

# 春玉米产量、氮肥效率及土壤矿质氮对施氮的响应

隽英华<sup>1</sup>, 汪仁<sup>1\*</sup>, 韩晓日<sup>2</sup>, 孙文涛<sup>1\*</sup>, 邢月华<sup>1</sup>

(1. 辽宁省农业科学院植物营养与环境资源研究所, 辽宁 沈阳 110161; 2. 沈阳农业大学土地与环境学院, 辽宁 沈阳 110866)

**摘要:** 为了提高氮肥增产效益, 减少对环境的污染, 通过田间试验研究了施氮量对春玉米产量、氮肥效率及土壤矿质氮的影响。结果表明, 施氮量较低时, 春玉米籽粒产量随施氮量增加显著增加, 当施氮量高于  $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时, 产量保持不变或有减少趋势。氮肥农学利用率、氮素吸收效率、氮素偏生产力及氮收获指数均随着施氮量增加显著降低, 氮肥表观利用率和氮肥生理利用率均先增加后降低。从苗期到收获期, 施氮处理 0~60 cm 土层硝态氮含量呈现“上升—下降—上升—下降—稳定”的变化趋势, 而 60~120 cm 土层硝态氮在春玉米生长后期有增加的趋势。随着土层加深, 土壤硝态氮含量呈波浪式下降, 施氮量  $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  和  $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  处理在 60~100 cm 土层硝态氮含量均显著高于其他处理。随着施氮量增加, 0~120 cm 土层硝态氮累积量显著增加, 当施氮量超过  $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  时, 土层中累积的硝态氮存在着较大的淋溶风险。综合考虑产量、氮肥效率和环境效应,  $179 \sim 209 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$  是本试验条件下春玉米的合理施氮量。

**关键词:** 春玉米; 施氮量; 氮肥效率; 土壤硝态氮

中图分类号: S147.22

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2014)02-0132-08

doi: 10.13254/j.jare.2013.0241

## Response of Spring Maize Grain Yield, Nitrogen Efficiency and Soil Mineral Nitrogen to Nitrogen Application

JUAN Ying-hua<sup>1</sup>, WANG Ren<sup>1\*</sup>, HAN Xiao-ri<sup>2</sup>, SUN Wen-tao<sup>1\*</sup>, XING Yue-hua<sup>1</sup>

(1. Institute of Plant Nutrition and Environmental Resource, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161, China; 2. Department of Soil and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

**Abstract:** In order to increase crop production and reduce environmental pollution by nitrogen (N) fertilizer, a field experiment was carried out to study the effects of N application rate on spring maize grain yield, N use efficiency and temporal and spatial dynamics of soil mineral N ( $N_{\text{min}}$ ). The results showed that the yield of spring maize increased significantly with N application rate increasing, but once the rate exceeded  $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , the yield began to keep stable or trend to decline. With increasing of N application rate, N agronomic use efficiency, N uptake efficiency, N partial productivity and N harvest index all decreased significantly, however, N apparent use efficiency and N physiological use efficiency both first increased and then decreased. From seedling stage to maturity of spring maize,  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  content in 0~60 cm soil layer showed a trend of increase-decrease-increase-decrease and keeping stable at the end, but in 60~120 cm soil layer showed a trend of increase at the late growing stage under N treatment. With increasing of soil depth, soil  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  content decreased in a wave manner, when N application rates were  $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  and  $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  content in 60~100 cm soil layer was significantly higher than that under other N treatments. With the increase of N application rate,  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  accumulation in 0~120 cm soil layer increased significantly, but once the rate exceeded  $240 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , accumulated  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  in soil layer had high leaching risk. In view of grain yield, N utilization efficiency and environmental benefit,  $179 \sim 209 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$  was the reasonable N application rate for spring maize under the experimental conditions.

**Keywords:** spring maize; nitrogen application rate; nitrogen use efficiency; soil nitrate nitrogen

施用氮肥是增加作物产量和改善作物品质的重要措施之一<sup>[1]</sup>。但是, 当粮食产量达到一定水平, 过量施

用氮肥不仅不能持续提高作物产量及经济效益, 而且还会引起资源的严重浪费, 污染土壤、水体、大气生态环境及降低生物多样性<sup>[2-4]</sup>。因此, 优化氮肥施用制度, 不仅能够满足作物所需的氮素营养, 获得较高的氮肥效益, 而且必须使土壤矿质氮, 特别是硝态氮残留量保持在一定范围内, 并确保土壤生态系统的氮素平衡。

春玉米是我国东北地区最重要的粮食作物之一, 在国家粮食安全中具有举足轻重的地位<sup>[5]</sup>。增加水肥特别是氮肥投入是该地区 30 年来春玉米产量不断提高

收稿日期: 2013-12-11

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (2011BAD16B12, 2012BAD04B03, 2013BAD07B03, 2013BAD05B07)

作者简介: 隽英华 (1979—), 男, 山东莒南人, 博士研究生, 副研究员, 主要从事作物营养与土壤氮转化的生物化学调控研究。

E-mail: juanyong\_001@sohu.com

\* 通信作者: 汪仁 E-mail: lntfswr@yahoo.com.cn;

孙文涛 E-mail: wentaow@163.com

的重要措施。由于盲目追求高产,生产中氮肥施用过多现象普遍存在,而且春玉米生长季高温多雨,土壤矿化作用强烈,因此土壤氮素供应常常过量,在降雨或灌溉条件下以硝态氮形式向土壤深层淋洗,造成地下水的污染<sup>[1,6-7]</sup>。近年来,有关氮肥施用对玉米氮素利用及环境效应方面的研究多集中在华北夏玉米<sup>[8-11]</sup>和西北春玉米<sup>[12-13]</sup>上,东北春玉米生长发育的温度、水热等环境条件不同于夏玉米,针对东北春玉米氮素利用及土壤矿质氮淋溶累积的系统研究报道不多。东北昌图地区地处中温带亚湿润季风大陆性气候区,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,但近年来农户玉米氮肥不合理施用问题严重,氮肥过量与不足施用同时存在,直接导致氮肥利用率低下。为此,试验以东北昌图地区广泛种植的春玉米为研究对象,研究施氮量对春玉米产量、氮肥效率及土壤矿质氮时空分布的影响,旨在为优化氮肥管理、减少春玉米农田土壤硝态氮淋溶损失和降低环境污染提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验于2010—2011年在辽宁省昌图县老城镇(42°46'33" N, 123°57'39" E)进行,该区属于中温带亚湿润季风大陆性气候,年均温度7.0℃,年均日照总数为2700h,年均降雨量500~600mm,无霜期148d,≥10℃有效积温3200℃。供试土壤为中等肥力棕壤。0~20cm表层土壤的基础理化性质为:pH6.10、有机质18.50g·kg<sup>-1</sup>、全氮1.23g·kg<sup>-1</sup>、全磷1.08g·kg<sup>-1</sup>、全钾13.81g·kg<sup>-1</sup>、碱解氮114.00mg·kg<sup>-1</sup>、有效磷18.21mg·kg<sup>-1</sup>、速效钾156.00mg·kg<sup>-1</sup>。播种前0~120cm土层的矿质氮含量见表1。

2010年田间试验共设置6个施氮水平:0、60、120、180、240kg N·hm<sup>-2</sup>和300kg N·hm<sup>-2</sup>,分别用N0、N60、N120、N180、N240和N300表示,随机区组排列,3次重复。各处理均施磷酸二铵(以P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>计)97.5kg·hm<sup>-2</sup>(N0处理用过磷酸钙代替),氯化钾(以K<sub>2</sub>O计)105.0

kg·hm<sup>-2</sup>,全部以基肥形式施入;氮肥为尿素,其中20%作基肥,40%作拔节期追肥(6月28日),40%作大喇叭口期追肥(7月31日)。试验小区面积为30m<sup>2</sup>(5.6m×5.4m)。供试玉米品种为郑单958,种植密度为6.2×10<sup>4</sup>株·hm<sup>-2</sup>。4月23日播种,9月23日收获。2011年与2010年试验方案一致,试验区在同一田块,但位于不同位置。

### 1.2 测定项目与方法

土壤样品自播种开始,每隔15d取样1次,共取样10次(5月8日、5月23日(苗期)、6月7日、6月22日、7月7日(拔节期)、7月22日(大喇叭口期)、8月6日(抽雄期)、8月21日、9月5日(灌浆期)、9月20日(成熟期))。每次采样时,采集每个小区0~120cm土层,每20cm为一层。每小区随机采取3点,同层次的土壤混合为1个土样,装入自封袋中。带回实验室将新鲜土壤混匀过2mm筛,经四分后,一部分用烘干法测定土壤水分含量<sup>[14]</sup>;一部分用于测定土壤矿质氮含量<sup>[14]</sup>,具体方法如下:称取10g鲜土,用100mL 2mol·L<sup>-1</sup> KCl溶液浸提,160r·min<sup>-1</sup>振荡1h,过滤后将滤液保存于-18℃冰箱中,采用连续流动分析仪(AA3,德国布朗卢比公司)测定硝态氮和铵态氮含量。

收获时每个小区选取2行玉米(约6.7m<sup>2</sup>)测定生物产量,然后选取整齐一致具有代表性的5穗玉米和3株秸秆带回实验室,考种测产;同时,按分茎、叶、籽粒和穗轴测定其鲜质量。再分别剪碎,取一部分装入信封烘干至恒重,并测定其干质量。样品烘干粉碎过筛后(0.25mm),用H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>消解,采用半微量开氏法测定全氮含量<sup>[14]</sup>。

### 1.3 计算方法与数据分析

有关氮肥效率参数的计算方法<sup>[11,15]</sup>如下:

$$\text{氮肥表观利用率}(\%) = (\text{施氮处理作物吸氮量} - \text{不施氮处理作物吸氮量}) / \text{施氮量} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{氮肥农学利用率}(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{N}) = (\text{施氮处理产量} - \text{不施氮处理产量}) / \text{施氮量} \quad (2)$$

$$\text{氮肥生理利用率}(\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{N}) = (\text{施氮处理产量} - \text{不施氮处理产量}) / \text{作物吸氮量} \quad (3)$$

表1 试验前0~120cm土层矿质氮含量  
Table 1 N<sub>min</sub> content in 0~120 cm soil layer before test

项目	土层深度/cm					
	0~20	20~40	40~60	60~80	80~100	100~120
硝态氮/mg·kg <sup>-1</sup>	13.57	10.51	9.58	6.80	4.01	2.70
铵态氮/mg·kg <sup>-1</sup>	4.19	2.66	1.77	1.25	1.26	0.94

氮素偏生产力( $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{N}$ )=施氮处理籽粒产量/施氮量 (4)

氮素吸收效率( $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}\text{N}$ )=作物吸氮量/施氮量 (5)

氮收获指数(%)=(籽粒吸氮量/作物吸氮量) $\times 100\%$  (6)

土壤剖面中各土层矿质氮(硝态氮或铵态氮)累积量( $N_{\text{min}}, \text{N kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )按下式计算:

$$N_{\text{min}}=d\times P_b\times C\times 0.1 \quad (7)$$

式中: $d$ 为土层厚度(20 cm); $P_b$ 为土壤容重( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ); $C$ 为土壤中硝态氮或铵态氮含量( $\text{N}, \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ );0.1为换算系数。剖面矿质氮累积量为硝态氮和铵态氮累积量之和。经测定 0~20 cm 土壤容重为  $1.15\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 20~40 cm 土层容重为  $1.23\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ , 40 cm 下层土层容重为  $1.38\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

试验数据采用 2 年试验平均值的形式表示,利用软件 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 11.5 进行数据处理及统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 春玉米产量性状及经济效益

随着施氮量增加,穗长和籽粒产量均先增加后降低,而百粒重无规律性变化(表 2)。分析表明,施氮处理与不施氮处理之间百粒重和籽粒产量存在差异显著,而穗长差异不显著;施氮处理之间穗长差异不显著,而百粒重和籽粒产量的差异显著性受施氮量制约;N240 处理百粒重显著高于其他施氮处理,N180 和 N240 处理籽粒产量显著高于其他施氮处理。进一步分析表明,春玉米籽粒产量与施氮量呈二次曲线关系(图 1),当施氮量为  $209\text{kg}\cdot\text{N}\cdot\text{hm}^{-2}$  时获得最高产量  $10\,847\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,当施氮量为  $179\text{kg}\cdot\text{N}\cdot\text{hm}^{-2}$  时获得最

佳产量  $10\,806\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (利用  $d_N$ (尿素态氮单价)/ $d_Y$ (玉米籽粒单价)求导数获得最佳产量<sup>[6]</sup>,按尿素态氮  $5.20\text{Yuan}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,玉米籽粒  $1.90\text{Yuan}\cdot\text{kg}^{-1}$  计)。从经济效益的角度看,施氮明显提高了经济效益,但大小因施氮量而异,以 N240 处理最高( $16\,051\text{Yuan}\cdot\text{hm}^{-2}$ ),其次是 N180 处理( $15\,815\text{Yuan}\cdot\text{hm}^{-2}$ )。随着施氮量增加,产投比降低,以 N0 处理最高(11.14),N300 处理最低(5.89)。综合分析施氮量对产量性状及经济效益的影响表明,最佳施氮量在  $179\sim 209\text{kg}\cdot\text{N}\cdot\text{hm}^{-2}$  之间。

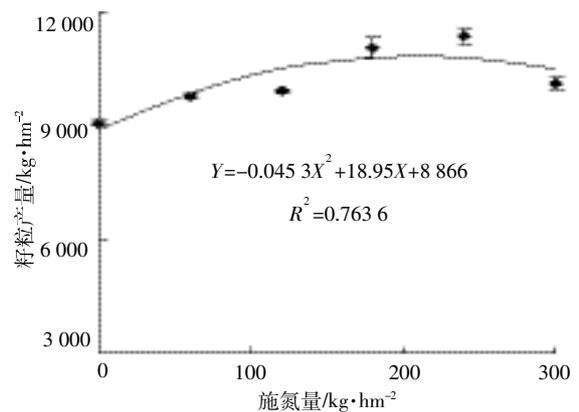


图 1 籽粒产量与施氮量之间的关系拟合

Figure 1 Simulation of the relationship between grain yield and N application rate

### 2.2 春玉米氮肥利用效率

不同施氮水平下春玉米的氮肥效率如表 3 所示。随着施氮量增加,氮肥表观利用率先增加后降低,当施氮量为  $180\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  时,利用率达到最大,且与其他施氮处理差异显著。氮肥农学利用率随着施氮量增加除 N120 处理外,其他施氮处理呈现降低趋势,说明氮肥增产效益随施氮量增加而降低。氮肥生理利用率随施氮量增加先增加后降低,当施氮量为  $180\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  和  $240\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  时,生理利用率达到最大,且两者之间差

表 2 不同施氮水平下春玉米产量性状及经济效益

Table 2 Yield characteristics and economic benefits of spring maize as affected by N application rate

处理	穗长/cm	百粒重/g	籽粒产量/ $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$	施肥效益/ $\text{Yuan}\cdot\text{hm}^{-2}$			产投比
				产值	成本	利润	
N0	14.80aA	29.70aA	9 058.00aA	14 492.80	1 193.82	13 298.98aA	11.14
N60	14.87aA	33.57bcB	9 762.67bB	15 620.27	1 423.05	14 197.22bA	9.98
N120	15.64aA	32.41bcAB	9 913.33bB	15 861.33	1 654.81	14 206.52bA	8.58
N180	15.87aA	31.69abAB	11 064.00cC	17 702.40	1 886.57	15 815.83cB	8.38
N240	15.51aA	34.57cB	11 356.33cC	18 170.13	2 118.33	16 051.80cB	7.58
N300	15.51aA	32.71bcAB	10 120.67bB	16 193.07	2 350.09	13 842.98abA	5.89

注:价格:玉米  $1.6\text{Yuan}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,尿素  $1.8\text{Yuan}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,磷酸二铵  $2.6\text{Yuan}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,氯化钾  $4.5\text{Yuan}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,过磷酸钙  $0.75\text{Yuan}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;同一列数据后的不同小写字母和大写字母分别表示处理间差异达 5%显著水平和 1%显著水平。下同。

表3 不同施氮水平下春玉米氮肥效率  
Table 3 N use efficiency of spring maize as affected by N application rate

处理	氮肥表观利用率/%	氮肥农学利用率/ kg·kg <sup>-1</sup> N	氮肥生理利用率/ kg·kg <sup>-1</sup> N	氮素偏生产力/ kg·kg <sup>-1</sup> N	氮素吸收效率/ kg·kg <sup>-1</sup> N	氮收获指数/%
N0						68.5cB
N60	21.3aA	11.7bB	4.0aA	163.0eD	3.0eC	67.9bcB
N120	23.8aA	7.1bB	4.4aA	82.6dC	1.6dB	65.8bAB
N180	28.0bB	11.1bB	9.3bB	61.5cBC	1.2cAB	65.8bAB
N240	22.2aA	9.6bB	10.5bB	47.3bAB	0.9bAB	62.7aA
N300	19.8aA	3.5aA	4.7aA	33.7aA	0.7aA	60.8aA

异不显著。氮素吸收效率和氮素偏生产力随着施氮量增加均显著降低,两者均以 N60 处理最大,分别为 3.0 kg·kg<sup>-1</sup> N 和 163.0 kg·kg<sup>-1</sup> N。施用氮肥可显著降低氮收获指数,以 N0 处理最大(68.5%),但当施氮量分别在 0~180 kg·hm<sup>-2</sup> 和 240~300 kg·hm<sup>-2</sup> 之间时各施氮水平间差异不显著。

### 2.3 土壤矿质氮时空分布特征

#### 2.3.1 土壤铵态氮时空分布特征

本研究表明(试验结果未列出),除追施拔节肥(6月28日)和大喇叭口肥(7月31日)后的拔节期和抽雄期 0~40 cm 土层铵态氮含量较高外(4~27 mg·kg<sup>-1</sup>),其余生育时期各土层铵态氮含量均较低(<6 mg·kg<sup>-1</sup>),没有表现出随施氮水平、生育时期和土层深度的规律性变化;并且铵态氮容易被土壤颗粒吸附,植株吸收利用的量较少,因此土壤矿质氮以硝态氮为主,铵态氮含量相对于硝态氮可忽略不计。

#### 2.3.2 土壤硝态氮时空分布特征

施氮明显影响春玉米土壤硝态氮的动态变化,其含量高低和分布特征因生育时期和土层深度而异(图2)。纵观春玉米整个生育期而言,施氮处理 0~60 cm 土层硝态氮含量呈现“上升—下降—上升—下降—稳定”的变化趋势,而 60~120 cm 土层硝态氮含量则呈现“上升—稳定”的变化趋势。各施氮处理均以 0~40 cm 土层硝态氮含量最高,且随着土层加深整体呈波浪式下降。

当施氮量为 60~240 kg·hm<sup>-2</sup> 时,苗期 0~60 cm 土层硝态氮含量较 N0 处理明显增加,且增加幅度随着施氮量增加而增大。由于追施氮肥,拔节期 0~120 cm 土层硝态氮含量较苗期增加,且 0~60 cm 增加幅度大于 60~120 cm。这表明从出苗到拔节期春玉米对氮需求较小,外源投入氮肥和土壤本身氮素超出了作物生长对氮的需求,多余的氮素主要富集在土壤上层。大喇叭口期 N180、N240 和 N300 处理土壤硝态氮均有

向下层淋洗的趋势,在 40~80 cm 处有明显的累积峰出现。由于大喇叭口期追施氮肥,抽雄期 N120、N180、N240 和 N300 处理 0~40 cm 土层硝态氮含量明显增加,以 N300 处理最大;N240 和 N300 处理的硝态氮累积峰迁移到 80~100 cm 处,说明过量施用的氮肥以硝态氮形式由表层进入深层,增加了向深层土壤迁移的风险。与抽雄期相比,灌浆期 0~40 cm 土层硝态氮含量迅速下降,这是由于,一方面,春玉米处于生殖生长的关键时期,养分吸收急剧增加;另一方面,部分硝态氮迁移到更深的土体中。

氮肥施用量与土壤硝态氮累积量密切相关,因此土壤硝态氮的时空分布特征是表征硝态氮淋失风险的重要指标<sup>[7]</sup>。0~120 cm 土层硝态氮累积量的动态变化如图3所示。从图3中可以看出,随着施氮量增加,0~120 cm 土层硝态氮累积量显著增加,当施氮量超过 240 kg·hm<sup>-2</sup> 时,硝态氮累积量变化不大。随着生育进程推进,0~120 cm 土层硝态氮累积量总体呈增加趋势,但具体变化行为因施氮水平而异。与 N180 相比,N240 和 N300 处理 0~120 cm 土层硝态氮累积量在整个生育期均有大幅度提高,增幅在 18.2%~56.2% 之间,这是由于过量施用氮肥在土壤中的大量残余引起的。较 N240 相比,N300 处理 0~120 cm 土层硝态氮累积量在 8月6日有一个更大幅度的增加,达到了 286.34 kg·hm<sup>-2</sup>。

## 3 讨论

### 3.1 春玉米产量和氮肥利用效率

产量和土壤条件不同,合理的施氮量也有所差异<sup>[18]</sup>。研究表明,玉米产量随着施氮量增加呈二次抛物线趋势<sup>[19]</sup>;孙占祥等<sup>[7]</sup>在辽宁清源县的研究表明,草甸土春玉米的合理施氮量应控制在 200 kg·hm<sup>-2</sup> 左右;王爽等<sup>[1]</sup>在黑龙江黑土上研究认为,春玉米的推荐施氮量应控制在 165 kg·hm<sup>-2</sup> 以内;但也有研究表明,由于高

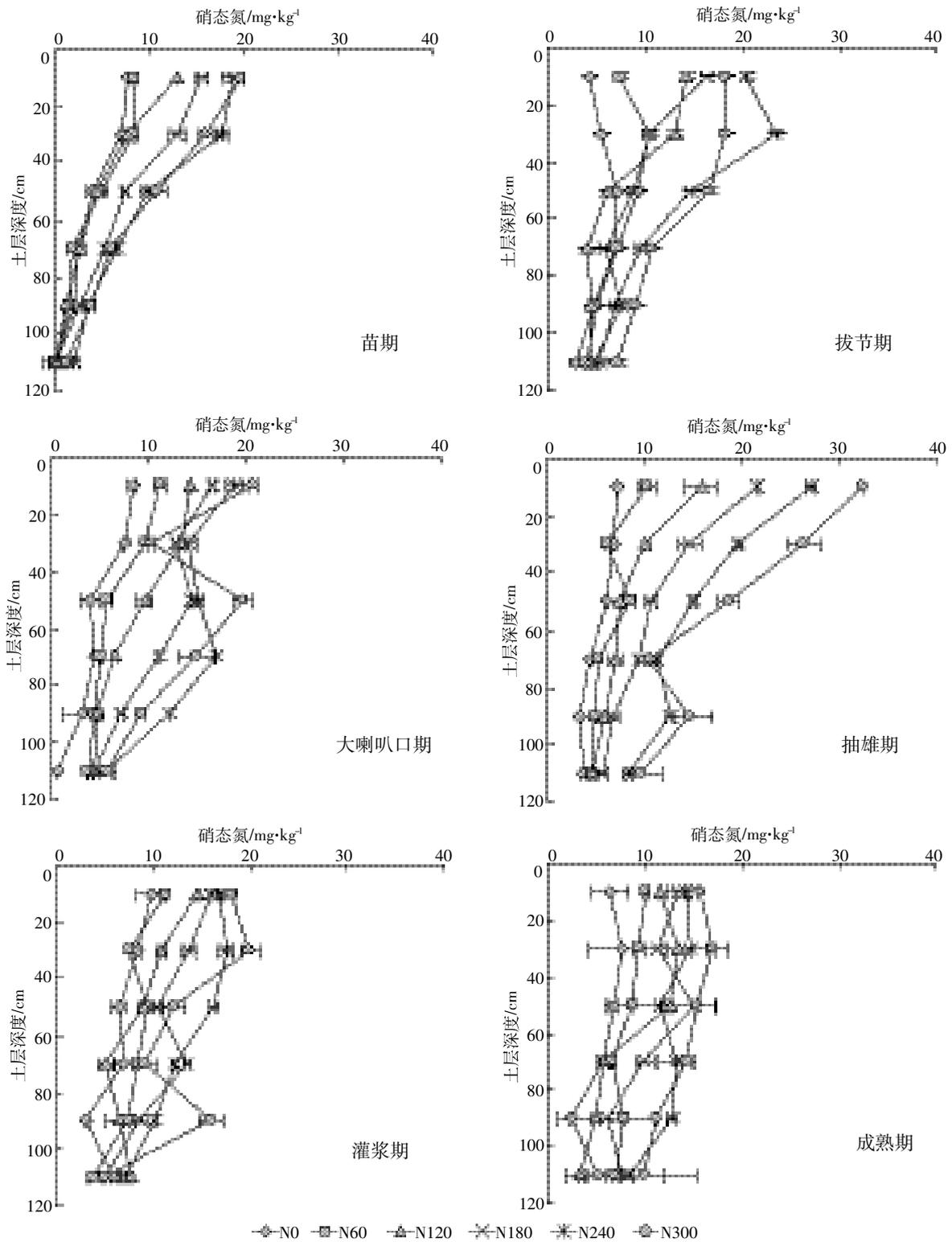


图 2 不同施氮水平下春玉米生长季土壤硝态氮含量动态变化

Figure 2 Dynamics of soil nitrate content during the growing stage of spring maize as affected by N application rate

产、耐肥玉米品种的推广,过高的施氮量并不会立即表现为倒伏和产量下降<sup>[20]</sup>;施氮对玉米籽粒产量的增产作用不大,氮肥利用率随着施氮量增加而降低<sup>[9]</sup>。

本研究 2 年的试验结果表明,施氮明显改善春玉米的产量性状和经济效益。随着施氮量增加,春玉米籽粒产量和经济效益均显著增加,当施氮量为 180 kg·hm<sup>-2</sup> 时

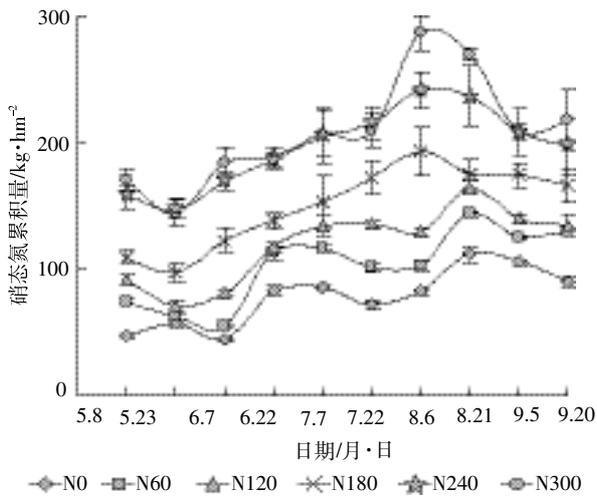


图3 不同施氮水平下0~120 cm 土层硝态氮累积量动态变化  
Figure 3 Dynamics of nitrate accumulation in 0~120 cm soil layer as affected by N application rate

达到最大,分别为 11 064.0 kg·hm<sup>-2</sup> 和 15 815.8 Yuan·hm<sup>-2</sup>,超过这个施氮量以后,春玉米的生长发育受到抑制,因此产量和经济效益均显著下降。通过建立的肥料效益函数求得春玉米最高产量施氮量为 209 kg·hm<sup>-2</sup>,最佳经济产量施氮量为 179 kg·hm<sup>-2</sup>,这与实际最高产量的施氮量(180 kg·hm<sup>-2</sup>)差异不大。因此,综合考虑产量和经济效益,合理施氮量应在 180 kg·hm<sup>-2</sup>左右。由于本试验仅为 2 年的试验结果,对土壤高残留量氮条件下(播前矿质氮残留量 154 kg·hm<sup>-2</sup>)氮肥的合理施用量及氮肥利用效率等尚需进一步验证。

氮肥效率是施氮量、作物产量和氮养分利用的综合体现<sup>[12]</sup>。氮肥表观利用率、氮肥农学利用率、氮肥生理利用率和偏生产力是评价农田氮肥效率的 4 个主要指标,被国内外广泛使用<sup>[21-23]</sup>。氮肥表观利用率反映了作物对施入土壤中的肥料氮的回收效率,氮肥生理利用率是作物地上部每吸收单位肥料中的氮所获得的籽粒产量的增加量。本试验条件下的氮肥表观利用率在 19.8%~28.0%之间,低于全国平均氮肥利用率(30%~51%)<sup>[24]</sup>,这是由于玉米根系分布浅、土壤供氮能力强和难以避免的氮素淋洗下渗引起的。随着施氮量增加,氮肥表观利用率和氮肥生理利用率均显著增加,当施氮量为 180 kg·hm<sup>-2</sup> 时达到最大,分别为 28.0% 和 9.3 kg·kg<sup>-1</sup> N,超过这个施氮量以后,氮肥表观利用率和氮肥生理利用率均显著下降。氮肥农学利用率是指单位施氮量所增加的作物籽粒产量,氮素偏生产力是指单位投入的肥料氮所能产生的作物籽粒产量<sup>[23]</sup>。本试验条件下,氮肥农学利用率与氮肥表观利用率和

氮肥生理利用率的变化趋势正好相反,这是因为氮素利用率不仅与氮肥品种有关,还受土壤条件、作物品种、气候特征等因素的影响<sup>[25]</sup>。氮素偏生产力、氮素吸收效率和氮收获指数均随施氮量增加显著降低,说明适宜的氮肥施用可促使作物吸收转移更多的氮素,提高氮肥利用效率。本试验结果只能说明本季作物的氮肥效率特征,其普遍的规律性还需要长期试验来验证。

### 3.2 春玉米土壤矿质氮动态分布

本研究表明,除外源追施氮肥后的拔节期和抽雄期 0~40 cm 土层外,其余生育时期 0~120 cm 土层铵态氮含量均较低(<6 mg·kg<sup>-1</sup>),因此土壤剖面中存在和作物吸收利用矿质氮的主要形式为硝态氮,这与王西娜等<sup>[26]</sup>和戴铭宏等<sup>[6]</sup>的研究结论相一致。高亚军等<sup>[27]</sup>研究认为,施氮是造成土壤中硝态氮累积的主要原因。大量研究表明,土壤硝态氮含量及累积量均随着施氮量增加而增加<sup>[12,28]</sup>。考虑到玉米根系的 95%分布在 0~80 cm 土层<sup>[9]</sup>,玉米根区以下的土壤氮素很难被玉米吸收利用,故本研究将 0~120 cm 土层作为作物对养分的有效吸收层来评价土壤硝态氮的动态变化特征。

随着施氮量增加,0~60 cm 土层硝态氮含量显著增加,60 cm 以下土层无规律性变化;随着土层加深,土壤硝态氮含量总体呈下降趋势,这与孙志梅等<sup>[30]</sup>和蔡红光等<sup>[31]</sup>的研究结论相一致。已有研究表明,最佳的氮肥管理方式是减少作物生长季末土壤中硝态氮的残留量<sup>[32]</sup>。在本研究中,收获期低氮不足(N60、N120)、中氮适宜(N180)和高氮过量(N240、N300)3 个施氮水平分别以 60、80 cm 和 100 cm 为界线,上层土壤硝态氮含量均明显高于下层土壤。与低氮不足和中氮适宜处理相比,高氮过量处理 N240 和 N300 在土壤剖面中有明显硝态氮累积峰的出现,且随生育期推进累积峰逐渐向下迁移,这也进一步佐证了低量施氮能增加土壤硝态氮残留量,而高量施氮则加重了硝态氮淋溶损失风险<sup>[31,33]</sup>。从春玉米播种到收获,N0 处理 0~120 cm 土层硝态氮累积量一直呈波浪式增加,这和戴明宏等<sup>[6]</sup>在华北春玉米的试验结果正好相反。这是由于,一方面,供试土壤的基础供氮能力较高,播种前 0~120 cm 土层硝态氮残留累积量高达 124 kg·hm<sup>-2</sup>;另一方面,此地区春玉米生长季高温多雨,土壤矿化作用强烈,净矿化氮量达到 141 kg·hm<sup>-2</sup><sup>[32]</sup>。可见,本试验条件下,播前土壤残留氮和施氮是造成土壤硝态氮累积的 2 个主要因子。研究表明,在满足春玉米氮素生

理需求的前提下,适当降低施氮量是提高氮肥利用效率的有效措施。如何通过栽培管理、新型肥料及施肥新技术等措施进一步提高春玉米的氮肥利用效率有待于进一步的研究。

## 4 结论

综合分析氮肥用量对春玉米产量及氮肥效率的影响,并考虑土壤硝态氮时空分布带来的环境风险,初步得到,本试验条件下春玉米适宜施氮量应维持在179~209 kg·hm<sup>-2</sup>之间。当然,氮肥最佳用量的确定还应综合兼顾目标产量、作物需肥特性、土壤条件和周围环境因素等因子,因此本研究得到的适宜施氮量必须进一步进行田间示范验证,最终实现作物高产、资源高效以及生态环境保护的统一。

### 参考文献:

- [1] 王爽,孙磊,陈雪丽,等.不同施氮水平对玉米产量、氮素利用效率及土壤无机氮含量的影响[J].生态环境学报,2013,22(3):387-391.  
WANG S, SUN L, CHEN X L, et al. Effects of different nitrogen fertilization levels on maize yield, nitrogen utilization and inorganic nitrogen content in soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(3): 387-391.(in Chinese)
- [2] ZHU Z L, CHEN D L. Nitrogen fertilizer use in China: Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies[J]. *Nutrient Cycling Agroecosystems*, 2002, 62(2-3): 117-127.
- [3] 王朝辉,李生秀,王西娜,等.旱地土壤硝态氮残留淋溶及影响因素研究[J].土壤,2006,38(6):676-681.  
WANG Z H, LI S X, WANG X N, et al. Nitrate nitrogen residue and leaching in dryland soil and influence factors[J]. *Soils*, 2006, 38(6): 676-681.(in Chinese)
- [4] 张丽娟,巨晓棠,张福锁,等.土壤剖面不同层次标记硝态氮的运移及其后效[J].中国农业科学,2007,40(9):1964-1972.  
ZHANG L J, JU X T, ZHANG F S, et al. Movement and residual effect of labeled nitrate-N in different soil layers[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(9): 1964-1972.(in Chinese)
- [5] 徐志刚,习银生,张世煌.2008/2009年度国家玉米临时收储政策实施状况分析[J].农业经济问题,2010(3):16-23.  
XU Z G, XI Y S, ZHANG S H. Analysis on the implementation, mechanisms and effects of 2008/2009 national corn provisional reserve policy [J]. *Issues in Agricultural Economy*, 2010(3): 16-23.(in Chinese)
- [6] 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.  
DAI M H, TAO H B, WANG L N, et al. Characteristics of soil NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N changing and nitrogen mineralization during spring maize seasons in the North China Plain[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(3): 76-81.(in Chinese)
- [7] 孙占祥,邹晓锦,张鑫,等.施氮量对玉米产量和氮肥利用效率及土壤硝态氮累积的影响[J].玉米科学,2011,19(5):119-123.  
SUN Z X, ZOU X J, ZHANG X, et al. Effects of maize yield and N application on N utilization and content of soil nitrate[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2011, 19(5): 119-123.(in Chinese)
- [8] 金继运,何萍,刘海龙,等.氮肥用量对高淀粉玉米和普通玉米吸氮特性及产量和品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2004,10(6):568-573.  
JIN J Y, HE P, LIU H L, et al. Comparison of nitrogen absorption, yield and quality between high-starch and common corn as affected by nitrogen application[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2004, 10(6): 568-573.(in Chinese)
- [9] 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.  
WU Y C, ZHOU S L, WANG Z M, et al. Dynamics and residue of soil nitrate in summer maize field of North China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(7): 1620-1625.(in Chinese)
- [10] 赵营,同延安,赵护兵.不同供氮水平对夏玉米养分累积、转运及产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2006,12(5):622-627.  
ZHAO Y, TONG Y A, ZHAO H B. Effects of different N rates on nutrients accumulation, transformation and yield of summer maize [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(5): 622-627.(in Chinese)
- [11] 吕丽华,陶洪斌,王璞,等.施氮量对夏玉米碳、氮代谢和氮利用效率的影响[J].植物营养与肥料学报,2008,14(4):630-637.  
LÜ L H, TAO H B, WANG P, et al. The effect of nitrogen application rate on carbon and nitrogen metabolism and nitrogen use efficiency of summer maize[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(4): 630-637.(in Chinese)
- [12] 王激清,刘社平,韩宝文.施氮量对晋西北春玉米氮肥利用效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.  
WANG J Q, LIU S P, HAN B W. Effects of nitrogen application on nitrogen use efficiency of spring maize and distribution of soil nitrate nitrogen in Northwest Hebei Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(2): 138-143.(in Chinese)
- [13] 韩宝文,王激清,李春杰,等.氮肥用量和耕作方式对春玉米产量、氮肥利用率和经济效益的影响[J].中国土壤与肥料,2011(2):28-34.  
HAN B W, WANG J Q, LI C J, et al. Impacts of nitrogen application rates and tillage modes on yield, nitrogen use efficiency of spring maize and economic benefit[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2011(2): 28-34.(in Chinese)
- [14] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,2000.  
LU R K. Analytical method for soil agricultural chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science Technology Press, 2000.(in Chinese)
- [15] 刘学军,赵紫娟,巨晓棠,等.基施氮肥对冬小麦产量、氮肥利用率及氮平衡的影响[J].生态学报,2002,33(7):1122-1128.  
LIU X J, ZHAO Z J, JU X T, et al. Effect of N application as basal fertilizer on grain yield of winter wheat, fertilizer N recovery and N balance[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 33(7): 1122-1128.(in Chinese)
- [16] 杨金,李楠,弭云禄,等.利用肥料效应函数确定黑土玉米最

- 佳施氮量的研究[J]. 吉林农业大学学报, 1984, 6(4): 36-40, 80.
- YANG J, LI N, MI Y L, et al. Study on optimal N application rate in black soil maize based on the fertilizer effect function[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 1984, 6(4): 36-40, 80. (in Chinese)
- [17] 黄绍敏, 宝德俊, 皇甫湘荣. 施氮对潮土土壤及地下水硝态氮含量的影响[J]. 农业环境保护, 2000, 19(4): 228-229.
- HUANG S M, BAO D J, HUANGFU X R. Effects of N fertilizer application on content of nitrate-N in soil and underground water[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2000, 19(4): 228-229. (in Chinese)
- [18] Cassman K G, Dobermann A, Walters D T. Agroecosystems, nitrogen use efficiency, and nitrogen management[J]. *Ambio*, 2002, 31(2): 132-140.
- [19] 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.
- YE D J, GAO Q, HE W T, et al. Effect of N application on N utilization and N balance in spring maize[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(3): 552-558. (in Chinese)
- [20] 肖焱波, 段宗颜, 苏 凡, 等. 玉米不同种植方式氮肥合理施用研究[J]. 玉米科学, 2002, 10(1): 78-80.
- XIAO Y B, DUAN Z Y, SU F, et al. Economically optimal nitrogen fertilizer rate for corn under different planting pattern[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2002, 10(1): 78-80. (in Chinese)
- [21] Cassman K G, Peng S, Olk D C, et al. Opportunities for increased nitrogen use efficiency from improved resource management in irrigated rice systems[J]. *Field Crops Research*, 1998, 56: 7-38.
- [22] Fageria N K, Baligar V C. Methodology for evaluation of low land rice genotypes for nitrogen use efficiency[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2003, 26: 1315-1333.
- [23] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 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.
- ZHANG F S, WANG J Q, ZHANG W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal, crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915-924. (in Chinese)
- [24] 朱兆良, 文启孝. 中国土壤氮素[M]. 南京: 江苏科学技术出版社, 1992.
- ZHU Z L, WEN Q X. Nitrogen in soil of China[M]. Nanjing: Jiangsu Science and Technology Press, 1992. (in Chinese)
- [25] 张国梁, 章 申. 农田氮素淋失研究进展[J]. 土壤, 1998(6): 291-297.
- ZHANG G L, ZHANG S. Advance on farm ecology nitrogen leaching loss[J]. *Soils*, 1998(6): 291-297. (in Chinese)
- [26] 王西娜, 王朝辉, 李生秀. 施氮量对夏季玉米产量及土壤水氮动态的影响[J]. 生态学报, 2007, 27(1): 197-204.
- WANG X N, WANG Z H, LI S X. The effect of nitrogen fertilizer rate on summer maize yield and soil water-nitrogen dynamic[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(1): 197-204. (in Chinese)
- [27] 高亚军, 李生秀, 李世清, 等. 施肥与灌水对硝态氮在土壤中残留的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(6): 61-64.
- GAO Y J, LI S X, LI S Q, et al. Effect of fertilization and irrigation on residual nitrate N in soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(6): 61-64. (in Chinese)
- [28] 王宜伦, 刘天学, 赵 鹏, 等. 施氮量对超高产夏玉米产量与氮素吸收剂土壤硝态氮的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(12): 2483-2491.
- WANG Y L, LIU T X, ZHAO P, et al. Effect of nitrogen fertilizer application on yield, nitrogen absorption and soil nitric N in super-high-yield summer maize [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(12): 2483-2491. (in Chinese)
- [29] Kindu M, Roland J B, Bashir R J. Root and inorganic nitrogen distribution in sesbania fallow, natural fallow and maize fields[J]. *Plant and Soil*, 1997, 188: 319-327.
- [30] 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.
- SUN Z M, WANG Y Q, LIU Y, et al. Analysis on distribution of  $\text{NO}_3^-$ -N in soil profile and environmental effect in corn field of different yields [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(4): 162-166, 181. (in Chinese)
- [31] 蔡红光, 张秀芝, 任 军, 等. 东北春玉米连作体系土壤剖面无机氮的变化特征[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2012, 40(5): 143-148, 156.
- CAI H G, ZHANG X Z, REN J, et al. Characteristic of inorganic nitrogen in soil profile for continuous maize production in Northeast China [J]. *Journal of Northwest A & F University: Natural Science Edition*, 2012, 40(5): 143-148, 156. (in Chinese)
- [32] Karlen D L, Kramer L A, Logsdon S D. Field-scale nitrogen balances associated with long-term continuous corn production[J]. *Agronomy Journal*, 1998, 9(5): 644-650.
- [33] 隽英华, 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 Y H, WANG R, SUN W T, 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)