

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.02.031

不同水氮管理模式对玉米地土壤氮素和肥料氮素的影响

张忠学^{1,2} 刘明^{1,2} 齐智娟^{1,2}

(1. 东北农业大学水利与建筑学院, 哈尔滨 150030;

2. 东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要: 为了解决东北地区灌溉条件下水氮合理施用问题,以大田试验为基础,采用¹⁵N同位素示踪技术,设置3个灌水定额水平(W1:40 mm, W2:60 mm, W3:80 mm)和3个施氮量水平(N1:180 kg/hm², N2:240 kg/hm², N3:300 kg/hm²),分析比较了不同水氮管理模式对玉米地土壤氮素的吸收、土壤无机氮残留、土壤-作物氮平衡以及肥料氮去向的影响。结果表明:随着施氮量的增加,0~100 cm土层铵态氮、硝态氮的含量和累积量均呈现增加的趋势;提高灌水量可以提高60~100 cm土层铵态氮累积量、80~100 cm土层硝态氮累积量。对土壤-作物氮平衡的研究表明,增加施氮量可以提高土壤无机氮残留量和氮素盈余,而作物氮素吸收量随着施氮量的增加呈先增后减的趋势,氮素盈余量和表观损失量随灌水量的增加表现为先降低后增加。肥料氮累积量随着施氮量的增加呈先增后减的趋势,施氮量300 kg/hm²时肥料氮累积量占比21.27%~31.23%,肥料氮残留量和损失量所占比例均有所提高。玉米植株氮素中有66.70%~75.05%来自于对土壤氮的累积,随着施氮量的增加,玉米植株土壤氮素累积量呈先增后减的趋势。综合不同水氮管理模式对玉米地土壤无机氮残留、土壤-作物氮平衡以及肥料氮去向的影响得出,灌水60 mm、施氮240 kg/hm²的水氮组合可保证肥料氮的充分利用,减少无机氮的残留和损失。

关键词: 玉米; 水氮管理; 铵态氮; 硝态氮; 氮平衡; 同位素示踪技术

中图分类号: S513; S143.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2020)02-0284-08

OSID:



Effects of Different Water and Nitrogen Managements on Soil Nitrogen and Fertilizer Nitrogen in Maize Field

ZHANG Zhongxue^{1,2} LIU Ming^{1,2} QI Zhijuan^{1,2}

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

2. Key Laboratory of Effective Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: In order to solve the problem of rational application of water and nitrogen under irrigation conditions in Northeast China, an experiment with three irrigation levels (W1:40 mm, W2:60 mm, W3:80 mm) and three nitrogen levels (N1:180 kg/hm², N2:240 kg/hm², N3:300 kg/hm²) was carried out in the field conditions with ¹⁵N isotope tracer technique. The results showed that the accumulations of ammonia nitrogen and nitrate nitrogen in the 0~100 cm soil layer was increased with the increase of nitrogen application, so did the contents in the different layers. The ammonia nitrogen accumulation in 60~100 cm layer and the nitrate nitrogen accumulation in 80~100 cm layer were increased due to the increase of irrigation amount. The soil inorganic nitrogen residue and nitrogen surplus were increased with the increase of nitrogen application, however, the crop nitrogen absorption was decreased first and then increased. The nitrogen surplus and apparent loss was decreased first and then increased with the increase of irrigation water amount. The accumulation of fertilizer nitrogen was increased first and then decreased with the increase of nitrogen application. The proportion of accumulated fertilizer nitrogen was 21.27%~31.23%, and the proportion of residual fertilizer nitrogen and nitrogen loss were increased when 300 kg/hm² nitrogen was applied. As the nitrogen in maize plants, of which 66.70%~75.05%

收稿日期: 2019-07-12 修回日期: 2019-12-09

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(51809042)

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

通信作者: 齐智娟(1987—),女,讲师,博士后,主要从事土壤水热运移和节水灌溉理论与技术研究, E-mail: zhijuanqi@neau.edu.cn

came from the accumulation of soil nitrogen. The accumulation of soil nitrogen in maize plants was increased first and then decreased with the increase of nitrogen application. Combined with the effects of different water and nitrogen management on inorganic nitrogen residue in maize soil, soil-crop nitrogen balance and the fate fertilizer nitrogen, the water and nitrogen combination of 60 mm irrigation and 240 kg/hm² nitrogen application can ensure the full utilization of fertilizer nitrogen and reduce the residue and loss of inorganic nitrogen.

Key words: maize; water and nitrogen management; ammonia nitrogen; nitrate nitrogen; nitrogen balance; isotope trace technology

0 引言

在农田系统中,施入土壤中的氮肥经过硝化和脲酶作用后,转化为能够被作物吸收利用的铵态氮和硝态氮,部分 NO₃⁻ 盐和 NH₄⁺ 盐经历淋洗、反硝化、NH₃挥发以及 NO₂⁻ 的化学分解等途径从土壤中损失,大部分将存在于土壤中,且主要为硝态氮。一季作物收获后,土壤中依然有氮存留,可以供下一季作物吸收利用^[1-2]。现阶段作物增产方式主要是通过增施氮肥和提高灌水量来实现,这往往导致肥料氮的大量浪费和土壤中无机氮的大量残留,同时,肥料氮和无机氮随灌水向深层土体淋失也将引发一系列的环境问题^[3-4]。中国北方地区氮肥的当季利用率仅为 30%~35%^[5],随着生育期的进行,土壤氮素含量降低,作物氮素增加,土壤中减少的氮素量与作物中增加的氮素量存在一定关系^[6-7]。

已有的研究表明,高施氮处理玉米氮素累积量高于低施氮处理,而中等施氮条件下植株氮素累积量最高,氮肥利用率较高,高灌水更容易导致硝态氮的淋失^[8-9]。隗英华等^[10]对东北地区春玉米的研究指出,随着施氮量增加,氮肥农学利用率、氮素吸收效率和氮素偏生产力均显著降低,氮盈余主要以土壤残留为主。张忠学等^[11]利用¹⁵N示踪技术对玉米肥料氮的吸收利用进行了深入研究,发现籽粒对于肥料氮的竞争能力大于叶和茎。

已有关于作物氮素的研究大多集中于产量和氮素农学效率方面,只考虑单一变量对土壤无机氮残留和土壤氮库盈亏的影响,而关于不同水氮配比对土壤无机氮残留,特别是对于玉米地土壤-作物氮平衡的研究很少。本文在前人研究基础上,探究喷灌条件下不同水氮用量对于东北黑土区玉米土壤无机氮的残留特征和水氮两因素对于土壤-作物氮平衡的影响,同时借助于¹⁵N同位素示踪技术,研究肥料氮在土壤中的残留和玉米植株中土壤氮素累积量及其分配特征,并对肥料氮的去向进行系统的分析,以期为东北地区玉米种植过程中水氮合理施用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2018年4—10月在黑龙江省肇州县水利科学试验站进行。试验站位于45°17'N、125°35'E,属大陆性温寒带气候。年降雨量在400~500 mm之间,平均蒸发量1 733 mm,有效积温2 845℃,无霜期138 d,属于第一积温带,试验土壤为碳酸盐黑钙土。试验区土壤质量田间持水率为31.78%,土壤pH值为6.4。土壤有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾含量(质量比)分别为28.20、1.41、0.88、19.86、0.13、0.04、0.21 g/kg。

1.2 试验设计

试验设置灌水定额和施氮量2个因素。灌水定额设置3个水平:W1(40 mm)、W2(60 mm)、W3(80 mm)。氮肥施用量设置3个水平为:N1(180 kg/hm²)、N2(240 kg/hm²)、N3(300 kg/hm²),磷肥和钾肥施用量均为90 kg/hm²,同时设置不施氮不灌水的对照(CK)处理,共10个处理,每个处理3次重复,共30个小区。各小区面积104 m²(10.4 m×10 m)。每公顷保苗67 500株,各小区均采用65 cm小垄种植,每小区16条垄,株距23.0 cm。保护区宽度为5 m,保护行宽度为1 m,隔离带宽度为1.3 m(即2条垄)。于各小区正中心设置微区,微区采用长2.0 m、宽0.6 m、高0.4 m的铁皮框制成。将铁皮框放到划出的微区所在位置,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。

试验所用的肥料为尿素(氮质量分数46%)、磷酸二铵(氮质量分数18%,含磷质量分数46%)和硫酸钾(钾质量分数58%),施肥方式为撒施,不覆膜,微区内施用的氮肥为丰度10.22%的¹⁵N标记的尿素。各处理的肥料施用量均是经过折算后的氮、磷、钾元素的施用量,磷肥和钾肥全部作基肥施入,氮肥1/2随底肥施入,剩余1/2在拔节期施入。供试玉米品种为“大龙568”。试验于2018年5月1日播种,分别在拔节期、抽雄期灌水两次,各次灌水定额比例为1:1,其中拔节期灌水是在施完拔节肥

随后进行灌水,6月30日追肥,撒施尿素,拔节期7月1日灌水,抽雄期7月20日灌水。

喷灌采用5983型摇臂式喷头(喷洒半径9.0~14.0 m,流量0.74~1.02 m³/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,调节喷头射程略微小于小区长度。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。

1.3 观测内容及方法

1.3.1 植株含氮量

成熟期在微区取样,将植株沿地上部分取下,用农用压缩喷雾器将植株冲洗干净,并将植株按不同器官放入干燥箱中,105℃下杀青30 min后,60℃干燥至恒定质量。将干燥后的样品放置在干燥箱中冷却,冷却后称量干物质量,将干燥后的样品用球磨机磨碎,过80目筛后混匀,采用H₂SO₄-H₂O₂消煮,取消煮后的清液,采用德国SEAL Analytical公司生产的AutoAnalyzer-6 III型流动分析仪,测定成熟期植株各器官含氮质量分数。

1.3.2 土壤含氮量及同位素测定

玉米收获后,在微区按“S”形采集深度100 cm的土壤样品,取样分层为0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm、60~80 cm和80~100 cm。每层取3个平行样,同层次混合。将部分土样105℃干燥至恒定质量,并计算土壤容重及含水率,将干燥的土样磨碎后用于测定土样中¹⁵N丰度。其余土壤样品用2 mol/L KCl浸提,并使用AA3型连续流动分析仪(Seal Analytical GmbH,德国,灵敏度0.001 AUFS)测定土壤各层硝态氮、铵态氮、土壤全氮含量。

植株和土样同位素测定在东北农业大学农业农村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型,Thermo Fisher Scientific,美国)和同位素质谱仪(DELTA V Advantage,Thermo Fisher Scientific,美国)联用的方法测定收获后不同土层土壤中的¹⁵N丰度。

1.3.3 相关指标计算

植株氮素累积量计算公式为

$$N_{AA} = D_m N_c \quad (1)$$

式中 D_m ——植株干物质量,g

N_c ——植株含氮率

植株氮素来源于肥料氮素的百分比计算公式为

$$N_{df} = (N_p - N_c) / (N_f - N_c) \times 100\% \quad (2)$$

植株氮素来源于土壤氮素的百分比计算公式为

$$N_{dfs} = 1 - N_{df} \quad (3)$$

式中 N_p ——微区内植株样品的¹⁵N丰度

N_c ——天然¹⁵N丰度标准值(0.3663% ¹⁵N)

N_f ——¹⁵N标记尿素中¹⁵N丰度

植株中肥料氮素累积量为 N_{df} 与植株氮素累积量的乘积。

植株中土壤氮素累积量为 N_{dfs} 与植株氮素累积量的乘积。

各层土壤的氮素总量按社会英等^[12]的公式计算,即

$$T_s = \rho V N_s \quad (4)$$

式中 T_s ——各层土壤氮素总量,kg/hm²

ρ ——各层土壤容重,g/cm³

V ——各层土壤体积,m³

N_s ——各层土壤全氮质量比,g/kg

肥料氮土壤残留量(N_{soil})计算公式为

$$N_{soil} = (N_e - N_c) / (N_f - N_c) T_s \times 100\% \quad (5)$$

式中 N_e ——微区中土壤样品的¹⁵N丰度

肥料氮损失量为施氮量减去植株中肥料氮素累积量和肥料氮土壤残留量。参考巨晓棠等^[13]的方法计算0~100 cm土层氮素平衡参数,土壤无机氮残留量为土层厚度与土壤容重、土壤无机氮含量的乘积除以10,土壤氮素净矿化量为不施氮区作物吸氮量与不施氮区土壤无机氮残留量的和减去不施氮区土壤起始无机氮累积量,土壤氮素表现损失量为施氮量、土壤起始无机氮累积量、土壤氮素净矿化量三者之和减去作物吸氮量和土壤无机氮残留量,氮素盈余量为氮素表现损失量与收获后土壤无机氮残留量的和。

1.4 数据处理

采用Microsoft Excel 2010记录数据,SPSS 16.0统计分析数据,LSD法进行显著性检验。采用Microsoft Excel 2010绘图。

2 结果与分析

2.1 不同水氮管理对土壤无机氮含量的影响

2.1.1 对土壤剖面铵态氮含量的影响

如图1可知,玉米收获后,0~100 cm土层铵态氮质量比在0.40~5.97 mg/kg之间,随着土层加深总体呈现先降低再升高再降低的趋势,由大到小依次为0~20 cm、20~40 cm、60~80 cm、40~60 cm、80~100 cm。施氮处理的铵态氮含量高于CK处理,其中N3W1处理0~60 cm土层的铵态氮含量最高,N3W3处理60~100 cm土层铵态氮含量最高。相同灌水量条件下,随着施氮量增加,各层土壤铵态氮含量呈增加趋势,相同土层N3各处理较CK处理各土层铵态氮含量分别提高了84.82%~385.77%,N2、N3处理0~40 cm铵态氮含量较CK处理提高

31.69% ~ 174.34%, N1、N2 各处理在 40 ~ 60 cm 的铵态氮含量接近,而当土层深度在 60 ~ 100 cm 时,N2、N1 较 CK 处理提高 115.01% ~ 377.93%、N3 较 CK 处理提高 246.40% ~ 786.33%,说明高施氮量能提升各层土壤铵态氮含量。相同施氮量条件下,0 ~ 60 cm 土层铵态氮含量随灌水量的增加而减小,其中 0 ~ 40 cm 土层中施氮处理在 W2、W3 水平下的含量较 W1 下降 13.52% ~ 41.47%,而 W3 和 W2 水平下铵态氮含量接近;60 ~ 100 cm 土层的铵态氮含量随灌水量增加出现增加的趋势,N2W3 处理较 N2W1 处理在 60 ~ 80 cm、80 ~ 100 cm 土层的铵态氮含量增幅最高,达到 27.56%、65.23%。

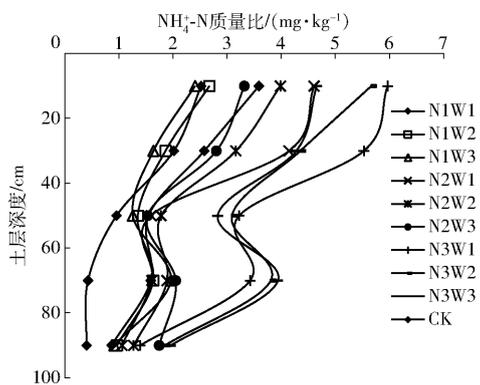


图1 不同土层深度铵态氮质量比

Fig. 1 Ammonia nitrogen content in different soil layers

2.1.2 对土壤剖面硝态氮含量的影响

如图2所示,玉米收获后,相同处理相同土层硝态氮含量明显高于铵态氮。与铵态氮含量变化趋势相似,在 60 ~ 80 cm 土层中呈增加的趋势后,在 80 ~ 100 cm 又呈降低趋势,施氮灌水处理较 CK 处理增加明显。各处理 0 ~ 20 cm 的硝态氮含量最高,与 40 ~ 60 cm 接近,而 60 ~ 80 cm 含量较 40 ~ 60 cm 的含量有小幅提升。相同灌水水平下,随着施氮量的提高,施氮处理 0 ~ 100 cm 土层的硝态氮含量均较 CK 处理提升明显,其中 N2、N3 处理 80 ~ 100 cm 土

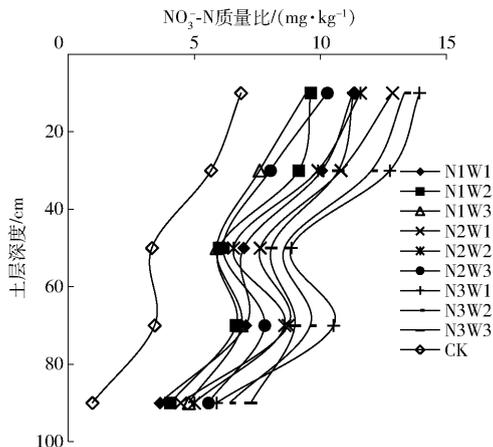


图2 不同土层深度硝态氮质量比

Fig. 2 Nitrate nitrogen content in different soil layers

层硝态氮含量增幅最高,达 366.37% ~ 656.55%,说明增施氮肥在对土壤硝态氮含量有显著提升的同时对底层土壤的硝态氮含量影响显著。N3 和 N2 水平各土层硝态氮含量均较 N1 有明显增加,同时 N3 的增幅高于 N2。相同施氮水平下,随着灌水量的增加,0 ~ 60 cm 的硝态氮含量均呈下降趋势,40 ~ 60 cm 硝态氮含量下降最大;60 ~ 100 cm 呈增加趋势,但不同灌水水平下的硝态氮含量接近。

2.2 不同水氮管理对土壤无机氮累积量的影响

2.2.1 对成熟期土壤铵态氮累积量的影响

由表1可知,玉米收获后,0 ~ 100 cm 土层中铵态氮累积量在 19.29 ~ 47.57 kg/hm²之间。随着施氮量的增加,0 ~ 100 cm 土层铵态氮的累积量呈上升趋势,且相同灌水水平下,各个土层铵态氮累积量均随着施氮量的增加而增加,不同施氮量条件下 0 ~ 100 cm 土层铵态氮总累积量差异显著 ($P < 0.05$)。施氮处理 60 ~ 80 cm 土层较 40 ~ 60 cm 土层铵态氮累积量有所提高。相同灌水水平下,N1 各处理与 CK 处理各土层铵态氮累积量间没有明显差异 ($P > 0.05$),但 N3 与 N2、N1 处理 0 ~ 80 cm 土层铵态氮累积量均差异显著 ($P < 0.05$)。相同施氮水平下,0 ~ 100 cm 土层铵态氮累积量随着灌水量的增加而减小,施氮处理 W3 与 W1 水平下的累积量差异显著 ($P < 0.05$),而 W3 与 W2 无明显差异。0 ~ 60 cm 土层铵态氮累积量随着灌水量的提高而减少,除 N1W3 处理外,60 ~ 100 cm 土层铵态氮累积量随着灌水量的增加而增加。

表1 不同处理不同土层铵态氮的累积量

Tab. 1 Ammonia nitrogen accumulation of different treatments in different soil layers kg/hm²

处理	土层深度/cm					合计
	0 ~ 20	20 ~ 40	40 ~ 60	60 ~ 80	80 ~ 100	
N1W1	8.61 ^{bc}	6.29 ^{cd}	3.74 ^{bc}	3.91 ^{bc}	2.19 ^{bc}	24.74 ^e
N1W2	6.42 ^{cd}	4.55 ^d	3.27 ^{bc}	4.02 ^{bc}	2.46 ^b	20.72 ^f
N1W3	5.78 ^{cd}	4.00 ^d	3.04 ^{bc}	4.82 ^b	2.32 ^{ab}	19.96 ^f
N2W1	10.06 ^b	10.11 ^b	3.86 ^{bc}	3.95 ^{bc}	2.68 ^b	30.66 ^c
N2W2	9.56 ^{bc}	7.57 ^c	4.64 ^b	4.65 ^{bc}	3.23 ^{ab}	29.65 ^{cd}
N2W3	7.96 ^c	6.83 ^c	3.70 ^{bc}	5.05 ^b	4.43 ^{ab}	27.97 ^d
N3W1	14.32 ^a	13.49 ^a	7.80 ^a	8.42 ^a	3.54 ^{ab}	47.57 ^a
N3W2	13.58 ^a	10.62 ^b	7.47 ^a	9.36 ^a	4.70 ^{ab}	45.73 ^{ab}
N3W3	11.18 ^b	10.43 ^b	6.83 ^a	9.69 ^a	4.96 ^a	43.09 ^b
CK	7.65 ^{cd}	6.15 ^{cd}	2.89 ^c	1.32 ^c	1.28 ^c	19.29 ^f

注:同列不同小写字母表示处理在 5% 水平上差异显著,下同。

2.2.2 对成熟期土壤硝态氮累积量的影响

由表2可知,玉米收获后 0 ~ 100 cm 土层硝态氮累积量在 61.37 ~ 126.70 kg/hm²之间,比较表1

表2 不同处理不同土层硝态氮的累积量

Tab.2 Nitrate nitrogen accumulation of different treatments in different soil layers kg/hm²

处理	土层深度/cm					合计
	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100	
N1W1	27.09 ^e	24.51 ^{bc}	16.83 ^{bc}	17.32 ^e	9.23 ^d	94.98 ^d
N1W2	23.08 ^d	22.28 ^e	14.46 ^e	16.34 ^e	10.06 ^{cd}	86.22 ^e
N1W3	22.61 ^d	18.50 ^d	14.23 ^e	16.90 ^e	12.13 ^e	84.37 ^e
N2W1	30.85 ^b	26.38 ^b	18.41 ^b	21.43 ^b	11.32 ^{cd}	108.39 ^b
N2W2	27.77 ^e	24.14 ^{bc}	15.85 ^e	21.10 ^b	12.68 ^e	101.54 ^e
N2W3	24.64 ^{cd}	19.52 ^d	14.88 ^e	19.15 ^e	14.12 ^{bc}	92.34 ^d
N3W1	33.41 ^a	31.10 ^a	21.38 ^a	25.87 ^a	14.94 ^b	126.70 ^a
N3W2	31.99 ^{ab}	29.33 ^a	20.74 ^{ab}	23.59 ^{ab}	16.26 ^{ab}	121.91 ^a
N3W3	27.12 ^e	26.11 ^b	19.46 ^{ab}	22.08 ^b	18.36 ^a	113.13 ^b
CK	20.53 ^e	17.25 ^{ef}	10.03 ^d	10.53 ^d	3.03 ^{ef}	61.37 ^f

和表2可知,相同处理硝态氮累积量明显高于铵态氮。施氮处理0~100 cm 土层硝态氮累积量较CK处理有明显提高。0~100 cm 土层硝态氮累积量随着施氮量的增加呈现增加趋势,相同灌水水平下,不同施氮处理之间均差异显著($P < 0.05$),同时各层土壤硝态氮累积量也均随施氮量增加有不同程度增加,0~20 cm 土层的硝态氮累积量增加最多。N1、N2、N3 施氮水平下各层土壤硝态氮累积量较CK处理提高2.08~12.88 kg/hm²;80~100 cm 土层硝态氮累积量增幅高于其他层土壤。随着灌水量增加,0~100 cm 土层硝态氮累积量呈现递减趋势,且相同施氮量条件下W1和W3水平下硝态氮累积量差异显著($P < 0.05$)。除N1W2和N1W3处理外,其他处理硝态氮累积量在0~80 cm 土层均随灌水量的增加而减小;在80~100 cm 土层随着灌水量的增加而增加,同时80~100 cm 硝态氮累积量占0~100 cm 的比例由W1水平下的27.43%~28.67%增加到W2、W3水平下的28.62%~37.82%。灌水量的增加使得0~80 cm 硝态氮累积量降低,增加了80~

100 cm 土壤硝态氮累积量,增加了硝态氮向深层土壤淋失的风险。

2.2.3 对土壤-作物氮平衡的影响

由表3可以看出,施氮处理的氮素输入方式中肥料氮占比达到40.38%~53.02%,播前无机氮和矿化氮占比19.92%~25.28%和27.06%~34.34%。输出量中作物吸收量占比47.54%~63.60%,是氮素输出的主要方式。随施氮量的增加玉米氮素吸收量呈现先增后减的趋势,N2W3处理较高,与N2W2处理接近。相同施氮量条件下,W2、W3水平下玉米氮素吸收量较W1有明显提高($P < 0.05$),相同灌水水平下,N2、N3处理与N1处理差异显著($P < 0.05$),施氮灌水处理均较CK处理有明显提高。施氮处理0~100 cm 土层土壤残留无机氮量占输出量的比例为23.40%~29.63%,无机氮残留量与CK处理差异显著($P < 0.05$)。无机氮残留量由高到低表现为N3、N2、N1;相同施氮水平下,无机氮残留由高到低表现为W1、W2、W3,且W1和W3处理差异显著($P < 0.05$)。N3水平的3个处理无机氮残留量达到156.22~174.27 kg/hm²,与N1、N2处理差异显著($P < 0.05$)。表观损失量占输出量的比例为10.46%~25.60%。W1处理表观损失量最高,W2处理表观损失量最低。N3施氮量条件下,相同施氮量不同灌水量处理的表观损失量差异显著($P < 0.05$)。氮素盈余由大到小表现为N3、N2、N1,N2、N3施氮水平下,氮素盈余量随灌水量增加表现为先降低后增加,这与表观损失量的规律相同。灌水施氮处理氮素输出的各项指标均较CK处理有明显提高,且均表现出显著差异($P < 0.05$),适宜的水氮管理有助于土壤-作物氮平衡系统向着提高作物吸氮量、减少土壤残留的方向发展,对节约水氮用量和环境保护起到积极作用。

表3 不同处理土壤-作物氮平衡

Tab.3 Soil - crop nitrogen balance of different treatments

处理	氮输入			氮输出			氮素盈余量
	施氮量	播前无机氮量	净矿化量	作物吸收量	无机氮残留量	氮表观损失量	
N1W1	180	112.7	153.09	211.93 ^e	119.72 ^e	114.14 ^{bc}	233.86 ^d
N1W2	180	112.7	153.09	268.23 ^e	106.94 ^f	70.62 ^e	177.56 ^f
N1W3	180	112.7	153.09	260.57 ^{cd}	104.33 ^f	80.89 ^d	185.22 ^f
N2W1	240	112.7	153.09	267.66 ^e	139.05 ^e	99.08 ^e	238.13 ^{cd}
N2W2	240	112.7	153.09	321.67 ^a	131.19 ^d	52.93 ^f	184.12 ^f
N2W3	240	112.7	153.09	288.34 ^b	120.31 ^e	97.14 ^e	217.45 ^e
N3W1	300	112.7	153.09	252.47 ^d	174.27 ^a	139.05 ^a	313.33 ^a
N3W2	300	112.7	153.09	319.81 ^a	167.64 ^a	78.34 ^d	245.98 ^e
N3W3	300	112.7	153.09	286.42 ^b	156.22 ^b	123.15 ^b	279.37 ^b
CK	0	112.7	153.09	185.13 ^f	80.66 ^g	0 ^g	80.66 ^g

2.4 不同水氮管理植株对土壤氮素的利用

从表4可知,随着施氮量的增加,玉米植株土壤氮素累积量呈现先增后减的趋势,同一灌水水平下N2处理较N1处理提高7.37%~22.39%,N2处理与N1处理差异显著($P < 0.05$)。N2、N3施氮水平下植株土壤氮的累积量随着灌水量的增加而增加,相同施氮量W1、W2、W3水平下的植株土壤氮累积量差异显著($P < 0.05$),当施氮量为180 kg/hm²时,W2、W3处理植株土壤氮累积量接近,但均与W1处理差异显著($P < 0.05$)。结合表3和表4可以得出,玉米植株中氮素有66.70%~75.05%来自于对土壤氮的累积,其中占比最高的是N1W3处理,N2W2处理土壤氮累积量达到214.55 kg/hm²,占植株氮素累积量的比例最低。各器官土壤氮累积量由大到小顺序为籽粒、叶、茎(茎和茎鞘),籽粒、叶、茎、穗轴+苞叶占植株土壤氮累积量比例分别

表4 不同处理玉米土壤氮累积量

Tab.4 Soil nitrogen accumulation in different treatments of maize kg/hm²

处理	茎	叶	穗轴+苞叶	籽粒	合计
N1W1	7.67 ^c	21.87 ^d	8.51 ^a	120.56 ^e	158.61 ^e
N1W2	12.89 ^{ab}	36.41 ^b	8.45 ^a	142.07 ^c	199.83 ^c
N1W3	11.84 ^b	28.04 ^c	7.27 ^a	148.42 ^b	195.57 ^c
N2W1	7.64 ^c	40.34 ^b	8.53 ^a	137.62 ^{cd}	194.12 ^c
N2W2	15.90 ^a	48.87 ^a	8.76 ^a	141.02 ^c	214.55 ^b
N2W3	13.51 ^{ab}	40.83 ^b	8.36 ^a	163.43 ^a	226.13 ^a
N3W1	7.57 ^c	38.56 ^b	9.52 ^a	133.01 ^d	188.66 ^d
N3W2	13.13 ^{ab}	39.03 ^b	9.05 ^a	135.93 ^{cd}	197.14 ^c
N3W3	13.58 ^{ab}	37.20 ^b	7.41 ^a	150.02 ^b	208.21 ^b

为65.73%~76.01%、13.79%~22.78%、3.94%~7.41%、3.70%~5.37%。叶的土壤氮累积量随施氮量的增加呈现先增后减的趋势,籽粒土壤氮累积量随着灌水量的增加而增加。研究结果表明,中等施氮可以促进茎、叶、籽粒对于土壤氮的累积,而提高灌水量可以促进籽粒吸收土壤中的氮素。

2.5 不同水氮管理对肥料氮去向的影响

由表5可知,中等施氮水平下,植株肥料氮累积量最高,在氮肥去向中占比最大,当施氮量增加到300 kg/hm²时,土壤¹⁵N残留量成为占比最高的部分。植株肥料氮累积量随施氮量和灌水量的增加均呈现先增加后减小的趋势,植株肥料氮累积量由大到小表现为N2、N3、N1和W2、W3、W1,除N1水平外,相同施氮不同灌水处理肥料氮的累积量影响显著($P < 0.05$)。肥料残留量随着施氮量的增加而增加、随着灌水量的增加而减小,且相同灌水量条件下,N3水平下与N2、N1肥料氮损失量差异显著($P < 0.05$),相同施氮量条件下,W1处理肥料氮残留量与W2差异显著($P < 0.05$)。随着灌水量的增加肥料氮损失量先减少后增加,这与植株肥料氮累积量的趋势相反。从各去向的占比来看,中等施氮条件下植株氮素累积量所占的比例最高,当施氮量由240 kg/hm²增加到300 kg/hm²时,肥料氮残留量和肥料氮损失量所占比例均有所提高,而施氮量300 kg/hm²时肥料利用率为21.67%~31.23%,造成大量的氮肥残留或者损失。N1、N3各处理在灌水量80 mm时损失量以及损失量占比在各自施氮水平下均最高,这说明高灌水有增加肥料损失的风险。

表5 不同处理肥料氮去向

Tab.5 Fertilizer nitrogen whereabouts of different treatments

处理	施氮量/ (kg·hm ⁻²)	去向1		去向2		去向3	
		植株吸收 ¹⁵ N量/ (kg·hm ⁻²)	比例/%	0~100 cm 土层残留 ¹⁵ N量/(kg·hm ⁻²)	比例/%	¹⁵ N损失量/ (kg·hm ⁻²)	比例/%
N1W1	180	53.32 ^e	29.62	71.92 ^d	39.96	54.76 ^e	30.42
N1W2	180	73.54 ^{cd}	40.86	64.09 ^e	35.61	42.37 ^f	23.54
N1W3	180	63.81 ^d	35.45	59.89 ^f	33.27	56.30 ^e	31.28
N2W1	240	68.40 ^d	28.50	88.18 ^e	36.74	83.42 ^e	34.76
N2W2	240	107.12 ^a	44.63	74.08 ^d	30.87	58.80 ^e	24.50
N2W3	240	91.20 ^b	38.00	70.03 ^d	29.18	78.77 ^d	32.82
N3W1	300	63.81 ^d	21.27	123.79 ^a	41.26	112.40 ^a	37.47
N3W2	300	93.68 ^b	31.23	115.52 ^b	38.51	90.80 ^b	30.27
N3W3	300	78.21 ^c	26.07	112.41 ^b	37.47	109.38 ^a	36.46

3 讨论

长期施加化肥可以培育高肥力土壤,上茬作物残留在土壤中的无机氮可以作为储备为下茬作物所

利用,是作物不减产的保证^[13],潘家荣等^[14]对中国北方地区小麦/夏玉米轮作的土壤无机氮残留量的研究表明,无机氮残留量不宜超过100 kg/hm²。农业生产中,氮肥的去向主要包括作物吸收利用、以无

机氮形式残留在土壤中以及淋洗、径流和氨挥发等途径的损失^[15],而淋溶损失是肥料氮和无机氮特别是硝态氮损失的主要方式。灌溉区农业土壤中残留的无机氮将会随灌溉水淋溶而无法被下季作物利用,土壤中氮素的吸收可以改变土壤剖面中硝态氮的分布和淋洗状态,但当施氮量超过作物需求时,土壤无机氮累积量会随施氮量的增加而增加^[16]。本试验研究显示,施氮量 240 kg/hm²时,作物的氮素累积量和土壤氮累积量均最高,这与尚文彬等^[17]的研究结果相近,而本试验的研究还显示,当施氮量为 300 kg/hm²时,底层 80~100 cm 土层铵态氮和硝态氮含量较 CK 处理提高最为明显,这是由于 NO₃⁻-N 粒子带负电,土壤胶体粒子对硝态氮的吸附能力弱,降水及不合理灌溉将会加剧硝态氮的淋溶。本研究中灌水量的增加降低了表层土壤铵态氮和硝态氮的含量,提高了 60~100 cm 土层的铵态氮含量、80~100 cm 土层硝态氮含量,80~100 cm 土层硝态氮累积量以及占 0~100 cm 土层的比例也呈现增加的趋势,硝态氮有向下层土壤累积和淋失的风险。肥料氮和播前土壤提供的氮素是植物氮素的主要来源,播前土壤提供的无机氮和有机氮在土壤中的矿化,是播前土壤能够供给作物氮素的两个主要部分^[18]。从土壤和作物体系氮平衡的角度看,本研究中肥料氮为氮输入量的主要来源,本试验中当施氮量 240 kg/hm²时,氮输入量已达到 505.79 kg/hm²,已远超玉米全生育期吸氮量,这也导致继续增施氮肥至 300 kg/hm²时土壤无机氮累积量和氮表观损失量过高,土壤氮素大量盈余。N2W2 处理氮表观损失量最低,无机氮残留量也维持在相对较低的水平,同时 W2 灌水水平下的氮素盈余量和 W3 水平相近,有利于维持土壤-作物体系的氮素平衡,这与侯云鹏等^[19]的研究结果一致。杨荣等^[20]对沙地绿洲农田玉米肥料吸收利用率的研究中指出,地上部植株氮肥吸收利用率为 19.87%~49.85%。张忠学等^[11]在利用¹⁵N 同位素对玉米追肥氮素去向研究中指出,有 8.81%~24.89%的追肥氮素残留在土壤中。本试验中 0~100 cm 土层¹⁵N 残留量所占比例为 29.18%~40.87%,¹⁵N 损失量所占比例为 24.50%~37.47%,且肥料氮损失量和残留量均随着施氮量的升高而升高,这与山楠等^[21]的研究结果相近。张忠学等^[22]的研究发现,水稻成熟期氮素积累量中

77.77%~84.51%来自于土壤氮素,徐明杰等^[23]指出玉米累积的氮素中有 70%左右来源于土壤,这与本试验研究结果相同。同时本试验研究结果还表明,成熟期玉米各器官土壤氮累积量大小依次为籽粒、叶、茎(茎和茎鞘),增加灌水量可以提高籽粒对于土壤氮素的吸收。本试验利用¹⁵N 示踪技术对肥料氮的去向做了进一步研究,发现随着施入肥料氮的增加 0~100 cm 土层肥料氮残留和损失都明显增加,随着灌水量的增加¹⁵N 损失量呈现先减小后增加的趋势,而土壤残留肥料氮量却逐渐降低,说明增加灌水有加剧肥料氮淋失的风险。本试验中植株氮素累积量和肥料氮累积量、土壤无机氮残留量和肥料氮的残留量呈现类似的规律,施氮 240 kg/hm²和灌水 60 mm 条件下既能促进作物对肥料氮和土壤氮的利用,将肥料氮损失量和损失率以及表观损失量维持在一个较低水平,可以保障培肥土壤,保持土壤肥力,同时降低了无机氮和肥料氮淋失的风险,本研究可为东北地区玉米种植过程中水氮管理方式提供理论参考。

4 结论

(1) 随着施氮量的增加,0~100 cm 土层铵态氮、硝态氮含量和累积量均呈增加趋势,提高灌水量可降低表层土壤的铵态氮、硝态氮含量,提高深层土壤铵态氮、硝态氮含量。灌水施氮处理 0~100 cm 土层铵态氮、硝态氮累积量与 CK 处理差异显著 ($P < 0.05$)。

(2) 灌水施氮处理中 N2W2 处理作物氮累积量最高,达到 321.67 kg/hm²,氮表观损失量最低,为 52.93 kg/hm²,说明中等施氮、中等灌水条件处理能够使土壤-作物氮平衡系统向着提高作物吸氮量、减少土壤残留的方向发展。

(3) 玉米植株氮素中有 66.70%~75.05%来自于对土壤氮的累积,各器官土壤氮累积量由大到小依次为籽粒、叶、茎(茎和茎鞘),中等施氮可以促进茎、叶、籽粒对于土壤氮的累积,而提高灌水量可以促进籽粒吸收土壤中的氮素。

(4) 肥料氮累积量随着施氮量和灌水量的增加呈先增后减的趋势,0~100 cm 土层肥料氮残留量和肥料氮损失量均随着施氮量的增加而增加,施氮量 300 kg/hm²时会造成 68.77%~78.73%的肥料氮残留和损失。

参 考 文 献

- [1] 夏来坤,陶洪斌,王璞,等.施氮期对夏玉米氮素积累转移及氮肥利用的影响[J].玉米科学,2011,19(1):112-116. XIA Laikun, TAO Hongbin, WANG Pu, et al. Effects of nitrogen application period on nitrogen accumulation, translocation and nitrogen use efficiency of summer maize[J]. Journal of Maize Sciences, 2011, 19(1):112-116. (in Chinese)
- [2] 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)
- [3] LIU J G, DIAMOND J. China's environment in a globalizing world[J]. Nature, 2005, 435: 1179-1186.
- [4] MOSISA W, MARIANNE B, GUNDA S, et al. Nitrogen uptake and utilization in contrasting nitrogen efficient tropical maize hybrids [J]. Crop Science, 2007, 47(2): 519-528.
- [5] 巨晓棠, 张福锁. 中国北方土壤硝态氮的累积及其对环境的影响[J]. 生态环境, 2003(1): 24-28.
- [6] DIKER K, BAUSCH W C. Radiometric field measurements of maize for estimating soil and plant nitrogen [J]. Biosystems Engineering, 2003, 86(4): 411-420.
- [7] 刘小刚, 张富仓, 杨启良, 等. 调亏灌溉与氮营养对玉米根区土壤水氮有效性的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(2): 135-141. LIU Xiaogang, ZHANG Fucang, YANG Qiliang, et al. Effects of regulated deficit irrigation and nitrogen nutrition on validity of water and nitrogen in maize rootzone soil[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(2): 135-141. (in Chinese)
- [8] 张忠学, 刘明, 齐智娟. 喷灌条件下水氮用量对玉米氮素吸收转运的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 299-308. ZHANG Zhongxue, LIU Ming, QI Zhijuan. Effect of water nitrogen dosage on nitrogen absorption and transformation of maize under sprinkler irrigation condition[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 299-308. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190833&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.033. (in Chinese)
- [9] 刘小刚, 张富仓, 杨启良, 等. 交替隔沟灌溉条件下玉米群体水氮利用研究[J]. 农业机械学报, 2011, 42(5): 100-105. LIU Xiaogang, ZHANG Fucang, YANG Qiliang, et al. Group use of water and nitrogen on maize under alternative furrow irrigation [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(5): 100-105. (in Chinese)
- [10] 隗英华, 汪仁, 孙文涛, 等. 春玉米产量、氮素利用及矿质氮平衡对施氮的响应[J]. 土壤学报, 2012, 49(3): 544-551. JUAN Yinghua, WANG Ren, SUN Wentao, et al. Response of spring maize to nitrogen application in grain yield, nitrogen utilization and mineral nitrogen balance[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(3): 544-551. (in Chinese)
- [11] 张忠学, 陈帅宏, 陈鹏, 等. 基于¹⁵N示踪技术的不同灌水方案玉米追肥氮素去向研究[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(12): 262-272. ZHANG Zhongxue, CHEN Shuaihong, CHEN Peng, et al. Fate of maize topdressing nitrogen under different irrigation schemes based on ¹⁵N tracer technology[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(12): 262-272. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181232&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.032. (in Chinese)
- [12] 社会英, 冯洁, 郭海刚, 等. 麦季牛场肥水灌溉对冬小麦-夏玉米轮作土壤氮素平衡的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 159-165. DU Huiying, FENG Jie, GUO Haigang, et al. Effects of dairy effluents irrigation on N balance in soil under winter wheat - summer maize rotation system[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 159-165. (in Chinese)
- [13] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 冬小麦与夏玉米轮作体系中氮肥效应及氮素平衡研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(11): 1361-1368.
- [14] 潘家荣, 巨晓棠, 刘学军, 等. 高肥力土壤冬小麦/夏玉米轮作体系中化肥氮去向研究[J]. 核农学报, 2001, 15(4): 207-212. PAN Jiarong, JU Xiaotang, LIU Xuejun, et al. Fate of fertilizer N in winter wheat/summer maize rotation system on high-ertility soil[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2001, 15(4): 207-212. (in Chinese)
- [15] 张鹏飞, 张翼飞, 王玉凤, 等. 膜下滴灌氮肥分期追施量对玉米氮效率及土壤氮素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(4): 915-926. ZHANG Pengfei, ZHANG Yifei, WANG Yufeng, et al. Effects of nitrogen topdressing amount at various stages on nitrogen efficiency of maize and soil nitrogen balance under mulched drip irrigation [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, 24(4): 915-926. (in Chinese)
- [16] 杨荣, 苏永中, 王雪峰. 绿洲农田氮素积累与淋溶研究述评[J]. 生态学报, 2012, 32(4): 304-313. YANG Rong, SU Yongzhong, WANG Xuefeng. A review concerning nitrogen accumulation and leaching in agro-ecosystems of oasis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(4): 304-313. (in Chinese)
- [17] 尚文彬, 张忠学, 郑恩楠, 等. 水氮耦合对膜下滴灌玉米产量和水氮利用的影响[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(1): 49-55. SHANG Wenbin, ZHANG Zhongxue, ZHENG Ennan, et al. Nitrogen - water coupling affects nitrogen utilization and yield of film-mulched maize under drip irrigation[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(1): 49-55. (in Chinese)
- [18] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 冬小麦/夏玉米轮作体系中土壤氮素矿化及预测[J]. 应用生态学报, 2003, 14(12): 2241-2245. JU Xiaotang, LIU Xuejun, ZHANG Fusuo. Soil nitrogen mineralization and its prediction in winter wheat/summer maize rotation system[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2003, 14(12): 2241-2245. (in Chinese)
- [19] 侯云鹏, 李前, 孔丽丽, 等. 不同缓/控释氮肥对春玉米氮素吸收利用、土壤无机氮变化及氮平衡的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(20): 3928-3940. HOU Yunpeng, LI Qian, KONG Lili, et al. Effects of different slow/controlled release nitrogen fertilizers on spring maize nitrogen uptake and utilization, soil inorganic nitrogen and nitrogen balance[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(20): 3928-3940. (in Chinese)
- [20] 杨荣, 苏永中. 水氮配合对绿洲沙地农田玉米产量、土壤硝态氮和氮平衡的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1459-1469.
- [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 Fertilizers, 2016, 22(4): 930-936. (in Chinese)
- [22] 张忠学, 陈鹏, 聂堂哲, 等. 不同水氮调控模式对稻田土壤氮素分布与有效性的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(11): 210-219. ZHANG Zhongxue, CHEN Peng, NIE Tangzhe, et al. Effects of different water and nitrogen regulation models on nitrogen distribution and availability in paddy soils [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(11): 210-219. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20181125&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.11.025. (in Chinese)
- [23] 徐明杰, 张琳, 汪新颖, 等. 不同管理方式对夏玉米氮素吸收、分配及去向的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(1): 36-45. XU Mingjie, ZHANG Lin, WANG Xinying, et al. Effects of different management patterns on uptake, distribution and fate of nitrogen in summer maize[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2015, 21(1): 36-45. (in Chinese)