

# 东北棕壤长期不同施肥处理轮作大豆氮素吸收和土壤硝态氮特征

刘沥阳, 华伟, 张诗雨, 彭启超, 戴健\*, 韩晓日\*

(沈阳农业大学土地与环境学院/农业部东北玉米营养与施肥科学观测实验站/  
土肥资源高效利用国家工程实验室, 辽宁沈阳 110866)

**摘要:**【目的】在玉米-玉米-大豆轮作体系下, 基于棕壤肥料长期定位试验, 研究不同施肥处理对东北地区大豆生物量、产量、各部位吸氮量及收获期土壤 0—100 cm 硝态氮累积的影响, 为该地区合理施肥提供理论依据和科学指导。【方法】棕壤肥料长期定位田间试验始于 1979 年, 包括不施肥 (CK)、单施氮肥 (N)、氮磷钾肥配施 (NPK)、低量厩肥 ( $M_1$ ) 及其与化肥配施 ( $M_1N$  和  $M_1NPK$ )、高量厩肥 ( $M_2$ ) 及其与化肥配施 ( $M_2N$  和  $M_2NPK$ ) 9 个处理。厩肥为猪厩肥, 1992 年后大豆季不施猪厩肥, 仅在玉米季相关处理中施用。39 年后, 调查分析了大豆生物量、产量、氮素吸收利用及大豆收获期 0—100 cm 土壤硝态氮累积特征。【结果】高量、低量厩肥配施化肥处理大豆生物量、产量、总吸氮量及各部位吸氮量均显著高于单施氮肥和不施肥处理, 其中,  $M_1NPK$  处理大豆生物量、产量和总吸氮量最高, 分别为 9107、2979 和 314.2 kg/hm<sup>2</sup>, 较其他处理分别提高了 6.1%~133.6%、23.9%~232.5% 和 11.7%~359.4%。施肥提高了大豆氮收获指数, 但氮素生理效率降低。NPK 和  $M_1NPK$  处理的氮素收获指数最高, 均为 63.5%, 而氮素生理效率较 CK 分别降低了 30.6% 和 28.1%。大豆收获期各处理土壤硝态氮累积量随土层深度的增加而降低。与播前相比, 大豆收获期单施氮肥处理的 0—100 cm 土层硝态氮累积量显著增加, NPK 处理变化不显著,  $M_1$ 、 $M_1N$  和  $M_1NPK$  处理显著降低。低量厩肥配施化肥处理收获期 0—100 cm 土壤硝态氮累积量远低于高量厩肥配施化肥处理, 较播前平均降低了 79.2%。所有处理中, 土壤硝态氮累积量以  $M_1NPK$  处理最低, 比其他处理平均降低了 58.2%。【结论】在东北棕壤地区玉米-玉米-大豆轮作体系下, 玉米季低量厩肥 (13.5 t/hm<sup>2</sup>) 与氮磷钾化肥配合施用, 大豆季仅施氮磷钾化肥既可提高大豆生物量、产量, 促进氮素吸收, 同时还可降低大豆收获期土壤硝态氮累积量, 降低环境风险, 是该轮作体系较为合理的施肥方式。

**关键词:** 棕壤; 玉米; 大豆; 轮作; 施肥措施; 氮素吸收; 土壤硝态氮残留

## Nitrogen uptake of soybean and soil nitrate nitrogen under long-term rotation and different fertilization in a brown soil of northeast China

LIU Li-yang, HUA Wei, ZHANG Shi-yu, PENG Qi-chao, DAI Jian\*, HAN Xiao-ri\*

(College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University/Monitoring & Experimental Station of Corn Nutrition and Fertilization in Northeast Region, Ministry of Agriculture/National Engineering Laboratory for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Shenyang 110866, China)

**Abstract:** 【Objectives】Based on a long-term fertilization experiment in a brown soil of northeast China, the effects of different fertilization on soybean biomass, grain yield and nitrate N residual in 0–100 cm soil layer were systematically studied in a corn-corn-soybean rotation system. The results would provide theoretical basis and scientific instruction for crop rational application of fertilizer in rotation system. 【Methods】A long-term field experiment was initiated in 1979 in brown soil in Liaoning Province. The fertilization treatments included:

收稿日期: 2019-01-14 接受日期: 2019-08-20

基金项目: 国家重点研发项目 (2018YFD0201001); 国家自然科学基金项目 (31471940)。

联系方式: 刘沥阳 E-mail: 981316103@qq.com

\* 通信作者 戴健 E-mail: pzhdxh@126.com; 韩晓日 E-mail: hanxiaori@163.com

no fertilizer (CK), N fertilizer alone (N), combined application of N, P and K chemical fertilizers (NPK), manure at low rate ( $M_1$ ),  $M_1$  combined with N ( $M_1N$ ) or NPK( $M_1NPK$ ), manure at high rate ( $M_2$ ) and  $M_2$  combined with chemical N ( $M_2N$ ) or NPK ( $M_2NPK$ ). The manure was applied only in corn season since 1992. The soybean biomass, yield, N uptake were measured at harvest, and the soil nitrate N residual in 0–100 cm soil layer was determined before seeding and after harvest of soybean in 2018. **【 Results 】** The soybean biomass, grain yield and N uptake in treatments of  $M_1$ ,  $M_1N$ ,  $M_1NPK$ ,  $M_2$ ,  $M_2N$  and  $M_2NPK$  were significantly higher than those in CK and N. Among all the treatments, the highest soybean biomass, grain yield and total N uptake were all appeared in  $M_1NPK$ , which were 9107 kg/hm<sup>2</sup>, 2979 kg/hm<sup>2</sup>, and 314.2 kg/hm<sup>2</sup>, respectively, and were 6.1%–133.6%, 23.9%–232.5% and 11.7%–359.4% higher than those in the other treatments. The highest N harvest index was found in NPK and  $M_1NPK$ , which was 63.5%. However, the N physiological efficiency in NPK and  $M_1NPK$  were 30.6% and 28.1% lower than that in CK, respectively. Compared with the soil nitrate N before sowing, the soil nitrate N in 0–100 cm layer at harvest was increased significantly in N treatment, did not change significantly in NPK, while reduced significantly in low rate manure treatments, the reduce percentages in  $M_1$  treatments were averaged by 79.2%. At harvest, the lowest nitrate N accumulation in 0–100 cm soil was in  $M_1NPK$ , which was 58.2% lower than those in all the other treatments on average. **【 Conclusions 】** In the corn-corn-soybean rotation system of northeastern China, the combined application of NPK fertilizer with 13.5 t/hm<sup>2</sup> of manure in corn season and application of NPK fertilizer alone in soybean season can increase the nitrogen efficiency of the following soybean, increase its grain yield, and reduce the soil nitrate N residue significantly, which is a suitable fertilization method for this crop rotation system.

**Key words:** brown soil; corn; soybean; rotation system; fertilization pattern; N uptake; soil nitrate N residue

氮素是作物生长必需的大量营养元素, 施用氮肥是提高作物产量和品质的重要措施。然而, 过量施用氮肥不仅不能提高作物产量, 还会造成土壤矿质氮特别是硝态氮的大量残留<sup>[1]</sup>。在河北吴桥的研究发现, 施氮 90~270 kg/hm<sup>2</sup>, 0–200 cm 土体均有明显的硝态氮残留累积, 且随氮肥施用量的增加而增加, 40–60 cm 土层土壤硝态氮增加显著<sup>[2]</sup>, 增加了硝态氮随水分向下淋溶<sup>[3]</sup>、污染地下水的风险<sup>[4]</sup>。

施肥是促进作物生长、提高产量的主要农业措施之一。关于不同施肥对作物产量的影响, 国内外学者已进行了大量研究。70 多个长期定位施肥试验发现, 单施氮磷肥处理作物的平均产量与不施肥对照差异不显著。氮肥的肥效较高, 而磷、钾肥肥效在不同地区和作物间差异较大, 只有氮磷钾化肥配施才能保证作物高产和稳产<sup>[5]</sup>。有机肥含有丰富的有机质和各种养分, 不仅可直接为作物提供养分, 还可活化土壤潜在养分、增强土壤生物学活性, 改善理化特性<sup>[6]</sup>, 培肥土壤, 提升土壤质量<sup>[7]</sup>。大量研究均表明, 化肥与有机肥配施对作物的增产效应好于单施化肥或有机肥, 可显著提高大豆产量<sup>[8-9]</sup>。长期施用有机肥可增加土壤各土层全氮含量<sup>[10]</sup>, 增加被大团聚体保护的不稳定性碳氮含量, 提高养分持续供应能力<sup>[11-12]</sup>。有机肥和无机肥配施可提高作物产量<sup>[13]</sup>,

促进氮素吸收<sup>[14]</sup>, 提高水肥利用效率<sup>[15-16]</sup>, 还可改善土壤理化性质<sup>[17]</sup>, 降低肥料氮以矿质态氮形式的淋溶损失<sup>[18]</sup>。宋北光等<sup>[19]</sup>研究表明, 有机肥 (300 kg/hm<sup>2</sup>) 与无机肥配施处理下, 大豆氮素转运率均有所提高。在旱地瘠土上, 冬小麦-大豆轮作条件下, 长期有机肥配施氮磷钾化肥处理可显著降低土壤硝酸盐淋失, 减缓硝态氮在土壤累积<sup>[20]</sup>。巨晓棠等<sup>[21]</sup>研究发现施用氮肥和有机肥能够显著增加土壤有机氮含量。玉米-大豆轮作条件下, 有机无机肥配施显著提高了土壤有机质、矿质氮和微生物量氮含量<sup>[22]</sup>。

大豆是重要的油料和蛋白质作物, 其产量到 2050 年需提高 80% 才能满足人类需求<sup>[23]</sup>, 东北地区大豆种植面积和产量均占全国的 34% 左右, 玉米-大豆轮作是该地区重要的轮作措施, 持续稳定地提高玉米-大豆轮作体系生产力对我国粮食安全至关重要。农业生产中, 通过调控氮肥施用提高作物产量与氮素利用率的研究已有很多; 同时, 围绕玉米、小麦开展土壤硝态氮累积变化的研究也不少。然而, 在东北地区玉米-大豆轮作体系中, 不同肥料配施对大豆季氮素吸收利用和收获期土壤硝态氮累积变化特征影响的研究还不多。因此, 基于东北地区 39 年的典型棕壤肥料长期定位田间试验, 研究了玉米-玉米-大豆轮作体系中, 长期不同施肥处理对大

豆产量、氮素吸收及0—100 cm土壤硝态氮累积特征的影响,为东北棕壤地区玉米-玉米-大豆轮作体系中大豆的合理施肥提供科学指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验地在沈阳农业大学棕壤肥料长期定位试验站(始于1979年),位于沈阳市东陵沈阳农业大学后山科研基地(北纬40°48′,东经123°33′)。该地处于松辽平原南部中心地带,属于温带湿润-半湿润季风气候,年均气温7.0℃~8.1℃,年降雨量574~684 mm,年蒸发量1436 mm,无霜期140~180天,5—9月份平均气温20.7℃,适于玉米、大豆等大多数农作物生长,全生育期130~150天,春季降雨少,6—8月份降水较充沛。土壤为发育在黄土性母质上的壤质棕壤(湿润淋溶土)。1979年试验开始前土壤理化性质为:pH 6.50、有机质15.9 g/kg、全氮0.80 g/kg、全磷0.38 g/kg、全钾21.1 g/kg、碱解氮106 mg/kg、有效磷6.50 mg/kg、速效钾97.9 mg/kg。

### 1.2 试验设计

田间定位试验小区面积160 m<sup>2</sup>(16 m × 10 m),种植模式为玉米-玉米-大豆轮作。本研究选取其中9个处理,具体为:不施肥(CK)、单施氮肥(N)、氮磷钾肥配施(NPK)、低量厩肥(M<sub>1</sub>)及其与化肥配施(M<sub>1</sub>N和M<sub>1</sub>NPK)、高量厩肥(M<sub>2</sub>)及其与化肥配施(M<sub>2</sub>N和M<sub>2</sub>NPK)。试验用氮肥为尿素,磷肥为过磷酸钙,钾肥为硫酸钾,有机肥施用猪厩肥,其有机质平均含量为120 g/kg,全氮为5.6 g/kg。施肥量具体为:大豆季施氮肥(N)30 kg/hm<sup>2</sup>、磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)90 kg/hm<sup>2</sup>、钾肥(K<sub>2</sub>O)90 kg/hm<sup>2</sup>;玉米季施氮肥(N)120 kg/hm<sup>2</sup>、磷肥(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)60 kg/hm<sup>2</sup>、钾肥(K<sub>2</sub>O)60 kg/hm<sup>2</sup>、低量厩肥为13.5 t/hm<sup>2</sup>、高量厩肥为27 t/hm<sup>2</sup>。因前期大豆季长期施用厩肥处理大豆产量有降低趋势,从1992年起,玉米季正常施用厩肥,而在大豆季各有机肥处理中不再施用厩肥,化肥正常施用。所有肥料均在播种前作为基肥一次性撒施,翻耕后与0—20 cm耕层土壤混匀。

2017年供试大豆品种为‘辽豆15’。垄宽60 cm,株距11 cm。试验于2017年5月6日施肥、8日播种,10月7日收获。大豆整个生育期无灌溉,采取常规田间管理,与当地农户一致,收获后,清理干净秸秆,休闲。

### 1.3 样品采集与测定

在2017年大豆播前(4月23日)和收获期

(10月20日)分别采集0—100 cm土壤样品,以每20 cm为一个土层采集,随机采集2点,同层样品剔除作物根系后混匀作为一个分析样品,密封并带回实验室,4℃保存待测。土壤矿质氮采用0.01 mol/L CaCl<sub>2</sub>溶液浸提(土液质量比为1:10),振荡1 h,过滤后用连续流动分析仪(AA3)测定浸提液中的硝态氮和铵态氮含量。0—100 cm各土层土壤硝态氮累积量由相应土层土壤容重与对应的硝态氮含量计算。

在2017年大豆收获期(10月7日)采集植物样品。每个小区随机选取3个计产区,每个计产区选取2条垄,收割2 m,风干计产。同时,在计产区以外每个小区随机取5点采集植株样品,每点采集1株,采取对角线5点取样法,样点离地头2 m以上。调查生物性状(株高、节数、分枝数、荚数等)后,人工脱粒,分粒、荚、茎叶3个部位,分别取部分样品在105℃杀青30 min,65℃烘干至恒重,烘干样品粉碎后混匀。粉碎植株样品全氮含量采用浓H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>消煮,凯氏定氮法测定。

### 1.4 数据处理与分析

土壤硝态氮累积(kg/hm<sup>2</sup>) = 土层厚度(cm) × 土壤容重(g/cm<sup>3</sup>) × 土壤矿质氮含量(mg/kg)/10

氮收获指数(%) = 籽粒氮积累总量(kg/hm<sup>2</sup>)/地上部吸氮量(kg/hm<sup>2</sup>) × 100

氮素生理效率(kg/kg) = 植株产量(kg/hm<sup>2</sup>)/地上部吸氮量(kg/hm<sup>2</sup>)

用Microsoft Excel 2013进行数据计算和图表处理,SPSS 22.0统计软件进行方差分析和显著性分析( $P < 0.05$ )。

## 2 结果与分析

### 2.1 长期施肥对棕壤大豆生物量、籽粒产量的影响

图1表明,在大豆收获期,各处理大豆生物量、产量变化趋势相同,较高的生物量带来较高的产量。单施化肥处理中,NPK处理大豆生物量和籽粒产量较高,分别为6963和2214 kg/hm<sup>2</sup>,显著高于CK和N处理,其中,CK和N处理间差异不显著。与CK和单施氮肥比较,长期配施厩肥各处理大豆生物量、籽粒产量显著提高;与CK相比,M<sub>1</sub>、M<sub>1</sub>N和M<sub>1</sub>NPK处理大豆生物量、籽粒产量分别增加了100.0%~133.6%和160.0%~232.5%( $P < 0.05$ );M<sub>2</sub>、M<sub>2</sub>N和M<sub>2</sub>NPK处理大豆生物量、籽粒产量较CK分别提高了87.5%~120.0%和126.0%~162.0%,差异也达显著水平。低量、高量厩肥配施

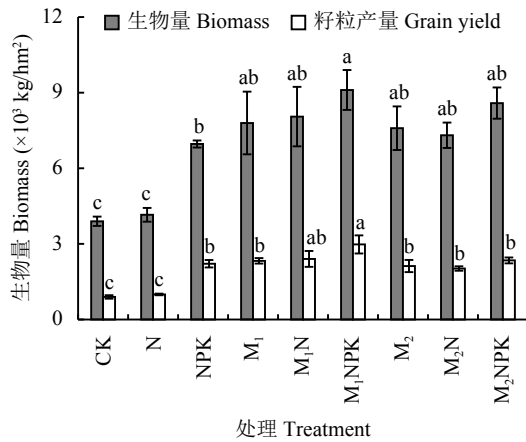


图 1 2017 年不同施肥条件下大豆生物量和籽粒产量  
Fig. 1 Soybean biomass and grain yield under different fertilization managements in 2017

[注 (Note): 方柱上不同字母表示处理间在 0.05 水平差异显著 Different letters above the bars indicate significant difference among treatments at the 0.05 level.]

化肥各处理, 以 M<sub>1</sub>NPK 处理的生物量和籽粒产量最高, 分别为 9107 和 2979 kg/hm<sup>2</sup>; M<sub>2</sub>NPK 处理的生物量为 8587 kg/hm<sup>2</sup>, 与 M<sub>1</sub>NPK 处理差异不显著, 但籽粒产量 (2345 kg/hm<sup>2</sup>) 显著低于 M<sub>1</sub>NPK 处理。可见, 玉米季长期配施适量厩肥有助于大豆生长, 可以提高后茬大豆籽粒产量, 长期投入高量厩肥并不利于大豆籽粒产量的提高。

## 2.2 长期施肥对棕壤大豆氮素吸收利用的影响

施肥显著影响大豆的氮素吸收 (表 1)。不同施肥

条件下, 大豆各部位吸氮量总体表现为籽粒 > 荚皮 > 茎叶, 氮磷钾化肥处理或化肥配施厩肥处理大豆各部位吸氮量显著高于单施氮肥和不施肥对照处理。长期厩肥配施化肥条件下, 大豆植株总吸氮量显著高于 N 和 CK 处理, 其中 M<sub>1</sub>NPK 处理大豆总吸氮量最高为 314.2 kg/hm<sup>2</sup>, 显著高于 M<sub>1</sub>N 处理, 较其他处理增加了 11.7%~359.4%; M<sub>2</sub>NPK 处理大豆总吸氮量为 281.3 kg/hm<sup>2</sup>, 显著高于 M<sub>2</sub>N 处理, 与 M<sub>1</sub>NPK 处理差异不显著。施肥提高了大豆氮收获指数, 且 NPK 和 M<sub>1</sub>NPK 处理的氮收获指数最高, 均为 63.5%, 明显高于其他处理。施肥条件下大豆氮素生理效率降低, 由 CK 处理的 13.1 kg/kg 降低到 NPK 处理的 9.1 kg/kg, M<sub>1</sub>NPK 处理的 9.4 kg/kg 和 M<sub>2</sub>NPK 处理的 8.3 kg/kg。可见, 大豆季不施用厩肥, 玉米季适量厩肥配施氮磷钾化肥条件下大豆吸氮量和氮收获指数均显著提高。

## 2.3 长期施肥对棕壤 0—100 cm 硝态氮贮量变化的影响

大豆播前和收获期各处理土壤硝态氮贮量随土层增加均呈递减趋势 (表 2)。CK 处理大豆播前和收获期 0—100 cm 土壤硝态氮累积量分别为 45.0 和 72.1 kg/hm<sup>2</sup>, 收获期较播前增加了 60.1%; N 处理分别为 99.3 和 157.2 kg/hm<sup>2</sup>, 且各土层硝态氮累积量均较高, 收获期较播前增加了 58.3%; NPK 处理播前和收获期 0—100 cm 土壤硝态氮累积量分别为 57.9 和 53.7 kg/hm<sup>2</sup>, 变化不大。单施氮肥处理收获

表 1 长期不同施肥条件下大豆对氮素的吸收利用

Table 1 N uptake and utilization of soybean under different fertilization managements

处理 Treatment	吸氮量 N uptake (kg/hm <sup>2</sup> )				氮收获指数 (%) N harvest index	氮素生理效率 (kg/kg) N physiological efficiency
	茎叶 Stem and leaf	荚皮 Shell	籽粒 Grain	合计 Total		
CK	8.0 ± 1.1 d	23.3 ± 1.0 b	37.1 ± 3.0 c	68.4 ± 4.9 d	54.2 ± 0.9 d	13.1 ± 0.1 a
N	17.2 ± 1.3 c	31.2 ± 0.9 b	66.7 ± 4.7 c	115.1 ± 6.5 d	57.9 ± 1.2 bcd	8.7 ± 0.2 ef
NPK	30.8 ± 0.9 b	57.6 ± 1.4 a	154.7 ± 11.3 b	243.1 ± 12.0 bc	63.5 ± 1.7 a	9.1 ± 0.2 ef
M <sub>1</sub>	22.7 ± 2.1 c	58.9 ± 11.2 a	131.7 ± 4.6 b	213.4 ± 17.7 c	62.2 ± 2.8 ab	11.0 ± 0.5 b
M <sub>1</sub> N	33.5 ± 2.4 b	61.4 ± 8.8 a	147.2 ± 22.0 b	242.1 ± 33.0 bc	60.6 ± 0.7 bc	10.0 ± 0.1 cd
M <sub>1</sub> NPK	41.2 ± 2.7 a	73.3 ± 7.6 a	199.6 ± 19.1 a	314.2 ± 28.4 a	63.5 ± 1.0 a	9.4 ± 0.3 de
M <sub>2</sub>	22.3 ± 2.0 c	58.1 ± 5.2 a	126.3 ± 14.5 b	206.7 ± 21.7 c	61.0 ± 0.6 bc	10.2 ± 0.1 bc
M <sub>2</sub> N	30.8 ± 0.8 b	58.4 ± 4.8 a	129.9 ± 8.0 b	219.1 ± 13.5 c	59.3 ± 0.1 bc	9.3 ± 0.2 de
M <sub>2</sub> NPK	43.3 ± 1.9 a	78.4 ± 8.5 a	159.6 ± 6.8 b	281.3 ± 11.2 ab	56.8 ± 2.6 cd	8.3 ± 0.3 f

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著 Values followed by different lowercase letters in a column indicate significant difference among treatments at the 0.05 level.

表 2 长期不同施肥处理大豆播前、收获期 0—100 cm 土层硝态氮累积  
Table 2 Nitrate N accumulation in 0—100 cm soil layers before seeding and at harvest of soybean under different fertilization treatments

时期 Stage	处理 Treatment	土层 Soil layer (cm)					合计 Total (kg/hm <sup>2</sup> )
		0—20	20—40	40—60	60—80	80—100	
播前 Before seeding	CK	23.4 ± 2.6 e	10.6 ± 0.9 d	3.3 ± 1.0 d	3.0 ± 0.9 c	4.9 ± 0.5 d	45.0 ± 3.1 e
	N	27.9 ± 6.1 e	20.9 ± 3.6 cd	20.3 ± 6.6 cd	22.3 ± 9.5 b	7.9 ± 0.6 cd	99.3 ± 20.0 cde
	NPK	22.0 ± 3.2 e	18.2 ± 3.4 cd	7.8 ± 3.1 d	4.6 ± 2.6 c	5.2 ± 2.0 cd	57.9 ± 6.9 de
	M <sub>1</sub>	61.9 ± 4.6 d	34.3 ± 1.9 bcd	16.6 ± 0.2 cd	19.9 ± 1.2 bc	2.6 ± 0.4 d	135.2 ± 5.5 bcd
	M <sub>1</sub> N	86.5 ± 2.3 cd	28.1 ± 8.7 bcd	30.7 ± 8.8 c	19.9 ± 3.1 bc	8.4 ± 0.8 cd	173.5 ± 2.4 bc
	M <sub>1</sub> NPK	64.8 ± 1.5 d	42.1 ± 3.2 bc	33.3 ± 10.1 c	25.5 ± 6.9 b	21.5 ± 9.2 c	187.2 ± 25.5 b
	M <sub>2</sub>	96.2 ± 24.0 bc	53.6 ± 9.9 b	29.2 ± 8.8 c	25.9 ± 5.4 b	13.6 ± 5.9 cd	218.5 ± 53.1 b
	M <sub>2</sub> N	128.2 ± 9.4 a	82.5 ± 17.6 a	53.0 ± 8.8 b	65.0 ± 15.3 a	66.5 ± 8.9 a	395.3 ± 49.1 a
	M <sub>2</sub> NPK	119.6 ± 9.8 ab	105.6 ± 7.5 a	86.7 ± 1.8 a	53.0 ± 3.7 a	49.7 ± 4.5 b	414.6 ± 8.8 a
收获期 Harvest	CK	32.1 ± 1.6 b	11.9 ± 1.4 d	14.7 ± 6.6 b	7.7 ± 3.5 bcd	5.7 ± 2.0 cd	72.1 ± 10.3 c
	N	42.3 ± 9.5 ab	15.2 ± 2.4 c	37.3 ± 12.6 a	30.7 ± 7.9 a	31.7 ± 5.4 a	157.2 ± 20.3 a
	NPK	20.2 ± 4.7 c	16.4 ± 1.5 c	8.1 ± 1.7 b	5.0 ± 0.8 cd	4.1 ± 0.5 cd	53.7 ± 2.8 cd
	M <sub>1</sub>	16.8 ± 0.7 c	6.9 ± 0.2 e	7.6 ± 1.9 b	1.1 ± 0.1 d	0.4 ± 0.2 d	32.9 ± 1.8 d
	M <sub>1</sub> N	17.7 ± 3.6 c	3.5 ± 0.4 f	6.9 ± 0.2 b	0.5 ± 0.1 d	0.6 ± 0.1 d	29.2 ± 4.4 d
	M <sub>1</sub> NPK	14.1 ± 0.7 c	6.5 ± 0.3 ef	16.2 ± 0.5 b	0.7 ± 0.1 d	2.3 ± 0.2 cd	39.7 ± 0.8 d
	M <sub>2</sub>	42.6 ± 2.3 a	28.1 ± 1.3 b	15.8 ± 0.5 b	11.2 ± 0.2 bc	7.1 ± 1.0 c	104.8 ± 2.8 b
	M <sub>2</sub> N	42.9 ± 3.3 ab	28.9 ± 0.7 b	13.9 ± 0.1 b	14.9 ± 0.3 b	14.9 ± 1.3 b	115.6 ± 4.4 b
	M <sub>2</sub> NPK	42.9 ± 1.9 ab	42.4 ± 0.8 a	49.3 ± 3.9 a	13.0 ± 0.3 bc	16.3 ± 0.4 b	163.8 ± 5.1 a

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示同一时期不同处理间在 0.05 水平差异显著 Values followed by different lowercase letters in a column indicate significant difference among treatments for the same stage at the 0.05 level.

期 0—40 cm 土层土壤硝态氮累积量高于 CK 处理, 与 NPK 处理持平, 40—100 cm 土层显著高于 CK 和 NPK 处理。低量厩肥条件下, 大豆收获期土壤 0—100 cm 硝态氮累积量显著低于播前, M<sub>1</sub> 处理大豆播前和收获期 0—100 cm 土壤硝态氮总累积量分别为 135.2 和 32.9 kg/hm<sup>2</sup>, 收获期较播前降低了 75.7%, M<sub>1</sub>N 和 M<sub>1</sub>NPK 处理分别为 173.5 和 29.2 kg/hm<sup>2</sup>、187.2 和 39.7 kg/hm<sup>2</sup>, 较播前分别降低了 83.2% 和 78.8%。低量厩肥各处理硝态氮主要累积在 0—60 cm 土层, 60—100 cm 土层硝态氮累积量较低, 各土层处理间差异不显著。高量厩肥各处理大豆收获期 0—100 cm 土壤硝态氮累积量显著低于播前, M<sub>2</sub>、M<sub>2</sub>N 和 M<sub>2</sub>NPK 处理收获期 0—100 cm 土壤硝态氮累积量分别为 104.8、115.6 和 163.8 kg/hm<sup>2</sup>, 与播前相比分别降低了 52.0%、70.8% 和 60.5%, 且各土层硝态氮累积量高于单施化肥和低量厩肥处理。高量厩肥处理土壤 0—100 cm 各土层硝态氮贮

量均较高, 以 M<sub>2</sub>NPK 最为显著。低量厩肥与化肥配施降低了大豆收获期 0—100 cm 土壤硝态氮总累积量, 显著低于单施氮肥和高量厩肥各处理, 与 NPK 处理差异不大。

### 3 讨论

#### 3.1 长期不同施肥对大豆生物量、产量及氮素吸收利用的影响

大豆是我国主要的粮食及经济作物, 也是高固氮作物, 在培肥地力和维护农田氮素平衡中具有重要作用。有机无机肥配施是农业生产中常用的施肥方式之一。大量研究表明, 在施用化肥的基础上配施有机肥能够促进作物增产稳产<sup>[24]</sup>, 提高水分、养分的吸收<sup>[25]</sup>, 改善土壤物理、化学、生物学性质, 提高土壤肥力, 改良土壤团粒结构和田间蓄水量, 增强土壤的抗旱能力<sup>[26-27]</sup>。有机肥与氮磷钾化肥配施能促

进大豆茎、叶、豆荚等生长<sup>[28]</sup>, 提高大豆植株氮素积累量及氮素利用率<sup>[29]</sup>。也有长期肥料试验发现, 有机肥对大豆的增产效应和化肥没有差异<sup>[30]</sup>。本研究中, 大豆季虽不施有机肥(猪厩肥), 但玉米季高量、低量厩肥配施化肥处理下, 大豆生物量、产量、总吸氮量和各部位吸氮量均显著高于单施氮肥和不施肥处理, 这主要和玉米季长期施用有机肥改善土壤理化性质、促进土壤营养元素平衡、提高土壤氮素水平(表 2), 能够为作物生长提供充足氮素养分有关。低量厩肥区各处理大豆生物量和产量高于高量厩肥区和化肥区各处理, 其中 M<sub>1</sub>NPK 处理生物量和产量最高, 分别高于其他处理 6.1%~133.6% 和 23.9%~232.5%; M<sub>2</sub>NPK 处理产量提高幅度和 NPK 处理类似, 但生物量显著增加。可见, 高量有机肥与化肥配施促进了大豆地上部生长, 但高量有机肥导致大豆奢侈吸收, 早期养分和水分过度消耗, 后期水分胁迫影响干物质积累与同化物向籽粒的转移<sup>[31]</sup>。田艳洪等<sup>[32]</sup>在黑龙江省白浆土上的研究也发现, 不同用量有机肥及其与化肥配施处理对大豆植株生长和产量具有不同影响, 其中有机肥(15 t/hm<sup>2</sup>) 配施 50% 常规施肥处理相对较好, 其产量较常规施肥增加显著, 提高了 2.6%。因此, 玉米季适量猪厩肥配施氮磷钾化肥, 大豆季施用氮磷钾化肥有利于大豆干物质积累与转移, 提高产量, 效果较好。

氮素是作物生长发育必需的大量元素之一, 是土壤肥力中最活跃的因素, 也是决定作物生长、发育、产量和品质形成的最关键元素。研究结果表明, 施肥显著提高了大豆各部位吸氮量。化肥区、低量厩肥区、高量厩肥区大豆平均总吸氮量分别为 142.2、256.6 和 235.7 kg/hm<sup>2</sup>, 其中 M<sub>1</sub>NPK 处理大豆总吸氮量最高, 与其他处理相比增加了 11.7%~359.4%, 这主要是由于玉米季长期施用猪厩肥可培肥土壤, 对大豆季植株吸收肥料氮有一定的促进作用, 均衡施肥的效果更突出。此外, 大豆生长过程中氮素发生转移, 到收获期籽粒含氮量达到峰值, 各施肥处理中大豆各部位吸氮量总体趋势为: 籽粒 > 荚皮 > 茎叶。王凤仙等研究发现, 长期施用氮肥可改善大豆的生长状况, 提高干物质积累量, 改善大豆产量构成因子<sup>[33]</sup>, 显著提高各部位氮素含量<sup>[34]</sup>。大豆植株氮素含量与施氮量、土壤肥力、配施肥料种类及含量等因素有关。适当地补充氮素, 大豆生物量、单株荚数和粒数均有所增加, 而过量施用氮肥大豆产量增加不显著, 同时限制了大豆的固氮能力<sup>[35]</sup>。渭北旱塬冬小麦研究发现, 有机无机肥配施处理作

物氮素吸收量显著高于单施化肥处理<sup>[35]</sup>。施肥显著影响大豆对氮素的利用, 大豆氮肥利用效率和氮肥表观利用效率均随施氮量的增加而逐渐降低<sup>[36]</sup>。本研究中, 施肥提高了大豆的氮收获指数, 以 NPK 和 M<sub>1</sub>NPK 处理最高, 均为 63.5%。施肥条件下大豆氮素生理效率降低, 与 CK 处理比较, NPK、M<sub>1</sub>NPK 和 M<sub>2</sub>NPK 处理分别降低了 30.6%、28.1% 和 36.3%。可见, 大豆季不施厩肥, 玉米季适量厩肥配施氮磷钾化肥条件下大豆吸氮量和氮收获指数均显著提高, 氮素生理效率降低。

### 3.2 长期不同施肥对棕壤硝态氮贮量变化的影响

硝态氮是旱地农田氮素的主要形态, 其移动性较强, 在降雨条件下极易随水流失。作物收获期, 土壤累积的残留氮绝大部分以 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 形态存在<sup>[37]</sup>, 累积的硝态氮如不及时被作物吸收利用, 容易向下移动造成土壤深层硝态氮累积或进入浅层地下水造成污染。于昕阳等<sup>[35]</sup>在黄土高原的研究表明, 0—200 cm 土壤硝态氮累积量随施氮量增加显著增加, 氮肥用量越高硝态氮累积量增加的幅度越大。长期有机无机肥配施可促使土壤有效固定更多的硝态氮, 从而减少肥料氮以矿质态氮形态的淋溶损失。渭北旱塬雨养条件下, 收获期有机无机肥配施处理土壤硝态氮累积残留量显著高于单施化肥处理, 增加幅度为 13.8%~37.2%<sup>[38]</sup>, 施氮量大于 150 kg/hm<sup>2</sup> 时显著加剧了 0—200 cm 土壤硝态氮累积, 加大硝态氮淋溶风险<sup>[39]</sup>。可见, 长期大量施肥会造成土壤中硝态氮大量累积, 同时促进硝态氮向土壤深层移动, 增加氮素损失。本试验中, 单施氮肥处理下, 大豆收获期 0—100 cm 土壤硝态氮较播前显著增加, 且各个土层累积量较播前增加; NPK 处理下, 大豆播前和收获期土壤 0—100 cm 硝态氮累积量变化不大, 这主要是由于氮磷钾化肥配施下大豆长势较好, 吸氮量高, 收获期残留量少, 降低了硝态氮损失。施用厩肥明显影响土壤硝态氮的累积特征, 厩肥和化肥配施处理大豆收获期土壤硝态氮累积量较播前降低, 且低量厩肥处理各土层硝态氮累积量显著低于单施氮肥处理。与高量厩肥各处理相比, 低量厩肥各处理大豆收获期土壤硝态氮含量低于播前的趋势更加显著, 平均降低了 79.2%; 大豆收获期, M<sub>1</sub>NPK 处理 0—100 cm 土壤硝态氮贮量显著低于各高量厩肥处理, 平均降低 58.2%。M<sub>2</sub>NPK 处理大豆收获期 0—100 cm 土壤硝态氮贮量与 N 处理差异不显著, 但显著高于其他处理。与南镇武等<sup>[40]</sup>研究

类似, 有机无机肥配施处理可显著增加收获期土壤硝态氮残留量, 且随着有机肥用量的增加呈显著增加的趋势。因此, 大豆季不施厩肥, 玉米季适量厩肥配施氮磷钾化肥条件下大豆收获期土壤各层硝态氮贮量降低, 0—100 cm 土壤硝态氮贮量显著降低, 可降低硝态氮淋溶损失。

## 4 结论

长期施肥棕壤玉米-玉米-大豆轮作体系中, 厩肥与化肥配施处理大豆生物量、产量、总吸氮量及各部位吸氮量均显著高于单施氮肥和不施肥处理, 且以  $M_1NPK$  处理最高。 $M_1NPK$  处理大豆生物量、产量和总吸氮量分别高于其他处理 6.1%~133.6%、23.9%~232.5% 和 11.7%~359.4%。不同施肥措施明显影响 0—100 cm 土壤硝态氮累积特征, 适量厩肥配施化肥可降低大豆收获期土壤 0—100 cm 硝态氮累积量。与高量厩肥各处理相比, 低量厩肥各处理大豆收获期土壤硝态氮含量低于播前的趋势更加明显, 平均降低了 79.2%; 在大豆收获期,  $M_1NPK$  处理 0—100 cm 土壤硝态氮贮量显著低于各高量厩肥处理, 平均降低 58.2%。综上所述, 在东北棕壤地区玉米-玉米-大豆轮作体系中, 玉米季低量厩肥 ( $13.5 \text{ t/hm}^2$ ) 配施氮磷钾化肥, 大豆季仅施用氮磷钾化肥既可提高大豆生物量、产量, 促进其氮素吸收, 还可降低大豆收获期土壤硝态氮累积量, 减少环境风险, 是该轮作体系较为合理的施肥方式。

## 参考文献:

- [1] 刘敏超, 曾长立, 王兴仁, 等. 氮肥施用对冬小麦氮肥利用率及土壤剖面硝态氮含量动态分布的影响[J]. *农业现代化研究*, 2000, 21(5): 309-312.  
Liu M C, Zeng C L, Wang X R, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer in winter wheat on its utilization rate and dynamic distribution of  $\text{NO}_3^-$ -N in soil layers[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2000, 21(5): 309-312.
- [2] 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.
- [3] 戴健, 王朝辉, 李强, 等. 氮肥用量对旱地冬小麦产量及夏闲期土壤硝态氮变化的影响[J]. *土壤学报*, 2013, 50(5): 956-965.  
Dai J, Wang Z H, Li Q, *et al.* Effects of nitrogen application rate on winter wheat yield and soil nitrate nitrogen during summer fallow season on dryland[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(5): 956-965.
- [4] Ju X T, Xing G X, Chen X P, *et al.* Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2009, 106(9): 3041-3046.
- [5] 林葆, 林继雄, 李家康. 长期施肥的作物产量和土壤肥力变化[J]. *植物营养与肥料学报*, 1994, 1(1): 6-18.  
Lin B, Lin J X, Li J K. The changes of crop yield and soil fertility with long-term fertilizer application[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 1994, 1(1): 6-18.
- [6] 韩晓增, 王凤仙, 王凤菊, 等. 长期施用有机肥对黑土肥力及作物产量的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2010, 28(1): 66-71.  
Han X Z, Wang F X, Wang F J, *et al.* Effect of long-term organic manure application on crop yield and fertility of black soil[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(1): 66-71.
- [7] 温延臣, 李燕青, 袁亮, 等. 长期不同施肥制度土壤肥力特征综合评价方法[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(7): 91-99.  
Wen Y C, Li Y Q, Yuan L, *et al.* Comprehension assessment methodology of characteristics of soil fertility under different fertilization regimes in North China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(7): 91-99.
- [8] Bandyopadhyay K K, Misra A K, Ghosh P K, *et al.* Effect of integrated use of farmyard manure and chemical fertilizers on soil physical properties and productivity of soybean[J]. *Soil and Tillage Research*, 2010, 110(1): 115-125.
- [9] Choudhary M, Panday S C, Meena V S, *et al.* Long-term effects of organic manure and inorganic fertilization on sustainability and chemical soil quality indicators of soybean-wheat cropping system in the Indian mid-Himalayas[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2018, 257: 38-46.
- [10] 周建斌, 李昌纬, 赵伯善, 等. 长期施肥对壤土底土养分含量的影响[J]. *土壤通报*, 1993, 24(1): 21-23.  
Zhou J B, Li C W, Zhao B S, *et al.* Effect of long-term fertilization on soil nutrients concentration in a loess soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1993, 24(1): 21-23.
- [11] Mikha M M, Rice C W. Tillage and manure effects on soil and aggregate-associated carbon and nitrogen[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(3): 809-816.
- [12] 杨洪波, 申艳, 徐明岗, 等. 长期施肥下黑土不同团聚体氮组分的植物有效性差异[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(6): 1581-1587.  
Yang H B, Shen Y, Xu M G, *et al.* Difference in plant availability of nitrogen in aggregates of black soil under long-term fertilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(6): 1581-1587.
- [13] Wei W L, Yan Y, Cao J, *et al.* Effects of combined application of organic amendments and fertilizers on crop yield and soil organic matter: An integrated analysis of long-term experiments[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2016, 225(1): 86-92.
- [14] Chakraborty A, Chakrabarti K, Chakraborty A, *et al.* Effect of long-term fertilizers and manure application on microbial biomass and microbial activity of a tropical agricultural soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2011, 47(2): 227-233.
- [15] 张婧, 王平, 刘淑英, 等. 有机无机肥配施对甘肃省秦王川灌区蚕豆产量、养分吸收量及肥料利用率的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2017, 31(1): 154-159.  
Zhang J, Wang P, Liu S Y, *et al.* Effects of organic and chemical fertilization on dry biomass, grain yield, nutrient uptake and fertilizer

- utilization efficiency of faba bean in northwest hemi-dryland[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2017, 31(1): 154–159.
- [16] 张绪成, 于显枫, 王红丽, 等. 半干旱区减氮增钾、有机肥替代对全膜覆盖垄沟种植马铃薯水肥利用和生物量积累的调控[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(5): 852–864.
- Zhang X C, Yu X F, Wang H L, *et al.* Regulations of reduced chemical nitrogen, potassium fertilizer application and organic manure substitution on potato water-fertilizer utilization and biomass assimilation under whole field plastics mulching and ridge-furrow planting system on semi-arid area[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(5): 852–864.
- [17] Zhou Z C, Gan Z T, Shanguan Z P, *et al.* Effects of long-term repeated mineral and organic fertilizer applications on soil organic carbon and total nitrogen in a semi-arid cropland[J]. *European Journal of Agronomy*, 2013, 45: 20–26.
- [18] 梁斌. 有机肥与化肥长期配施协调土壤供氮的效应及机理[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学博士学位论文, 2012.
- Liang B. Effect of long-term combined application of manure and inorganic fertilizers on soil nitrogen availability and its mechanism[D]. Yangling, Shaanxi: PhD Dissertation of Northwest Agriculture and Forest University, 2012.
- [19] 宋北光, 郭婷, 谢晓伟, 等. 商品有机肥和无机肥配施对大豆氮素积累及利用效率的影响[J]. *大豆科技*, 2016, (3): 5–11.
- Song B G, Guo T, Xie X W, *et al.* Effects of commercial manure and chemical fertilizer integration on nitrogen accumulation and use efficiency in soybean[J]. *Soybean Science & Technology*, 2016, (3): 5–11.
- [20] 古巧珍, 杨学云, 孙本华, 等. 旱地塬土长期定位施肥土壤剖面硝态氮分布与累积研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2003, 21(4): 48–52.
- Gu Q Z, Yang X Y, Sun B H, *et al.* Effect of long-term fertilization on distribution and accumulation of  $\text{NO}_3^-$ -N in loess profile of dryland[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2003, 21(4): 48–52.
- [21] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 长期施肥对土壤有机氮组成的影响[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(1): 87–91.
- Ju X T, Liu X J, Zhang F S. Effects of long-term fertilization on soil organic nitrogen fractions[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(1): 87–91.
- [22] 周东兴, 李磊, 李晶, 等. 玉米/大豆轮作下不同施肥处理对土壤微生物生物量及酶活性的影响[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(6): 1856–1864.
- Zhou D X, Li L, Li J, *et al.* Effects of different fertilization treatments on soil microbial biomass and enzyme activities in maize-soybean rotation system[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(6): 1856–1864.
- [23] 张鑫. 施肥对小麦-大豆轮作体系产量可持续性与温室气体排放的影响[D]. 北京: 中国农业科学院博士学位论文, 2019.
- Zhang X. Effects of fertilization on yield sustainability and greenhouse gas emissions under wheat-soybean rotation system[D]. Beijing: PhD Dissertation of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.
- [24] 何晓雁, 郝明德, 李慧成, 等. 黄土高原旱地小麦施肥对产量及水肥利用效率的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, 16(6): 1333–1340.
- He X Y, Hao M D, Li H C, *et al.* Effect of different fertilization on yield of wheat and water and fertilizer use efficiency in the Loess Plateau[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2010, 16(6): 1333–1340.
- [25] 俄胜哲, 杨志奇, 罗照霞, 等. 长期定位施肥对黄绵土区作物产量及养分回收率的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(1): 55–63.
- E S Z, Yang Z Q, Luo Z X, *et al.* Effect of longterm fertilization on crop yields and nutrition accumulative recovery rates in Loessial soils region[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(1): 55–63.
- [26] 管建新, 王泽云, 王伯仁, 等. 施用有机肥对红壤旱地玉米产量与土壤性质的影响[J]. *湖南农业科学*, 2016, (8): 52–54.
- Guan J X, Wang Z Y, Wang B R, *et al.* Effects of organic fertilizer on red soil upland maize yield and soil properties[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2016, (8): 52–54.
- [27] 赵军, 李勇, 冉炜, 等. 有机肥替代部分化肥对稻麦轮作系统产量及土壤微生物区系的影响[J]. *南京农业大学学报*, 2016, 39(4): 594–602.
- Zhao J, Li Y, Ran W, *et al.* Effects of organic manure partial substitution for chemical fertilizer on crop yield and soil microbiome in a rice-wheat cropping system[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2016, 39(4): 594–602.
- [28] Mandal K G, Hati K M, Misra A K. Biomass yield and energy analysis of soybean production relation to fertilizer-NPK and organic manure[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2009, 33(12): 1670–1679.
- [29] 张成兰, 刘春增, 李本银, 等. 有机肥对大豆生产效应研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2018, 46(18): 25–28.
- Zhang C L, Liu C Z, Li B Y, *et al.* Research progress on the effect of organic fertilizer on soybean production[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, 46(18): 25–28.
- [30] 郝小雨, 周宝库, 马星竹, 等. 长期不同施肥措施下黑土作物产量与养分平衡特征[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(16): 178–185.
- Hao X Y, Zhou B K, Ma X Z, *et al.* Characteristics of crop yield and nutrient balance under different long-term fertilization practices in black soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(16): 178–185.
- [31] Yi Z, Peter H, David C, *et al.* Strategic nitrogen supply alters canopy development and improves nitrogen use efficiency in dryland wheat[J]. *Agronomy Journal*, 2017, 109(3): 1072–1081.
- [32] 田艳洪, 赵晓锋, 刘玉娥, 等. 不同有机肥用量对大豆植株生长及产量的影响[J]. *大豆科学*, 2018, 37(4): 578–584.
- Tian Y H, Zhao X F, Liu Y E, *et al.* Effects of different dosages of organic fertilizer on the growth and yield of soybean[J]. *Soybean Science*, 2018, 37(4): 578–584.
- [33] 王凤仙, 丁娇, 韩晓增, 等. 长期氮肥不同施用量对大豆生物量和产量的影响[J]. *大豆科技*, 2016, (6): 4–7.
- Wang F X, Ding J, Han X Z, *et al.* Effects of different application rates of long-term nitrogen fertilizer on soybean biomass and yield[J]. *Soybean Science & Technology*, 2016, (6): 4–7.
- [34] 丁娇. 长期施肥对大豆固氮能力的影响[D]. 黑龙江哈尔滨: 东北农业大学硕士学位论文, 2013.
- Ding J. Effect of long-term fertilization on nitrogen fixation ability of soybean[D]. Harbin, Heilongjiang: MS Thesis of Northeast



- Agricultural University, 2013.
- [35] 于昕阳, 翟丙年, 金忠宇, 等. 有机无机肥配施对旱地冬小麦产量、水肥利用效率及土壤肥力的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(5): 320–324.
- Yu X Y, Zhai B N, Jin Z Y, *et al.* Effect of combined application of organic and inorganic fertilizers on winter wheat yield, water and fertilizer use efficiency and soil fertility in dryland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(5): 320–324.
- [36] 孙云岭, 杨树青, 刘德平, 等. 水肥互作对大豆产量及氮肥利用的影响[J]. 灌溉排水学报, 2015, 21(1): 36–45.
- Sun Y L, Yang S Q, Liu D P, *et al.* Impact of water-fertilizer interaction on yield and nitrogen use efficiency of soybean[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2015, 21(1): 36–45.
- [37] 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): 76–81.
- Li S Q, Li S X. Estimation of nitrogen fertilizer use efficiency in dry land agro-ecosystem[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2000, 33(1): 76–81.
- [38] 王西娜, 王朝辉, 李华, 等. 旱地土壤中残留肥料氮的动向及作物有效性[J]. 土壤学报, 2016, 53(5): 1202–1212.
- Wang X N, Wang Z H, Li H, *et al.* Dynamics and availability to crops of residual fertilizer nitrogen in upland soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(5): 1202–1212.
- [39] 张昊青, 于昕阳, 翟丙年, 等. 渭北旱地麦田配施有机肥减量施氮的作用效果[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(1): 124–133.
- Zhang H Q, Yu X Y, Zhai B N, *et al.* Reducing N fertilization rate through a combination of manure and chemical fertilizer in Weibei dryland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(1): 124–133.
- [40] 南镇武, 刘树堂, 袁铭章, 等. 长期定位施肥土壤硝态氮和铵态氮积累特征及其与玉米产量的关系[J]. 华北农学报, 2016, 31(2): 176–181.
- Nan Z W, Liu S T, Yuan M Z, *et al.* Characteristics of nitrate nitrogen and ammonium nitrogen accumulation in soil and its relationship with maize yield on long-term located fertilization[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2016, 31(2): 176–181.