

不同水肥管理措施对春玉米产量和土壤 硝态氮时空分布的影响

王激清,刘社平

(河北北方学院农林科技学院,河北 张家口 075000)

摘要:采取大田结合小区试验的方法,研究了不同水肥管理措施对春玉米产量和土壤硝态氮时空分布的影响。结果表明:水肥一体管理区春玉米产量为 $17\ 107\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,显著高于传统水肥管理区($13\ 349\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$);从春玉米出苗期到收获期,无肥区 $0\sim 90\ \text{cm}$ 各土层硝态氮含量不断降低,累积总量也从 $452.5\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 降低到 $279.1\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,传统水肥管理区和水肥一体管理区 $0\sim 90\ \text{cm}$ 各土层硝态氮含量和累积总量均呈先上升后下降的趋势,但水肥一体管理区分次追肥避免了传统水肥管理大喇叭口期过量追氮带来的淋溶风险;春玉米大喇叭口期和收获期随着土层深度的增加, $0\sim 180\ \text{cm}$ 土层硝态氮含量呈下降趋势;不同水肥管理措施 $0\sim 180\ \text{cm}$ 土层硝态氮累积总量传统水肥管理区最高,大喇叭口期和收获期分别达到 $1\ 119.3\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $945.5\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,淋溶风险最大。因此以水肥一体化为核心的水肥管理措施可实现冀西北地区春玉米高产和环境友好。

关键词:春玉米;水肥一体化;产量;土壤剖面;土壤硝态氮

中图分类号: S147.35;S158.3 **文献标志码:** A

Effects of water and fertilizer on yield of spring maize and temporal and spatial distribution of soil nitrate-nitrogen

WANG Ji-qing, LIU She-ping

(College of Agriculture and Forestry, Hebei North University, Zhangjiakou, Hebei 075000, China)

Abstract: Field and plot experiment were carried out to investigate effects of different water and fertilizer practices on yield of spring maize and temporal and spatial distribution of soil nitrate nitrogen ($\text{NO}_3^- - \text{N}$). The results showed that yield was $17\ 107\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ for integration of water and fertilizer management, being significantly higher than $13\ 349\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ in traditional water and fertilization management area. From seedling stage to harvest stage of spring maize, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ content in $0\sim 90\ \text{cm}$ soil layers showed the trends of continuously decreasing in zero fertilizer area, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ accumulation decreased from $452.5\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ to $279.1\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, while $\text{NO}_3^- - \text{N}$ in $0\sim 90\ \text{cm}$ soil layers showed the trends of increasing first, then decreasing in integration of water and fertilizer management area and traditional water and fertilization management area, but compared with traditional water and fertilization management area, leaching risk of excess N fertilization topdressing could be avoided in integration of water and fertilizer management area through increased topdressing count. At large flare stage and harvest stage, $\text{NO}_3^- - \text{N}$ content in $0\sim 180\ \text{cm}$ soil layers decreased with increasing of soil depth. $\text{NO}_3^- - \text{N}$ accumulation in $0\sim 180\ \text{cm}$ soil layers, total amount in traditional water and fertilization management area was the highest, which was $1\ 119.3\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ at large flare stage and $945.5\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ at harvest stage respectively, and the leaching risk was the largest. Therefore, water and fertilizer management practice as core of integration of water and fertilizer could achieve high yield of spring maize and environmental friendly in the northwest of Hebei province.

Keywords: spring maize; integration of water and fertilizer; yield; soil profile; soil nitrate nitrogen

世界农业发展的实践证明,施用化肥不论是发达国家还是发展中国家,都成为了最快最有效的粮食增产措施,化肥对粮食作物产量的贡献率占到了 50% 左右^[1-2]。但相伴而来的肥料不合理施用问题日益普遍而严重,尤其是氮肥,由于过量施用,忽视土壤和环境养分的利用,作物产量潜力未得到充分发挥以及养分损失未能得到有效阻控等原因,我国水稻、小麦、玉米三大粮食作物的氮肥利用率平均只有 27.5%,远低于国际水平,与 20 世纪 80 年代相比呈明显下降趋势^[3]。在农田土壤各种形态氮素中,由于硝态氮不易被土壤胶体所吸附,在降雨和灌溉时发生随水运移淋失,很容易从上层土壤向下淋溶,造成肥料浪费,乃至污染地下水源,因此包括水分管理、栽培管理、土壤耕作、秸秆管理、有机肥和其他营养元素配合等优化农艺措施成为减少硝态氮淋失、降低氮肥向环境流失的关键措施^[4-6]。

冀西北张家口地区地处干旱半干旱大陆性季风气候,是我国北方重要的春玉米生产带,合理施肥尤其是合理施氮对于玉米高产高效具有重要意义,但近年来农户不考虑甚至不了解春玉米需肥规律和当地土壤养分含量状况,氮肥不合理施用问题严重,直接导致氮肥利用率低下,土体硝态氮过量累积^[7]。此外,在干旱、半干旱地区玉米获得高产的水分供给

与肥料供应关系密切^[5],而水肥一体化技术可借助压力灌溉系统,将可溶性固体肥料或液体肥料配兑而成的肥液与灌溉水一起,均匀、准确地输送到作物根部土壤,提供玉米吸收利用可达到提高玉米氮肥利用率的目的^[8]。因此,本研究采用大田结合小区试验的方法,选择同一区域内由于施肥和管理水平不同造成的无肥区、传统水肥管理区和水肥一体管理区为研究对象,进行春玉米产量和整个玉米生长季土壤剖面硝态氮的时空累积特征对比分析研究,揭示不同水肥管理措施下春玉米田土壤硝态氮运移特点,为冀西北地区春玉米科学施肥提供合理依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验于 2014 年在冀西北张家口市宣化县沙岭子镇南兴渠村进行,试验区位于北纬 40°40',东经 114°52',海拔 615 m,无霜期 140 d,日照时数 2 881 h,年均气温 7.7℃,年平均降水量 400 mm,春季降水偏少、气候干旱,雨量主要集中在 6—9 月份,属温带半干旱大陆性季风气候。

供试土壤为灌淤土,播前土壤基本理化性状见表 1。供试的玉米品种为巡天 969,播种时间为 4 月 20 日,收获时间为 9 月 28 日。

表 1 播前土壤基本理化性状

Table 1 Basic physical and chemical properties of the tested soil before sowing

土层深度 Soil depth /cm	有机质 Organic matter /(g·kg ⁻¹)	全氮 Total N /(g·kg ⁻¹)	硝态氮 NO ₃ ⁻ - N /(mg·kg ⁻¹)	速效磷 Available P /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K /(mg·kg ⁻¹)	土壤容重 Bulk density /(g·cm ⁻³)	pH
0~30	22.44	1.12	56.57	23.78	290.93	1.19	8.24
30~60	18.44	0.94	50.80	17.82	211.23	1.23	8.22
60~90	13.78	0.72	32.53	14.42	171.81	1.25	8.36

1.2 试验方法

试验采用大田结合小区试验的方法,设计 3 种不同水肥管理措施,即无肥区(CK)、传统水肥管理区(CT)和水肥一体管理区(SF)。其中无肥区采用小区试验,小区面积为 20 m²,设 3 次重复,共 60 m²;传统水肥管理区和水肥一体管理区为大田试验,面积均为 3.0 hm²,每块地中随机选取 3 个区域取样作为 3 次重复。

无肥区和传统水肥管理区采用农户传统的种植管理措施,春季播种前清茬并深翻 25 cm,播种采用当地的圆盘式玉米播种机进行播种,大小行种植,大行 70 cm,小行 40 cm,平均行距 55 cm,种植密度为 67 500 株·hm⁻²,播后喷施除草剂。无肥区不施任何肥料,传统水肥管理区基肥用 18-18-18-1(Zn)

的史丹利牌复合肥,于深翻前撒施于地块中,用量为 750 kg·hm⁻²,在玉米生长大喇叭口期追施尿素(N 46%) 750 kg·hm⁻²,全生育期总计投入 N 480 kg·hm⁻²,P₂O₅ 135 kg·hm⁻²,K₂O 135 kg·hm⁻²。无肥区和传统水肥管理区均为春播前浇水一次,玉米生长大喇叭口期和抽穗期各浇水一次,每次浇水量为 2 250 m³·hm⁻²。

水肥一体管理区利用玉米膜下滴灌专用播种机实现播种、施肥、覆膜、铺设滴灌带、喷施除草剂、覆土压膜等多道工序的一次性完成。采用幅宽 1.20 m,厚度 0.008 mm 地膜进行全膜覆盖,玉米种植在垄沟内;顺玉米行间布置膜下滴灌,一膜一带,滴灌二行玉米,滴孔间距 30 cm;采用大小行种植,大行 70 cm,小行 40 cm,平均行距 55 cm,种植密度为

81 000 株·hm⁻², 播后喷施除草剂, 并进行覆土压膜。水肥一体管理区基肥用 18-18-9-1(Zn) 的天喜牌春玉米专用肥, 用量为 1 125 kg·hm⁻², 随播种机施入种植小行, 追肥分三次施入: 第一次在大喇叭口期, 追施尿素(N 46%) 375 kg·hm⁻², 第二次在抽穗期, 追施尿素(N 46%) 225 kg·hm⁻², 第三次在灌浆期, 追施尿素(N 46%) 95 kg·hm⁻² 和硫酸钾(K₂O 50%) 58 kg·hm⁻², 全生育期总计投入 N 522.2 kg·hm⁻², P₂O₅ 202.5 kg·hm⁻², K₂O 130.3 kg·hm⁻²。由于播种期至苗期降雨偏多, 水肥一体管理区未浇水, 只在大喇叭口期、抽穗期、灌浆期结合三次追肥滴灌浇水三次, 每次浇水 480 m³·hm⁻²。

1.3 样品采集及分析方法

收获时春玉米测产: 每个测产区域取连续 4 行玉米, 每行 5 m, 作为测产区, 测产样方面积为 4 × 5 m × 0.55 m = 11 m², 收获的同时在测产样方中取有代表性的 10 株玉米穗并进行室内考种, 项目为穗长、穗粗、穗行数、行粒数、单穗粒重、千粒重。

在春玉米生长出苗期、抽穗期、吐丝期和灌浆期取土样, 每区域土壤样品采 5 个取样点, 取样深度分别为 0~30、30~60、60~90 cm 共三层; 在春玉米生长大喇叭口期、收获期取土样, 每区域土壤样品采 5 个取样点, 取样深度分别为 0~30、30~60、60~90、90~120、120~150、150~180 cm 共六层。新鲜土样

带回实验室立即测定土壤水分含量, 0.01 mol·L⁻¹ CaCl₂ 浸提紫外分光光度法测定土壤硝态氮含量, 并于收获后采用环刀分上述 6 层取土测定土壤容重, 计算硝态氮累积量, 土壤剖面硝态氮累积量(kg·hm⁻²) = 土壤硝态氮含量(mg·kg⁻¹) × 土层厚度(cm) × 土壤容重(g·cm⁻³) × 10⁻¹。

所有试验数据均采用 Excel 软件进行计算和绘图, 用 SAS 软件进行统计检验, 5% 水平下 LSD 多重比较检验各处理平均值之间的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同水肥管理措施下春玉米产量比较

穗长、穗粗、穗行数、行粒数、单穗粒重和千粒重是春玉米穗部特征的主要指标, 也是决定春玉米产量的主要因素, 从表 2 可见传统水肥管理区和水肥一体管理区这几个产量构成因素除穗行数外, 其余的均显著高于无肥区, 说明氮磷钾的配合施用能有效改善春玉米的产量构成因素。水肥一体管理区春玉米的穗长、穗粗、穗行数、行粒数、单穗粒重分别为 21.3 cm、5.29 cm、16.3 行、38.8 粒、252.4 g, 均高于传统水肥管理区; 对于千粒重来说, 水肥一体管理区为 398.4 g, 显著高于传统水肥管理区(383.7 g), 这表明与传统水肥管理相比, 水肥一体管理对春玉米的增产效果更明显。

表 2 不同水肥管理措施下春玉米产量构成因素

Table 2 Yield components of spring maize under different water and fertilizer management practices

处理 Treatment	穗长/cm Ear length	穗粗/cm Ear diameter	穗行数/行 Row number per ear	行粒数/粒 Kernel number per row	单穗粒重/g Grain weight per ear	千粒重/g 1000-grain weight
CK	18.9b	4.81b	16.0a	35.6b	200.0b	349.3c
CT	20.9a	5.26a	16.2a	37.6a	233.8a	383.7b
SF	21.3a	5.29a	16.3a	38.8a	252.4a	398.4a

注: 同一列中平均值标不同字母者表示差异达到 5% 显著水平。CK—无肥区; CT—传统水肥管理; SF—水肥一体管理。下同。

Note: In same column different letters following the means indicate significant difference by LSD multi-comparison at the 5% level. CK—no fertilizer; CT—traditional water and fertilizer management; SF—integration of water and fertilizer management. The same below.

表 3 为三种不同水肥管理措施下春玉米产量的比较分析, 从表中可以看出, 水肥一体管理区春玉米测产区的产量为 18.8 kg, 显著高于传统水肥管理区的产量 14.7 kg, 而传统水肥管理区的产量又显著高于无肥区的产量; 同样水肥一体管理区春玉米的折合产量为 17 107 kg·hm⁻², 显著高于传统水肥管理区的产量(13 349 kg·hm⁻²), 而传统水肥管理区的产量又显著高于无肥区的产量。与无肥区相比, 水肥一体管理区和传统水肥管理区增产率分别达到 52.9% 和 19.3%。

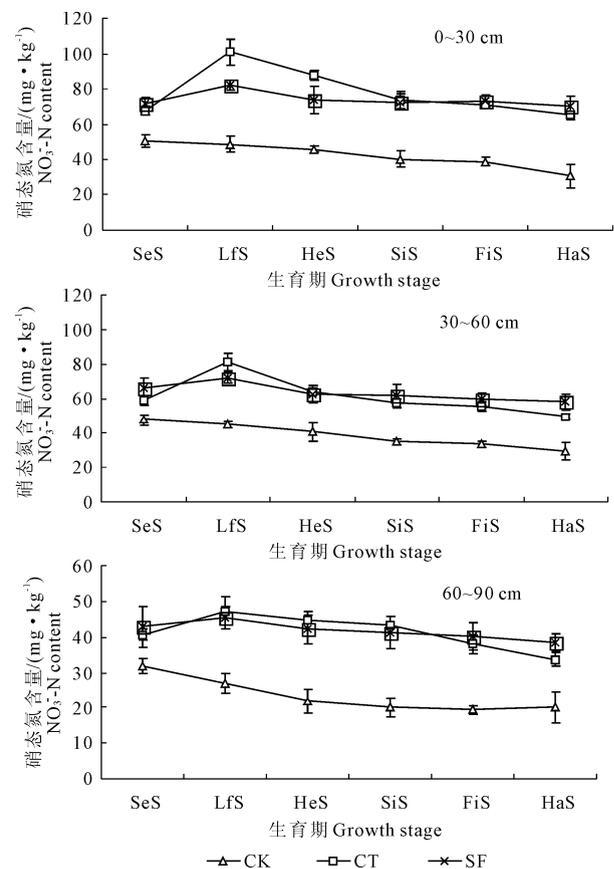
表 3 不同水肥管理措施下春玉米产量

Table 3 Yield of spring maize under different water and fertilizer management practices

处理 Treatment	测产区产量 Yield in sampling plot /(kg·plot ⁻²)	折合产量 Average yield /(kg·hm ⁻²)	增产率 Rate of growth /%
CK	12.3c	11187c	—
CT	14.7b	13349b	19.3
SF	18.8a	17107a	52.9

2.2 不同水肥管理措施下春玉米生长季土壤硝态氮动态变化

研究表明,土壤硝态氮的淋洗主要受土壤中可溶性氮的分布和数量的影响^[9],而玉米整个生育期0~90 cm各土层土壤铵态氮含量较低,因此土壤中可溶性氮主要以硝态氮为主,评价土壤矿质氮时忽略铵态氮的影响,只计算硝态氮的贡献^[10]。图1为不同水肥管理措施下春玉米整个生育期0~90 cm土层硝态氮含量变化,从图中可以看出,无论是0~30、30~60 cm还是60~90 cm土层,传统水肥管理区和水肥一体管理区硝态氮含量在整个生长季均高于无肥区处理,同时0~30、30~60、60~90 cm土层无肥区处理春玉米从出苗期到收获期硝态氮含量不断降低,即随着作物的发育吸收,土壤中硝态氮处于不断消耗的过程。



注 Note: SeS—出苗期 seedling stage; LfS—大喇叭口期 large flare stage; HeS—抽穗期 heading stage; SiS—吐丝期 silking stage; FiS—灌浆期 filling stage; HaS—收获期 harvest stage

图1 春玉米不同生育期0~90 cm土层硝态氮含量

Fig.1 NO₃⁻-N content in 0~90 cm soil layers under different growth stage of spring maize

分析传统水肥管理区和水肥一体管理区0~30、30~60、60~90 cm土层硝态氮含量的变化规律

可以得到(图1),从出苗期到大喇叭口期硝态氮含量均呈增加的趋势,从大喇叭口期到抽穗期、吐丝期、灌浆期和收获期,硝态氮含量均呈逐渐降低的趋势,但传统水肥管理区大喇叭口期0~30 cm和30~60 cm土层硝态氮含量分别为100.8、81.6 mg·kg⁻¹,显著高于0~30 cm和30~60 cm土层水肥一体管理区的硝态氮含量,这是因为传统水肥管理区大喇叭口期追施尿素量为750 kg·hm⁻²,为水肥一体管理区的2倍,过量的施氮量导致土壤硝态氮超量累积,遇到降雨或灌溉,存在向下淋溶进入地下水的风险。从图1还可以看出,从春玉米抽穗到吐丝期以后,0~30、30~60、60~90 cm土层传统水肥管理区的硝态氮含量低于水肥一体管理区,这是因为传统水肥管理区春玉米生长发育后期主要靠大喇叭口期追施的氮肥,因此土壤剖面硝态氮含量降低很快,而水肥一体管理区抽穗期和灌浆期均追施氮肥,土壤剖面保持较高含量的硝态氮持续供给春玉米生长发育,保证了春玉米高产高效的需求。

从表4可进一步看出,0~90 cm土层传统水肥管理区和水肥一体管理区硝态氮累积量在整个生长季均显著高于无肥区处理,无肥区处理春玉米从出苗期到收获期,0~90 cm土层硝态氮累积量也不断降低,从452.5 kg·hm⁻²降低到279.1 kg·hm⁻²。与0~30、30~60、60~90 cm土层硝态氮含量变化一致,传统水肥管理区和水肥一体管理区从出苗期到大喇叭口期0~90 cm土壤剖面硝态氮累积量均呈增加的趋势,从大喇叭口期到抽穗期、吐丝期、灌浆期和收获期,硝态氮累积量呈逐渐降低的趋势,大喇叭口期土壤硝态氮出现一个明显的累积峰,大喇叭口期是玉米生长的关键时期,此时硝态氮过量累积为春玉米的快速生长提供基础,但如果累积量太高,如传统水肥管理区的累积量高达772.2 kg·hm⁻²,遇到过量的降雨,存在着向下淋溶的趋势。

2.3 不同管理措施下春玉米大喇叭口期和收获期土壤硝态氮的动态变化

硝态氮在土壤剖面中的含量及其空间分布特征是表征硝态氮淋失风险的重要指标^[11],因此为分析硝态氮在土壤剖面中的动态迁移规律,本试验研究了春玉米生长大喇叭口期和收获期0~180 cm各土层硝态氮含量的变化趋势(图2)。从图中可以看出,0~180 cm各土层传统水肥管理区和水肥一体管理区的硝态氮含量均高于无肥区处理,各处理0~30 cm土层的硝态氮含量较高,随着深度的增加,硝态氮含量呈下降趋势。进一步分析传统水肥管理区和水肥一体管理区0~180 cm各土层的变化可以得

到,大喇叭口期 0~30、30~60、60~90、90~120 cm 土层传统施肥管理区土壤硝态氮含量均高于水肥一体管理区,120~150、150~180 cm 土层这两种处理硝态氮含量基本相等;而收获期 0~30、30~60、60~90 cm 土层水肥一体管理区土壤硝态氮含量均高于传统施肥管理区,90~120、120~150、150~180 cm

土层传统施肥管理区均高于水肥一体管理区,因此与水肥一体管理区相比,传统水肥管理区大喇叭口期追施过量的氮肥未被春玉米吸收利用,以硝态氮的形式逐渐向下淋溶迁移,在收获期淋溶进入 90~120、120~150 cm 和 150~180 cm 土层,加大了淋溶进入地下水造成硝酸盐污染的风险。

表 4 春玉米不同生育期 0~90 cm 土层硝态氮的累积量/(kg·hm⁻²)

Table 4 NO₃⁻-N accumulation at 0~90 cm soil layers under different growth stages of spring maize

处理 Treatment	出苗期 Seedling stage	大喇叭口期 Large flare stage	抽穗期 Heading stage	吐丝期 Silking stage	灌浆期 Filling stage	收获期 Harvest stage
CK	452.5b	418.0c	374.4c	330.5b	316.5b	279.1b
CT	564.2a	772.2a	663.9a	591.4a	556.5a	500.2a
SF	577.5a	638.0b	570.6b	560.6a	552.9a	533.3a

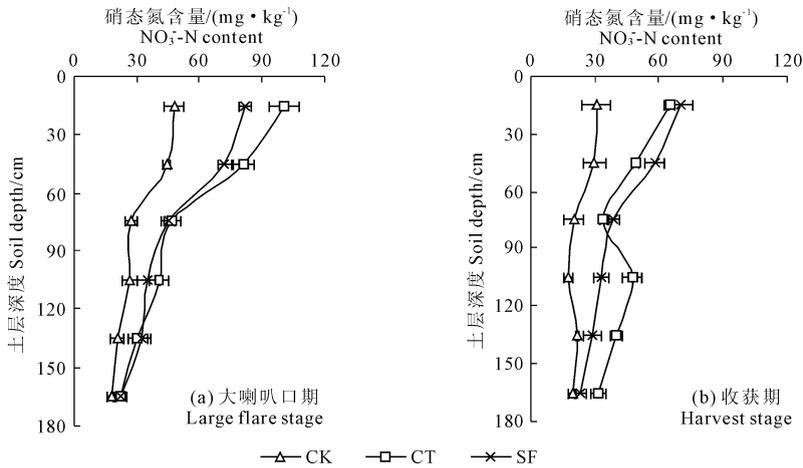


图 2 春玉米大喇叭口期和收获期 0~180 cm 土层硝态氮含量

Fig.2 NO₃⁻-N content at 0~180 cm soil layers under large flare stage and harvest stage of spring maize

研究表明过量施氮会造成土壤剖面中硝态氮严重累积,综合考虑环保、资源高效利用和作物高产,确定合理施氮量下保持适宜土壤硝态氮累积量是研究的热点^[12-13]。表 5 为三种不同管理措施下春玉米大喇叭口期和收获期不同土层硝态氮累积量,从表中可以看出,与玉米整个生长季 0~90 cm 土层硝态氮累积量的变化趋势一样,传统水肥管理区和水肥一体管理区大喇叭口期 60~180、0~180 cm 土层硝态氮累积量均显著高于无肥区处理,收获期 90~180、0~180 cm 土层硝态氮累积量均显著高于无肥区处理。同时表 5 也表明,大喇叭口期传统水肥管理区 60~180 cm 和 0~180 cm 硝态氮累积量分别为 517.2 kg·hm⁻²和 1 119.3 kg·hm⁻²,高于水肥一体管理区的硝态氮累积量;收获期传统水肥管理区 90~180 cm 和 0~180 cm 硝态氮累积量分别为 445.2 kg·hm⁻²和 945.5 kg·hm⁻²,显著高于水肥一

体管理区的硝态氮累积量。

硝态氮的淋失量是以根层为依据的,根据春玉米的生长发育特性,春玉米大喇叭口期根系可伸长至 60 cm 土层,收获期 0~80 cm 土层根干重比例达 95%以上^[13],因此设定 60、90 cm 分别为春玉米大喇叭口期、收获期硝态氮淋溶损失的下边界,即超过 60、90 cm 土层的硝态氮存在着更大的淋溶损失风险。从表 5 中可以看出,春玉米大喇叭口期,60~180 cm 土层硝态氮累积量占 0~180 cm 土壤剖面累积总量的百分比变化范围为 46.2%~51.1%,春玉米收获期,90~180 cm 土层硝态氮累积量占 0~180 cm 土壤剖面累积总量的百分比变化范围为 36.8%~47.1%,因此,不同水肥管理措施下 0~180 cm 土壤剖面硝态氮累积总量的 40%~50% 都存在着淋溶风险,累积总量越高,存在淋溶风险硝态氮的量就越大。

表 5 春玉米大喇叭口期和收获期不同土层硝态氮累积量及所占百分比

Table 5 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ accumulation at different soil layers and percentage under large flare stage and harvest stage of spring maize

处理 Treatment	大喇叭口期不同土层硝态氮/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) $\text{NO}_3^- - \text{N}$ accumulation under large flare stage			收获期不同土层硝态氮/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) $\text{NO}_3^- - \text{N}$ accumulation under harvest stage		
	60 ~ 180 cm	0 ~ 180 cm	百分比/% Percentage	90 ~ 180 cm	0 ~ 180 cm	百分比/% Percentage
	CK	335.3b	656.1c	51.1	213.9c	493.0c
CT	517.2a	1119.3a	46.2	445.2a	945.5a	47.1
SF	482.0a	968.7b	49.7	310.1b	843.4b	36.8

3 结论与讨论

肥料是粮食作物增产的物质基础,和农户传统种植措施相比,春玉米专用肥及水肥协同优化组合可以提高水分、养分利用效率,是提高产量的关键^[8]。郭军玲等的研究结果表明在山西省晋中市平川区、土石山区春玉米专用肥处理与农户习惯施肥相比增产显著,产量分别提高 16.02% 和 10.01%;专用肥处理还提高了春玉米穗粒数、百粒重及收获指数,降低了秃尖长度^[14]。李彬等的研究结果表明,相比于传统种植,水肥一体化条件下作物在高效利用水肥资源的情况下,可明显改善春玉米的穗重、穗长等产量构成因子,玉米产量提高 22.01%^[15]。本研究结果表明氮磷钾的配合施用能有效改善春玉米的产量构成因素,与传统水肥管理区相比,水肥一体管理能明显改善春玉米的穗长、穗粗、穗行数、行粒数、单穗粒重,尤其是春玉米千粒重,水肥一体管理区显著高于传统水肥管理区;水肥一体管理区春玉米的产量为 $17\ 107\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,显著高于传统水肥管理区。

研究表明,从春玉米出苗期到收获期,无肥区处理 0 ~ 90 cm 各土层硝态氮含量及总累积量由于作物吸收呈不断降低的趋势;传统水肥管理区和水肥一体管理区 0 ~ 90 cm 各土层硝态氮含量和累积总量从出苗期到大喇叭口期均呈增加的趋势,从大喇叭口期到抽穗期、吐丝期、灌浆期和收获期呈逐渐降低的趋势,大喇叭口期土壤硝态氮出现一个明显的累积高峰。对春玉米而言,一方面大喇叭口期正值玉米雌穗小花分化,并且大喇叭口期之后植株生长迅速,要求有充足的氮素供应;另一方面此生长期和雨期同步,降雨过多容易导致硝态氮大量淋洗,因此必须同时考虑实际供氮能力和植物对氮素的需求,合理安排施氮量^[16],但本研究传统水肥管理区大喇叭口期追施尿素量为 $750\ \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,为水肥一体管理区的 2 倍,遇到过量的降雨,存在着向下淋溶的趋势;水肥一体管理区大喇叭口期、抽穗期和灌浆期均追施适量的氮肥,土壤剖面即能保持较高含量的硝

态氮供给春玉米生长发育,又不会存在淋溶风险。

春玉米大喇叭口期和收获期随着土层深度的增加,硝态氮均呈下降趋势,而大喇叭口期 0 ~ 120 cm 各土层硝态氮含量传统水肥管理区高于水肥一体管理区,收获期 90 ~ 180 cm 各土层硝态氮含量传统施肥管理区均高于水肥一体管理区,因此传统水肥管理区大喇叭口期追施的过量氮肥,未被春玉米吸收利用向下淋溶迁移,会在收获期淋溶进入 90 ~ 180 cm 土层,加大了淋溶进入地下水造成硝酸盐污染的风险,这和他人的研究结果一致^[5,11]。春玉米大喇叭口期 60 ~ 180、0 ~ 180 cm 土层硝态氮累积量,收获期 90 ~ 180、0 ~ 180 cm 土层硝态氮累积量均为传统施肥管理区高于水肥一体管理区,不同管理措施下 0 ~ 180 cm 土壤剖面硝态氮累积总量的 40% ~ 50% 都存在着淋溶风险,累积量越高,存在淋溶的风险就越大。

综合分析,以水肥一体化技术为核心的水肥管理措施,根据春玉米的需水、需肥规律和土壤水分、养分状况,将肥料和灌溉水一起适时、适量、准确地输送到春玉米根部土壤,可实现冀西北地区春玉米的高产并降低土壤硝态氮淋洗带来的环境风险。

参考文献:

- [1] 高祥照,马文奇,杜森,等.我国施肥中存在问题的分析[J].土壤通报,2001,32(6):255-261.
- [2] 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.
- [3] 张福锁,王激清,张卫锋,等.中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J].土壤学报,2008,45(5):915-924.
- [4] 王科,赵亚妮,王佳锐,等.施氮及种植措施对玉米氮素利用效率和土壤硝态氮含量的影响[J].水土保持学报,2015,29(4):121-126.
- [5] 冯磊磊,张富仓,雷艳,等.不同生育期灌水和施氮对春玉米农田硝态氮迁移及产量的影响[J].中国农村水利水电,2010,(4):54-57,61.
- [6] 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误解[J].土壤学报,2014,51(5):921-933.

- ing, 1987, 18(3):331-350.
- [5] 吴春霞,王 进,任 岗,等.基于高光谱技术的棉花冠层反射特征研究[J].农业与技术,2008,28(4):56-60.
- [6] 卢 霞.沿海滩涂棉花叶片叶绿素含量高光谱遥感估算模型研究[J].安徽农业科学,2011,39(12):7452-7454.
- [7] 王登伟,黄春燕,张 伟,等.高光谱数据与棉花叶绿素含量和叶绿素密度的相关性分析[J].棉花学报,2008,20(5):368-371.
- [8] Horler D N H, Dockray M, Barber J. Red edge measurements for remotely sensing plant chlorophyll content [J]. *Advances in Space Research*, 1983,3(2):273-277.
- [9] Pinar A, Curran P J. Grass chlorophyll and the reflectance red edge [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996,17(2):351-357.
- [10] 姚 霞,吴华兵,朱 艳,等.棉花功能叶片色素含量与高光谱参数的相关性研究[J].棉花学报,2007,19(4):267-272.
- [11] Broge N H, Mortensen J V. Deriving green crop area index and canopy chlorophyll density of winter wheat from spectral reflectance data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002,81(1):45-57.
- [12] 代 辉,胡春胜,程一松,等.不同氮水平下冬小麦农学参数与光谱植被指数的相关性[J].干旱地区农业研究,2005,23(4):16-21.
- [13] 靳彦华,熊黑钢,张 芳,等.不同地类春小麦叶片叶绿素含量高光谱植被指数估算模型研究[J].麦类作物学报,2013,33(5):1012-1018.
- [14] Haboudane D, Miller J R, Tremblay N, et al. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002,81(2):416-426.
- [15] 金震宇,田庆久,惠凤鸣,等.水稻叶绿素浓度与光谱反射率关系研究[J].遥感技术与应用,2003,18(3):134-137.
- [16] 徐新刚,赵春江,王纪华,等.新型光谱曲线特征参数与水稻叶绿素含量间的关系研究[J].光谱学与光谱分析,2011,31(1):188-191.
- [17] 宋开山,张 柏,李 方,等.玉米叶绿素含量的高光谱估算模型研究[J].作物学报,2005,31(8):1095-1097.
- [18] 易秋香,黄敬峰,王秀珍,等.玉米叶绿素高光谱遥感估算模型研究[J].科技通报,2007,23(1):83-87.
- [19] 陈 燕,黄春燕,王登伟,等.北疆棉花叶绿素密度的高光谱估算研究[J].新疆农业科学,2006,43(6):451-454.
- [20] 陈 燕,王登伟,黄春燕,等.新疆棉花 LAI 和叶绿素密度的高光谱估算研究[J].遥感信息,2007,(2):33-36,41.
- [21] 黄春燕,王登伟,张煜星.基于棉花红边参数的叶绿素密度及叶面积指数的估算[J].农业工程学报,2009,25(2):137-141.
- [22] 浦瑞良,宫 鹏.高光谱遥感及其应用[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [23] 唐延林,王秀珍,黄敬峰.棉花高光谱及其红边特征(I)[J].棉花学报,2003,15(3):146-150.
- [24] Gitelson A A, Kaufman Y J, Stark R, et al. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002,80(1):76-87.
- [25] Mutanga O, Skidmore A K, Van Wieren S. Discriminating tropical grass (*Cenchrus ciliaris*) canopies grown under different nitrogen treatments using spectroradiometry [J]. *Photogrammetry & Remote Sensing*, 2003,57:263-272.
- [26] 王登伟,黄春燕,马勤建,等.棉花高光谱植被指数与 LAI 和地上鲜生物量的相关性分析[J].中国农学通报,2008,24(3):426-429.
- [27] 马勤建,王登伟,黄春燕,等.棉花叶面积指数和地上干物质积累量的高光谱估算模型研究[J].棉花学报,2008,20(3):217-222.
- [28] 陈志强,王 磊,白由路,等.整个生育期玉米叶片 SPAD 高光谱预测模型研究[J].光谱学与光谱分析,2013,33(10):2838-2842.
- [29] 楚万林,齐雁冰,常庆瑞,等.棉花冠层叶片叶绿素含量与高光谱参数的相关性[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(9):65-73.
- [30] 白 丽,王 进,蒋桂英,等.干旱区基于高光谱的棉花遥感估产研究[J].中国农业科学,2008,41(8):2499-2505.
- [31] 陈 兵,李少昆,王克如,等.病害胁迫下棉花叶片色素含量高光谱遥感估测研究[J].光谱学与光谱分析,2010,30(2):421-425.
- [32] 王 强,易秋香,包安明,等.基于高光谱反射率的棉花冠层叶绿素密度估算[J].农业工程学报,2012,28(15):125-132.

(上接第 113 页)

- [7] 王激清,韩宝文,刘社平.施氮量和耕作方式对春玉米产量和土壤硝态氮累积的影响[J].干旱地区农业研究,2011,29(2):129-135.
- [8] 谭 华,郑德波,邹成林,等.水肥一体膜下滴灌对玉米产量与氮素利用的影响[J].干旱地区农业研究,2015,33(3):18-23.
- [9] Belanger G, Ziadi N, Walsh J R, et al. Residual soil nitrate after potato harvest [J]. *Journal of Environmental Quality*, 2003,32:607-612.
- [10] 叶东靖,高 强,何文天,等.施氮对春玉米氮素利用及农田氮素平衡的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(3):552-558.
- [11] 淮贺举,张海林,蔡万涛,等.不同施氮水平对春玉米氮素利用及土壤硝态氮残留的影响[J].农业环境科学学报,2009,28(12):2651-2656.
- [12] 于红梅,王志刚,葛建军,等.适量施肥提高土壤残留硝态氮利用率及菠菜产量[J].农业工程学报,2014,30(16):121-128.
- [13] 孙志梅,王艳群,刘 杨,等.不同产量水平的玉米田土壤无机氮时空分布与环境效应分析[J].水土保持学报,2010,24(4):162-166,181.
- [14] 郭军玲,王永亮,郭彩霞,等.春玉米区域专用肥研制及其应用效果[J].中国农学通报,2014,20(21):183-188.
- [15] 李 彬,妥德宝,程满金,等.水肥一体化条件下内蒙古优势作物水肥利用效率及产量分析[J].水资源与水工程学报,2015,26(4):216-222.
- [16] 戴明宏,陶红斌,王利纳,等.华北平原春玉米季土壤硝态氮动态及氮素矿化的特征[J].水土保持学报,2008,22(3):76-81.