

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.033

基于¹⁵N示踪技术的不同水肥条件下玉米氮素利用实验

张忠学^{1,2} 尚文彬^{1,2} 郑恩楠^{1,2} 陈帅宏^{1,2} 陈鹏^{1,2} 刘明^{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: 为了研究不同水肥条件下玉米对氮肥的吸收利用情况, 试验采用¹⁵N示踪技术, 通过设置3个灌溉水平(200、400、600 m³/hm²)以及5个施氮水平(0、150、200、250、300 kg/hm²)研究了玉米成熟期各器官对肥料氮和土壤氮的吸收情况, 不同水肥处理肥料氮对土壤氮的激发规律以及各处理的氮肥有效率。结果表明: 不同水肥条件下玉米吸收肥料中氮素占总氮量的33.32%~43.54%, 吸收土壤中氮素占总氮量的56.46%~66.68%。各器官对肥料氮的竞争能力不同, 由大到小表现为: 籽粒、叶、茎。增加施氮量可以适当提升玉米对土壤中氮素的吸收能力, 但过量施氮时必须通过增加灌水量才能使玉米从土壤吸收更多的氮素。当灌水量为400 m³/hm², 施氮量为250 kg/hm²时产量达到14063.04 kg/hm², 土壤氮库达到平衡状态, 既实现了高产又满足环境友好需求。

关键词: 玉米; 水肥耦合; 氮素吸收; 同位素示踪技术

中图分类号: S513; S311 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2018)10-0292-08

Experiment on Nitrogen Utilization of Maize under Different Water and Fertilizer Conditions Based on ¹⁵N Tracing Technique

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

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
2. Key Laboratory of High Efficiency Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture, Harbin 150030, China)

Abstract: The aim was to study absorption and utilization of nitrogen fertilizer of maize under different water and fertilizer conditions by using the ¹⁵N tracer technique. Three irrigation levels (200 m³/hm², 400 m³/hm² and 600 m³/hm²) and five nitrogen application levels (0 kg/hm², 150 kg/hm², 200 kg/hm², 250 kg/hm² and 300 kg/hm²) were set. The absorption of nitrogen from fertilizer and soil in different organs of maize was studied at maturation stage. Soil nitrogen excitation effect and nitrogen fertilizer efficiency under different water and fertilizer conditions were also studied. The results showed that the nitrogen absorbed from fertilizer by maize accounted for 33.32%~43.54% and the nitrogen absorbed from soil by maize accounted for 56.46%~66.68% under different water and fertilizer conditions. It was showed that soil was the main nitrogen source of maize growth. The different organs' competitive ability to nitrogen from fertilizer was different, and the expression in a descending trend was grain, leaf and stem. Increasing of nitrogen application could improve the absorption ability of maize to nitrogen from soil, but it was necessary to increase the amount of water when excessive nitrogen was applied, in order to make the maize absorb more nitrogen from soil. The ¹⁵N residue in 0~60 cm soil layer was increased with the increase of nitrogen application rate. With the increase of irrigation volume, the residual amount of ¹⁵N on the surface was decreased. When the amount of irrigation was 400 m³/hm² and nitrogen applied was 250 kg/hm², the yield reached 14063.04 kg/hm², and the soil nitrogen reservoir was in equilibrium state which not only achieved high production, but also met the needs of environment friendly. The conclusion can provide reference for the management of corn fertilizer and water and the sustainable development of agriculture.

Key words: maize; coupling of water and fertilizer; nitrogen uptake; isotope tracer technique

0 引言

氮素是营养元素中影响产量的首要因子,氮素的积累和分配对玉米的增产有重要意义^[1-2]。然而,为了追求高产盲目地大量施用氮肥不仅达不到预期的效果,还会降低水肥利用效率,造成环境污染^[3-5]。提高肥料利用率,满足产量与环境友好需求是当前农业可持续性发展以及建设美好生态环境面临的重要科学问题。

传统普遍采用差值法来计算肥料利用率,即将施肥作物收获的养分量减去不施肥作物收获的养分量占施入肥料养分量的比作为肥料利用率^[6]。然而此方法不能识别作物吸收的氮来自于肥料氮还是土壤氮。近年来随着同位素示踪技术的发展,更多的学者采用同位素示踪法来测定肥料利用率^[7]。利用同位素示踪技术,不仅可以得知氮素来源还可以通过其在植株各器官分布状况反映植株长时间对氮素的利用情况以及氮素在植株体内代谢和运转的综合信息^[8]。侯毛毛等^[9]利用¹⁵N 示踪技术得出后季烤烟对首季施入肥料氮素的再利用率为 10.79%~14.58%;赵登超等^[10]采用¹⁵N 标记的肥料测定不同时期的冬枣氮素利用率分别为 2.42%、9.77%、9.01%;董雯怡等^[11]应用¹⁵N 示踪探究毛白杨苗木对不同形态氮素的吸收利用及分配。玉米在我国粮食生产中有着十分重要的地位,已有报道利用示踪法探究玉米对氮素的利用效率,然而关于整个土壤与作物体系氮素流动过程,肥料氮对土壤氮的激发和补偿规律,以及肥料氮真实损失情况还少有报道。

本文在优化的水肥组合方案基础上^[12]控制磷肥、钾肥一致,采用大田试验结合¹⁵N 示踪微区试验的方法,研究不同水氮条件下,玉米各器官中氮素的累积情况及玉米对肥料氮和土壤氮的吸收利用情况,以期对玉米生产节水减肥、提高氮肥利用率提供理论依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验设在黑龙江省肇州县水利科学试验站内(45°17'N,125°35'E),属典型的旱作物试验区,主要进行玉米、大豆等旱田作物的试验研究。该区平均海拔 150 m,属于大陆性温寒带气候,多年生育期平均降雨量约为 390 mm,平均蒸发量 1 733 mm,大于等于 10℃有效积温 2 845℃,无霜期 138 d。属于第一积温带,地下水深度在 7 m 左右。试验土壤为碳酸盐黑钙土(土壤物理性质),容重 1.21 g/cm³。土壤基础肥力(均为质量比):有机质 28.20 g/kg、全氮

1.41 g/kg、全磷 0.88 g/kg、全钾 19.86 g/kg、碱解氮 0.13 g/kg、速效磷 0.04 g/kg、速效钾 0.21 g/kg。

1.2 试验设计

供试玉米品种为“良玉 99”。试验采用 3 个灌溉水平,即 W1(200 m³/hm²)、W2(400 m³/hm²)、W3(600 m³/hm²),5 个施氮水平,即 N0(不施氮)、N1(150 kg/hm²)、N2(200 kg/hm²)、N3(250 kg/hm²)、N4(300 kg/hm²),15 个处理,每个处理 3 次重复,共计 45 个处理小区,每个处理小区面积为 8 m×7.8 m=62.4 m²。与整个试验小区长边平行的两端设置宽度为 5 m 的保护区,与整个试验小区短边平行的两端设置宽度为 1 m 的保护带。在每个小区正中心位置设置微区,微区由长 1.0 m、宽 0.46 m、高 0.4 m 的铁皮框制成。划出微区所在位置后,将铁皮框放到微区所在位置,外围垂直挖出 0.35 m,将铁皮框套入土中,使其周围与土壤紧贴,铁皮框上方露出地表 5 cm。试验于 2017 年 5 月 1 日播种,每公顷保苗 67 500 株,生育期于拔节期、灌浆期灌水两次。灌水方式采用滴灌,滴头间距 20 cm,滴头工作压力 0.1 MPa,滴头流量 2 L/h。各处理均施磷肥(磷酸二铵,N 的质量分数为 18%;P₂O₅ 的质量分数为 46%)90 kg/hm²、钾肥(硫酸钾,K₂O 的质量分数为 54%)90 kg/hm²。磷肥、钾肥作为基肥一次性施入,氮肥(尿素,含 N 质量分数 46%)40% 作为基肥施入,60% 于拔节期与灌浆期随灌水按 1:1 施入。微区所用氮肥为 10.22% 丰度的¹⁵N 标记的尿素(上海化工研究院)。微区中施用的氮肥、钾肥、磷肥及灌水量同其所在的小区。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 植株土壤全氮含量及同位素测定

在玉米成熟期取微区中植株的地上部分,并在取样时用土钻分别取微区中深度为 0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 的土样。将植株清洗干净后分成茎(含鞘和雄穗)、叶(含苞叶)、籽粒 3 部分置于干燥箱中,105℃杀青 30 min,65℃干燥至恒温并称量。植株样品粉碎后过 0.15 mm 筛,土壤样品过 0.25 mm 筛,混匀后连续用四分法取测定所需的样品量。植株全氮采用浓 H₂SO₄-H₂O₂ 消解,土壤全氮采用硫酸铜-硫酸钾-硫酸消解,AA3 型连续流动分析仪(Seal Analytical GmbH,德国,灵敏度 0.001 AUFS)测定各部分全氮含量。植株和土壤同位素测定在东北农业大学农业部水资源高效利用重点实验室完成,采用元素分析仪(Flash 2000 HT,Thermo Fisher Scientific,美国)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玉米各器官以及土壤中的¹⁵N 丰度。

1.3.2 产量测定

在 2017 年 9 月 28 日进行测产,每个小区随机选取 5 点(中心点与对角点),每点连续选 5 株玉米,测其穗长、穗粗、穗质量、百粒鲜质量、百粒干质量,计算出小区产量。

1.3.3 相关指标计算

植株氮素来源于肥料氮素的百分比为

$$N_{diff} = (N_p - N_A) / (N_f - N_A) \times 100\%$$
 (1)

式中 N_p ——植株样品中¹⁵N 丰度,%

N_A ——¹⁵N 的自然丰度,取 0.365%

N_f ——肥料中¹⁵N 丰度,%

植株氮素来源于土壤氮素的百分比为

$$N_{dfs} = 1 - N_{diff}$$
 (2)

植株中肥料氮素含量(F_N)为

$$F_N = N_{diff} D_M N_C$$
 (3)

式中 D_M ——植株干物质量,kg/hm²

N_C ——植株含氮量,%

植株中土壤氮素含量(S_N)为

$$S_N = N_{dfs} D_M N_C$$
 (4)

土壤氮素激发率(S_E)为

$$S_E = N_{PK} / P_K \times 100\%$$
 (5)

式中 N_{PK} ——施氮处理来自土壤中氮量,kg/hm²

P_K ——不施氮处理植株总氮量,kg/hm²

1.3.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2007 对数据进行整理,使用 SPSS 16.0 统计分析数据,LSD 法进行显著性检验。采用 Origin 9.0 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同水肥条件下玉米各器官肥料氮素与土壤氮素吸收利用

器官的 N_{diff} 是指作物各器官从肥料氮中吸收的氮量对该器官全氮的贡献率,反映了各器官对¹⁵N 的吸收征调能力^[10]。玉米不同器官来自肥料中的

氮素和来自土壤中的氮素如图 1 所示。不同水肥条件下,玉米茎来自肥料中的氮素为 26% ~ 37%,玉米叶来自肥料中的氮素为 28% ~ 40%,玉米籽粒来自肥料中的氮素为 23% ~ 46%。当灌水量相同, N1 处理的玉米茎、叶、籽粒来自肥料中的氮素显著低于 N2、N3、N4 处理($P < 0.05$)。说明当施氮量较低时,玉米各器官中氮素主要来自于土壤。N1 处理时,3 种灌水条件下玉米叶来自肥料中的氮素显著高于玉米籽粒来自肥料中的氮素($P < 0.05$),但与玉米茎来自肥料中的氮素差异不显著($P > 0.05$)。随着施氮量的增加,各器官来自肥料中的氮素整体呈上升趋势,而各器官来自土壤中的氮素整体呈下降趋势。说明增加施氮量可以提升植株对肥料氮素的利用能力,减小土壤中氮素的消耗。处理 W2N3 玉米籽粒来自肥料中的氮素最大达到了 46%,且显著高于其他处理($P < 0.05$),籽粒吸收肥料氮素与土壤氮素的比例接近 1:1。玉米茎来自肥料中的氮素为 31%,玉米叶来自肥料中的氮素为 34%,玉米各器官对肥料氮的竞争能力由大到小表现为籽粒、叶、茎(各器官间差异显著, $P < 0.05$)。说明适宜的水肥组合可以提升玉米生殖器官对肥料氮的利用,减少玉米营养器官对肥料氮素的利用,进而提升玉米的产量。

表 1 为不同水肥处理下玉米各器官对肥料氮和土壤氮的吸收总量。由表 1 可以看出,当灌水量为 W1 和 W2 时,随着施氮量的增加各器官从肥料中吸收的氮量呈先增加后减小的趋势;当灌水量为 W3 时,随着施氮量的增加各器官从肥料中吸收的氮量呈持续增大趋势。当灌水量为 W1 时,N3 处理来自肥料中的氮量最高,较 N1、N2 和 N4 分别高出了 106% ($P < 0.05$)、20.89% ($P < 0.05$)和 9.71% ($P > 0.05$);当灌水为 W2 时,N3 处理来自肥料中的氮量最高,较 N1、N2 和 N4 分别高出了 123% ($P < 0.05$)、37.34% ($P < 0.05$)和 4.60% ($P > 0.05$);当

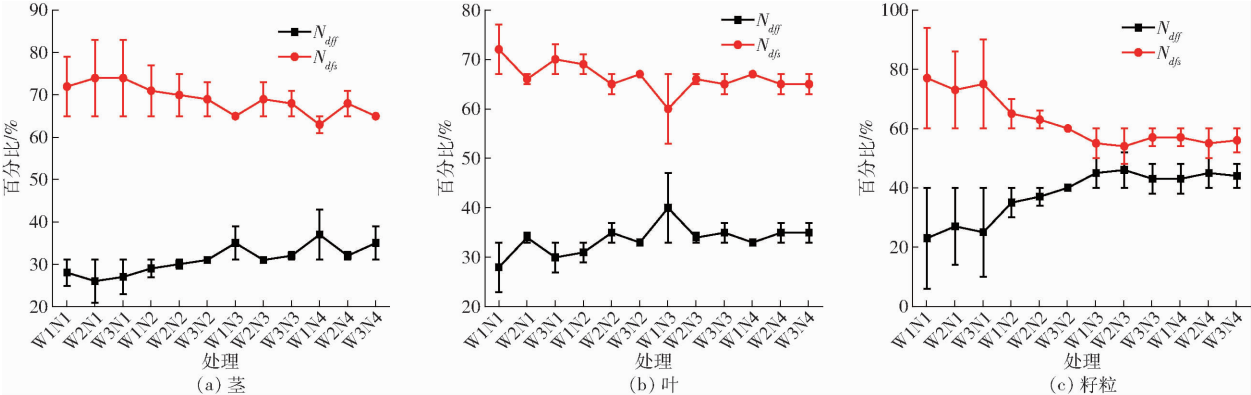


图 1 玉米对肥料氮与土壤氮的吸收

Fig. 1 Absorption of nitrogen from fertilizer and soil by maize

灌水为 W3 时,N4 处理来自肥料中的氮量最高,较 N1、N2 和 N3 分别高出了 123% ($P < 0.05$)、30.69% ($P < 0.05$)和 4.42% ($P > 0.05$)。表明,当水量充足时,增加施氮量可以促进植株对肥料氮的吸收能力,而灌水量不足时,过量氮肥对植株肥料氮的吸收能力出现抑制作用但抑制作用不显著。不同器官从肥料中吸收的氮量不同,由大到小表现为:籽粒、叶、茎。籽粒、叶、茎从肥料中吸收的氮量分别占总量的 62.33% ~ 68.59%、16.66% ~ 22.69%、8.72% ~ 21.01%。不同水肥条件下植株对¹⁵N 吸收量占总量的 33.32% ~ 43.54%,对土壤中氮素的吸收量占总量的 56.46% ~ 66.68%。所有处理植株吸收土壤中的氮量均高于植株吸收肥料中的氮量。

表 1 不同水肥条件的玉米对肥料氮和土壤氮的吸收总量
Tab.1 Uptake of nitrogen from fertilizer and soil by maize under different water and fertilizer conditions

处理	来自肥料氮			来自土壤氮		
	茎	叶	籽粒	茎	叶	籽粒
	kg/hm ²					
W1N0	0	0	0	16.85 ^e	22.93 ^{cd}	54.35 ^c
W1N1	8.27 ^e	9.99 ^e	24.12 ^d	21.05 ^d	25.75 ^e	77.29 ^b
W1N2	12.35 ^b	14.19 ^b	45.92 ^c	30.10 ^{ab}	31.26 ^{bc}	84.29 ^a
W1N3	13.80 ^{ab}	17.56 ^{ab}	56.24 ^{bc}	25.27 ^{bc}	26.24 ^e	68.58 ^c
W1N4	13.32 ^b	16.50 ^b	50.02 ^c	22.37 ^{cd}	33.93 ^b	66.74 ^c
W2N0	0	0	0	17.88 ^d	23.60 ^{cd}	56.78 ^c
W2N1	8.63 ^e	10.04 ^c	28.76 ^d	24.77 ^e	25.06 ^e	77.90 ^b
W2N2	12.79 ^b	15.14 ^b	48.95 ^c	30.34 ^{ab}	29.03 ^{bc}	82.46 ^{ab}
W2N3	14.69 ^{ab}	18.26 ^{ab}	72.64 ^a	32.38 ^a	35.54 ^{ab}	86.03 ^a
W2N4	13.83 ^{ab}	17.65 ^{ab}	69.46 ^{ab}	29.14 ^{ab}	33.01 ^{ab}	84.03 ^{ab}
W3N0	0	0	0	19.55 ^d	20.22 ^d	54.13 ^c
W3N1	8.60 ^e	9.78 ^c	27.16 ^d	22.74 ^{cd}	23.27 ^{cd}	80.74 ^{ab}
W3N2	12.39 ^b	16.12 ^b	49.21 ^c	27.38 ^b	32.77 ^b	72.59 ^{bc}
W3N3	15.39 ^a	19.60 ^a	62.29 ^b	28.43 ^{ab}	36.93 ^{ab}	81.43 ^{ab}
W3N4	15.62 ^a	19.95 ^a	66.01 ^b	29.55 ^{ab}	37.95 ^a	83.11 ^{ab}

注:同列数据后不同小写字母表示同种器官不同处理在 0.05 水平差异显著,下同。

2.2 不同水肥条件下肥料氮对土壤氮的激发效应

有学者将施用无机氮肥使土壤中有有机氮分解的现象称为激发效应^[13-14]。氮素的激发效应反映了土壤氮库的盈亏和平衡状况。由表 2 可以看出,在不同水肥处理下,土壤氮素激发率为 127% ~ 160%。所有处理均产生了正激发效应。除 W1 处理外,N1 处理下土壤氮素激发率均为最低。当灌水量为 W2 时,施氮量为 N1 处理的土壤氮素激发率较其他处理降低了 14、27、19 个百分点($P < 0.05$),当灌水量为 W3 时,施氮量为 N1 的处理土壤氮素激发率较其他处理降低 7、22、26 个百分点($P < 0.05$)。

表明当灌水充足时,随着施氮量的增加,作物从土壤中吸收的氮量也不断上升,而灌水不足时,过量施氮会抑制作物从土壤中吸收氮素。在灌水量为 W1、W2、W3 时,土壤氮素激发率达到最大对应的施氮量分别为 N2、N3、N4,土壤氮素激发率达到了 154%、157% 和 160%。表明灌水和施肥均会影响土壤氮素激发效应,过量氮肥的施入会抑制土壤呼吸,使土壤稳定碳分解而促进土壤碳的累积,增大碳氮比,降低土壤氮素激发效应。而通过灌水可以增加土壤水分有效性,补充微生物细胞水,提高微生物活性,使土壤有机碳矿化增加,降低碳氮比,增加土壤氮素激发效应。

表 2 土壤氮的激发效应
Tab.2 Soil nitrogen excitation effect %

灌水	施氮	土壤氮素激发率
W1	N1	131 ^b
	N2	154 ^a
	N3	127 ^b
	N4	130 ^b
W2	N1	130 ^b
	N2	144 ^a
	N3	157 ^a
	N4	149 ^a
W3	N1	134 ^b
	N2	141 ^{ab}
	N3	156 ^a
	N4	160 ^a

2.3 不同水肥条件下土壤肥料氮素残留量

图 2 为不同土层中肥料氮素的残留量。从图中可以看出,不同水肥处理¹⁵N 在 0 ~ 60 cm 土层中的总残留量为 16.54 ~ 117.55 kg/hm²。随着施氮量的增加,0 ~ 60 cm 土层中的¹⁵N 残留量总体呈增加趋势,不同施氮处理之间差异显著($P < 0.05$)。当灌水量为 W1 时,随着土层深度的增加¹⁵N 残留量呈明显降低趋势。0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm 土层中¹⁵N 残留量分别占¹⁵N 残留总量的 41.99% ~ 42.86%、32.40% ~ 34.70% 和 22.44% ~ 25.61% (各土层间差异显著, $P < 0.05$)。当灌水量为 W2 时,土层中¹⁵N 含量分布较均匀。0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm 土层中¹⁵N 残留量分别占¹⁵N 残留总量的 36.13% ~ 38.54%、33.14% ~ 35.22% 和 26.24% ~ 30.73% (0 ~ 20 cm 土层与 20 ~ 40 cm 土层间差异不显著, $P > 0.05$;与 40 ~ 60 cm 土层间差异显著, $P < 0.05$)。当灌水量为 W3 时,0 ~ 20 cm 土层中¹⁵N 的残留量明显减小,而 40 ~ 60 cm 土层中¹⁵N 的残留量呈增加趋势。0 ~ 20 cm、20 ~ 40 cm、40 ~ 60 cm 土层中¹⁵N 残留量分别占¹⁵N 残留总量的

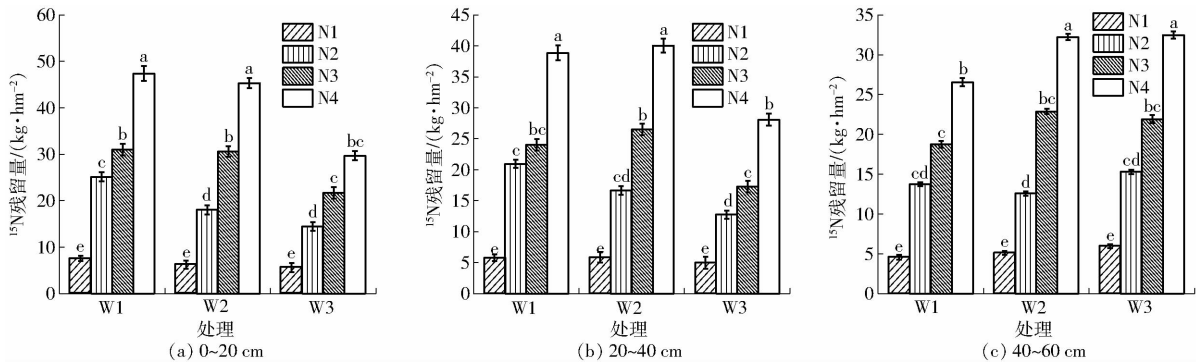


图 2 不同土层¹⁵N 残留量

Fig.2 Residual of ¹⁵N in different soil layers

32.89% ~ 35.63%、28.37% ~ 35.12% 和 29.25% ~ 38.74% (各土层间差异不显著, $P > 0.05$)。

2.4 不同水肥条件下氮肥损失

氮肥损失率必须基于肥料氮、土壤氮素以及作物吸氮“三氮”之间关系,将主要根区残留的肥料氮看作是对土壤氮素的一种补偿效应,更加全面客观地反映氮肥效果,确定最佳水肥组合方案。表 3 为不同水肥条件下的氮肥损失率。不同水肥处理的氮肥损失率为 25.79% ~ 45.28%。W3N1 处理氮肥损失率最高,达到了 45.28%,显著高于其他处理 ($P < 0.05$)。这可能是由于灌水过多,施氮量过低,施入的氮肥多数溶于水中随水流失造成的。相同施氮条件下氮肥损失率整体由大到小依次为 W3、W1、W2。可见灌水是影响氮肥损失率的重要因素,过量灌水会使大量的肥料随水流失,而灌水量不足时会对氮肥产生抑制作用。相同灌水条件下 N1 处理的氮肥损失率都显著高于其他处理,氮肥损失率高达 42.48%、41.59% 和 45.28% ($P < 0.05$)。在 N1 条件下,不同水分处理间,作物吸收的¹⁵N 都显著低于其他处理 ($P < 0.05$),表明施氮量过低会无法满足植株生长需求,出现过早萎蔫现象,提高了氮肥损失率。W2N3、W2N4 处理的氮肥损失率显著低于其他处理 ($P < 0.05$)。说明适宜水肥配比会充分发挥水和肥的作用,使其被植株充分利用,减少水肥的损失。

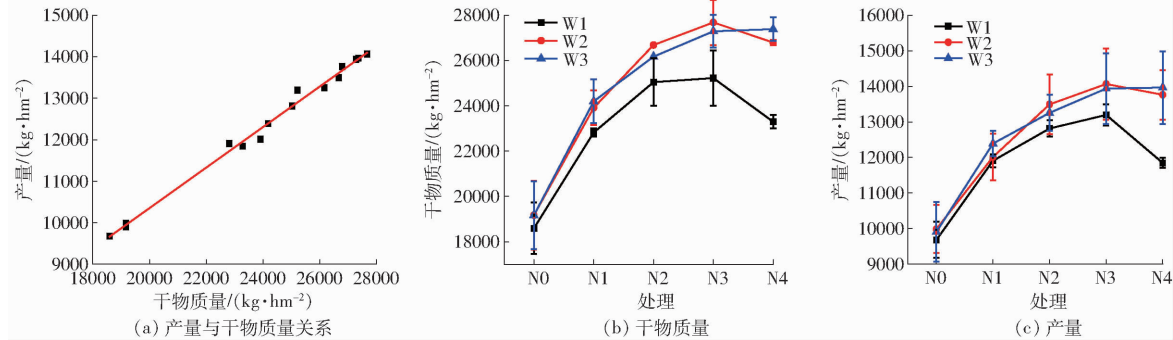


图 3 不同水肥条件下玉米产量与干物质量

Fig.3 Yield and dry mass of maize under different water and fertilizer conditions

表 3 不同水肥条件的氮肥损失率

Tab.3 Nitrogen fertilizer loss rate under different water and fertilizer conditions

处理	¹⁵ N 施用量/ (kg·hm ⁻²)	作物吸收 ¹⁵ N 量/ (kg·hm ⁻²)	土壤残留 ¹⁵ N 量/ (kg·hm ⁻²)	氮肥损失 率/%
W1N1	150	42.38 ^d	17.90 ^e	42.48 ^{ab}
W1N2	200	72.46 ^c	59.83 ^c	33.86 ^c
W1N3	250	87.6 ^{bc}	73.76 ^c	35.46 ^{bc}
W1N4	300	79.84 ^c	112.79 ^a	35.79 ^{bc}
W2N1	150	47.43 ^d	17.19 ^e	41.59 ^{ab}
W2N2	200	76.88 ^c	47.27 ^d	37.93 ^{bc}
W2N3	250	105.59 ^a	79.93 ^{bc}	25.79 ^d
W2N4	300	100.94 ^{ab}	117.55 ^a	27.17 ^d
W3N1	150	45.54 ^d	16.54 ^e	45.28 ^a
W3N2	200	77.72 ^c	42.51 ^d	39.89 ^b
W3N3	250	97.28 ^b	60.84 ^c	36.75 ^{bc}
W3N4	300	101.58 ^{ab}	90.23 ^b	36.06 ^{bc}

2.5 不同水肥条件下玉米产量与干物质量

图 3a 为不同水肥处理下玉米产量与干物质量间的关系。从图 3a 中可以看出玉米产量与干物质累积量呈线性分布规律,具有较强的相关性,决定系数 $R^2 = 0.9928$ 。说明不同水肥处理对玉米产量与干物质量的影响基本一致。由图 3b、3c 可以看出,与不施氮相比,施氮可以显著提升玉米干物质量与产量 ($P < 0.05$)。但施氮对产量和干物质量提升存在阈值,当灌水量为 W1 和 W2 时,随着施氮量的增

加,产量和干物质累积量均呈先增加后减小的趋势,在施氮量为 N3 时干物质量和产量达到最大,W1 分别为 25 218.68、13 192.88 kg/hm²,W2 分别为 27 672.60、14 063.04 kg/hm²,显著高于其他处理($P<0.05$)。当灌水量为 W3 时,随着施氮量的增加产量和干物质累积量呈持续增加趋势,在施氮量为 N4 时干物质量和产量达到最大(与 N3 处理差异不显著, $P>0.05$;与其他处理差异显著, $P<0.05$),分别为 27 377.33、13 963.73 kg/hm²。说明灌水量过低会使土壤含水率过低无法满足肥料需求,造成胁迫作用。而灌水量过高会使肥料随着灌水流失,无法充分发挥肥料作用。

3 讨论

氮是玉米生长所需的必要元素,水分对作物生长起着重要的制约作用^[15-16]。许多学者^[17-19]都得出:水氮对玉米产量的影响最显著。因此,本试验控制磷肥、钾肥一致(均为 90 kg/hm²),在不同的水氮组合方案上应用被¹⁵N 标记过的氮肥探究肥料氮和土壤氮在玉米不同器官中的吸收分配规律。同时对各水氮组合下,氮肥损失率进行分析计算。结果表明:植株来自肥料中的氮素与全氮量有着密切的关系,含氮量高的器官中肥料氮的比例也更大(由大到小为籽粒、叶、茎)。潘晓丽等^[20]对不同肥力土壤中玉米氮素吸收和利用规律做了探究,也得到了类似的结论。不同的水氮组合中,玉米中来自肥料中的氮为 33.32%~43.54%,来自土壤中的氮为 56.46%~66.68%。这与山楠等^[21]的研究成果一致,都得出了土壤是植物最主要供氮源的结论。沈善敏^[6]在田间试验中得出了随¹⁵N 施用量增加,作物从土壤吸收的氮也增加的结果。而本研究表明:随着灌水量的增加,提高施氮量,作物从土壤中吸收的氮量增加。这可能是由于在本试验中施氮量的范围较大,最高施氮量达到了 300 kg/hm²,而前者的最高施氮量仅为 189 kg/hm²。过量的施氮会导致土壤微生物活性降低,而灌水会使土壤湿润,微生物细胞自溶使其营养物质释放到土壤溶液中,提升微生物活性。土壤中微生物对施入的氮素和土壤中的氮素进行一系列的矿化,并且将施入的标记氮素替代非标记的氮素被固定,使土壤中更多的氮元素被利用。

许多学者研究表明^[6,22-26]:我国的氮肥利用率仅为 20%~35%,而西方发达国家可以达到 50%~60%。且氮肥施用量越低肥料利用率越高。近年来,越来越多的学者对此感到质疑。李世清等^[22]认为应该采用叠加氮肥利用率,宇万太等^[23]表明¹⁵N 标记法和传统差值法得出的结果不可信,并对比值

法进行了验证,王火焰等^[24]提出了肥料养分真实利用率,田昌玉等^[25]对氮肥利用率进行了规范,巨晓棠^[26]则提出了氮肥有效率。本研究对巨晓棠^[26]所提出的氮肥有效率进行了分析,并在此基础上对氮肥利用率、肥料氮对土壤氮的激发效应、土壤氮库平衡做了分析计算。结果表明:不同水肥处理下,氮肥利用率为 26.61%~42.24%,且氮肥利用率并不是随着施氮量的增加而减小。在施氮量 250 kg/hm²,灌水量为 400 m³/hm² 时,氮肥利用率最高为 42.24%。而无论在低氮处理(吸氮量小)还是高氮处理(尽管吸收氮量增加,但分母增加更大)氮肥利用率都很低。不同水肥条件下,氮肥损失率达到 25.79%~45.28%。施入的氮肥除转为有效养分供植物吸收利用和用于补充被作物吸收的土壤氮外,主要通过以下两种途径损失:①经过土壤理化作用移动到不能被植物根系吸收利用的深层土壤中。②通过气体如氨挥发和硝化反硝化损失。朱兆良等^[27]曾在国家尺度上对我国部分地区农田中氮肥去向做了初步估计,氨挥发损失占 11%,硝化和反硝化是氮肥损失的主要途径,占 34%,土壤残留等占 15%。SEBILO 等^[28]用¹⁵N 做了 30 a 的示踪实验,虽然没能最终获得肥料氮被消耗完的真实利用率,但却有 61%~65% 的肥料氮被累积利用,仍有 15% 的肥料氮有待被利用,残留在土壤中的肥料氮仅有 10% 被真实损耗。在本文研究中,将玉米主要根系残留的肥料作为对土壤氮库补偿的一种手段。不同水氮处理下土壤氮库盈亏情况如表 4 所示。在计算土壤氮库盈余时除了要考虑作物带走土壤氮和土壤残留肥料氮外还要考虑到秸秆还田和干湿沉降对土壤氮的补充(50~75 kg/hm²)。不同灌水量下施入所能维持土壤氮库平衡的氮肥量不同。具体表现为随灌水量的增加,施入维持土壤氮库平衡的氮量也增加。当施入氮肥过低时不仅使作物产量降低还会耗竭土壤氮。而施入氮肥过高时,盈余的氮素会造成水体与大气的污染。虽然本试验并未对土壤中的硝态氮、铵态氮作具体的测量,但大量的研究^[15,29-31]都表明土壤中盈余的氮素会让土壤中硝态氮严重累积,硝态氮的迁移和渗漏对地下水造成严重的污染。硝化和反硝化作用产生的 N₂O 对全球变暖的贡献高达 7%,其微小的累积就会给臭氧层带来长期的破坏。同时,灌溉量一定时,随着施氮量的增加水分利用效率均呈先增加后减小的趋势。而当施氮量一定时,在一定范围内增加灌水量有助于提高水分利用效率,灌水量过高反而会降低水分利用效率。水分利用效率是决定玉米经济效益的重要指标。合理有效的水肥调控有助于提高水分利用

效率,避免资源浪费。

表 4 收获后土壤氮素盈亏情况
Tab.4 Budget of soil N after harvest kg/hm²

处理	作物带走土 壤氮量	土壤残留 肥料氮量	土壤氮素 盈亏量
W1N0	94.13 ^d	0	-94.13
W1N1	124.09 ^c	17.90 ^e	-106.19
W1N2	145.65 ^{ab}	59.83 ^c	-85.82
W1N3	120.09 ^{cd}	73.76 ^c	-46.33
W1N4	123.04 ^{cd}	112.79 ^a	-10.25
W2N0	98.26 ^d	0	-98.26
W2N1	127.73 ^{bc}	17.19 ^e	-110.54
W2N2	141.83 ^{ab}	47.27 ^d	-94.56
W2N3	153.95 ^a	79.93 ^{bc}	-74.02
W2N4	146.18 ^{ab}	117.55 ^a	-28.63
W3N0	93.90 ^d	0	-93.90
W3N1	126.75 ^c	16.54 ^e	-110.21
W3N2	132.74 ^b	42.51 ^d	-90.28
W3N3	146.79 ^{ab}	60.84 ^c	-85.95
W3N4	150.61 ^{ab}	90.23 ^b	-60.38

4 结 论

(1)通过¹⁵N 同位素标记发现,作物从肥料中获取的氮要少于作物从土壤中获取的氮。各器官对氮

的竞争能力由大到小为籽粒、叶、茎,且不同水肥处理下,这种竞争趋势不同。当灌水量 400 m³/hm²、施氮量为 250 kg/hm²时这种竞争最明显,籽粒中吸收的肥料氮素占植株吸收肥料氮素的 68.79%,而茎与叶中吸收的肥料氮素分别占植株吸收肥料氮素的 13.91% 和 17.30%。

(2)不同灌水量下最适宜的氮肥施用量不同。当灌水量为 200 m³/hm²时施入 250 kg/hm²的氮肥可获得最高产量 13 192.88 kg/hm²,最高干物质量 25 218.68 kg/hm²;当灌水量为 400 m³/hm²时施入 250 kg/hm²的氮肥可获得最高产量 14 063.04 kg/hm²,最高干物质量 27 672.60 kg/hm²;当灌水量为 600 m³/hm²时施入 300 kg/hm²的氮肥可获得最高产量 13 963.73 kg/hm²,最高干物质量 27 377.33 kg/hm²。

(3)通过对玉米产量、经济效益、玉米对肥料氮以及土壤氮的吸收能力,土壤氮库盈余水平以及环境友好的角度综合考量,在黑龙江省西部地区玉米最佳灌水量为 400 m³/hm²,最佳施氮量为 250 kg/hm²,在此条件下玉米产量为 14 063.04 kg/hm²,氮肥利用率为 42.24%,土壤氮库处于平衡状态,氮肥向环境中损失率为 25.79%。

参 考 文 献

1 丁晋利,武继承,杨永辉,等. 长期保护性耕作对冬小麦氮素积累和转运的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 240-246,341. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170232&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.02.032.
DING Jinli, WU Jicheng, YANG Yonghui, et al. Effects of long-term conservation tillage on nitrogen accumulation and translocation of winter wheat[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 240-246, 341. (in Chinese)

2 OTTMAN M J, POPE N V. Nitrogen fertilizer movement in the soil as influenced by nitrogen rate and timing in irrigated wheat[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000, 64(5): 1883-1892.

3 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)

4 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)

5 张忠学,郑恩楠,王长明,等. 不同水氮处理对水稻荧光参数和光合特性的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 176-183. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170623&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.06.023.
ZHANG Zhongxue, ZHENG Ennan, WANG Changming, et al. Effect of different water and nitrogen levels on chlorophyll fluorescence parameters and photosynthetic characteristics of rice[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017,48(6):176-183. (in Chinese)

6 沈善敏. 关于肥料利用率的猜想[J]. 应用生态学报, 2005, 16(5): 781-782.
SHEN Shanmin. A conjecture on the fertilizer recovery measurement by field experiment [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2005, 16(5): 781-782. (in Chinese)

7 习向银,晁逢春,李春俭. 利用¹⁵N 示踪法研究土壤氮对烤烟氮素累积和烟碱合成的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(6): 1232-1236.
XI Xiangyin, ZHAO Fengchun, LI Chunjian. Effect of soil-N on nitrogen and nicotine accumulation in flue-cured tobacco using ¹⁵N-traced method[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(6): 1232-1236. (in Chinese)

8 YOUSFI S, SERRET M D, MARQUEZ A J, et al. Combined use of δ¹³C, δ¹⁸O and δ¹⁵N tracks nitrogen metabolism and genotypic

- adaptation of durum wheat to salinity and water deficit[J]. *New Phytologist*, 2012, 194(1): 230–244.
- 9 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)
- 10 赵登超, 姜远茂, 彭福田, 等. 不同施肥时期对冬枣¹⁵N 贮藏及翌年分配利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(8): 1626–1631.
ZHAO Dengchao, JIANG Yuanmao, PENG Futian, et al. Storage and remobilization of nitrogen by Chinese jujube (*Z. jujuba* Mill. var. *inermis* Rehd) seedling as affected by timing of ¹⁵N supply[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(8): 1626–1631. (in Chinese)
- 11 董雯怡, 聂立水, 李吉跃, 等. 应用¹⁵N 示踪研究毛白杨苗木对不同形态氮素的吸收及分配[J]. *北京林业大学学报*, 2009, 31(4): 97–101.
DONG Wenyi, NIE Lishui, LI Jiyue, et al. Effects of nitrogen forms on the absorption and distribution of nitrogen in *Populus tomentosa* seedlings using the technique of ¹⁵N tracing[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2009, 31(4): 97–101. (in Chinese)
- 12 张忠学, 张世伟, 郭丹丹, 等. 玉米不同水肥条件的耦合效应分析与水肥配施方案寻优[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(9): 206–214. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20170926&flag=1. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.09.026.
ZHANG Zhongxue, ZHANG Shiwei, GUO Dandan, et al. Coupling effects of different water and fertilizer conditions and optimization of water and fertilizer schemes on maize[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(9): 206–214. (in Chinese)
- 13 HAUCK R D, BRENNER J M. Use of tracers for soil and fertilizer nitrogen research[J]. *Advances in Agronomy*, 1976, 28(23): 219–266.
- 14 JENKINSON D S, FOX R H, RAYNER J H. Interactions between fertilizer nitrogen and soil nitrogen—the so-called ‘priming’ effect[J]. *European Journal of Soil Science*, 2010, 36(3): 425–444.
- 15 张君, 赵沛义, 潘志华, 等. 基于产量及环境友好的玉米氮肥投入阈值确定[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(12): 136–143.
ZHANG Jun, ZHAO Peiyi, PAN Zhihua, et al. Determination of input threshold of nitrogen fertilizer based on environment-friendly agriculture and maize yield[J]. *Transactions of the CSAE*, 2016, 32(12): 136–143. (in Chinese)
- 16 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)
- 17 张忠学, 聂堂哲, 王栋. 黑龙江省西部半干旱区玉米膜下滴灌水、氮、磷耦合效应分析[J]. *中国农村水利水电*, 2016(2): 1–4.
ZHANG Zhongxue, NIE Tangzhe, WANG Dong. The coupling effect of water, N and P with drip irrigation under plastic film on maize yield in semi-arid region of western Heilongjiang Province[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2016(2): 1–4. (in Chinese)
- 18 邵书静, 薛吉全, 张仁和, 等. 不同时期氮肥配比对饲用玉米产量和品质的影响[J]. *西北农业学报*, 2006, 15(1): 56–59, 99.
TAI Shujing, XUE Jiquan, ZHANG Renhe, et al. Effects of proportionate fertilizing nitrogen at different stage on yield and quality of forage corn[J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 2006, 15(1): 56–59, 99. (in Chinese)
- 19 唐碧芳, 周晓舟, 蒋益敏. 氮磷钾对南方秋玉米产量及经济性性状的影响[J]. *园艺与种苗*, 2012(5): 63–65, 74.
TANG Bifang, ZHOU Xiaozhou, JIANG Yimin. Effects of nitrogen-phosphorus-potassium on yield and economic traits of southern autumn maize[J]. *Horticulture & Seed*, 2012(5): 63–65, 74. (in Chinese)
- 20 潘晓丽, 林治安, 袁亮, 等. 不同土壤肥力水平下玉米氮素吸收和利用的研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2013(1): 8–13.
PAN Xiaoli, LIN Zhian, YUAN Liang, et al. Nitrogen uptake and use of summer maize under different soil fertility levels[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2013(1): 8–13. (in Chinese)
- 21 山楠, 杜连凤, 毕晓庆, 等. 用¹⁵N 肥料标记法研究潮土中玉米氮肥的利用率与去向[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22(4): 930–936.
SHAN Nan, DU Lianfeng, BI Xiaoqing, et al. Nitrogen use efficiency and behavior studied with ¹⁵N labeled fertilizer in maize in fluvo-aquic soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22(4): 930–936. (in Chinese)
- 22 李世清, 李生秀. 旱地农田生态系统氮肥利用率的评价[J]. *中国农业科学*, 2000, 33(1): 79–84.
LI Shiqing, LI Shengxiu. Estimation of nitrogen fertilizer use efficiency in dryland agroecosystem[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(1): 79–84. (in Chinese)
- 23 宇万太, 周桦, 马强, 等. 氮肥施用对作物吸收土壤氮的影响——兼论作物氮肥利用率[J]. *土壤学报*, 2010, 47(1): 90–96.
YU Wantai, ZHOU Hua, MA Qiang, et al. Effect of N fertilizer on up-take of soil N by crops with special discussion on fertilizer nitrogen re-recovery rate[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47(1): 90–96. (in Chinese)
- 24 王火焰, 周健民. 肥料养分真实利用率计算与施肥策略[J]. *土壤学报*, 2014, 51(2): 216–225.
WANG Huoyan, ZHOU Jianmin. Calculation of real fertilizer use efficiency and discussion on fertilization strategies[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(2): 216–225. (in Chinese)

- Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, 1999.
- 55 VAN GENUCHTEN M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892–898.
- 56 MUALEM Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. Water Resources Research, 1976, 12(3): 513–522.
- 57 CARSEL R F, PARRISH R S. Developing joint probability distributions of soil water retention characteristics[J]. Water Resources Research, 1988, 24(5): 755–769.
- 58 RAB M A, CHANDRA S, FISHER P D, et al. Modelling and prediction of soil water contents at field capacity and permanent wilting point of dryland cropping soils[J]. Soil Research, 2011, 49(5): 389–407.
- 59 张建丰, 帖西宁, 杨潇, 等. 土壤初始含水率对深层坑灌入渗特性的影响[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18(5): 44–50.
ZHANG Jianfeng, TIE Xi'ning, YANG Xiao, et al. The impact of initial soil water content on infiltration properties of deep pit infiltration irrigation[J]. Journal of China Agricultural University, 2013, 18(5): 44–50. (in Chinese)
- 60 张智韬, 吴普特, 陈俊英, 等. 涌泉根灌土壤湿润体运移模型[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(2): 173–179.
ZHANG Zhitao, WU Pute, CHEN Junying, et al. Prediction model of wetted front migration distance under bubbled-root irrigation[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2013, 31(2): 173–179. (in Chinese)
- 61 费良军, 刘显, 王佳, 等. 土壤容重对涌泉根灌土壤水氮运移特性的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(8): 219–228.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170825&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.025.
FEI Liangjun, LIU Xian, WANG Jia, et al. Effects of soil bulk density on transport characteristics of water and nitrogen under bubbled-root irrigation[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(8): 219–228. (in Chinese)
- 62 MORIASI D N, ARNOLD J G, VAN LIEW M W, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3): 885–900.
-

(上接第 299 页)

- 25 田昌玉, 林治安, 赵秉强, 等. 氮肥利用率测定规范化探讨[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(4): 327–333.
TIAN Changyu, LIN Zhian, ZHAO Bingqiang, et al. Discussing the determination standard of recovery efficiency of nitrogen fertilizer[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2016, 33(4): 327–333. (in Chinese)
- 26 巨晓棠. 氮肥有效率的观念及意义——兼论对传统氮肥利用率的理解误区[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 921–933.
JU Xiaotang. The concept and meanings of nitrogen fertilizer availability ratio — discussing misunderstanding of traditional nitrogen use efficiency[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(5): 921–933. (in Chinese)
- 27 朱兆良, 金继运. 保障我国粮食安全的肥料问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 259–273.
ZHU Zhaoliang, JIN Jiyun. Fertilizer use and food security in China[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(2): 259–273. (in Chinese)
- 28 SEBILO M, MAYER B, NICOLARDOT B, et al. Long-term fate of nitrate fertilizer in agricultural soils[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(45): 18185–18189.
- 29 银敏华, 李援农, 李昊, 等. 氮肥运筹对夏玉米根系生长与氮素利用的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(6): 129–138.
http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=20160617&flag=1. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.06.017.
YIN Minhua, LI Yuannong, LI Hao, et al. Effects of nitrogen application rates on root growth and nitrogen use of summer maize[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(6): 129–138. (in Chinese)
- 30 于红梅, 李子忠, 龚元石. 传统和优化水氮管理对蔬菜地土壤氮素损失与利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2007, 23(2): 54–59.
YU Hongmei, LI Zizhong, GONG Yuanshi. Comparison of nitrogen loss and use efficiency of vegetable in vegetable field under traditional and improved water and N-fertilizer management[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(2): 54–59. (in Chinese)
- 31 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?file_no=20180128&flag=1. 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 NH_4^+-N and NO_3^--N of red globe grape seedling[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 228–234. (in Chinese)