seedling, jointing, tasselling and filling), the results can provide theoretical support and data reference for maize production in Northeast China.

Key words: maize; isotope tracer technology; nitrogen utilization; nitrogen residue rate; nitrogen loss rate

0 引言

黑龙江省是全国重要的玉米生产基地之一,玉米播种面积占全国玉米总播种面积的 10%,产量占全国玉米总产量的 9%。肥料氮素是玉米生产过程中必需的营养元素,但目前我国氮肥利用率仅在 35% 左右^[1]。由于东北地区气温较低,养分矿化速率慢,肥效较长,因此在玉米生产上,当地农民普遍采用一次性施用基肥而不施用追肥的施肥方式。但该地区土壤基本为黑土或黑钙土,土壤有机质含量较高,且随着生产力的提高,作物需氮总量逐年增加,使得玉米生育前期氮素用量偏大,而后期出现缺肥的情况,当前东北玉米种植区的氮肥损失率高达 55%^[2-3]。研究表明,在相同施氮量下增加追肥比例能够促进植株生育后期对氮素的吸收积累,提高氮素向果实中的转运率,增加果实产量;同时随追肥用量的增加,作物吸收利用肥料氮的比例增大,对土壤氮的吸收比例减小^[4-5]。氮素的运输是随土壤中水分运移进行的,灌水量、灌水强度、灌水频率对氮肥利用率、土壤残留率和氮素损失率有较大影响^[6],因此在保证玉米高产和籽粒品质稳定的前提下,找出有助于氮素优化分配的灌水方案,以实现节水增效和减少氮肥损失的有机统一是东北地区节水灌溉研究的必然要求。

作物吸收积累的氮素来源于肥料氮素、土壤氮素以及大气氮沉降^[7]等多个方面。相关学者对作物肥料利用特性的研究多集中在差值法上^[8-9],但由于肥料氮会对土壤氮素产生激发效应^[10-11],因此利用差值法得出的肥料利用率会较实际值偏大。在玉米生育期施用¹⁵N 标记的尿素可以有效地确定植株中来源于肥料、土壤氮的含量,为平衡施氮量和作物生长期内需氮量提供必不可少的信息^[12]。¹⁵N 示踪技术已经广泛应用于相关农业研究之中,在水稻、小麦、玉米等粮食作物和葡萄等水果上已普遍得到运用。林晶晶等^[13]研究发现,水稻全生育期吸收积累的氮素中,基肥的贡献占 4.13%~10.59%,蘖肥占 3.98%~11.75%,穗肥占 13.32%~37.56%,土壤的贡献在 45.71%~70.83% 之间。沈其荣等^[14]研究发现,小麦地上部分对叶面施用尿素的氮吸收

率为 54.5%~68.9%,玉米全株对叶面施用氮素的吸收率为 59.9%~75.3%,且随生育期的推进,2 种作物对叶面施用氮素的吸收率均逐渐增加。赵丰云等^[15]通过对葡萄幼苗进行根际注气研究得出,根际注气处理能够促进葡萄新生部位对硝态氮的吸收,同时抑制植株吸收铵态氮。相对于水稻、小麦等作物,¹⁵N 示踪技术在玉米方面的研究报道较少,且大部分研究集中在水氮互作条件下植株氮素吸收分配规律以及施用氮肥后土壤氮在植株中贡献率的变化等方面^[16-17],而灌溉条件下水分变化对玉米生产中追肥氮素去向的影响研究鲜有报道。

本文采用田间设置微区试验的方法,通过在玉米拔节期施用¹⁵N 标记尿素,研究不同灌水方案下玉米对追肥氮素的吸收、分配规律和氮肥利用率,以及玉米收获后追肥氮素的残留和损失情况,旨在进一步解释不同灌水量和灌水频次下追肥氮素在植株内部的迁移转化规律,找出符合东北地区玉米节水、高产要求,同时能够获得更高氮素利用率和更低氮素损失率的灌水方案,为该地区玉米生产提供理论支撑和数据参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验在黑龙江省大庆市肇州县农业技术推广中心进行。位于黑龙江省西南部(125°17'57.70"E, 45°42'57.50"N),松嫩平原腹地,属于大陆性温寒带气候,大于 10℃ 活动积温 2 845℃,无霜期 138 d,多年平均降水量为 463 mm,本试验各时期降雨量见图 1。年风向多属于西南风和西北风,多风少雨,十年九春旱。试验供试农田土壤类型为碳酸盐黑钙土,基础理化性质:pH 值 6.4,耕层土壤(0~20 cm)基础肥力如下(均为质量比):全氮 1.41 g/kg、全磷 0.88 g/kg、全钾 19.86 g/kg、有机质 28.73 g/kg、碱解氮 110.17 mg/kg、速效磷 44.71 mg/kg、速效钾 220.16 mg/kg。

1.2 试验设计

1.2.1 小区试验

试验采用灌水定额和灌水次数 2 因素试验,试验处理方案见表 1。灌溉量设置 3 个水平,依次为 800、700、600 m³/hm²。灌水次数设置 3 个水平,分

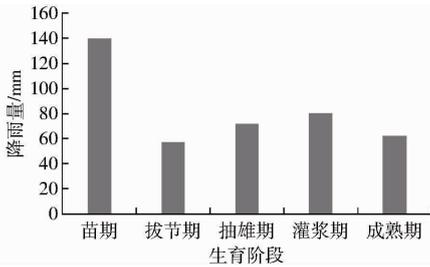


图1 玉米各生育阶段降雨量

Fig. 1 Rainfall during maize growth stages

别为灌水4次(苗期、拔节期、抽雄期、灌浆期)、灌水3次(苗期、拔节期、抽雄期)和灌水2次(苗期、拔节期)。试验共计9个处理,以不灌水作为空白对照,3次重复,共计27个试验小区。小区采用随机区组布置,每个小区面积为 104 m^2 ($10\text{ m} \times 10.4\text{ m}$),试验区总面积为 0.41 hm^2 。试验区每公顷保苗67 500株,每小区16条垄,垄宽65 cm,植株间距23 cm,保护区宽度5 m,保护行宽1 m。

表1 试验处理设计

Tab. 1 Design of experimental treatments

处理	灌溉定额/ $(\text{m}^3 \cdot \text{hm}^{-2})$	灌水次数
L1	800	4
L2	700	4
L3	600	4
L4	800	3
L5	700	3
L6	600	3
L7	800	2
L8	700	2
L9	600	2
CK	0	0

试验玉米品种为当地高产品种“大龙568”,于2017年4月21日施基肥,4月28日播种,6月13日进行苗期灌水,7月5日进行拔节期追肥和灌水,7月24日进行抽穗期灌水,8月25日进行灌浆期灌水,到9月25日成熟期结束,全生育期共150 d。4次灌水均都在各生育阶段开始10~15 d进行,若该时段出现降雨,则灌水延后数日进行。试验所用的肥料为尿素(含氮质量分数46%)、磷酸二铵(含氮质量分数18%,含磷质量分数46%)和硫酸钾(含钾质量分数58%)。各处理的施肥量相同,折算成元素量为施纯氮 $225\text{ kg}/\text{hm}^2$,施纯磷 $90\text{ kg}/\text{hm}^2$,施纯钾 $90\text{ kg}/\text{hm}^2$,磷肥和钾肥全部作为基肥一次性施入,氮肥按照基肥:拔节肥为2:1的比例分施,各试验小区基肥尿素施用量为 2.60 kg ,采用人工方式将基肥均匀撒入垄沟中。

试验灌水方式为喷灌,采用5983型摇臂式喷头(喷洒半径 $9.0 \sim 14.0\text{ m}$,流量 $0.74 \sim 1.02\text{ m}^3/\text{h}$),

喷头安装在长 1.5 m 的支管上。灌水时将4个喷头分别布置在小区四角上,逐一对各小区进行灌水。为防止各小区之间发生水分交换,调节喷头射程略小于小区长度,且在各个小区之间设置 30 cm 宽的缓冲区。灌溉所用水源为当地地下水,用管道末端的水表控制灌水量。

1.2.2 微区试验

为了研究不同灌水方案下玉米对追肥氮素的吸收及分配,在上述试验小区内设置 ^{15}N 示踪微区,每个试验小区内设置1个微区,每个处理下设3个微区作为试验重复。试验用微区采用长 0.69 m 、宽 0.6 m 、高 0.4 m 的无底矩形白铁皮框,于施用基肥尿素前将铁皮框埋入各个小区中,埋深至犁底层(深约 30 cm)。为防止灌水后肥料的横向流失,铁皮框高出地面 10 cm 左右。微区内尿素采用上海化工研究院生产的 ^{15}N 标记尿素(丰度 10.22%),施用时将肥料溶于 500 mL 蒸馏水中,并用喷壶均匀喷洒在微区内,微区外使用普通尿素。氮肥、磷肥和钾肥施用量、灌水方案、灌水方式以及其余田间管理等同于微区所在试验小区。

1.3 观测内容与与方法

1.3.1 植株、土壤全氮含量与植株干物质量

于玉米成熟期从每个微区中取3株玉米,将地上部分分为叶片、茎秆、苞叶、籽粒和穗轴5部分,装入样品袋中,在 105°C 下杀青 30 min ,然后在 70°C 条件下干燥到质量恒定并称量各器官干物质量。于玉米收获后利用土钻在微区中钻取土样,取土深度为 80 cm ,分为 $0 \sim 20\text{ cm}$ 、 $20 \sim 40\text{ cm}$ 、 $40 \sim 60\text{ cm}$ 、 $60 \sim 80\text{ cm}$,共4层,将取出的土样自然阴干。将干燥后的植株和阴干后的土壤样品分别进行研磨,过80目筛后各自装入样品袋中密封保存。样品全氮含量采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-H}_2\text{O}_2$ 消煮法和AA3型连续流动分析仪(Seal Analytical GmbH,德国,灵敏度 0.001 AUFS)测定。

1.3.2 氮原子百分比

稳定同位素参数在东北农业大学农业部水资源高效利用重点实验室内进行测量,采用元素分析仪(Flash 2000 HT型)和同位素质谱仪(DELTA V Advantage, Thermo Fisher Scientific,美国)联用的方法测定成熟期各器官中 ^{15}N 丰度。

植株中来自追肥氮的百分含量(N_{diff})根据YANG等^[18]的方法计算

$$N_{\text{diff}} = \frac{a-b}{c-d} \times 100\% \quad (1)$$

式中 a ——微区内植株样品的 ^{15}N 丰度, %

b ——相同处理自然条件下 ^{15}N 丰度, %

c ——¹⁵N 标记尿素中¹⁵N 丰度, %

d ——自然¹⁵N 丰度标准值(0.3663%)

植株叶片、茎秆、苞叶、籽粒、穗轴的氮素积累量计算公式为

$$N_{(l,s,h,g,c)} = W_{(l,s,h,g,c)} N \quad (2)$$

式中 $W_{(l,s,h,g,c)}$ ——植株各器官干物质质量, 下标 l 、 s 、 h 、 g 、 c 分别表示叶片、茎秆、苞叶、籽粒和穗轴, g

N ——植株各器官含氮率, %

植株各器官积累氮素来自追肥氮素的积累量(¹⁵ $N_{(l,s,h,g,c)}$)计算公式为

$$^{15}N_{(l,s,h,g,c)} = N_{(l,s,h,g,c)} N_{\text{diff}} \quad (3)$$

植株积累氮素来自追肥的总积累量(¹⁵ N_{total})为

$$^{15}N_{\text{total}} = ^{15}N_l + ^{15}N_s + ^{15}N_h + ^{15}N_g + ^{15}N_c \quad (4)$$

式中 ¹⁵ N_l 、¹⁵ N_s 、¹⁵ N_h 、¹⁵ N_g 、¹⁵ N_c ——叶片、茎秆、苞叶、籽粒、穗轴中积累氮素来自追肥的质量, g

氮素在各器官中分配比率(N_{DR})为

$$N_{DR} = \frac{^{15}N_{(l,s,h,g,c)}}{^{15}N_{\text{total}}} \times 100\% \quad (5)$$

追肥氮素植株吸收率(F_{NR})计算公式为

$$F_{NR} = \frac{^{15}N_{\text{total}}}{N_f} \times 100\% \quad (6)$$

式中 N_f ——微区施用标记尿素中¹⁵N 总量, g

各土层中氮素总量 T_{soil} 计算公式为

$$T_{\text{soil}} = \gamma sh N_{\text{soil}} \quad (7)$$

式中 γ ——土壤容重, g/cm^3

s ——土层面积, m^2

h ——土层厚度, m

N_{soil} ——土壤含氮率, %

追肥氮素土壤残留量($N_{R\text{-soil}}$)计算公式为

$$N_{R\text{-soil}} = \frac{e-b}{c-d} N_{\text{soil}} \quad (8)$$

式中 e ——微区中土壤样品的¹⁵N 丰度, %

追肥氮素土壤残留率(N_R)计算公式为

$$N_R = \frac{N_{R\text{-soil}}}{N_f} \times 100\% \quad (9)$$

追肥氮素损失率(F_{NL})为

$$F_{NL} = 1 - F_{NR} - N_R \quad (10)$$

1.3.3 产量

2017 年 9 月 25 日进行玉米产量测算, 按照对角线原则从每个试验小区中随机选取 5 个测点, 取样在微区外进行, 每个测点连续选取 5 株玉米分别测量单株穗长、穗粗、单株穗质量、秃尖长度和百粒

鲜质量。

氮肥偏生产力(P_{FPN})计算公式为

$$P_{FPN} = \frac{Y}{N_{\text{total}}} \quad (11)$$

式中 Y ——玉米籽粒产量(鲜质量), kg/hm^2

N_{total} ——玉米全生育期总施氮量, kg/hm^2

1.4 数据统计分析

采用 Excel 2013 对试验数据进行收集与整理, 运用 SPSS 19.0 (SPSS, Chicago, IL, 美国) 对不同处理之间各项数据进行统计分析, 采用 Duncan 多重比较方法进行各处理的显著差异性分析, 最后利用 Origin 9.0 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同灌水方案下玉米籽粒产量、地上部干物质总积累量和氮素总积累量

由表 2 可知, 不同灌水处理下玉米籽粒产量和地上部干物质质量变化范围分别为 14 180.43 ~ 18 881.04 kg/hm^2 和 18 730.98 ~ 28 744.37 kg/hm^2 , 在灌水次数相同情况下, 不同处理之间玉米地上部干物质质量均表现出显著差异 ($P < 0.05$), 且各处理均显著大于 CK 处理。在灌水 4 次和 2 次的情况下, 玉米地上部干物质质量均随灌水量的降低而减小, 但是当灌水次数为 3 次时, 在中等灌水量情况下, 即灌溉定额为 700 m^3/hm^2 所对应的 L5 处理玉米产量和地上部干物质质量均最大。在灌溉定额相同的情况下, 各处理之间玉米地上部干物质质量未表现出显著差异, 说明玉米地上部分干物质积累主要受到灌溉定额的影响, 而对于灌水次数的变化不敏感。

成熟期玉米地上部氮素总积累量、追肥¹⁵N 总积累量分别为 146.30 ~ 344.36 kg/hm^2 和 12.12 ~ 40.94 kg/hm^2 , 其中籽粒氮素总积累量占植株氮素总积累量的 45.50% ~ 68.80%。不同灌水处理下成熟期玉米地上部氮素总积累量的 8.14% ~ 13.21% 来自于追肥氮素, 各处理之间¹⁵N 占比差异显著且均显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$)。在灌溉定额相同条件下, 灌水 4 次和 3 次时处理之间氮素总积累量和肥料¹⁵N 积累量未表现出显著差异, 且均与灌水 2 次的情况差异显著 ($P < 0.05$), 表明在抽雄和灌浆期进行灌水有利于玉米植株吸收积累氮素。成熟期玉米地上部分氮素总积累量和追肥¹⁵N 积累量的变化规律基本一致。在灌水 4 次和 3 次的条件下, 植株氮素总积累量和追肥¹⁵N 总积累量均在灌溉定额 800 m^3/hm^2 时出现最大值, 但灌水 2 次时, 处理 L8 的氮素总积累量和追肥¹⁵N 总积累量最

大。结果表明在苗期和拔节期大量灌水,但在玉米生育中后期尤其是在抽雄期严重缺水的情况对植株吸收积累氮素的抑制作用较为显著,虽然处理 L7 的

籽粒产量和氮肥偏生产力均高于处理 L8 和处理 L9,但玉米营养物质的形成和转化均受到影响,不利于提高果实的品质。

表 2 不同处理下成熟期玉米籽粒产量、地上部干物质量、氮素总积累量和追肥¹⁵N 积累量

Tab. 2 Grain yield, dry matter accumulation, total N and fertilizer ¹⁵N accumulation of maize overground under different treatments at maturity

灌水次数	处理	地上部干物质量/ (kg·hm ⁻²)	氮素总积累量/ (kg·hm ⁻²)	追肥 ¹⁵ N 积累量/ (kg·hm ⁻²)	产量/ (kg·hm ⁻²)	偏生产力/ (kg·kg ⁻¹)
4	L1	28 744.37 ^a	344.36 ^a	40.94 ^a	18 881.04 ^a	83.92 ^a
	L2	28 328.94 ^b	286.79 ^c	34.86 ^c	17 393.40 ^b	77.30 ^b
	L3	26 615.39 ^c	303.47 ^b	40.11 ^b	17 133.12 ^c	76.15 ^c
	CK	18 730.98 ^d	148.84 ^d	12.12 ^d	14 180.43 ^d	63.02 ^d
3	L4	27 498.32 ^b	344.01 ^a	33.60 ^a	18 235.92 ^b	81.05 ^b
	L5	28 231.30 ^a	282.32 ^c	31.42 ^b	18 328.80 ^a	81.46 ^a
	L6	26 629.52 ^c	293.72 ^b	24.84 ^c	18 156.36 ^c	80.69 ^c
	CK	18 730.98 ^d	148.84 ^d	12.12 ^d	14 180.43 ^d	63.02 ^d
2	L7	24 757.02 ^a	146.30 ^c	13.88 ^c	16 800.96 ^a	74.67 ^a
	L8	22 863.49 ^b	263.30 ^a	26.71 ^a	15 453.96 ^b	68.68 ^b
	L9	20 270.33 ^c	195.87 ^b	22.41 ^b	15 152.04 ^c	67.34 ^c
	CK	18 730.98 ^d	148.84 ^c	12.12 ^d	14 180.43 ^d	63.02 ^d

注:同一列不同小写字母表示处理之间在 $P < 0.05$ 水平差异显著,下同。

2.2 不同灌水方案下成熟期玉米各器官对追肥氮素的吸收分配

由图 2a 可知,追肥¹⁵N 在玉米各器官中的分配比例差异较大,在不同灌水处理下,成熟期玉米地上部积累的¹⁵N 中有 10.50% ~ 27.73% 分布在叶片中,3.02% ~ 9.48% 分布在茎秆中,5.22% ~ 15.53% 分布在穗轴中,苞叶中积累的¹⁵N 最少,仅占总体的 0.53% ~ 2.35%,而籽粒中积累的追肥¹⁵N 最多,占比 47.95% ~ 74.40%。在 3 种灌水次数水平下,成熟期玉米籽粒中追肥¹⁵N 所占比例均随灌溉定额的减少呈现先减后增的变化趋势。在图 2b 中,不同灌水处理下玉米籽粒积累的总氮素量中来自追肥氮素的比例为 4.80% ~ 9.83%,叶片积累氮素总量的 1.03% ~ 2.86% 来自追肥氮素,其余器官总氮素积累量中来源于追肥氮素的比例较小,为 0.06% ~ 1.78%。在灌水 4 次和 2 次的情况下,籽粒氮素总积累量中追肥¹⁵N 占比随灌溉定额减小均

呈先减后增抛物线趋势变化,而灌水 3 次时,籽粒中追肥¹⁵N 占比随灌溉定额减小呈先增后减趋势变化,总体而言,随着灌水次数的减少,玉米籽粒中追肥¹⁵N 积累量占其氮素总积累量的比例逐渐减小。

结合图 2 和表 2 可知,在灌水次数为 2 次,灌溉定额为 800、700 m³/hm² 所对应的处理 L7、L8 中,成熟期玉米籽粒氮素积累量分别仅比 CK 处理高出了 15.01%、15.92%,远小于其余各处理籽粒氮素积累量高出 CK 处理的平均值 61.71% (表 2),在灌水 2 次情况下,穗轴¹⁵N 积累量占植株积累¹⁵N 总量百分比处于较高水平,尤其处理 L8 中穗轴¹⁵N 积累量占比显著大于其余各处理(图 2a),且该处理中籽粒¹⁵N 占氮素总积累量的比例以及其占植株追肥¹⁵N 总积累量的比例均显著小于 CK 处理,说明在玉米苗期和拔节期灌水量过大且在抽雄期和灌浆期缺水对植株吸收追肥氮素以及肥料氮素向籽粒进行转移等过程均产生了较为显著的不利影响,因此应在玉

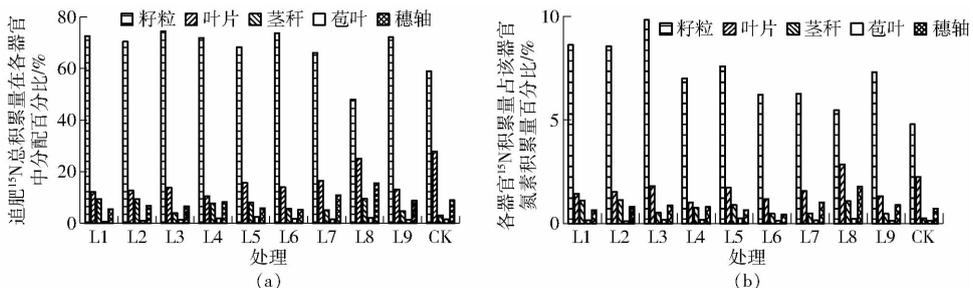


图 2 不同处理成熟期追肥¹⁵N 总积累量在玉米各器官中的分配百分比和各器官中¹⁵N 积累量占该器官氮素总积累量百分比
Fig. 2 Distribution of fertilizer ¹⁵N, percentage of ¹⁵N to total N accumulation in maize organs under different treatment at maturity

米抽雄和灌浆两个时期进行补充灌水以提高追肥氮素向籽粒转化率,提高追肥氮素利用效率。

2.3 不同灌水方案下植株对追肥氮素的吸收率

由表 3 可知,不同处理玉米成熟期植株¹⁵N 总吸收率为 19.16% ~ 64.72%,各处理吸收率均显著高于 CK 处理($P < 0.05$)。在灌溉定额相同的情况下,处理 L1、L2 的植株¹⁵N 总吸收率较处理 L4、L5 高出 21.86%、10.95%,处理间差异显著($P < 0.05$),同时处理 L4、L5 的¹⁵N 总吸收率显著较处理 L7、L8 高出 142.07%、40.27%,处理间差异显著($P < 0.05$)。在灌水 2 次的情况下,植株¹⁵N 总吸收率随灌溉定额增加显著下降,且处理 L9 的¹⁵N 总吸收率显著高于处理 L6,但低于处理 L3,表明在玉米生育后期尤其是灌浆期进行灌水可提高追肥氮素吸收率,但是在苗期和拔节期灌水量过大会显著降低氮肥的吸收率。

不同灌水处理下成熟期玉米籽粒的¹⁵N 吸收率为 11.29% ~ 47.17%,在灌溉定额为 600 m³/hm²,灌水次数为 4 次的情况下籽粒对追肥¹⁵N 的吸收率最高,为 47.17%。灌水 4 次和 3 次情况下各处理籽粒¹⁵N 吸收率均显著大于 CK 处理($P < 0.05$),但灌水 2 次时,处理 L7 的籽粒¹⁵N 吸收率与 CK 处理差异不显著,且随灌水量增加呈逐渐较小趋势。其余各部位追肥¹⁵N 吸收率为 0.29% ~ 8.87%,各处理茎秆和穗轴的¹⁵N 吸收率均显著大于 CK 处理,但 L7 处理的叶片¹⁵N 吸收率显著小于 CK 处理,且该处理苞叶¹⁵N 吸收率与 CK 处理差异不显著。表明在玉米生育后期进行灌水会促进追肥氮素向籽粒中转移,在生育前期灌水量过大会显著降低籽粒对追肥¹⁵N 的吸收率。在灌水 4 次情况下,处理 L1 的植株¹⁵N 总吸收率略微大于处理 L3,同时 L1 处理的籽粒对¹⁵N 的吸收率略微小于 L3 处理,差异均不显著。

表 3 不同处理下成熟期玉米全植株以及不同器官¹⁵N 吸收率

Tab. 3 ¹⁵N recovery of whole plant and different organs of maize under different treatments at maturity %

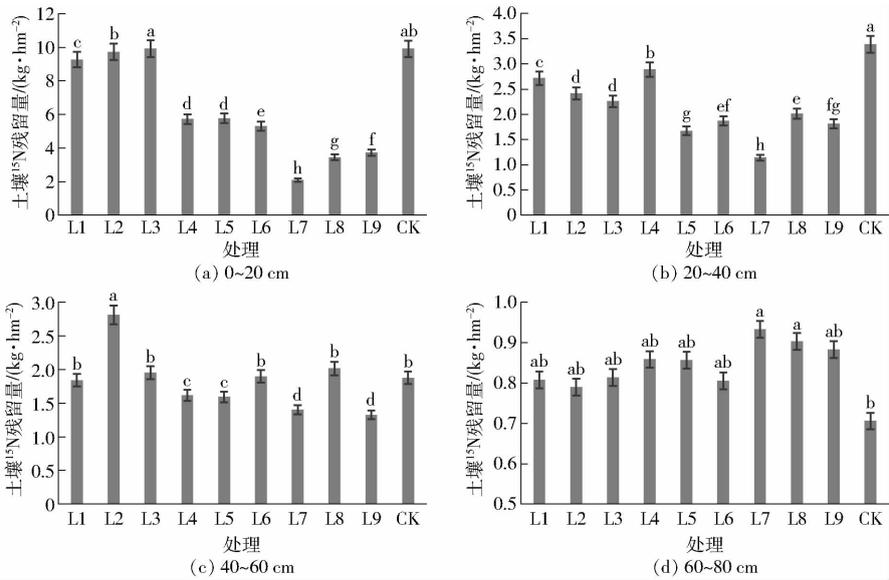
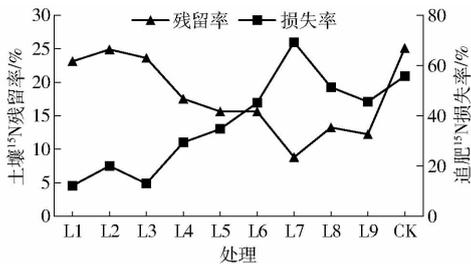
灌水次数	处理	植株 ¹⁵ N 总吸收率	各器官 ¹⁵ N 吸收率				
			籽粒	叶片	茎秆	苞叶	穗轴
4	L1	64.72 ^a	46.96 ^a	7.80 ^b	6.05 ^a	0.34 ^f	3.56 ^d
	L2	55.11 ^b	38.81 ^b	6.93 ^c	5.17 ^b	0.51 ^e	3.69 ^{cd}
	L3	63.41 ^a	47.17 ^a	8.71 ^a	2.53 ^e	0.82 ^c	4.17 ^{bc}
	CK	19.16 ⁱ	11.29 ^e	5.31 ^e	0.58 ^h	0.29 ^f	1.70 ^g
3	L4	53.11 ^c	38.16 ^b	5.57 ^d	4.08 ^c	0.97 ^b	4.33 ^b
	L5	49.67 ^d	33.92 ^c	7.73 ^b	3.96 ^c	1.17 ^a	2.89 ^e
	L6	39.27 ^f	28.93 ^d	5.47 ^{de}	2.19 ^f	0.64 ^{de}	2.05 ^f
	CK	19.16 ⁱ	11.29 ^e	5.31 ^e	0.58 ^h	0.29 ^f	1.70 ^g
2	L7	21.94 ^h	14.50 ^{de}	3.62 ^f	1.10 ^g	0.34 ^f	2.38 ^f
	L8	35.41 ^g	16.96 ^d	8.87 ^a	3.35 ^d	0.73 ^{cd}	5.50 ^a
	L9	42.22 ^e	30.45 ^{cd}	5.51 ^d	1.98 ^f	0.57 ^e	3.72 ^{cd}
	CK	19.16 ⁱ	11.29 ^e	5.31 ^e	0.58 ^h	0.29 ^f	1.70 ^g

2.4 不同灌水方案下追肥¹⁵N 土壤残留及损失

由图 3 可知,不同灌水方案下玉米收获后 0 ~ 80 cm 土层中追肥¹⁵N 总残留量为 5.57 ~ 15.87 kg/hm²,其中 CK 处理的¹⁵N 总残留量最大,L7 处理的总残留量最小。随着灌水次数的减少,土壤¹⁵N 残留量逐渐减少,这是由于单次灌水量过大会产生深层渗漏,使得土壤氮素随下渗水分淋失。0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm、60 ~ 80 cm 4 个土层的¹⁵N 残留量分别占总残留量的 37.62% ~ 66.36%、15.12% ~ 26.04%、11.81% ~ 25.14%、4.45% ~ 16.75%,其中 0 ~ 60 cm 土层中¹⁵N 残留量占总残留量的 83.25% ~ 95.55%,而 60 ~ 80 cm 土层中¹⁵N 残留量仅占总残留量的 4.45% ~ 16.75%。不同灌水处理下,0 ~ 20 cm 和 20 ~ 40 cm 土层¹⁵N 残留量变化规律基本一致,均随灌水次数的减少呈逐渐减小趋势。

在 0 ~ 20 cm 土层,灌水 4 次和 2 次的情况下,处理之间土壤¹⁵N 残留量差异显著($P < 0.05$),但在灌水 3 次时差异未达到显著水平。在 20 ~ 40 cm 土层,灌水 3 次和 2 次情况下,处理间土壤¹⁵N 残留量差异显著($P < 0.05$),灌水 4 次时差异未达到显著水平。在 40 ~ 60 cm 土层,仅有少量处理之间的¹⁵N 残留量差异达到显著水平($P < 0.05$),在 60 ~ 80 cm 土层,各处理之间¹⁵N 残留量差异均不显著,说明施用氮肥对 40 cm 以下土层的氮素水平影响较小,对 60 cm 以下土层基本不产生影响。

由图 4 可知,各处理在 0 ~ 80 cm 土层追肥总残留率和损失率呈极显著负相关关系($R = -0.920$, $P < 0.01$)。各处理土壤¹⁵N 残留率为 8.81% ~ 24.89%,其中处理 L7 的残留率最小,损失率最大,损失率达到了 69.25%,处理 L1 的损失率最小,仅

图3 玉米收获后不同土层追肥¹⁵N残留量Fig. 3 Residual ¹⁵N in different soil layers after maize harvest图4 玉米收获后土壤¹⁵N残留率和追肥¹⁵N损失率Fig. 4 Residual rate and loss rate of ¹⁵N after maize harvest

为12.16%。在灌溉定额相同的情况下,肥料¹⁵N损失率随灌水次数增加呈逐渐减小趋势,相应的土壤中¹⁵N残留率逐渐增大。结果表明在施肥后灌水量过大会产生水分的深层渗漏,使得大量氮素随水分淋溶损失;在玉米全生育期适当增加灌水次数,合理控制单次灌水量,增加土壤对肥料氮素的吸收率,减少追肥氮素损失率,有助于维持土壤氮库平衡。

3 讨论

余卫东等^[19]发现,苗期和拔节期淹水对玉米的影响较为显著,连续淹水3 d,玉米产量显著下降。本研究中,全生育期灌水2次的条件下,产量同样出现大幅度下降,3个处理平均产量较4次灌水和3次灌水分别降低16.84%、15.96%。这是因为苗期淹水胁迫抑制了植株吸收水分和养分的能力,并且干物质过多地向穗部转移,降低了籽粒干质量^[20]。这与马玉平等^[21]对黄淮海地区玉米的研究结果一致。研究证明将灌溉水量较为均衡地分配给玉米生长的各个时期内,尤其是在抽雄—乳熟期间进行适量的补充灌水有利于玉米的生长发育,促进产量的形成,达到高产的目的。前人研究发现,成熟期玉

米籽粒氮素分配约占到植株氮素总积累量的2/3左右^[22],在本研究中,玉米成熟期不同灌水处理籽粒中氮素积累量占植株氮素总积累量的45.50%~68.80%,且随着灌水次数的减少呈逐渐减小趋势,说明在灌溉定额不变的情况下,适当的增加灌水次数,尤其是在玉米抽雄期适当地进行灌水有助于氮素向籽粒中转移,提高氮肥生产率。这与苗文芳等^[23]对华北平原夏玉米的研究结果一致。这是因为玉米抽雄—乳熟期是营养生长和生殖生长最为旺盛的时期,植株对水分需求逐渐增加,然而在灌水2次情况下,抽雄期和灌浆期玉米会出现水分亏缺状况,抑制了根系从土壤中吸取水分的能力,植株运输氮素进入果实中的能力大幅下降,从而抑制了营养物质向果实中进行转移。同时玉米承受淹水的能力较弱^[24],因此在灌溉定额固定,仅灌水2次情况下,玉米生育前期植株处于一段时间的淹水状态,淹水过后植株吸收养分的能力减弱,从而导致产量大幅减少。

本研究采用¹⁵N示踪技术,对不同灌水方案下玉米对追肥氮素的吸收分配情况进行了试验研究,结果表明玉米成熟期地上部分积累氮素总量的8.14%~13.21%来自于追肥氮素,同时植株对追肥的总利用率为19.16%~64.72%,并且处理L7的追肥利用率仅高出CK处理1.76%,这是因为单次灌水量过大只是增加了氮素淋溶损失,对植株吸收利用肥料氮素未产生积极影响^[25]。翟丙年等^[26]研究发现,灌溉对小麦吸收利用氮素的影响不仅体现在灌水量上,同时与灌水量在作物各个生育期内的分配有关。在本研究中,灌溉定额不变的情况下,植株氮素总积累量和追肥¹⁵N总积累量均随灌水次数

的减少呈逐渐减小趋势,同时籽粒氮素积累量和¹⁵N 积累量也呈相同趋势,这是因为在玉米生育前中期分配过多的水量对植株生长发育产生不利影响,同时这种影响具有一定的后效作用,抑制了灌浆期植株籽粒的形成以及营养物质向籽粒中进行转移的过程。本研究还发现,¹⁵N 在玉米各器官中分配比例由大到小依次为籽粒、叶片、茎秆、穗轴、苞叶,且各器官¹⁵N 积累量占该器官氮素总积累量比例为 4.80%~9.83%,这与张水勤等^[27]对玉米的研究结果基本一致。ICHIR 等^[28]研究发现,灌水频率会影响肥料氮在植株中的再分配,灌水频率的增加会提高肥料氮在籽粒中的分配比例。本研究发现,在灌溉定额不变的条件下,随着灌水次数的增加,玉米籽粒中¹⁵N 积累量占植株¹⁵N 总积累量的比例逐渐增加,但增加幅度较小,除灌水 2 次外,灌水 4 次和 3 次对应处理间差异不显著。玉米生育前期为营养生长阶段,灌水 2 次的情况下,植株处于短暂的淹水状态,抑制根系吸收追肥氮素,植株营养器官贮存的氮素减少,同时在玉米生育中后期生殖生长阶段,土壤出现缺水状况,不利于前期贮存的追肥氮素向籽粒中进行再分配^[29],这与孟维伟等^[30]的研究结果类似,说明在玉米生育各个时期合理分配灌水量,尤其是在抽雄期和灌浆期进行适量的补充灌水能够促进氮素的再分配。此外,本研究中成熟期¹⁵N 标记尿素在土壤中的残留率为 8.81%~24.89%,损失率为 12.16%~69.25%,该结果与陈平等^[31]的研究结果基本一致,但试验中¹⁵N 标记尿素的吸收率为 19.16%~64.72%,变化范围较大,与其研究结果不太一致,原因依然是不同的灌水方案对玉米吸收肥料氮素影响较大,更精确的灌水能够进一步提高肥料吸收率。

大量研究表明,作物收获后会有小部分肥料氮残留在土壤中,且灌水量、灌水次数、灌水强度是影响肥料氮残留量的主要因素^[32]。GABRIEL 等^[33]研究发现,玉米收获后约 4/5 的氮肥残留在 0~40 cm 土层中,80 cm 以下土层仅占总残留量的 3.7%。在本研究中,玉米收获后 0~60 cm 土层中追肥氮残留量占总残留量的 83.25%~95.55%,仅有 4.45%~16.75% 肥料氮残留在 60~80 cm 土层中,各处理在该土层残留量差异不显著。在 0~20 cm 土层,灌溉定额不变的条件下,增加灌水次数显著增加追肥氮在该层土壤中的残留量,这是因为单次灌水强度大于土壤入渗速率时,会形成优势流,使溶解在水中的氮素随水分渗漏快速向深层移动,产生淋溶损失。这与 ELRICK 等^[34]的研究结果一致,说明适当增加灌水次数,减少单次灌水量,能够有效地减少氮肥淋

溶损失,同时提高氮肥利用率和土壤残留率,一定程度上起到维持土壤氮平衡的作用,满足节水灌溉的要求。

东北地区玉米生产长期采用氮肥全部作为基肥一次施用的方法,氮肥前期流失较大,利用效率偏低。相关研究表明:相较于仅施用基肥氮素,在作物生育期内追施氮肥可以显著增加产量,提高作物地上部干物质质量和氮素总积累量,同时能够提高土壤脲酶和转化酶活性^[35-36]。因此在该地区进行追肥氮素利用及损失研究势在必行。目前在氮肥利用方面的研究多集中在水肥配施^[37-38]和多次施氮^[39]等条件下作物吸收利用氮素规律,对灌水强度影响作物吸收利用追肥氮素的机理仍不明确。野外试验中研究结果受到外界温度^[40]、风速等环境因素以及土壤结构等因素的影响较大,本研究仅关注了灌水量和灌水次数对玉米吸收利用追肥氮素的影响,不同环境因素和土壤类型对玉米氮肥利用特性以及土壤氮素残留的影响需要进一步研究。此外本研究设置灌水量水平和灌水梯度均较少,未考虑玉米氮肥吸收利用特性发生突变的水量临界值,应增加梯度以进一步研究节水灌溉条件下玉米的肥料氮素吸收利用特征,制定出满足该地区节水、省肥、高产要求的最优灌水方案。

4 结论

(1) 在灌溉定额不变的条件下,玉米地上部干物质质量均随灌水次数的减少呈逐渐下降趋势。不同灌水处理下成熟期玉米籽粒氮素积累量、追肥¹⁵N 积累量分别占两者总积累量的 45.50%~68.80%、47.90%~74.40%。处理 L1 的籽粒产量以及氮素积累量均最大,处理 L3 的籽粒追肥¹⁵N 积累量最大,但与处理 L1 差异不显著,综合考虑玉米产量和籽粒中追肥¹⁵N 积累量,得出灌溉定额为 800 m³/hm²,分别在苗期、拔节期、抽雄期、灌浆期进行灌水,共灌水 4 次的灌水方案符合玉米节水、高产同时提高肥料利用率的灌溉要求。

(2) 不同灌水处理下成熟期玉米地上部氮素总积累量的 8.14%~13.21% 来自于追肥氮素,其中成熟期玉米籽粒中积累的追肥¹⁵N 最多,占比 47.95%~74.40%,其余地上部分各器官中¹⁵N 分配比例由大到小依次为叶片、茎秆、穗轴、苞叶。不同灌水处理下玉米籽粒积累的总氮素量中来自追肥氮素的 4.80%~9.83%,其余器官总氮素积累量中来源于追肥氮素的比例很小。随着灌水次数的减少,玉米在相同灌溉定额条件下籽粒中追肥¹⁵N 积累量占其氮素总积累量的比例逐渐减小。

(3)不同灌水处理下玉米成熟期植株¹⁵N总吸收率为19.16%~64.72%,其中成熟期玉米籽粒的¹⁵N吸收率为11.29%~47.17%,其余各部位追肥¹⁵N吸收率为0.29%~8.87%。处理L1的植株¹⁵N总吸收率最大,为64.72%,处理L3的籽粒¹⁵N吸收率最大,为47.17%,但在两个处理之间差异均不显著。在灌水2次的条件下,植株¹⁵N总吸收率随灌溉定额增加显著下降,表明在生育前期单次灌水量过大会抑制玉米吸收肥料氮素,降低氮肥吸收率。

(4)玉米收获后8.81%~24.89%的追肥氮素

残留在土壤中,其中83.25%~95.55%的¹⁵N残留在0~60cm土层中,60cm以下¹⁵N残留量仅占4.45%~16.75%,并且施用氮肥对40cm以下土层中氮素水平影响较小,对60cm以下土层的氮素水平基本不产生影响。随着灌水次数的减少,土壤¹⁵N残留量逐渐减少,追肥损失率大幅度增加,因此在灌溉定额不变的情况下,单次灌水量过大会造成土壤中氮素的淋溶损失,适当增加灌水次数,减少单次灌水量能够有效地降低氮肥损失,提高肥料氮素残留率,在一定程度上起到维持土壤氮平衡的作用。

参 考 文 献

- 王静, 杨晓光, 吕硕, 等. 黑龙江省春玉米产量潜力及产量差的时空分布特征[J]. 中国农业科学, 2012, 45(10):1914-1925.
WANG Jing, YANG Xiaoguang, LÜ Shuo, et al. Spatial-temporal characteristics of potential yields and yield gaps of spring maize in Heilongjiang province[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(10):1914-1925. (in Chinese)
- 王激清, 马文奇, 江荣风, 等. 我国水稻、小麦、玉米基肥和追肥用量及比例分析[J]. 土壤通报, 2008(2):329-333.
WANG Jiqing, MA Wenqi, JIANG Rongfeng, et al. Analysis about amount and ratio of basal fertilizer and topdressing fertilizer on rice, wheat, maize in China[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008(2):329-333. (in Chinese)
- 巨晓棠, 潘家荣, 刘学军, 等. 北京郊区冬小麦/夏玉米轮作体系中氮肥去向研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(3):264-270.
JU Xiaotang, PAN Jiarong, LIU Xuejun, et al. Study on the fate of nitrogen fertilizer in winter wheat summer maize rotation system in Beijing suburban [J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2003, 9(3):264-270. (in Chinese)
- 袁仕豪, 易建华, 蒲文宣, 等. 多雨地区烤烟对基肥和追肥氮的利用率[J]. 作物学报, 2008,34(12):2223-2227.
YUAN Shihao, YI Jianhua, PU Wenxuan, et al. Nitrogen use efficiency of base fertilizer and top dressing in flue-cured tobacco in rainy regions[J]. Acta Agronomica Sinica, 2008,34(12):2223-2227. (in Chinese)
- 王宜伦, 李潮海, 谭金芳, 等. 氮肥后移对超高产夏玉米产量及氮素吸收和利用的影响[J]. 作物学报, 2011,37(2):339-347.
WANG Yilun, LI Chaohai, TAN Jinfang, et al. Effect of postponing N application on yield, nitrogen absorption and utilization in super-high-yield summer maize[J]. Acta Agronomica Sinica, 2011,37(2):339-347. (in Chinese)
- 史鑫蕊, 徐强, 胡克林, 等. 灌水次数对绿洲春玉米田氮素损失及水氮利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(3):118-126.
SHI Xinrui, XU Qiang, HU Kelin, et al. Effect of irrigation times on nitrogen loss, water and nitrogen use efficiencies in oasis spring maize farmland[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(3):118-126. (in Chinese)
- 谢迎新, 张淑利, 赵旭, 等. 作物地上部氨排放及对大气氮沉降的吸收[J]. 生态环境学报, 2009, 18(5):1929-1932.
XIE Yingxin, ZHANG Shuli, ZHAO Xu, et al. Ammonia emission and uptake of atmospheric nitrogen deposition of cropshoots[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009, 18(5):1929-1932. (in Chinese)
- 葛均筑, 李淑娅, 钟新月, 等. 施氮量与地膜覆盖对长江中游春玉米产量性能及氮肥利用效率的影响[J]. 作物学报, 2014, 40(6):1081-1092.
GE Junzhu, LI Shuya, ZHONG Xinyue, et al. Effects of nitrogen application and film mulching on yield performance parameters and nitrogen use efficiency of spring maize in the middle reaches of Yangtze river[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(6):1081-1092. (in Chinese)
- 杜衍红, 蒋恩臣, 王明峰, 等. 炭-肥互作对芥菜产量和肥料利用率的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(4):59-64. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160409&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.04.009.
DU Yanhong, JIANG Enchen, WANG Mingfeng, et al. Effect of interaction of biochar and fertilizer on mustard yield and fertilizer utilization rate[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2016,47(4):59-64. (in Chinese)
- LIU X J A, GROENIGEN K J V, DIJKSTRA P, et al. Increased plant uptake of native soil nitrogen following fertilizer addition—not a priming effect? [J]. Applied Soil Ecology, 2017, 114:105-110.
- CHEN Z, XU Y, HE Y, et al. Nitrogen fertilization stimulated soil heterotrophic but not autotrophic respiration in cropland soils: a greater role of organic over inorganic fertilizer[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2015, 116:253-264.
- HASHIM M M, YUSOP M K, OTHMAN R, et al. Characterization of nitrogen uptake pattern in malaysian rice MR219 at different growth stages using ¹⁵N isotope[J]. Rice Science, 2015, 22(5):250-254.

- 13 林晶晶, 李刚华, 薛利红, 等. ¹⁵N 示踪的水稻氮肥利用率细分[J]. 作物学报, 2014, 40(8):1424-1434.
LIN Jingjing, LI Ganghua, XUE Lihong, et al. Subdivision of nitrogen use efficiency of rice based on ¹⁵N tracer[J]. Acta Agronomica Sinica, 2014, 40(8): 1424-1434. (in Chinese)
- 14 沈其荣, 徐国华. 小麦和玉米叶面标记尿素态¹⁵N 的吸收和运输[J]. 土壤学报, 2001, 38(1):67-74.
SHEN Qirong, XU Guohua. Foliar absorption and translocation of labelled urea-¹⁵N in corn and wheat[J]. Acta Pedologica Sinica, 2001, 38(1):67-74. (in Chinese)
- 15 赵丰云, 郁松林, 孙军利, 等. 加气灌溉对温室葡萄生长及不同形态氮素吸收利用影响[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(1):228-234. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180128&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.028.
ZHAO Fengyun, YU Songlin, SUN Junli, et al. Effect of rhizosphere aeration on growth and absorption, distribution and utilization of NH₄⁺-N and NO₃⁻-N of red globe grape seedling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1):228-234. (in Chinese)
- 16 侯毛毛, 邵孝侯, 翟亚明, 等. 基于¹⁵N 示踪技术的烟田肥料氮素再利用分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(增刊1):118-123.
HOU Maomao, SHAO Xiaohou, ZHAI Yaming, et al. Analysis on reutilization characters of fertilizer N in tobacco field with ¹⁵N tracing technique[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(Supp.1): 118-123. (in Chinese)
- 17 崔远来, 李远华, 吕国安, 等. 不同水肥条件下水稻氮素运移与转化规律研究[J]. 水科学进展, 2004, 15(3):280-285.
CUI Yuanlai, LI Yuanhua, LÜ Guoan, et al. Nitrogen movement and transformation with different water supply for paddy rice[J]. Advances in Water Science, 2004, 15(3):280-285. (in Chinese)
- 18 YANG G Z, CHU K Y, TANG H Y, et al. Fertilizer ¹⁵N accumulation, recovery and distribution in cotton plant as affected by N rate and split[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(6):999-1007.
- 19 余卫东, 冯利平, 盛绍学, 等. 黄淮地区涝渍胁迫影响夏玉米生长及产量[J]. 农业工程学报, 2014, 30(13):127-136.
YU Weidong, FENG Liping, SHENG Shaoxue, et al. Effect of waterlogging at jointing and tasseling stages on growth and yield of summer maize[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(13):127-136. (in Chinese)
- 20 REN B Z, ZHANG J W, LI X, et al. Effects of waterlogging on the yield and growth of summer maize under field conditions[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2014, 94: 23-31.
- 21 马玉平, 孙琳丽, 马晓群. 黄淮海地区夏玉米对干旱和涝渍的生理生态反应[J]. 干旱地区农业研究, 2016, 34(4):85-93.
MA Yuping, SUN Linli, MA Xiaoqun. Ecophysiological responses of summer maize to drought and waterlogging in Huang—Huai—Hai plain[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2016, 34(4):85-93. (in Chinese)
- 22 张宏, 周建斌, 刘瑞, 等. 不同栽培模式及施氮对半旱地冬小麦/夏玉米氮素累积、分配及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(1):1-8.
ZHANG Hong, ZHOU Jianbin, LIU Rui, et al. Effects of different cultivation patterns and nitrogen fertilizer on accumulation, distribution and use efficiency of nitrogen in winter wheat/summer maize rotation system on semi-dryland farming[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(1):1-8. (in Chinese)
- 23 苗文芳, 陈素英, 邵立威, 等. 不同灌溉处理对夏玉米氮素吸收及转移的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(2):293-299.
MIAO Wenfang, CHEN Suying, SHAO Liwei, et al. Effect of irrigation on nitrogen uptake and translocation in summer maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(2): 293-299. (in Chinese)
- 24 任佰朝, 朱玉玲, 董树亭, 等. 大田淹水对夏玉米光合特性的影响[J]. 作物学报, 2015, 41(2):329-338.
REN Baizhao, ZHU Yuling, DONG Shuting, et al. Effects of waterlogging on photosynthetic characteristics of summer maize under field conditions[J]. Acta Agronomica Sinica, 2015, 41(2): 329-338. (in Chinese)
- 25 BEHERA S K, PANDA R K. Effect of fertilization and irrigation schedule on water and fertilizer solute transport for wheat crop in a sub-humid-sub-tropical region[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, 130(3-4): 141-155.
- 26 翟丙年, 李生秀. 冬小麦水氮配合关键期和亏缺敏感期的确定[J]. 中国农业科学, 2005, 38(6):1188-1195.
ZHAI Bingnian, LI Shengxiu. Study on the key and sensitive stage of winter wheat responses to water and nitrogen coordination[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(6):1188-1195. (in Chinese)
- 27 张水勤, 袁亮, 李伟, 等. 腐植酸尿素对玉米产量及肥料氮去向的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(5):1207-1214.
ZHANG Shuiqin, YUAN Liang, LI Wei, et al. Effects of humic acid urea on maize yield and the fate of fertilizer nitrogen[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(5): 1207-1214. (in Chinese)
- 28 ICHIR L L, ISMAILI M, Van CIEEMPOT O. Effect of organic and mineral fertilizers on N-use by wheat under different irrigation frequencies[J]. Comptes Rendus-Biologies, 2003, 326(4): 391-399.
- 29 SELIGMAN N G, SINCLAIR T R. Global environment change and simulated for age quality of wheat II. water and nitrogen stress[J]. Field Crops Research, 1995, 40(1): 29-37.
- 30 孟维伟, 王东, 于振文, 等. ¹⁵N 示踪法研究不同灌水处理对小麦氮素吸收分配及利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4):831-837.
MENG Weiwei, WANG Dong, YU Zhenwen, et al. Effects of irrigation on nitrogen uptake and distribution of wheat using the ¹⁵N

- tracer technique[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(4):831-837. (in Chinese)
- 31 陈平, 刘小明, 宋春, 等. 利用¹⁵N研究玉米-大豆套作体系中氮素利用特征[J]. *四川农业大学学报*, 2017, 35(3):300-308.
CHEN Ping, LIU Xiaoming, SONG Chun, et al. Study on nitrogen utilization characteristics in a maize-soybean relay intercropping system by labeled ¹⁵N[J]. *Journal of Sichuan Agricultural University*, 2017, 35(3):300-308. (in Chinese)
- 32 叶优良, 李隆, 张福锁, 等. 灌溉对大麦/玉米带田土壤硝态氮累积和淋失的影响[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(5):105-109.
YE Youliang, LI Long, ZHANG Fusuo, et al. Effect of irrigation on soil NO₃⁻-N accumulation and leaching in maize/barley intercropping field[J]. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(5):105-109. (in Chinese)
- 33 GABRIEL J L, ALONSON-AYUSO M, GARCIA-GONZALEZ I, et al. Nitrogen use efficiency and fertiliser fate in a long-term experiment with winter cover crops[J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 79:14-22.
- 34 ELRICK D E, FRENCH L K. Miscible displacement patterns on disturbed and undisturbed soil cores[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1966, 30(2):153-156.
- 35 郑文生. 氮肥运筹对地下滴灌玉米产量的影响[J]. *节水灌溉*, 2018(3):23-26.
ZHENG Wensheng. Effects of nitrogen application rates on maize yield under subsurface drip irrigation [J]. *Water Saving Irrigation*, 2018(3):23-26. (in Chinese)
- 36 严君, 韩晓增, 王树起, 等. 不同施氮量下一次与分次施氮对大豆土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(3):150-154.
YAN Jun, HAN Xiaozeng, WANG Shuqi, et al. Effects of single and multiple N application under different total N fertilizer on the amount of microorganisms and activity of enzymes of soybean[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(3):150-154. (in Chinese)
- 37 王振华, 权丽双, 郑旭荣, 等. 水氮耦合对滴灌复播油葵氮素吸收与土壤硝态氮的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(10):91-100. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20161013&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.10.013.
WANG Zhenhua, QUAN Lishuang, ZHENG Xurong, et al. Effects of water-nitrogen coupling on nitrogen uptake and nitrate accumulation in soil of oil sunflower in drip-irrigated multiple cropping system[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(10):91-100. (in Chinese)
- 38 周罕觅, 张富仓, ROGER K, 等. 水肥耦合对苹果幼树产量、品质和水肥利用的效应[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(12):173-183. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20151224&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.024.
ZHOU Hanmi, ZHANG Fucang, ROGER K, et al. Effects of water and fertilizer coupling on yield, fruit quality and water and fertilizer use efficiency of young apple tree[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(12):173-183. (in Chinese)
- 39 蔡东玉, 周丽丽, 顾涛, 等. 不同喷灌施氮频率下冬小麦产量和氮素利用研究[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(6):278-286. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180633&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.033.
CAI Dongyu, ZHOU Lili, GU Tao, et al. Yield and nitrogen utilization of winter wheat under different nitrogen application frequencies with sprinkler irrigation system[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(6):278-286. (in Chinese)
- 40 刘啸笑, 何章, 夏冬冬, 等. 温度与土壤水分对玉米幼苗生理特性的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(7):72-77.
LIU Xiaoxiao, HE Zhang, XIA Dongdong, et al. Effects of temperature and soil moisture on physiological characteristics of maize seedlings[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2016, 35(7):72-77. (in Chinese)