

# 滴灌施氮对春玉米氮素吸收、土壤无机氮含量及氮素平衡的影响

侯云鹏, 孔丽丽, 李前, 尹彩侠, 秦裕波, 于雷, 王立春, 谢佳贵

(农业部东北植物营养与农业环境重点实验室, 吉林省农业科学院农业资源与环境研究所, 长春 130033)

**摘要:** 为解决吉林省半干旱区滴灌施肥条件下氮肥合理施用问题, 通过 2 年(2015—2016 年)田间试验, 研究了覆膜滴灌条件下施氮量(0, 70, 140, 210, 280, 350 kg/hm<sup>2</sup>)对春玉米产量、氮素吸收利用、土壤剖面无机氮含量变化及氮素平衡的影响。结果表明: 施氮量在 70~210 kg/hm<sup>2</sup> 范围内玉米产量随施氮量的增加显著增加, 当施氮量超过 210 kg/hm<sup>2</sup> 后, 处理间产量无显著差异; 将玉米产量(y)与施氮量(x)拟合, 得出最佳施氮量分别为 195.1, 201.0 kg/hm<sup>2</sup>。施氮显著提高了玉米各生育时期氮积累量, 其中灌浆期和成熟期氮积累量以施氮量 210 kg/hm<sup>2</sup> 处理最高。氮素当季回收率、农学利用率和偏生产力均随施氮量的增加而下降。玉米成熟期 0—200 cm 剖面土壤硝态氮和铵态氮含量随土层深度增加呈逐渐下降的趋势; 施氮提高了 0—200 cm 土壤硝态氮和铵态氮含量, 其中施氮量 280, 350 kg/hm<sup>2</sup> 处理 40—200 cm 土层硝态氮含量显著高于其他施氮处理。玉米吸氮量、土壤无机氮残留量和氮表观损失量与施氮量呈极显著的正相关; 玉米吸氮量、土壤无机氮残留量和氮表观损失量分别占增加纯氮的 21.6%~23.3%, 33.0%~37.4%, 41.0%~43.7%。综上所述, 在本试验条件下, 综合产量、氮素吸收利用、土壤剖面无机氮含量变化及氮素平衡等因素, 在吉林省半干旱区滴灌施肥适宜施氮量应控制在 195~210 kg/hm<sup>2</sup>。

**关键词:** 滴灌施肥; 施氮量; 氮积累量; 土壤无机氮; 氮素平衡

**中图分类号:** S147.22; S158.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)01-0238-08

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbxb.2018.01.037

## Effects of Drip Irrigation with Nitrogen on Nitrogen Uptake, Soil Inorganic Nitrogen Content and Nitrogen Balance of Spring Maize

HOU Yunpeng, KONG Lili, LI Qian, YIN Caixia, QIN Yubo, YU Lei, WANG Lichun, XIE Jiagui

(Northeast Key Laboratory of Plant Nutrition and Agricultural Environment, Ministry of Agriculture,

Institute of Agricultural Resources and Environment, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033)

**Abstract:** To find optimum application rate of nitrogen under drip irrigation in the semi-arid region of Jilin province, two years (2015—2016) field experiments were conducted in spring maize fields mulched with plastic film to study the effects of different nitrogen application rates (0, 70, 140, 210, 280 and 350 kg/hm<sup>2</sup>) on yield, nitrogen absorption and utilization, inorganic nitrogen accumulation in soil profile (0—200 cm) and nitrogen balance under drip irrigation. The results indicated that maize yield increased with the increase of nitrogen application rate when the nitrogen application rate was in the range of 70~210 kg/hm<sup>2</sup>, and no significant difference was found among treatments when the nitrogen application rate was over 210 kg/hm<sup>2</sup>. Based on the fitting model between maize yield and nitrogen application rate, the optimal parameter was 195.1 and 201.0 kg/hm<sup>2</sup>, respectively. Nitrogen application significantly increased nitrogen accumulation at different growth stages of maize, and the highest nitrogen accumulation showed in the treatment supplied with 210 kg/hm<sup>2</sup> of nitrogen at the grain filling stage and the mature stage. Recovery efficiency, agronomic efficiency and partial factor productivity of nitrogen all decreased with the increasing of it application rate. At the mature stage of maize, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N contents both gradually reduced with the increasing depth of soil profiles (0—200 cm). Compared with the control, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N contents of 0—200

收稿日期: 2017-07-30

资助项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0300604); 国家科技支撑计划项目(2013BAD07B02, 2013BAD07B14); 吉林省科技基础条件与平台建设计划项目(20160623030TC); 国际植物营养研究所(IPNI)项目(BFDP-Jilin-2017)

第一作者: 侯云鹏(1982—), 男, 学士, 助理研究员, 主要从事养分资源高效利用研究。E-mail: exceedhvfha@163.com

通信作者: 王立春(1960—), 男, 博士, 研究员, 主要从事农业可持续利用研究。E-mail: wlc1960@163.com

谢佳贵(1972—), 男, 博士, 研究员, 主要从事农业可持续利用研究。E-mail: xiejiagui@163.com

cm soil layers were both increased in treatments applied with nitrogen, and  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  contents of 40—200 cm soil layers in treatments supplied with 280 and 350  $\text{kg}/\text{hm}^2$  of nitrogen were significant higher than those in other treatments. Nitrogen absorption of maize, soil inorganic nitrogen accumulation and nitrogen apparent loss were positively correlated with the nitrogen application rate, and they accounted for 21.6%~23.3%, 33.0%~37.4% and 41.0%~43.7% of the nitrogen input. Under the experimental conditions, according to the comprehensive yield, nitrogen absorption and utilization, soil inorganic nitrogen content and nitrogen balance and other factors, the appropriate amount of nitrogen fertilizer for spring maize should be controlled at 195~210  $\text{kg}/\text{hm}^2$  under drip irrigation with plastic mulching in the semi-arid region of Jilin province.

**Keywords:** drip irrigation with nitrogen; nitrogen application rate; nitrogen accumulation; soil inorganic nitrogen; nitrogen balance

膜下滴灌施肥是将滴灌技术与地膜覆盖和施肥技术相结合的一种灌水施肥技术,其中滴灌技术具有节水、省工、增产、高效等优点<sup>[1]</sup>,而地膜覆盖技术又发挥了保水、保墒、增加土壤积温和微生物活性等特长<sup>[2]</sup>,同时通过滴灌施肥可以有效调节化肥的施用时期、数量及比例,并将肥料施于根区,保证根区养分供应,从而减少养分淋失,提高氮肥利用效率和降低环境污染的风险<sup>[3]</sup>。目前,膜下滴灌施肥技术已被广泛应用在玉米<sup>[4]</sup>、小麦<sup>[5]</sup>、棉花<sup>[6]</sup>、花生<sup>[7]</sup>、果树<sup>[8]</sup>、蔬菜<sup>[9]</sup>等各类粮食和经济作物,并且相关研究逐步深入。

吉林省西部地区是东北春玉米主产区之一,同时也是我国典型的半干旱农业区。据统计,吉林省半干旱区玉米种植面积占全省玉米种植面积的 30%以上<sup>[10]</sup>。该区域春季干旱少雨,夏季干燥炎热,田间蒸发量大,达 1 200~1 700 mm,而该区域年均降水量不足 450 mm,远低于年蒸发量,且年内分布极不均匀,多集中在 7—8 月<sup>[11]</sup>,使玉米生长前期极易缺水,生长后期又易发生干旱,引起早衰,造成玉米减产,导致单产比全省平均水平低 30%以上。近年来,玉米膜下滴灌技术被引入到吉林省西部半干旱地区,并得到了广泛应用,有效改善土壤的水热状况,缓解了春旱和水分无效蒸发等问题,显著提高了玉米产量<sup>[12]</sup>。但目前玉米膜下滴灌的氮肥管理上,大部分农民为了追求高产,仍然大量施用氮肥。根据对当地农户实地调查发现,该区域玉米施氮(N)量在 245~280  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,平均施氮(N)量为 266  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,远超过了玉米当前产量水平下对氮素的需求。过量施氮不仅使肥料损失严重,利用率较低,同时破坏了农田生态系统氮素平衡,使土壤氮素盈余量不断增加,导致农田氮素以径流、淋溶等形式大量损失,加剧了对水环境的污染<sup>[13-14]</sup>。因此,明确滴灌施肥中氮肥适宜用量已成为该区域玉米生产中亟待解决的问题。目前,前人针对滴灌施肥对作物产量、氮素吸收利用及无机氮积累进行了大量研究,朱金龙等<sup>[15]</sup>在灌溉灰漠土上研究发现,在膜下滴灌条件下,随着施氮量增加,产量和地上部、根系干物质及

氮素累积增加,但过高施氮量会导致干物质和产量降低。陈静等<sup>[16]</sup>研究表明,在滴灌施氮条件下,当施氮量超过 189  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,收获后土壤硝态氮积累量显著增加。但这些研究多集中于西北和华北地区,而针对东北半干旱区春玉米膜下滴灌施氮条件下土壤无机氮分布、玉米氮素吸收及利用的综合研究鲜为报道,尚有待进一步研究。鉴于此,本试验拟通过在吉林省半干旱玉米主产区的玉米覆膜滴灌施肥试验,研究不同滴灌施氮量对玉米关键生长节点氮素积累特征、玉米成熟期土壤无机氮运移规律、氮素平衡和氮素利用效率的影响,旨在为吉林省半干旱区滴灌施肥模式的完善提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验点概况

试验于 2015—2016 年在吉林省乾安县四父村吉林省农业科学院试验基地(123°35'10.2" E, 44°39'21.3" N)进行,试验地点位于吉林省西北部,属于温带大陆性季风气候天气,年平均气温 5.6 °C,日照时数 2 866.6 h,全年积温 2 884.5 °C,无霜期平均 146 d,年均降水量 425.8 mm。土壤类型为淡黑钙土,2 年播前 0—20 cm 土壤基本养分状况:有机质含量分别为 17.39,18.63 g/kg,全氮分别为 1.21,1.28 g/kg,有效磷含量分别为 14.98,13.89 mg/kg,速效钾含量分别为 109.38,114.26 mg/kg,pH 分别为 8.06,7.84。0—20,20—40,40—60,60—80,80—100,100—120,120—140,140—160,160—180,180—200 cm 土壤硝态氮含量分别为 12.87,11.09,7.69,5.37,4.35,3.08,3.47,3.22,3.63,3.45 mg/kg 和 13.05,11.96,8.65,6.79,4.38,4.62,3.93,3.52,4.07,3.28 mg/kg,铵态氮含量分别为 3.82,3.17,2.16,2.35,2.03,1.33,1.26,1.47,1.70,1.12 mg/kg 和 3.63,3.41,2.94,2.87,1.89,2.25,2.07,1.75,1.62,1.30 mg/kg。

### 1.2 试验设计

试验设置 0,70,140,210,280,350  $\text{kg}/\text{hm}^2$  共 6 个施氮处理,分别用 N0、N70、N140、N210、N280、

N350 表示。不同施氮处理磷( $P_2O_5$ )、钾( $K_2O$ )肥用量相同,分别为 80,100 kg/hm<sup>2</sup>。氮肥在基肥、拔节期、大口期、抽雄期、灌浆期 5 个时期按 20% : 30% : 20% : 20% : 10% 的比例施用,追施氮肥随水滴施,磷肥与钾肥均在播种前一次性基施。试验用氮肥为尿素(N 46%),磷肥为重过磷酸钙( $P_2O_5$  46%),钾肥为氯化钾( $K_2O$  60%)。2 年供试玉米品种均为翔玉 998,种植密度 75 000 株/hm<sup>2</sup>。采用大垄双行覆膜栽培模式,相邻两垄间距 130 cm,垄上行距 40 cm,垄间行距 90 cm,地膜宽度 120 cm。每个小区 4 垄宽,小区面积 60 m<sup>2</sup>,随机区组排列,3 次重复,两边设有 2 垄保护行。2015 年和 2016 年的玉米种植日期分别为 5 月 4 日和 5 月 7 日。覆膜前在土壤表面喷施除草剂进行封闭防草,覆膜与铺设滴灌带同步进行。滴灌带选用内镶片式,滴头标称流量 2.0 L/h,滴头间距 30 cm。滴灌带铺设于大垄中间,每条滴灌带控制 2 行玉米。2 年玉米整个生育期灌水定额均为 240 mm,共分 6 次滴灌,其中播前、苗期和拔节期分别灌水 20 mm,大口期、抽雄期和灌浆期分别灌水 60 mm,每个处理用水表控制同等灌水量。试验水源采用地下井水,每小区配独立施肥罐,试验选用 18 L 压差式施肥罐,施肥开始前按各小区所需氮肥分别加入各小区施肥罐,将施肥罐充满水,充分搅拌,使其完全溶解,施肥前先滴清水 30 min,然后打开施肥阀施肥,施肥时间为 120 min,施肥后继续滴清水 30 min。2 年试验收获时间分别为 9 月 30 日和 10 月 2 日,收获后秸秆均移出试验田。其他田间管理按生产田进行。

### 1.3 样本采集与测定

分别于玉米苗期、拔节期、大喇叭口期、抽雄期、灌浆期和成熟期采集植株样本,每小区采取有代表性玉米 6 株(苗期取 30 株),灌浆期和成熟期植株样品分为秸秆和籽粒两部分,于 105 ℃ 杀青 30 min 后,80 ℃ 烘干至恒重,称重并计算地上部干物重,样品粉碎后过 0.05 mm 筛,采用  $H_2SO_4-H_2O_2$  法消煮,凯氏定氮法测定氮素含量。

每年玉米收获后在每个小区分别取 0—200 cm 土壤样品,每 20 cm 土壤为一层(共 10 层),并用环刀法测定 0—100 cm 土壤容重。每小区随机取 5 点,混匀放入冰盒,过 2 mm 筛,称取 5 g 土壤样品,加入 2 mol/L KCl 溶液(土液比 1 : 5)浸提,振荡 60 min 后过滤,浸提液用丹麦 Foss(FIA STAR 5000)流动注射分析仪测定  $NO_3^- - N$  和  $NH_4^+ - N$  含量。并根据各层土壤容重将无机氮含量换算成 0—100 cm 土体无机氮积累量,同时采用烘干法测定土壤含水量。

### 1.4 计算公式及统计方法

采用线性加平台拟合氮肥适宜用量:

$$\text{线性加平台肥效模型: } y = \begin{cases} a + bx & (x \leq C) \\ P & (x > C) \end{cases}$$

式中:  $y$  为玉米产量(kg/hm<sup>2</sup>);  $x$  为施氮量(kg/hm<sup>2</sup>);  $a$  为截距;  $b$  为回归系数;  $C$  为直线与平台的交点;  $P$  为平台产量(kg/hm<sup>2</sup>)。

收获指数 = 籽粒产量 / 总生物量

氮素积累量 = 某生育期单位面积植株(秸秆、籽粒)氮的吸收量

氮素当季回收率(%) = (收获期施氮区地上部吸氮量 - 收获期不施氮区地上部吸氮量) / 氮肥施用量 × 100%

氮素农学效率(kg/kg) = (施氮区玉米产量 - 不施氮区玉米产量) / 氮肥施用量

氮素偏生产力(kg/kg) = 施氮区玉米产量 / 氮肥施用量

土壤无机氮积累量(kg/hm<sup>2</sup>) = 土层厚度(cm) × 土壤容重(g/cm<sup>3</sup>) × 土壤无机氮含量(mg/kg) / 10

氮表观净矿化量(kg/hm<sup>2</sup>) = 不施氮区作物地上部氮积累量 + 不施氮肥区土壤残留无机氮量 - 不施氮肥区土壤起始无机氮量

氮素表观损失量(kg/hm<sup>2</sup>) = 施氮量 + 土壤起始无机氮量 + 土壤氮素净矿化量 - 作物收获氮移走量 - 土壤残留无机氮量

试验数据用 Microsoft Excel 2013 和 SAS 9.0 统计软件处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 施氮量对玉米产量及其构成因素的影响

由表 1 可知,与不施氮肥处理相比,施氮处理在 2015 年和 2016 年分别增产 17.9%~45.3% 和 17.8%~52.1%,差异均达显著水平( $P < 0.05$ )。造成产量差异的原因是施氮处理穗粒数和千粒重均显著高于不施氮肥(N0)处理,其中 2015 年和 2016 年穗粒数提高幅度分别为 7.8%~20.6% 和 5.3%~18.0%,千粒重提高幅度分别为 10.1%~22.8% 和 10.7%~22.0%。在不同施氮处理中,玉米产量、穗粒数和千粒重在施氮量 70~210 kg/hm<sup>2</sup> 范围内随着施氮量的增加而增加,当施氮量超过这一范围,各处理间玉米产量、穗粒数和千粒重无显著性差异;此外,不同施氮处理收获指数无显著差异,说明施氮并不影响同化物在营养器官和生殖器官间的分配规律。

由图 1 可知,线性加平台模型很好的模拟了施氮量和产量之间的关系( $R^2 = 0.849 2^{**}$ , 2015 年;  $R^2 = 0.806 1^{**}$ , 2016 年)。依据该方程求得 2015 年和 2016 年最高玉米产量所需要的施氮量分别为 195.1, 201.0 kg/hm<sup>2</sup>, 相对应的玉米产量分别为 11 935, 12 246 kg/hm<sup>2</sup>。

表 1 不同施氮处理玉米产量与构成因素

处理	2015 年				2016 年			
	产量/ (kg/hm <sup>2</sup> )	穗粒数	千粒重/ g	收获 指数	产量/ (kg/hm <sup>2</sup> )	穗粒数	千粒重/ g	收获 指数
N0	8316d	438.2c	273.7c	0.49a	8153d	457.2c	280.4c	0.50a
N70	9807c	472.3b	301.3b	0.52a	9608c	481.6b	310.5b	0.51a
N140	10861b	503.7ab	315.2b	0.52a	10996b	515.8ab	321.6b	0.53a
N210	12080a	528.4a	336.1a	0.53a	12403a	539.6a	342.2a	0.53a
N280	11959a	525.6a	333.6a	0.52a	12333a	534.1a	337.5a	0.52a
N350	11765a	518.9a	324.9a	0.50a	12002a	526.5a	330.8a	0.52a

注:不同字母表示处理间差异达 5%显著水平。下同。

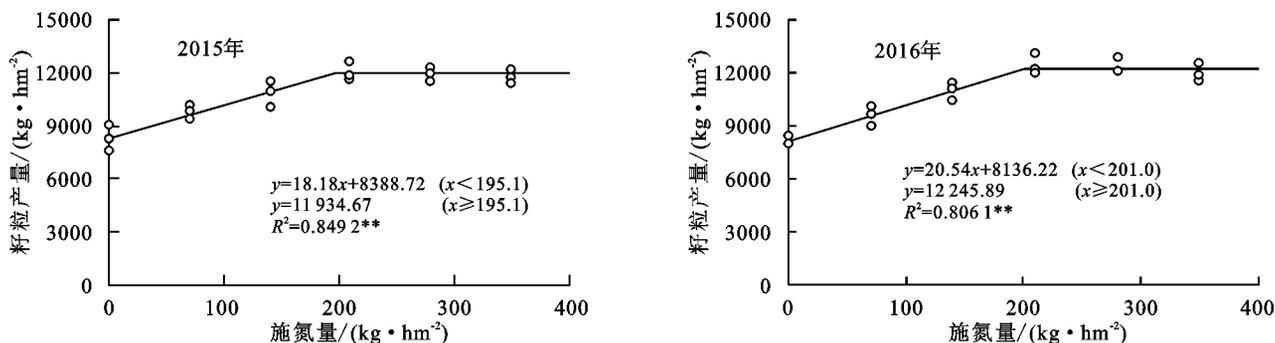


图 1 施氮量对玉米产量的影响

2.2 不同施氮量对玉米氮素吸收及利用率的影响

由表 2 可知,玉米苗期至拔节期,各处理玉米群体氮素积累量增加缓慢,拔节期至灌浆期,各处理玉米群体氮素积累量迅速增加,灌浆期至成熟期增加缓慢,并在成熟期达到峰值。在不同施氮处理中,苗期至抽雄期,植株氮积累量随施氮量的增加而增加,以 N350 处理最高;灌浆期至成熟期发生变化,施氮量在 70~210 kg/hm<sup>2</sup> 内氮积累量随施氮量的增加显著增加,当施氮量超过这一范围,氮积累量下降,但处理间差异不显著。说明氮肥供应过量易促进玉米营养生

长阶段氮素养分的积累,但不利于生殖生长阶段氮素养分的积累,而适宜的氮肥用量可以持续增加玉米氮积累量,并最终在成熟期达到最大值。

玉米氮素当季回收率、农学利用率和偏生产力均表现为随施氮量增加而下降。氮肥用量从 70 kg/hm<sup>2</sup> 增加至 350 kg/hm<sup>2</sup>,2015 年和 2016 年氮素当季回收率分别从 50.8%和 63.6%下降至 21.8%和 24.0%,氮素农学利用率分别从 21.3、20.8 kg/kg 下降至 9.9、11.0 kg/kg。氮素偏生产力分别从 140.1、137.3 kg/kg 下降至 33.6、34.3 kg/kg。

表 2 不同施氮处理玉米氮素吸收动态变化和利用率

年份	处理	氮积累量/(kg·hm <sup>-2</sup> )						氮素当季 回收率/%	氮素农学利用率/ 氮素偏生产力/ (kg·kg <sup>-1</sup> ) (kg·kg <sup>-1</sup> )	
		苗期	拔节期	大口期	抽雄期	灌浆期	成熟期			
2015	N0	2.6c	28.0d	79.9d	105.6d	117.5d	125.5d			
	N70	3.0b	34.6c	94.8c	117.9c	148.6c	161.1c	50.8a	21.3a	140.1a
	N140	3.2ab	40.4b	102.5b	128.8b	169.2b	179.5b	38.5b	18.2b	77.6b
	N210	3.4a	44.5a	112.8a	144.5a	187.8a	204.5a	37.6c	17.9b	57.5c
	N280	3.4a	45.9a	116.7a	151.1a	185.8a	202.2a	27.4d	13.0c	42.7d
	N350	3.5a	47.6a	118.8a	155.0a	181.1a	201.8a	21.8e	9.9d	33.6e
2016	N0	2.9c	25.5d	73.8d	104.1d	124.8d	121.6d			
	N70	3.4b	32.0c	85.2c	118.3c	150.4c	166.2c	63.6a	20.8a	137.3a
	N140	3.6a	38.5b	97.3b	134.9b	178.2b	189.8b	48.7b	20.3a	78.5b
	N210	3.6a	44.0a	117.5a	144.2a	193.4a	210.4a	42.3c	20.2a	59.1c
	N280	3.7a	44.3a	120.2a	147.4a	190.3a	209.7a	31.5d	14.9b	44.0d
	N350	3.7a	45.6a	123.4a	149.1a	189.2a	205.6a	24.0e	11.0c	34.3e

2.3 不同施氮量对土壤剖面无机氮含量的影响

由图 2 可知,耕层 0—20 cm 土壤硝态氮和铵态

氮含量最高,随着土层深度的增加,土壤硝态氮在 0—140 cm 呈下降趋势,140—200 cm 变化规律不明

显;土壤铵态氮在 0—100 cm 呈下降趋势,100—200 cm 变化规律不明显。施氮提高了 0—200 cm 土壤硝态氮和铵态氮含量,在不同施氮处理中,0—40 cm 土壤硝态氮含量在施氮量 70~210 kg/hm<sup>2</sup> 内随施氮量的增加显著增加,当施氮量超过这一范围,土壤硝态氮含量增加幅度不再显著,40—200 cm 土壤硝态氮含量在施氮量 140~210 kg/hm<sup>2</sup> 内无显著差异,当施氮量增加至 280 kg/hm<sup>2</sup> 后,硝态氮含量显著增

加;0—60 cm 土壤铵态氮含量在施氮量 70~210 kg/hm<sup>2</sup> 内随施氮量的增加显著增加,当施氮量增加至 280 kg/hm<sup>2</sup> 后,土壤铵态氮含量提高幅度不再显著,而不同施氮处理 60—200 cm 土壤铵态氮含量无显著性差异。由此可见,不同施氮量条件下土壤剖面硝态氮和铵态氮含量表现不同,施氮对 0—200 cm 土壤硝态氮的影响均较为明显,而对土壤铵态氮含量影响主要集中在 0—60 cm 土层,对 60 cm 以下影响较小。

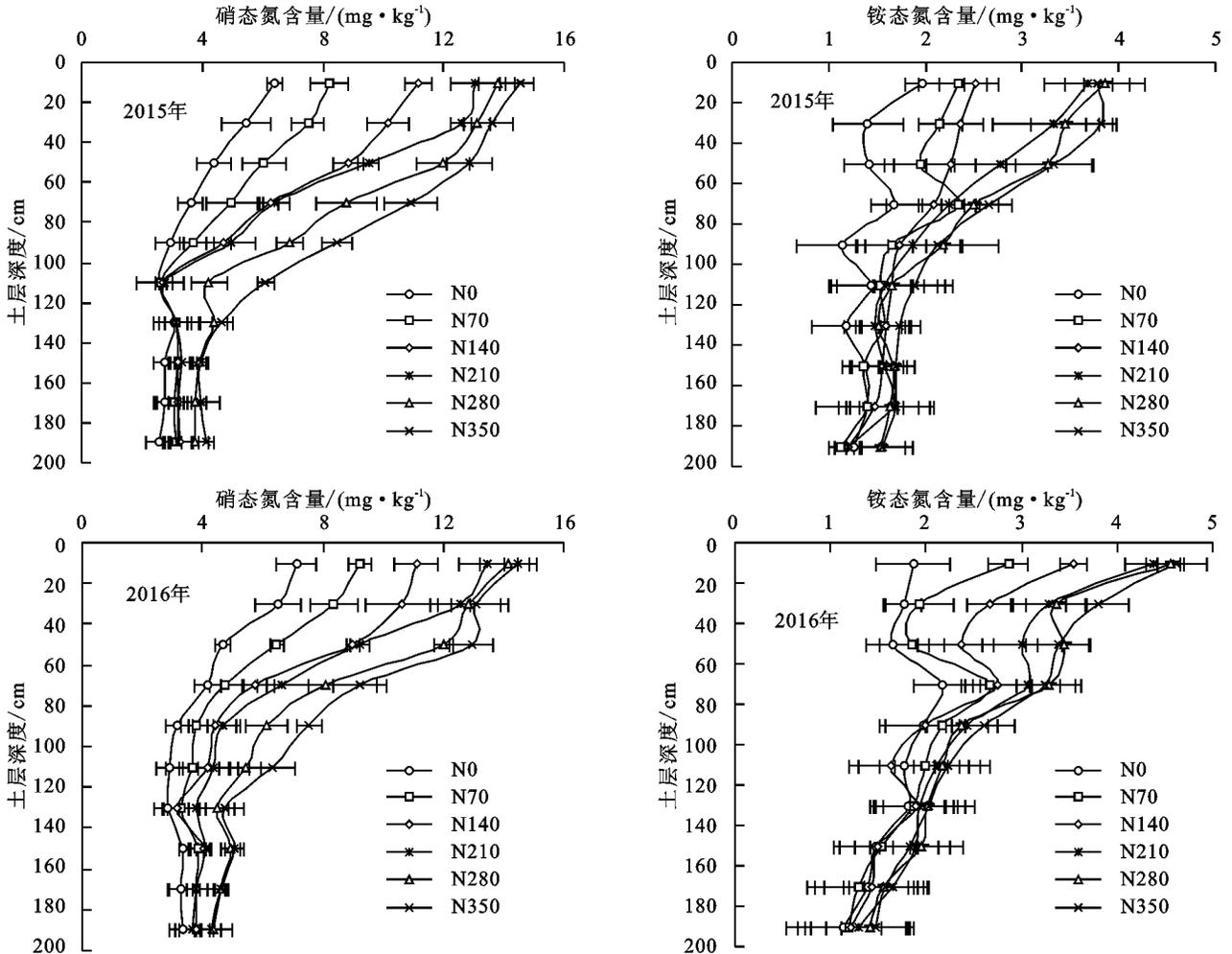


图 2 不同施氮处理土壤剖面无机氮含量变化特征

#### 2.4 不同施氮量对土壤氮素平衡的影响

由于玉米根系吸收养分的主要层次为 0—100 cm,100 cm 以下根重比例不足 1%<sup>[17]</sup>,因此土壤无机氮所在层次定义为 0—100 cm 深度,即作物根系吸收养分的主要层次来评估玉米对氮肥的利用状况。玉米收获期氮素平衡结果(表 3)表明,在氮的总输入项中,施氮量、播前土壤无机氮积累量起到了很重要的作用,总输入量随施氮量的增加而显著增加。在氮的总输出项中,玉米吸氮量、土壤无机氮残留量和氮表观损失变化规律一致,均随着施氮量的增加呈线性增加趋势(图 3),其中 2015 年和 2016 年玉米吸氮量与施氮量的关系可分别用线性回归方程  $y=0.2162x+141.26$  和  $y=0.2331x+143.09$  来拟合, $R^2$  分别为

0.808 9 和 0.754 3( $n=18$ );土壤无机氮残留量与施氮量的关系可分别用线性方程  $y=0.3743x+78.937$  和  $y=0.3301x+91.855$  来拟合, $R^2$  分别为 0.959 5 和 0.969 9( $n=18$ );氮表观损失量与施氮量的关系可分别用线性方程  $y=0.4095x-16.29$  和  $y=0.4368x-23.119$  来拟合, $R^2$  分别为 0.924 8 和 0.886 4( $n=18$ ),均达到极显著水平。依据该方程求得,即每增加 1 kg 纯氮,玉米吸氮量、土壤无机氮残留量和氮表观损失量分别占增加纯氮的 21.6%~23.3%,33.0%~37.4%,41.0%~43.7%。

显著性分析结果表明,无机氮残留量和氮表观损失量随着施氮量的增加显著增加,而玉米吸氮量表现不同,当施氮量超过 210 kg/hm<sup>2</sup> 后,各处理间无显

著差异。说明过量施氮不仅不能继续增加玉米吸氮量,同时还会显著增加土壤无机氮残留量和损失量。然而 N70 处理和 N140 处理虽然无机氮残留量和表观损失量较低,但由于施氮量低于玉米氮吸收量,使土壤无机氮积累量低于起始时无机氮积累量,当施氮

量增加至 210 kg/hm<sup>2</sup>,土壤无机氮残留量与试验起始时相近,而施氮量增加至 280 kg/hm<sup>2</sup> 后,土壤无机氮残留量显著的高于试验起始无机氮积累量。此外,无机氮残留量是氮盈余的主要部分,但随着施氮量的增加,氮表观损失量占氮盈余的比例显著增加。

表 3 不同施氮处理春玉米整个生育期矿质氮平衡

年份	处理	氮输入/(kg/hm <sup>2</sup> )			氮输出/(kg/hm <sup>2</sup> )			
		施氮量	起始氮	矿化氮	总输入	玉米吸氮量	残留无机氮	氮表观损失
2015	N0	0	145.9	58.0	203.9f	125.5d	78.4f	0
	N70	70	145.9	58.0	273.9e	161.1c	103.8e	9.1e
	N140	140	145.9	58.0	343.9d	179.5b	133.9d	30.5d
	N210	210	145.9	58.0	413.9c	204.5a	156.7c	52.7c
	N280	280	145.9	58.0	483.9b	202.2a	186.1b	95.6b
	N350	350	145.9	58.0	553.9a	201.8a	207.8a	144.3a
2016	N0	0	158.3	53.5	211.8f	121.6d	90.2f	0
	N70	70	158.3	53.5	281.8e	166.2c	113.0e	2.6e
	N140	140	158.3	53.5	351.8d	189.8b	141.9d	20.1d
	N210	210	158.3	53.5	421.8c	210.4a	162.3c	49.1c
	N280	280	158.3	53.5	491.8b	209.7a	186.3b	95.8b
	N350	350	158.3	53.5	561.8a	205.6a	203.9a	152.3a

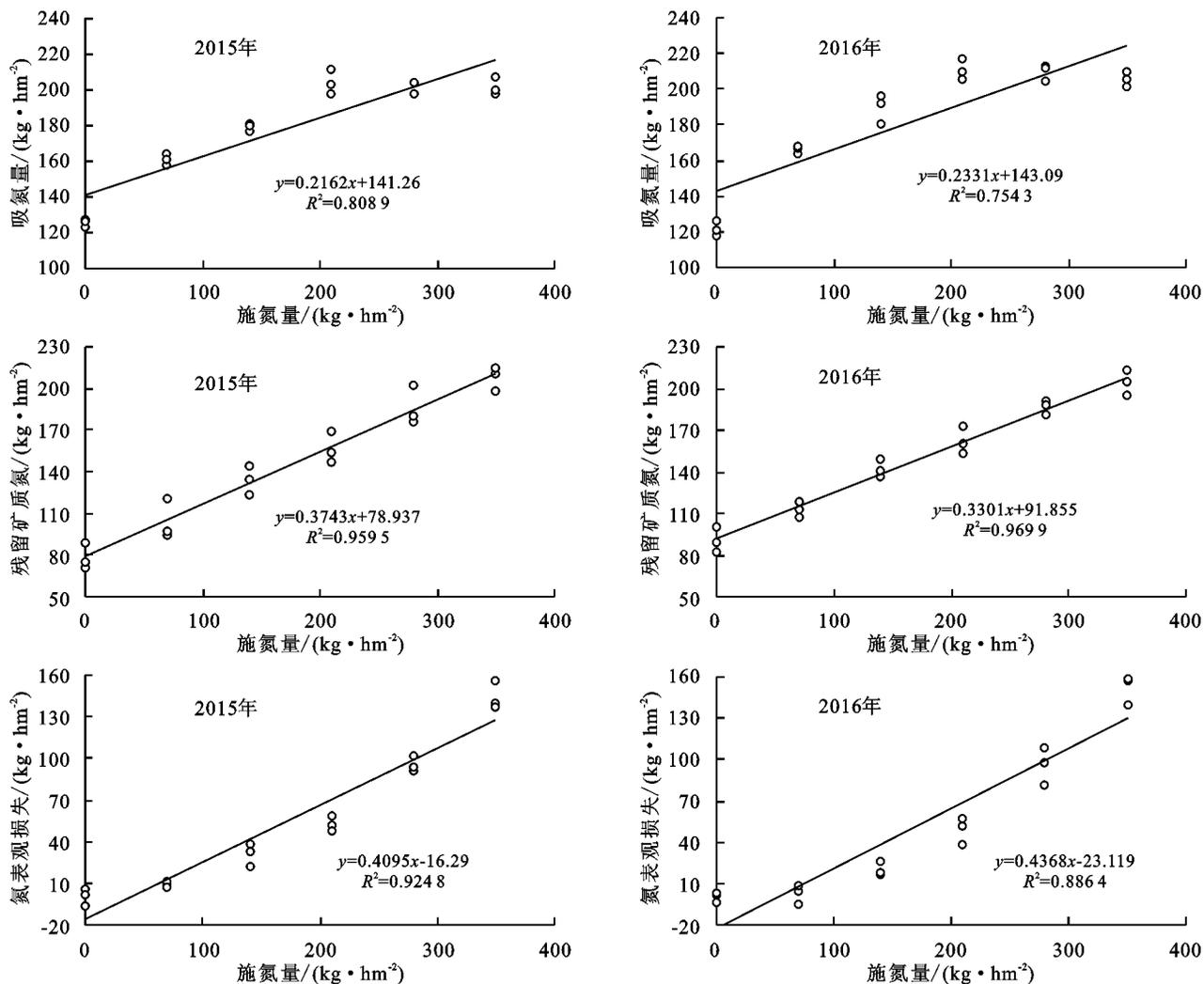


图 3 玉米吸氮量、残留矿质氮量、氮表观损失与施氮量的关系

### 3 讨论与结论

氮是促进玉米高产必需的营养元素之一,大量研究<sup>[18-19]</sup>结果表明,氮对作物的增产效果主要体现在增加有效穗数、穗粒数和粒重。这与本研究中施氮显著提高玉米穗粒数和千粒重的结果一致,说明施氮可以促进光合产物向穗部的转运,使穗粒数和粒重增加,进而提高玉米产量。而相关研究<sup>[13,20]</sup>指出,施氮量和产量间并不是完全呈正比关系,在过量施氮条件下,玉米产量不再显著提高,甚至下降。本研究中,在一定施氮范围内,玉米产量、穗粒数和千粒重随施氮量的增加显著增加,当施氮量超过这一范围,各处理玉米产量、穗粒数和千粒重间无显著性差异。可能是由于氮素供应过量导致营养体吸收消耗了大量光合产物用于蛋白质的合成,影响碳氮代谢平衡,抑制了光合产物的形成和转化所致<sup>[21]</sup>。可见大量投入氮肥并不能使玉米高产,适宜的氮肥用量才是玉米高产稳产的关键。

玉米植株对氮素的吸收、转运与利用,直接影响籽粒产量<sup>[22]</sup>。合理的施氮量可以促进作物对氮素的吸收和积累,但当氮肥过量供应时,氮积累量呈下降趋势<sup>[23-24]</sup>。本研究结果表明,过量施氮仅在玉米营养生长期(苗期~抽雄期)提高了氮积累量,当进入灌浆期和成熟期,氮积累量下降。这主要是由于过量施氮导致玉米营养体氮素代谢旺盛,使玉米开花后氮素向籽粒中转移量减少,限制了玉米灌浆期至成熟期氮积累量的提高。相关研究<sup>[25]</sup>也表明,施氮过多会使作物花前养分积累量过高,加重转运的负效应,导致作物生育后期养分积累量下降,最终影响产量。而已有研究<sup>[23,26]</sup>指出,作物花前氮素积累对最终产量的贡献率低于花后氮积累量,其中灌浆期氮积累量与产量间相关性最强<sup>[23]</sup>。由此可见,氮素累积和转运相互联系,平衡玉米花前养分吸收与营养器官再转移的相互关系是提高玉米生育后期氮素养分积累的关键。

氮肥施入土壤后经过硝化和脲酶作用转化为硝态氮和铵态氮,是作物吸收利用的主要方式。而土壤氮素盈亏状况与作物氮吸收量、产量构成密切相关,因此土壤硝态氮和铵态氮含量可作为土壤供氮能力与氮肥施用响应的重要指标。我国北方农田以碱性土壤为主,施入土壤中主要以硝态氮形式存在<sup>[27]</sup>,并且土壤铵态氮含量受施氮水平影响较小<sup>[28]</sup>,且差异多表现在土壤表层<sup>[29]</sup>。本研究中,不同施氮水平对 0—200 cm 土壤硝态氮的影响显著,而对铵态氮含量的影响集中在 0—60 cm,对 60 cm 以下影响较小,且土壤硝态氮含量远高于铵态氮含量。可见,土壤无机氮积累主要以硝态氮形式存在。蒋会利等<sup>[30]</sup>研究

指出,施氮量在一定的范围内,土壤硝态氮含量增加量不显著,但超过这一范围后,土壤硝态氮含量显著增加。王激清等<sup>[31]</sup>研究表明,当施氮量超过 225 kg/hm<sup>2</sup> 时,淋溶进入深层(120—180 cm)土壤硝态氮含量显著增加。从这些研究结果可见,不同土壤环境条件下土壤硝态氮均存在一个容纳安全阈值,虽然土壤无机氮含量随施氮量的增加而增加,但如果在安全阈值范围内相对来说是安全的。本研究结果表明,当施氮量增加至 280 kg/hm<sup>2</sup> 后,40—200 cm 层土壤硝态氮含量显著增加。说明在该区域施氮量不超过 210 kg/hm<sup>2</sup> 时,土壤无机氮含量在安全阈值范围之内,不会有过多氮素因淋失或挥发造成环境污染。

叶东靖等<sup>[32]</sup>指出,合理施氮量的确定除了要考虑氮肥对作物的增产效应和氮肥利用率外,还应考虑土壤无机氮残留和氮素损失的高低。相关研究<sup>[33-34]</sup>表明,无机氮残留量和氮表观损失量随着施氮量的提高显著提高,但也有研究<sup>[35]</sup>认为,只有当氮肥供应超过作物对养分的需求时,氮素残留和损失量才会急剧增加。本研究氮素平衡计算结果表明,随着施氮量的增加,无机氮残留量和表观损失量均显著增加。这可能是由于在本试验条件下,土壤自身供氮量较高(203.9~211.8 kg/hm<sup>2</sup>),与当季玉米吸氮量相近,影响了对肥料氮素的吸收利用,从而导致土壤剖面无机氮残留量、氮素表观损失量随施氮量增加显著增加的主要原因。各施氮处理中,以 N210 处理无机氮残留量和试验起始时相近,而低施氮量处理(N70、N140)虽然无机氮残留量和表观损失量较低,但因施氮量低于玉米吸氮量,使土壤无机氮残留量较试验起始时有所下降,高施氮量处理(N280、N350)由于施氮量远高于玉米吸氮量,使土壤氮素大量盈余。可见,施入土壤中的氮素不可避免会产生一定数量的积累或损失,因此在生产实际中,施氮应在满足作物对氮素的需求和维持土壤供氮能力的前提下,尽量控制无机氮过多积累与损失。

综合分析不同施氮量对春玉米产量、氮素吸收利用的影响,并考虑土壤无机氮分布特征及土壤无机氮残留量和氮表观损失带来的环境风险,可以得出,在吉林省西部半干旱区滴灌施肥条件下,春玉米合理施氮量应控制在 195~210 kg/hm<sup>2</sup>。

#### 参考文献:

- [1] 李久生,张建君,薛克宗,等. 滴灌施肥灌溉原理与应用[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2003:3-4.
- [2] 员学锋,吴普特,汪有科. 地膜覆盖保墒灌溉的土壤水、热、以及作物效应研究[J]. 灌溉排水学报,2006,25(1):

- 25-29.
- [3] 杨晓宠,严程明,张江周,等.中国滴灌施肥的技术优缺点分析与对策[J].农学学报,2014,4(1):76-80.
- [4] 李青军,张炎,胡伟,等.滴灌施肥对玉米生长发育、养分吸收及产量的影响[J].土壤通报,2014,45(5):1195-1201.
- [5] 陈静,王迎春,李虎,等.滴灌施肥对免耕冬小麦水分利用及产量的影响[J].中国农业科学,2014,47(10):1966-1975.
- [6] 侯振安,李品芳,龚江,等.不同滴灌施肥策略对棉花氮素吸收和氮肥利用率的影响[J].土壤学报,2007,44(4):702-708.
- [7] 程亮,曲杰,高建强,等.膜下滴灌对花生施肥农学效率及肥料利用率的影响[J].花生学报,2016,45(3):53-56.
- [8] 路永莉,高义民,同延安,等.滴灌施肥对渭北旱塬红富士苹果产量与品质的影响[J].中国土壤肥料,2013(1):48-52.
- [9] 张学军,赵营,陈晓群,等.滴灌施肥中施氮量对两年蔬菜产量、氮素平衡及土壤硝态氮累积的影响[J].中国农业科学,2007,40(11):2535-2545.
- [10] 赵炳南,朱风文,杨威,等.吉林省西部半干旱区玉米灌溉现状分析及对策[J].吉林农业科学,2010,35(6):8-10,15.
- [11] 曹玉军,魏雯雯,徐国安,等.半干旱区不同地膜覆盖滴灌对土壤水、温变化及玉米生长的影响[J].玉米科学,2013,21(1):107-113.
- [12] 徐泰森,孙杨,刘彦莹,等.膜下滴灌水肥耦合对半干旱区玉米生长发育及产量的影响[J].玉米科学,2016,24(5):118-122.
- [13] 张翠翠,闫凌云,赵鹏,等.施氮对夏玉米氮素利用及土壤硝态氮积累的影响[J].中国农学通报,2013,29(18):57-61.
- [14] 刘金山,戴健,刘洋,等.过量施氮对旱地土壤碳、氮及供氮能力的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(1):112-120.
- [15] 朱金龙,危常州,张书捷,等.不同供氮水平对膜下滴灌春玉米干物质及养分累积的影响[J].新疆农业科学,2014,51(9):1569-1576.
- [16] 陈静,王迎春,李虎,等.滴灌施肥对冬小麦农田土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 分布、累积及氮素平衡的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(4):927-935.
- [17] 吴永成,周顺利,王志敏,等.华北地区夏玉米土壤硝态氮的时空动态与残留[J].生态学报,2005,25(7):1620-1625.
- [18] 侯云鹏,韩立国,孔丽丽,等.不同施氮水平下水稻的养分吸收、转运及土壤氮素平衡[J].植物营养与肥料学报,2015,21(4):836-845.
- [19] 侯云鹏,孔丽丽,杨建,等.氮肥运筹对春玉米产量、养分吸收和转运的影响[J].玉米科学,2016,24(4):137-143.
- [20] 隗英华,孙文涛,韩晓日,等.春玉米土壤矿质氮累积及酶活性对施氮的响应[J].植物营养与肥料学报,2014,20(6):1368-1377.
- [21] 郭文奇,张思平,陈兵林,等.水氮运筹对棉花花后生物量和氮素利用率的影响[J].西北植物学报,2008,28(11):2270-2277.
- [22] 赵广才,何中虎,田奇卓,等.应用 $^{15}\text{N}$ 研究施氮比例对小麦氮素利用的效应[J].作物学报,2004,30(2):159-162.
- [23] 郑伟,何萍,高强,等.施氮对不同土壤肥力玉米氮素吸收和利用的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(2):301-309.
- [24] 侯云鹏,尹彩侠,孔丽丽,等.氮肥对吉林春玉米产量、农学效率和氮养分平衡的影响[J].中国土壤与肥料,2016(6):93-98.
- [25] 孙永健,孙园园,李旭毅,等.水氮互作对水稻氮磷钾吸收、转运及分配的影响[J].作物学报,2010,36(4):655-664.
- [26] 李朝苏,汤永禄,吴春,等.施氮量对四川盆地小麦生长及灌浆的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(4):873-883.
- [27] 井涛,樊明寿,周登博,等.滴灌施氮对高垄覆膜马铃薯产量、氮素吸收及土壤硝态氮积累的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(4):873-883.
- [28] 刘学军,巨晓棠,张福锁.基施尿素对土壤剖面中无机氮动态的影响[J].中国农业大学学报,2001,6(5):63-68.
- [29] 马兴华,于振文,梁晓芳,等.施氮量和底施追施比例对土壤硝态氮和铵态氮含量时空变化的影响[J].应用生态学报,2006,17(4):630-634.
- [30] 蒋会利,温晓霞,廖允成.施氮量对冬小麦产量的影响及土壤硝态氮运转特性[J].植物营养与肥料学报,2010,16(1):237-241.
- [31] 王激清,刘社平,韩宝文,等.施氮量对冀西北春玉米氮肥利用率和土壤硝态氮时空分布的影响[J].水土保持学报,2011,25(2):138-143.
- [32] 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.
- [33] 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.
- [34] 栗丽,洪坚平,王宏庭,等.施氮与灌水对夏玉米土壤硝态氮积累、氮素平衡及其利用率的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(6):1358-1365.
- [35] 崔振岭,石立委,徐久飞,等.氮肥施用对冬小麦产量、品质和氮素表现损失的影响研究[J].应用生态学报,2005,16(11):2071-2075.