



# 连续秸秆还田对大豆产量、磷素吸收特征及土壤磷组分的影响

尚磊<sup>1</sup>, 杨栗恒<sup>1</sup>, 王孟雪<sup>1\*</sup>, 王鹏<sup>1,2\*</sup>

(1. 黑龙江八一农垦大学 农学院, 黑龙江 大庆 163319; 2. 农业农村部东北平原农业绿色低碳重点实验室, 黑龙江 大庆 163319)

**摘要:**为探究连续秸秆还田后,在不同土壤肥力条件下,大豆对施磷水平的反应及黑土供磷潜力,在2016—2022年连续7年进行秸秆还田试验点,于2022和2023年选用黑河43为试验材料,设置秸秆还田和秸秆离田2个处理,在连续秸秆还田条件下于2种不同土壤肥力处理水平上进行不同磷肥用量试验。2022年分别设置0, 50.2, 71.8和86.1 kg·hm<sup>-2</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 4个施磷水平(P0、P1、P2和P3),其中71.8 kg·hm<sup>-2</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (P2)为当地推荐磷肥用量,2023年分别设置0, 50.2和71.8 kg·hm<sup>-2</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 3个施磷水平(P0、P1和P2),研究秸秆还田对大豆产量和土壤磷组分的影响,连续秸秆还田条件下施磷水平对大豆产量、干物质积累量、磷素积累与分配的影响。结果表明:秸秆还田与秸秆离田相比,大豆产量显著提高,增产幅度达到17.59%~22.55%;秸秆还田后土壤全磷、H<sub>2</sub>O-P、NaHCO<sub>3</sub>-Pi、NaOH-Pi、NaOH-Po和残余-P的含量显著提高,提高幅度分别为31.68%~43.12%、44.05%~78.82%、148.03%~223.66%、23.84%~37.92%、80.67%~97.32%和67.44%~76.04%,NaHCO<sub>3</sub>-Po和HCl-P含量显著降低,降低幅度分别达到15.58%~28.63%和22.65%~39.57%,其中土壤中活性磷的比例增加了3.37%~4.95%,稳定态磷的比例降低了4.42%~5.04%。两年两试验区试验结果表明,大豆产量随施磷水平的提高呈先增加后降低的趋势,P3处理较P2处理大豆籽粒产量显著降低了8.89%~15.75%。不同施磷水平在大豆不同生育阶段的影响表现为大豆生长前期干物质积累量和磷素积累量随着施磷水平的提高而增加,过高的施磷水平对大豆生长后期干物质积累量和磷素积累量有降低的趋势,同时也不利于磷素向籽粒中的转移分配,P3处理磷素在籽粒中的分配比例为54.45%~59.74%,显著低于P0、P1和P2处理。综上所述,经过连续6~7年秸秆还田后,秸秆还田较秸秆离田显著提高了大豆产量,提高了土壤全磷含量,降低了土壤稳定态磷百分含量,从而提高了土壤磷素有效性,土壤供磷能力得到增强;在连续秸秆还田6~7年的基础上,高肥区施用磷肥对大豆产量无显著影响,磷肥较当地推荐磷肥用量降低30%不会降低低肥区大豆产量,并且过高的磷素供应水平无益于大豆产量的增加,并存在减产趋势。

**关键词:** 秸秆还田; 大豆; 土壤磷组分; 磷素吸收与分配; 产量

## Effects of Continuous Straw Returning on Soybean Yield, Phosphorus Absorption Characteristics and Soil Phosphorus Fractions

SHANG Lei<sup>1</sup>, YANG Liheng<sup>1</sup>, WANG Mengxue<sup>1\*</sup>, WANG Peng<sup>1,2\*</sup>

(1. College of Agriculture Heilongjiang Bayi Agricultural University, Daqing 163319, China; 2. Key Laboratory of Low-carbon Green Agriculture in Northeastern China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs P. R. China, Daqing 163319, China)

**Abstract:** In order to investigate the response of soybean to phosphorus application level and the phosphorus supply potential of black soil under different soil fertility conditions after continuous straw returning, straw returning test site for seven consecutive years from 2016 to 2022, Heihe 43 was selected as the test material in 2022 and 2023. We set up two treatments of straw returning to the field and straw removal, under the condition of continuous straw returning to the field, the experiment of different phosphorus fertilizer dosage was carried out at two different soil fertility treatment levels. Four phosphorus application levels (P0, P1, P2 and P3) of 0, 50.2, 71.8 and 86.1 kg·ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (P2) were set respectively in 2022, where 71.8 kg·ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (P2) was the recommended local phosphorus fertilizer dosage, three phosphorus application levels (P0, P1 and P2) of 0, 50.2 and 71.8 kg·ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> were set in 2023, respectively. The effects of straw returning on soybean yield and soil phosphorus fractions, and the effects of phosphorus application level on soybean yield, dry matter accumulation, phosphorus accumulation and distribution under continuous straw returning were studied. The results show that: compared with straw removal, soybean yield of straw returning to field treatment increased significantly by 17.59%-22.55%. The contents of total phosphorus, H<sub>2</sub>O-P, NaHCO<sub>3</sub>-Pi, NaOH-Pi, NaOH-Po and residual-P in soil increased significantly after straw returned to the field. The increasing rate were 31.68%-43.12%, 44.05%-78.82%, 148.03%-223.66%, 23.84%-37.92%, 80.67%-97.32% and 67.44%-76.04%, respectively. The contents of NaHCO<sub>3</sub>-Po and HCl-P were significantly decreased. The reduction ranges were 15.58%-28.63% and 22.65%-39.57%, respectively. The proportion of medium active phosphorus in soil increased by 3.37%-4.95%, and the proportion of stable phosphorus decreased by 4.42%-5.04%. The

收稿日期:2024-09-21

基金项目:国家重点研发计划子课题(2022YFD1000105)。

第一作者:尚磊,男,硕士研究生,主要从事土壤肥料及植物营养研究。E-mail:635176316@qq.com。

通讯作者:王鹏,男,博士,教授,主要从事土壤肥料及植物营养研究。E-mail:wangp.ycs@163.com;

王孟雪,女,博士,副教授,主要从事农业生态节水、作物水分生理研究。E-mail:wangmengxue1978@163.com。

results of two years and two experimental areas showed that the soybean yield increased first and then decreased with the increase of phosphorus application level, and the soybean seeds yield of P3 treatment was significantly reduced by 8.89% - 15.75% compared with P2 treatment. The effects of different phosphorus application levels on different growth stages of soybean showed that dry matter accumulation and phosphorus accumulation in early growth period of soybean increased with the increase of phosphorus application level, and phosphorus application of too high level had a tendency to reduce dry matter accumulation and phosphorus accumulation in late growth period of soybean, and was not conducive to the transfer and distribution of phosphorus into seeds. The distribution ratio of phosphorus in seeds under P3 treatment was 54.45% - 59.74%, which was significantly lower than that under P0, P1 and P2 treatment. In summary, after 6 to 7 years of continuous straw returning to field compared with straw removal, straw returning to field significantly increased soybean yield, increased soil total phosphorus content, and decreased soil stable phosphorus content, thus improving soil phosphorus availability and enhancing soil phosphorus supply capacity. On the basis of continuous straw returning for 6-7 years, the application of phosphorus fertilizer in high fertilizer area had no significant effect on soybean yield, and compared with the local recommended phosphorus fertilizer dosage, the reduction of phosphorus fertilizer by 30% would not reduce the soybean yield in low fertilizer area, and the high phosphorus supply level was not conducive to the increase of soybean yield, and had a tendency to reduce the yield.

**Keywords:** straw returning; soybean; soil phosphorus fractions; phosphorus absorption and distribution; yield

大豆是我国重要的经济和粮油作物,2020 年总产量达 1 960 万 t,大豆生产和产业发展对中国粮食与油脂油料安全有着特殊的意义<sup>[1]</sup>。在大豆生长发育过程中,磷素是必需元素之一。黑土本身全磷含量和磷的有效性均处于较高水平<sup>[2,3]</sup>。农作物秸秆中富含多种营养元素,是一种可再生资源,2020 年我国农作物秸秆资源量约为  $7.72 \times 10^8$  t<sup>[4]</sup>。秸秆翻埋还田是秸秆综合利用的重要方式,随着秸秆肥料化利用和磷肥逐年的施用,尽管施磷可以补充土壤有效磷库,但过量的化肥投入导致了一系列农田土壤磷素盈余及相关环境风险问题<sup>[5]</sup>。由于土壤中绝大多数磷素以难溶态存在,且磷在土壤中移动性较小、极易被固定,所以我国大部分农田土壤已经成为潜在磷库<sup>[6]</sup>。土壤磷分级能够很好地了解土壤有效磷含量及各磷组分在土壤中的供应状况<sup>[7]</sup>。修正后的 Hedley 磷素分级法<sup>[8]</sup>同时兼顾了土壤中的无机磷和有机磷的区分,并根据活性分为活性态磷、中等活性磷和稳定态磷,更有助于全面评估土壤中各磷素的形态变化<sup>[9]</sup>,是目前较为科学合理的磷素分级方法,得到了广泛的认同,已被越来越多的学者所采用<sup>[10,11]</sup>。

现有研究表明,秸秆还田可以提高土壤养分积累量<sup>[12,13]</sup>。通过改变土壤理化性质和环境来影响土壤磷素有效性<sup>[14,15]</sup>。更重要的是在稳产或增产的前提下,长期连续秸秆还田具有培肥土壤,增强土壤养分供应能力,可以减少化肥投入,实现减肥增效<sup>[16]</sup>。已有研究表明施用磷肥能够改善大豆的产量构成,有利于大豆获得高产<sup>[17]</sup>。过高或过低的磷素供应水平,对大豆生长发育均存在不同程度的负面影响<sup>[18]</sup>。因此适当的磷素供应水平对大豆生长发育是至关重要的。已有研究证实了在黑土区大豆磷肥减施的潜力<sup>[19]</sup>。前人根据不同磷肥施用

水平下大豆的产量反应,建立了东北地区土壤磷的丰缺指标及磷肥推荐用量<sup>[20,21]</sup>。北大荒集团九三分公司地处黑土区已实现连续多年秸秆全量还田,土壤供肥能力变化情况尚待研究,按照当地目前磷肥施用量是否还会对玉米-大豆轮作下大豆产量具有显著提升效应目前仍然不明确。因此,本研究通过分析秸秆还田对大豆产量和土壤供磷能力的影响,以及连续秸秆还田 6~7 年后,在考虑土壤肥力的前提下,基于 2 种肥力水平研究施磷水平对大豆的产量、干物质积累量和磷素吸收与分配的影响,旨在挖掘黑土供磷潜力,为磷素养分管理提供参考,指导区域农业生产。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验于 2022—2023 年在北大荒集团九三分公司大西江农场有限公司进行(48°58′54″N,124°57′52″E),位于黑龙江垦区西北部,地处小兴安岭南麓、嫩江东岸,属于寒温带半湿润区,作物一年一熟,无灌溉,为典型的旱作雨养农业,降雨主要集中在 7 和 8 月,年平均降雨量为 526.6 mm,年 $\geq 10$ ℃有效积温 2 312.5℃。全年日照时数平均为 2 532 h,无霜期平均为 120 d。试验田土壤为黑土,2022 年秸秆离田和秸秆还田高、低肥区试验点前茬作物均为玉米;2023 年秸秆离田试验点前茬作物为大豆,2022 和 2023 年秸秆离田试验点为同一地块,秸秆还田高肥区和低肥区前茬作物为玉米,田间管理同一般生产田。供试土壤基本理化性质如表 1 所示。秸秆还田试验点 2016—2022 年连续秸秆还田 7 年;秸秆离田试验点 2017、2019 和 2021 年种植青贮玉米专为农场畜牧养殖提供饲料,2018 和 2020 年种植大豆,大豆秸秆采用秸秆打包的方式离田。

表 1 供试土壤理化性状  
Table 1 The soil physical and chemical properties of tested soil

年份 Year	处理 Treatment	有机质 Organic matter/ (g·kg <sup>-1</sup> )	碱解氮 Alkali-hydrolyzed N/(mg·kg <sup>-1</sup> )	有效磷 Olsen-P/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	速效钾 Available K/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	pH
2022	低肥区 Low fertilizer area	40.55	159.60	18.97	163.06	7.01
2022	高肥区 High fertilizer area	50.98	191.33	23.21	215.98	6.95
2023	低肥区 Low fertilizer area	37.97	137.80	21.11	185.60	6.99
2023	高肥区 High fertilizer area	51.96	186.53	29.98	196.80	6.96
2022	秸秆离田 Straw removal area	38.36	142.71	20.69	172.08	6.90

1.2 材料

供试材料:供试大豆品种为当地主栽品种黑河43,为亚有限结荚习性。株高 75 cm 左右,无分枝,紫花,尖叶,灰色茸毛,荚成熟时呈灰色。在适应区,需≥10℃活动积温2 150℃左右,出苗至成熟生育日数 113 d 左右,由北大荒垦丰种业股份有限公司大西江农场分公司提供。

供试肥料:尿素(N=46%)、磷酸二铵(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>=46%、N=18%)、硫酸钾(K<sub>2</sub>O=50%),所有试验点供试肥料品种均相同,由北大荒九三区域农业综合服务中心提供。秋季前茬作物收获后,通过机械深翻作业将秸秆进行翻埋还田,作业深度达 30 cm 以上,并进行秋起垄春施肥,肥料以机械条施的方式施入,所有肥料全部作为基肥。

1.3 试验设计

试验采用大区对比法,秸秆还田试验设置 2 个处理,以当地常规施肥水平为基准,分别为秸秆离

田(NS)和秸秆还田(S),由于当地管理和实际生产模式,秸秆离田试验点选择与秸秆还田低肥区土壤基础肥力相近的地块开展试验。

连续秸秆还田条件下,选择 2 种肥力水平地块设置不同施磷水平。2 种肥力水平地块分别为高(G,有机质含量≥45 g·kg<sup>-1</sup>)和低(D,有机质含量<45 g·kg<sup>-1</sup>)肥力区域。2022 年设置 4 个施磷水平,分别为无磷肥处理(P0)、低施磷水平(P1)、当地常规施磷水平(P2)和高施磷水平(P3)。根据 2022 年试验结果,2023 年施磷水平做了相应的调整,设置 3 个施磷水平,分别为无磷肥处理(P0)、低施磷水平(P1)、当地常规施磷水平(P2)。具体试验处理如表 2 所示。

大豆种植采用宽台大垄匀密栽培模式,每个处理 12 垄,垄宽 1.1 m,垄长 550 m,垄上 3 行,保苗株数为 36 万株·hm<sup>-2</sup>。2022 年 5 月 7 日播种,9 月 29 日收获;2023 年 4 月 30 日播种,10 月 1 日收获。

表 2 具体施肥措施  
Table 2 Specific fertilization measures

处理 Treatment	尿素 Urea	磷酸二铵 Diammonium phosphate	硫酸钾 Potassium sulfate	总氮量(N) Total nitrogen(N)	总磷量(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	总钾量(K <sub>2</sub> O)
					Total phosphorus content(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	Total potassium (K <sub>2</sub> O)
NS	46.0	156.0	30.0	49.2	71.8	15.0
S	46.0	156.0	30.0	49.2	71.8	15.0
P0	107.0	0	30.0	49.2	0.0	15.0
P1	64.3	109.2	30.0	49.2	50.2	15.0
P2	46.0	156.0	30.0	49.2	71.8	15.0
P3	33.8	187.2	30.0	49.2	86.1	15.0

1.4 样品采集与分析

1.4.1 土壤样品的采集与指标测定 于春季播种施肥前和秋季收获后取样,取样过程中根据地形等因素进行样方的选择,在试验区固定样地中随机布设 3 个典型样方,在每一样方内采用五点取样法用土钻采集各处理耕层(0~20 cm)土壤,并混合为 1 个土壤样品,混匀后按四分法取部分样品,去除植物残体及其他杂质,于室内自然风干备用,风干土

过 1 mm 筛后用于供试土壤基本化学性质的测定<sup>[22]</sup>,一部分再磨细过 0.149 mm 筛后用于土壤全磷及各形态磷组分的测定。

土壤全磷测定采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法<sup>[22]</sup>测定,土壤磷组分测定采用修正的 Hedley 磷素分级法<sup>[8]</sup>测定,该方法可以同时兼顾土壤中的无机磷和有机磷。

1.4.2 植株样品的采集与指标测定 大区内设采



样区,每次采样 3 次重复,在大豆始花期(R1)、始粒期(R5)和成熟期(R8)进行 3 次取样,2022 年因疫情原因大豆始粒期未进行取样。最后一个时期(R8 期)为取样加测产,根据种植面积、地力和大豆长势情况将试验田分成 3 个测产点。每一测产点采取对角线 5 点取样法,每个样点离地块边缘 5 m,随机选点,调查连续 10 株的荚数、粒数,测定株粒数和百粒重等,并计算籽粒产量。取样时,首先将地上部分自子叶痕一分为二,根系挖出后用水冲净后再用滤纸吸干,按照不同生育期将各器官分为根部、茎秆、叶(含叶柄)、荚皮和籽粒,首先 105 ℃杀青 30 min,然后调至 80 ℃继续烘干至恒重,分别称其干重,计算生物量,并粉碎待测。硫酸-过氧化氢消煮后采用钼锑抗比色法<sup>[22]</sup>测定植株全磷含量。

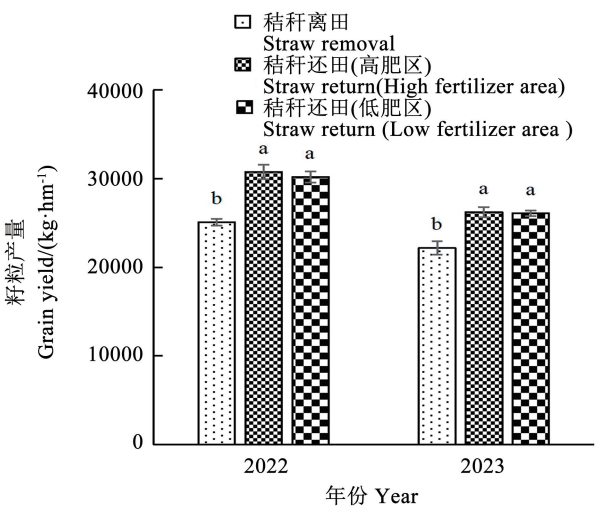
1.5 数据分析

利用 Excel 2021 软件对数据进行整理与作图,采用 SPSS 17.0 进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田和不同施磷水平对大豆产量的影响

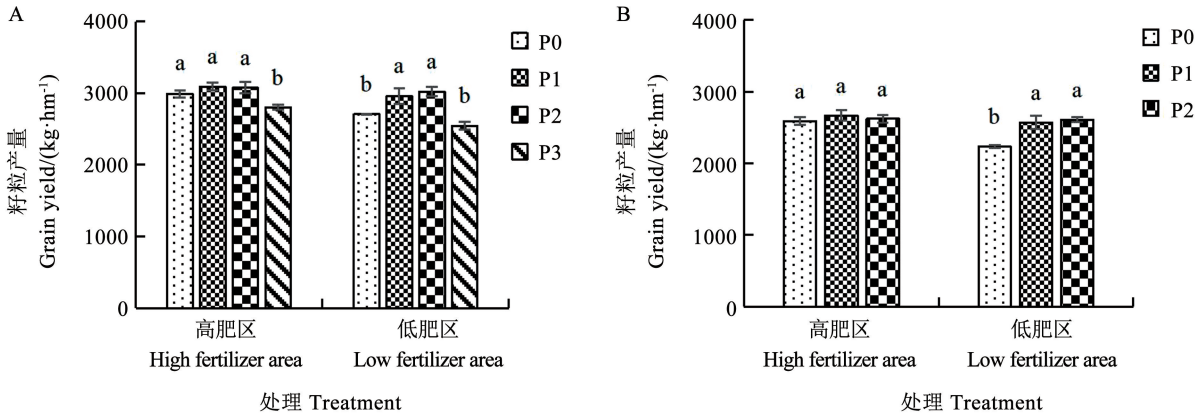
2.1.1 秸秆还田对大豆产量的影响 如图 1 所示,大豆的籽粒产量在年际间存在一定变化,表现为 2022 年籽粒产量高于 2023 年。2022 和 2023 年秸秆还田大豆籽粒产量均显著高于秸秆离田大豆籽粒产量,其中,2022 年高肥区和低肥区秸秆还田后大豆籽粒产量较秸秆离田大豆籽粒产量分别显著提高 22.55% 和 20.31%,2023 年分别较秸秆离田大豆籽粒产量显著提高 18.11% 和 17.59%。综合 2 年试验结果表明,秸秆还田达到 6~7 年后,无论土壤肥力高低均有利于大豆籽粒产量的增加,与秸秆离田相比,高肥区和低肥区的大豆籽粒产量分别提高了 18.11%~22.55% 和 17.59%~20.31%。



注:同一年份不同小写字母代表 0.05 水平差异显著。下同。  
Note: Different Cowevcase in the same year indicate significant difference at 0.05 level the same below.

图 1 2022—2023 年秸秆还田对大豆籽粒产量的影响  
Fig.1 Effects of straw returning on soybean seed yield in 2022 and 2023

2.1.2 施磷水平对大豆产量的影响 田间试验结果如图 2 所示,施磷水平对大豆籽粒产量的影响在不同肥力水平下有一定差异,高肥区施磷肥与不施磷肥对大豆籽粒产量均无明显的影响,过高的施磷水平使大豆籽粒产量表现降低的趋势。低肥区施用磷肥较不施磷肥处理显著提高了大豆籽粒产量,同样施磷水平过高使大豆籽粒产量表现降低的趋势,两种肥力水平下 P3 处理大豆籽粒产量分别较 P2 处理显著降低了 8.89% 和 15.75%,2 种肥力水平下 P1 与 P2 处理大豆籽粒产量均无显著差异。结果表明,秸秆还田 6~7 年后,在玉米-大豆轮作体系下,土壤有效磷含量达到中等以上水平时,高肥区大豆施用磷肥无增产作用,低肥区施用磷肥虽有增产效果,P1 水平基本达到推荐磷肥用量的产量。



注:A. 2022 年;B. 2023 年;P0、P1、P2 和 P3 分别代表无磷肥处理、低施磷水平、当地常规施磷水平和高施磷水平。  
Note: A. 2022; B. 2023; P0, P1, P2 and P3 represent no P fertilizer treatment, low P application level, conventional P application level and high P application level, respectively.

图 2 2022—2023 年高、低肥区施磷水平对大豆籽粒产量的影响

Fig.2 Effects of phosphorus application level on soybean seed yield in high and low fertility areas in 2022 and 2023

### 2.2 施磷水平对大豆植株磷素积累量的影响

由表3可知,大豆生育期内磷素营养水平变化对大豆磷素积累量有显著影响,大豆始花期和始粒期植株磷素积累量随着施磷水平的增加而增加,当施磷水平高于P1时磷积累量不再显著增加。两种肥力水平下,大豆成熟期植株磷素积累量均在P2处理达最大值,P1、P2和P3施磷水平下无显著差

异,均显著高于P0处理;从不施磷肥处理看,施磷肥可以提高大豆植株各时期的磷素积累量。综合两年试验结果表明,磷肥能有效促进大豆生长早期和中期植株磷素积累量的增加,过高的施磷水平会抑制大豆生长后期植株磷素的吸收与积累,但磷肥的用量对大豆成熟期植株磷素积累量的影响不显著。

表3 施磷水平对大豆不同生育期磷的吸收积累的影响

Table 3 Effects of phosphorus application level on phosphorus absorption volume of soybean at different growth stages						
单位:kg·hm <sup>-2</sup>						
肥力水平 Fertility level	处理 Treatment	2022 年			2023 年	
		R1	R8	R1	R5	R8
高肥区 High fertilizer area	P0	4.42 c	24.34 b	2.64 b	14.20 b	18.80 b
	P1	5.66 b	30.70 a	3.16 b	18.61 a	23.79 a
	P2	6.52 ab	31.74 a	3.85 a	20.81 a	24.01 a
	P3	6.88 a	30.15 a			
低肥区 Low fertilizer area	P0	3.95 b	20.80 b	3.02 c	12.22 c	15.76 b
	P1	4.80 ab	26.87 a	4.07 b	16.29 b	22.04 a
	P2	5.58 a	29.42 a	4.73 a	19.62 a	24.50 a
	P3	5.64 a	27.86 a			

注:不同小写字母差异显著( $P<0.05$ ),下同。  
Note: Different lowercase letters indicate significant difference( $P<0.05$ ), the same below.

### 2.3 施磷水平对大豆植株磷素分配的影响

施磷水平对大豆成熟期不同器官磷素积累及分配比例的影响存在差异。除籽粒的磷素积累量随施磷水平的增加呈先增加后降低的趋势外,其他器官均随施磷水平的增加而增加,且施磷肥可以显著增加根的磷素积累量;当施磷水平小于P2时,高肥区各处理间其他营养器官的磷素积累量无显著差异,施磷水平显著影响低肥区其他营养器官的磷素积累量;P1和P2处理最有利于磷素在籽粒中的积累,P0和P3处理间、P1和P2处理之间无显著性差异(表4)。说明适量施用磷肥能够促进大豆各器官中磷素的积累,过高的施磷水平会抑制籽粒中磷素的积累。

进一步分析大豆成熟期各器官磷素积累量所占总磷素积累量的比例可知,施磷水平对植株磷素

分配的影响也呈现一定的规律性。从各器官的分配比例可以看出,磷素分配比例最高的器官是籽粒,占整个植株磷素积累量的54.45%~73.66%。两种肥力水平下籽粒中磷素的分配比例均随施磷水平的增加呈先增加后降低的趋势,P1处理最有利于磷素向籽粒中的分配,分别较P2处理提高了3.59%~4.06%和1.94%~1.99%,各处理均显著高于P3处理;P3处理茎中磷素的分配比例分别较P0、P1和P2处理提高了4.48%~5.24%、5.89%~8.14%和4.93%~8.11%,P0、P1和P2处理间无显著差异(表4)。说明施磷水平的变化会影响大豆植株中磷素的分配,适宜的施磷水平有利于籽粒中磷素的积累和分配,过高会使营养器官中积累了更多的磷素,且磷素营养越充足,残留在营养体中的磷就越多,甚至使分配到籽粒中的比例显著降低。

表 4 施磷水平对大豆成熟期各器官磷素积累与分配的影响

Table 4 Effects of phosphorus level on phosphorus accumulation and distribution in organs of soybean at maturity stage										
年份 Year	肥力水平 Fertility level	处理 Treatment	磷素积累量 Phosphorus accumulation/ ( kg·hm <sup>-2</sup> )				分配比例 Distribution ratio/%			
			根 Root	茎 Stem	荚皮 Pod skin	籽粒 Seed	根 Root	茎 Stem	荚皮 Pod skin	籽粒 Seed
2022	高肥区 High fertilizer area	P0	1.93 c	4.39 c	1.76 a	16.27 c	7.95 bc	18.13 b	7.23 a	66.69 a
		P1	2.30 b	5.13 bc	2.03 a	21.24 a	7.49 c	16.72 b	6.61 a	69.19 a
		P2	2.84 a	5.60 b	2.46 a	20.83 ab	8.97 ab	17.68 b	7.76 a	65.60 a
		P3	2.94 a	6.81 a	2.37 a	18.03 bc	9.75 a	22.61 a	7.91 a	59.74 b
	低肥区 Low fertilizer area	P0	1.65 c	4.10 b	2.12 b	12.92 c	7.93 b	19.71 b	10.28 a	62.07 a
		P1	2.09 b	4.50 b	2.26 b	18.03 ab	7.77 b	16.81 b	8.42 a	67.00 a
		P2	2.51 a	4.96 b	2.80 a	19.16 a	8.54 b	16.84 b	9.56 a	65.06 a
		P3	2.83 a	6.96 a	2.91 a	15.17 bc	10.17 a	24.95 a	10.44 a	54.45 b
2023	高肥区 High fertilizer area	P0	1.39 c	2.64 b	1.12 a	13.64 b	7.42 a	14.06 ab	6.00 a	72.52 ab
		P1	1.80 b	3.18 b	1.29 a	17.52 a	7.57 a	13.35 b	5.42 a	73.66 a
		P2	2.02 a	3.75 a	1.49 a	16.74 ab	8.49 a	15.72 a	6.20 a	69.60 b
	低肥区 Low fertilizer area	P0	1.19 b	2.14 c	1.01 c	11.99 b	7.63 a	13.68 a	6.44 a	72.25 a
		P1	1.72 a	3.01 b	1.33 b	15.98 a	7.83 a	13.64 a	6.06 a	72.47 a
		P2	1.86 a	3.63 a	1.74 a	17.27 a	7.63 a	14.79 a	7.11 a	70.48 a

2.4 施磷水平对大豆农艺性状及产量构成的影响

由表 5 可以看出,各处理间株高与节数变化趋势相似,除 2023 年高肥区大豆株高和节数随着施磷水平的提高呈先增加后降低的趋势外,其余处理均表现为随着施磷水平的增加而增加。从不施磷肥来看,磷肥对株高和节数的影响在年际间存在差异,2022 年施磷肥对株高无显著影响,但显著增加了大豆节数,2023 年表现为施磷肥仅对低肥区大豆株高存在显著影响;从不同施磷水平来看,除 2023 年高肥区 P1 处理株高较 P2 处理显著提高了 9.82% 外,施磷水平对其余处理大豆株高和节数无显著影响。大豆单株荚数、单株粒数和百粒重均随着施磷水平的提高呈先增加后降低的趋势,以 P1 和 P2 处理最有利于大豆单株荚数、单株粒数和百粒重的增加,当施磷水平大于 P1 时不会再显著促进大豆的生长发育,甚至会抑制大豆产量的形成。综合两年试验结果表明,在两种肥力水平下,过剩的磷素营养对大豆生长及产量的形成无显著促进作用,P1 处理的磷肥水平可基本满足大豆生长需求。

2.5 施磷水平对大豆地上部干物质积累量的影响

施磷水平对大豆地上部干物质积累的影响在大豆不同生育时期存在差异。在 2 种肥力水平下,大豆始花期和始粒期地上部干物质积累量随着施磷水平的提高而增加,2022 年低肥区大豆始花期 P3 处理较 P0 处理地上部干物质积累量显著提高了 23.92%,2023 年高肥区大豆始花期 P2 处理地上部干物质积累量较 P0 处理显著提高了 13.95%,其余各处理间无显著差异;大豆进入成熟期,除 2023 年低肥区施用磷肥较不施磷肥显著增加了大豆成熟期地上部干物质积累量外,2022 和 2023 年其他处理表现为施磷对大豆成熟期地上部干物质积累量均无显著影响(表 6)。综合 2 年试验结果说明,在经过 6~7 年的秸秆还田后高肥区与低肥区对于磷肥的需求不明显,施磷水平对大豆干物质积累量的影响主要体现在生长前中期,施磷水平的提高能够增加大豆始花期和始粒期地上部干物质的积累,但施用磷肥与否对大豆成熟期地上部干物质的积累量无显著影响。说明连续秸秆还田 6~7 年后土壤后期供磷较强。

表 5 施磷水平对大豆农艺性状及产量构成的影响

Table 5 Effects of phosphorus application level on agronomic traits and yield composition of soybean

年份 Year	肥力水平 Fertility level	处理 Treatment	株高 Plant height/ cm	节数 Nodes number	单株荚数 Pods number per plant	单株粒数 Seeds number per plant	百粒重 100-seed weight
2022	高肥区 High fertilizer area	P0	91.33 a	12.83 b	23.03 a	57.07 b	19.39 a
		P1	100.30 a	13.77 a	24.07 a	58.43 b	19.60 a
		P2	104.05 a	14.30 a	24.27 a	61.13 a	18.63 b
		P3	106.98 a	14.33 a	24.00 a	57.73 b	17.97 b
	低肥区 Low fertilizer area	P0	94.83 a	12.97 c	22.60 ab	56.53 a	17.74 a
		P1	98.12 a	13.50 bc	24.70 a	61.03 a	17.95 a
		P2	103.40 a	14.10 ab	25.13 a	61.23 a	18.26 a
		P3	107.35 a	14.39 a	24.30 ab	53.67 a	17.57 a
2023	高肥区 High fertilizer area	P0	88.42 ab	13.87 a	21.60 a	52.20 a	18.37 a
		P1	92.85 a	13.97 a	22.20 a	52.77 a	18.73 a
		P2	84.55 b	13.40 a	20.90 a	51.13 a	19.00 a
	低肥区 Low fertilizer area	P0	75.03 b	12.83 b	19.63 a	44.23 a	18.70 a
		P1	86.31 a	13.70 ab	20.47 a	49.87 a	19.07 a
		P2	91.05 a	13.93 a	21.53 a	50.27 a	19.23 a

表 6 施磷水平对大豆地上部干物质积累量的影响

Table 6 Effects of phosphorus application level on aboveground dry matter accumulation of soybean

单位:kg·hm<sup>-2</sup>

肥力水平 Fertility level	处理 Treatment	2022 年		2023 年		
		R1	R8	R1	R5	R8
高肥区 High fertilizer area	P0	1172 a	6489 a	832 b	4983 a	4924 a
	P1	1211 a	6815 a	899 ab	5232 a	5069 a
	P2	1264 a	6775 a	949 a	5518 a	4981 a
	P3	1329 a	6639 a			
低肥区 Low fertilizer area	P0	1004 b	6202 a	672 a	4747 a	4438 b
	P1	1093 ab	6514 a	728 a	4922 a	4979 a
	P2	1155 ab	6630 a	778 a	5218 a	5112 a
	P3	1245 a	6284 a			

2.6 秸秆还田对土壤磷组分含量及分配比例影响

由表 7 可知,秸秆还田显著影响土壤全磷及各组分的含量。秸秆还田显著增加了土壤全磷含量,增幅为 31.68% ~ 43.12%;通过对土壤各磷组分的分析发现,与秸秆离田相比,秸秆还田后土壤 H<sub>2</sub>O-P、NaHCO<sub>3</sub>-Pi、NaOH-Pi、NaOH-Po 和残余-P 的含量显著提高,提高幅度分别为 44.05% ~ 78.82%、148.03% ~ 223.66%、23.84% ~ 37.92%、80.67% ~ 97.32% 和 67.44% ~ 76.04%, NaHCO<sub>3</sub>-Po 和 HCl-P 含量显著降低,降低幅度分别为 15.58% ~ 28.63% 和 22.65% ~ 39.57%。从各活性磷组分来看,与秸秆离田相比秸秆还田显著提高了活性态磷、中等活性磷

和稳定态磷的含量,增幅分别为 35.73% ~ 52.41%、43.20% ~ 54.03% 和 13.39% ~ 26.76%。

进一步分析各活性磷所占全磷的比例可知,秸秆还田对土壤磷组分的分配在不同活性磷组分中存在差异。与秸秆离田相比秸秆还田对活性态磷的占比无显著影响,显著增加了土壤中等活性磷的比例,增幅为 3.37% ~ 4.95%;显著降低了稳定态磷的比例,降幅为 4.42% ~ 5.04%。说明秸秆还田通过调节不同活性磷组分比例,从而调节土壤磷库的贮存与供应能力。总体来看,秸秆还田在提高稳定态磷总量的情况下,降低土壤稳定态磷百分含量,从而提高了土壤磷素有效性。



表 7 秸秆还田对土壤磷组分含量及分配比例的影响  
Table 7 Effects of straw returning to field on soil phosphorus fractions and distribution ratio 单位:mg·kg<sup>-1</sup>

		磷组分 Phosphorus fractions										全磷 Total phosphorus
年份 Year	处理 Treatment	活性态磷 Active phosphorus				中等活性磷 Moderately active phosphorus			稳定态磷 Stable phosphorus			
		H <sub>2</sub> O-	NaHCO <sub>3</sub> -	NaHCO <sub>3</sub> -	总和	NaOH-	NaOH-	总和	HCl-	残余-	总和	
		P	Pi	Po	( 比例/% )	Pi	Po	( 比例/% )	P	P	( 比例/% )	
2022	NS	11.6 b	29.5 c	63.5 a	104.6 c ( 16.3 a )	179.6 b	108.6 b	288.3 b ( 45.0 b )	121.2 a	126.4 b	247.6 b ( 38.7 a )	640.4 b
	S(G)	19.6 a	94.4 a	45.3 b	159.3 a ( 17.4 a )	229.0 a	214.4 a	443.4 a ( 48.4 a )	91.4 b	222.4 a	313.8 a ( 34.2 b )	916.6 a
	S(D)	18.1 a	73.1 b	50.7 b	141.9 b ( 15.9 a )	247.8 a	196.3 a	444.1 a ( 50.0 a )	91.8 b	211.6 a	303.4 a ( 34.1 b )	889.4 a
2023	NS	12.0 c	27.4 b	73.2 a	112.7 b ( 16.7 a )	208.3 b	107.1 c	315.5 c ( 46.8 b )	128.8 a	117.1 b	245.9 b ( 36.5 a )	674.1 c
	S(G)	21.5 a	88.8 a	55.9 c	166.2 a ( 17.8 a )	263.7 a	208.7 a	472.4 a ( 50.5 a )	99.6 b	197.5 a	297.1 a ( 31.8 b )	935.8 a
	S(D)	17.3 b	77.9 a	61.8 b	157.1 a ( 17.7 a )	258.0 a	193.8 b	451.7 b ( 50.9 a )	77.8 c	201.0 a	278.8 a ( 31.4 b )	887.6 b

3 讨论

3.1 秸秆还田与施磷水平对大豆产量的影响

自 1963 年开始北大荒开展秸秆还田培肥地力,九三分公司自 2011 年开始实施秸秆翻埋全量还田,生产中按玉米秸秆全量还田,然后种植大豆,大豆秸秆亦全量还田,玉米和大豆每年秸秆还田量分别约为 8 500 和 2 200 kg·hm<sup>-2</sup> [16],并严格按大豆-玉米轮作制度执行。已有研究表明,秸秆还田对作物植株生长具有重要的调控效应,可以显著促进植株生长、降低病株率、改善土壤性状、提高土壤养分、生物量及养分累积量和收获密度,进而增加产量 [23,24]。本研究两年结果表明,在两种肥力水平下秸秆还田产量均显著高于秸秆离田产量,这与孔德杰等 [25] 在麦豆轮作模式下和蔡丽君等 [26] 在玉豆轮作模式下的研究结果一致。施磷对大豆的增产作用已被前人的研究所证实 [18,27]。适宜的施磷能显著地提高大豆各器官的干物质积累,并且分配到豆荚中的干物质量较高,有利于产量的形成 [28]。蔡柏岩等 [29] 通过研究施磷水平对 3 个大豆品种产量的影响发现,随着施磷量的增加,大豆产量呈先增加后降低的变化趋势。大豆产量对磷肥的反应与土壤有效磷含量关系密切,有研究表明在土壤有效磷含量低于 20 mg·kg<sup>-1</sup> 的棕黄土上,施磷可以促进大豆产量的增加,而在有效磷含量达到 60 mg·kg<sup>-1</sup> 的草甸土上,施磷对大豆产量无显著促进作用 [30]。本研究试验土壤的有效磷含量在 18.97 ~ 29.98 mg·kg<sup>-1</sup>,随着施磷水平的提高大豆产量呈先增加后降低的趋势,在 2 种肥力水平下大豆产量均表现为 P2 > P1

> P0 > P3,在低肥区当施磷水平大于 P1 时,再增加磷肥用量对产量没有显著的促进作用,因此,低肥区仍需要补充一定的磷肥。在高肥区 P0、P1 和 P2 处理间大豆产量无显著差异,分析原因认为在有机质含量较高的土壤条件下,经过多年的秸秆还田后,土壤的供磷能力得到提高已经可以满足大豆对磷素的需求,磷肥的施用虽然能够增加大豆的产量,但是过多施用磷肥对大豆增产效果不显著 [19,31]。本研究结果中,成熟期地上部干物质积累量表现为与产量一致的趋势,且 P2 处理干物质积累量显著高于 P3 处理,这可能是由于过高的供磷水平会过度增强作物的呼吸作用,养分消耗过多,也不利于植株干物质的积累 [32,33]。本研究试验条件下,施磷对大豆株高和节数的影响较小。适当的施磷水平可增加大豆单株荚数、单株粒数和百粒重,过量施用反而会导致单株荚数、单株粒数和百粒重的减少,与前人研究结果一致 [34]。

3.2 施磷水平对大豆磷素积累与分配的影响

本研究在 2 种肥力水平下,施磷肥均可以提高大豆对磷素的吸收和累积。有研究认为较高的供磷水平促进大豆前中期大豆磷素积累 [34,35],其结论与本研究结果一致。研究表明,大豆始花期、始粒期的积累量随着施磷量增加而增加,但是当施磷水平大于 P2 时,不会再提高成熟期植株磷素的积累量。通过对成熟期各器官磷素积累量及分配比例的研究发现,在 2 种肥力水平下,均表现为 P1 处理最有利于磷素在籽粒中的积累与分配,P3 处理显著提高了磷素在茎秆中的分配比例。表明过量的施用磷肥,会造成磷素在营养器官中的积累 [36]。



娄梦玉等<sup>[37]</sup>对冬小麦的研究表明,过量施磷不仅不能使冬小麦植株磷积累不断提高,还会降低小麦产量,造成小麦对磷的“奢侈吸收”,降低了籽粒中磷素的积累与分配比例。本研究中,2022 年两种肥力水平下均表现为 P3 处理籽粒中磷素的积累量显著低于 P2 处理,说明过高的施磷水平并不能提高籽粒的磷素积累量,也不利于磷素向籽粒的转移<sup>[38]</sup>。

3.3 秸秆还田对土壤磷组分的影响

除施用磷肥外,秸秆还田也是向土壤输入磷素的重要途径之一<sup>[39]</sup>。Zhang 等<sup>[40]</sup>的研究表明,与秸秆离田相比,秸秆还田显著提高了土壤全磷、速效磷以及磷酸酶活性。本研究中,在不同肥力水平下秸秆还田与秸秆离田相比均显著提高了土壤全磷含量,但显著降低了  $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$  和  $\text{HCl-P}$  的含量,分析原因可能与  $\text{HCl-P}$  和  $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$  的分解和转化有关,还田秸秆能补充并活化土壤中的一部分磷素,从而提高了土壤磷的解吸率,促进了土壤中磷素的释放<sup>[31,41,42]</sup>。有研究表明秸秆还田显著影响土壤磷库的供应和积累能力<sup>[43,44]</sup>。徐悦等<sup>[45]</sup>的研究也得出类似的结论,在轮作制中,秸秆还田可以促进土壤中无效态磷向有效态磷和缓效态磷转化,从而提升土壤磷素有效性。植物对磷的利用取决于其在土壤中的赋存形态及其迁移转化过程<sup>[46]</sup>。土壤磷组分可全面表征土壤磷素状况,磷组分之间的转化直接影响磷的有效性,根际土壤磷有效性高低对植物磷的吸收积累能力影响较大, $\text{H}_2\text{O-P}$  和  $\text{NaHCO}_3\text{-P}$  是有效性最高的磷组分, $\text{NaOH-P}$  为中活性磷组分,而  $\text{HCl-P}$  和残渣态磷的有效性较低<sup>[47]</sup>。本研究结果表明,秸秆还田虽然降低土壤中  $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$  和  $\text{HCl-P}$  含量,但在提高了全磷含量的同时提高了活性态磷和中等活性磷的百分含量,从而调节土壤磷库的贮存与供应能力。连续秸秆还田 6~7 年后在不同肥力水平下土壤磷组分含量存在差异,可能是因为肥力较低的土壤难以满足植物需要的磷养分,因此植物对土壤中磷的吸收加速,影响了土壤各磷组分间的转化与分配,因此在土壤肥力较低的土壤上仍然需要补充一定量的磷肥。

4 结论

连续秸秆全量还田 6~7 年后在 2 种肥力水平下秸秆还田均可提高大豆产量;秸秆还田对土壤供磷能力的影响主要表现在提高了土壤全磷含量,降低土壤稳定态磷百分含量,从而提高土壤磷素有效性;通过调节不同活性磷组分比例,影响土壤磷库的贮存与供应能力。大豆对施磷水平的反应表现为适宜的磷肥施用量能够促进大豆植株磷素积累量和干物质积累量的增加,过高的施磷水平对大豆植株磷素积累量和干物质积累量没有显著的促进

作用,也不利于磷素向籽粒中的转运和分配。高肥区施用磷肥对大豆产量无显著影响,在当地推荐磷肥用量  $156\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  的基础上减少 30% 的投入量不会降低低肥区大豆产量,并且过高的磷素供应水平无益于大豆产量的增加,有造成减产的趋势。

参考文献

[1] 司伟,韩天富.“十四五”时期中国大豆增产潜力与实现路径[J]. 农业经济问题, 2021, 42(7): 17-24.  
SI W, HAN T F. China's soybean yield increase potential and realization path during the “14th five-year plan” period [J]. Issues in Agricultural Economy, 2021, 42(7): 17-24.

[2] 陆欣春,邹文秀,韩晓增,等. 长期施肥对黑土磷和锌形态转化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1536-1542.  
LU X C, ZOU W X, HAN X Z, et al. Effect of long-term fertilization on phosphorus and zinc fractions in a Mollisol [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2015, 21(6): 1536-1542.

[3] 宋春,韩晓增. 不同土地利用下黑土磷素肥力特征的研究[J]. 土壤通报, 2007, 38(5): 928-933.  
SONG C, HAN X Z. Rhosphorus fertility characteristics of black soil under different types of land use[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, 38(5): 928-933.

[4] 杨传文,邢帆,朱建春,等. 中国秸秆资源的时空分布、利用现状与碳减排潜力[J]. 环境科学, 2023, 44(2): 1149-1162.  
YANG C W, XING F, ZHU J C, et al. Temporal and spatial distribution, utilization status, and carbon emission reduction potential of straw resources in China[J]. Environmental Science, 2023, 44(2): 1149-1162.

[5] XU M, GAO P, YANG Z, et al. Biochar impacts on phosphorus cycling in rice ecosystem [J]. Chemosphere, 2019, 225: 311-319.

[6] 张淑香,张文菊,沈仁芳,等. 我国典型农田长期施肥土壤肥力变化与研究展望[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(6): 1389-1393.  
ZHANG S X, ZHANG W J, SHEN R F, et al. Variation of soil quality in typical farmlands in China under long-term fertilization and research expedition [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2015, 21(6): 1389-1393.

[7] 张林,吴宁,吴彦,等. 土壤磷素形态及其分级方法研究进展[J]. 应用生态学报, 2009, 20(7): 1775-1782.  
ZHANG L, WU N, WU Y, et al. Soil phosphorus form and fractionation scheme: A review [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(7): 1775-1782.

[8] HEDLEY M J, STEWART J W B, CHAUHAN B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations [J]. Soil Science Society of America Journal, 1982, 46(5): 970-976.

[9] 谢英荷,洪坚平,韩旭,等. 不同磷水平石灰性土壤 Hedley 磷形态生物有效性的研究[J]. 水土保持学报, 2010, 24(6): 141-144.  
XIE Y H, HONG J P, HAN X, et al. Study on soil bioavailability of the hedley P forms in calcareous soil with different phosphorus level [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(6): 141-144.

[10] 胡佩,周顺桂,刘德辉. 土壤磷素分级方法研究评述[J]. 土

- 壤通报, 2003, 34(3): 229-232.
- HU P, ZHOU S G, LIU D H. Assessment of soil phosphorus fractionation scheme[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2003, 34(3): 229-232.
- [11] 徐晓峰, 米倩, 刘迪, 等. 磷肥施用量对石灰性土壤磷组分和作物磷积累量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(11): 1857-1866.
- XU X F, MI Q, LIU D, et al. Effect of phosphorus fertilizer rate on phosphorus fractions contents in cal-careous soil and phosphorus accumulation amount in crop [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(11): 1857-1866.
- [12] 张畅, 高燕, 张延, 等. 秸秆还田对东北黑土碳氮磷钾化学计量特征及玉米产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(1): 31-44.
- ZHANG Y, GAO Y, ZHANG Y, et al. Effects of residue return on stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen, phosphorus, potassium, and the maize yield in black soil of Northeast China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023, 29(1): 31-44.
- [13] YAN S, SONG J, FAN J, et al. Changes in soil organic carbon fractions and microbial community under rice straw return in Northeast China[J]. Global Ecology and Conservation, 2020, 22: e00962.
- [14] 邱琛, 韩晓增, 陆欣春, 等. 东北黑土区玉米秸秆还田对土壤肥力及作物产量的影响[J]. 土壤与作物, 2020, 9(3): 277-286.
- QIU C, HAN X Z, LU X C, et al. Effects of maize straw incorporation on soil fertility and crop production in the black soil region of Northeast China[J]. Soils and Crops, 2020, 9(3): 277-286.
- [15] 王辉, 王清洲, 付庆灵, 等. 秸秆还田深度对稻田土壤磷生物有效性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(8): 33-41.
- WANG H, WANG Q Z, FU Q L, et al. Effects of straw returning depth on soil phosphorus bioavailability in paddy fields[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2023(8): 33-41.
- [16] 苏珊珊, 张吉立, 彭程, 等. 秸秆还田条件下大豆-玉米轮作体系中氮素对玉米产量和氮利用效率的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2023(5): 68-75.
- SU S S, ZHANG J L, PENG C, et al. Effects of nitrogen in soybean-maize rotation system on maize yield and nitrogen use efficiency under straw returning conditions[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2023(5): 68-75.
- [17] 蔡柏岩, 葛菁萍, 祖伟. 磷素水平对不同大豆品种产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(1): 65-70.
- CAI B Y, GE J P, ZU W. Yield and quality of different soybean varieties as affected by different phosphorus supplies[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2008, 14(1): 65-70.
- [18] 张小明, 曾宪楠, 孙羽. 磷素对大豆生长发育影响的研究进展[J]. 大豆科学, 2016, 35(1): 176-180.
- ZHANG X M, ZENG X N, SUN Y. The research progress of phosphorus fertilizer effect on soybean [J]. Soybean Science, 2016, 35(1): 176-180.
- [19] 赵家煦, 张一鹤, 韩晓增, 等. 东北黑土区长期不同磷肥施用量对大豆生长及产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2018, 36(5): 116-121.
- ZHAO J X, ZHANG Y H, HAN X Z, et al. The effect of different dosage of phosphorous fertilizer application on growth and yield of soybean in a Mollisol in Northeast China [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2018, 36(5): 116-121.
- [20] 董环, 娄春荣, 牛世伟, 等. 辽宁省大豆土壤养分丰缺指标研究[J]. 土壤通报, 2011, 42(1): 145-147.
- DONG H, LOU C R, NIU S W, et al. The Research of the Rich-Lack index on the Soil Nutrient of Soybean in the Liaoning Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(1): 145-147.
- [21] 吕继龙, 何萍, 魏丹, 等. 大豆养分专家系统在我国大豆主产区的应用与评价[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(2): 243-252.
- LÜ J L, HE P, WEI D, et al. Application and assessment of Nutrient Expert(NE) system in main soybean production areas of China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(2): 243-252.
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [23] 张国伟, 王晓娟, 杨长琴, 等. 前茬作物秸秆还田下轮作模式和施肥对大豆产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(9): 1493-1501.
- ZHANG G W, WANG X J, YANG C Q, et al. Effects of rotational pattern and fertilization application on soybean yield under straws returning of preceding crop[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(9): 1493-1501.
- [24] 孔凡丹, 周利军, 郑美玉, 等. 秸秆覆盖对黑土区大豆生长及产量构成因素的影响[J]. 大豆科学, 2022, 41(2): 189-195.
- KONG F D, ZHOU L J, ZHENG M Y, et al. Effects of straw mulching on growth and yield components of soybean in black soil area[J]. Soybean Science, 2022, 41(2): 189-195.
- [25] 孔德杰, 朱金霞, 任成杰, 等. 麦豆长期轮作下秸秆还田对土壤碳氮组分及作物产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(5): 190-200.
- KONG D J, ZHU J X, REN C J, et al. Effects of straw return on soil carbon and nitrogen components and crop yield under long-term wheat-soybean rotation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(5): 190-200.
- [26] 蔡丽君, 张敬涛, 刘婧琦, 等. 玉米-大豆免耕轮作体系玉米秸秆还田量对土壤养分和大豆产量的影响[J]. 作物杂志, 2015(5): 107-110.
- CAI L J, ZHANG J T, LIU J Q, et al. Effects of corn stalk amount returning to field on the soil nutrient and soybean yields under alternate-year no-till corn-soybean rotation[J]. Crops, 2015(5): 107-110.
- [27] 严君, 韩晓增, 丁娇, 等. 东北黑土区大豆生长、结瘤及产量对氮、磷的响应[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2): 318-325.
- YAN J, HAN X Z, DING J, et al. Responses of growth, nodulation and yield of soybean to different nitrogen and phosphorus fertilization management[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2014, 20(2): 318-325.
- [28] 吴俊江, 王金生, 刘丽君, 等. 供磷水平对不同磷效率基因型大豆生物量积累及分配影响[J]. 大豆科学, 2015, 34(6): 1020-1023, 1028.
- WU J J, WANG J S, LIU L J, et al. Effect of phosphorous application rate on biomass accumulation and its distribution of soybean with different phosphorus efficient genotype[J]. Soybean Science, 2015, 34(6): 1020-1023, 1028.
- [29] 蔡柏岩, 葛菁萍, 祖伟. 不同磷肥水平对大豆磷营养状况和产量品质性状的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13

(3): 404-410.

CAI B Y, GE J P, ZU W. Effect of phosphorus levels on soybean phosphorus nutrition, yield and quality [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2007, 13(3): 404-410.

[30] FERGUSON R B, SHAPIOR C A, DOBERMANN A R, et al. Fertilizer recommendations for soybean [M]. University of Nebraska Lincoln; Cooperative Extension, Institute of Agriculture and Natural Resources, 2003.

[31] 龚振平, 杜婷婷, 闫超, 等. 玉米秸秆还田及施磷量对黑土磷吸附与解吸特性的影响[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(22): 148-156.

GONG Z P, DU T T, YAN C, et al. Effects of corn straw returning and phosphorus application rate on phosphorus adsorption and desorption characteristics of black soil [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(22): 148-156.

[32] 杜孝敬, 符小文, 黄红梅, 等. 磷肥对滴灌复播大豆生长发育、产量及经济效益的影响[J]. *核农学报*, 2019, 33(8): 1622-1629.

DU X J, FU X W, HUANG H M, et al. Effect of phosphorus fertilizer on growth and development, yield and economic benefit of summer-sowing soybean under drip irrigation [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, 33(8): 1622-1629.

[33] 樊红柱, 陈庆瑞, 秦鱼生, 等. 长期施肥紫色水稻土磷素累积与迁移特征[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(8): 1520-1529.

FAN H Z, CHEN Q R, QIN Y S, et al. Characteristics of phosphorus accumulation and movement in a calcareous purple paddy soil profile as affected by long-term fertilization [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(8): 1520-1529.

[34] 吴冬婷, 张晓雪, 龚振平, 等. 磷素营养对大豆磷素吸收及产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(3): 670-677.

WU D T, ZHANG X X, GONG Z P, et al. Effects of phosphorus nutrition on P absorption and yields of soybean [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2012, 18(3): 670-677.

[35] 赵玉昆, 张惠君, 敖雪, 等. 磷酸二铵对大豆超高产品种养分吸收与利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(12): 2326-2334.

ZHAO Y K, ZHANG H J, AO X, et al. Effect of different diammonium phosphate levels on nutrient uptake of super-high yielding soybean [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(12): 2326-2334.

[36] 曹立为, 郭晓双, 龚振平, 等. 磷素营养变化对大豆磷素积累及产量和品质的影响[J]. *大豆科学*, 2015, 34(3): 458-462, 479.

CAO L W, GUO X S, GONG Z P, et al. Changes of phosphorus nutrition on P accumulation, yield and quality of soybean [J]. *Soybean Science*, 2015, 34(3): 458-462, 479.

[37] 娄梦玉, 薛华龙, 郭彬彬, 等. 施磷水平与冬小麦产量和土壤有效磷含量的关系[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(9): 1582-1593.

LOU M Y, XUE H L, GUO B B, et al. Relationship of phosphorus application rate, winter wheat yield and soil available phosphorus content [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(9): 1582-1593.

[38] 周涛, 徐开未, 王科, 等. 麦-豆和麦/玉/豆体系中大豆的磷肥增产增效作用研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(2): 336-345.

ZHOU T, XU K W, WANG K, et al. Effect of phosphate fertilizer on the improvement of yield and nutrient use efficiency of soybean in wheat-soybean and wheat/maize/soybean systems [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(2): 336-345.

[39] 柴如山, 黄晶, 罗来超, 等. 我国水稻秸秆磷分布及其还田对土壤磷输入的贡献[J]. *中国生态农业学报*, 2021, 29(6): 1095-1104.

CHAI R S, HUANG J, LUO L C, et al. Distribution of rice straw phosphorus resources in China and its utilization potential under straw return [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(6): 1095-1104.

[40] ZHANG P, CHEN X, WEI T, et al. Effects of straw incorporation on the soil nutrient contents, enzyme activities, and crop yield in a semiarid region of China [J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 160: 65-72.

[41] 张一, 李厚华, 何绪生, 等. 不同外源添加物质对土壤磷素淋溶和迁移特征的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(5): 151-156, 222.

ZHANG Y, LI H H, HE X S, et al. Effect of different external materials on the leaching and movement characteristics of soil phosphorus [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(5): 151-156, 222.

[42] 李季, 张桥, 张嘉欣, 等. 秸秆还田对稻田土壤磷素形态及磷循环微生物功能基因的影响[J]. *福建农业学报*, 2023, 38(10): 1230-1241.

LI J, ZHANG Q, ZHANG J X, et al. Effects of straw-returning on phosphorus morphology and microbial phosphorus-cycling genes in rice paddy soil [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2023, 38(10): 1230-1241.

[43] 韩晓飞, 谢德体, 高明, 等. 减磷配施有机肥对水旱轮作紫色水稻土磷素淋失的消减效应[J]. *生态学报*, 2017, 37(10): 3525-3532.

HAN X F, XIE D T, GAO M, et al. Effects of reduced-phosphorus fertilizer and combinations of organic fertilizers on phosphorus leaching in purple paddy soil with conventional paddy-upland rotation tillage [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(10): 3525-3532.

[44] 许艳, 张仁陟, 张冰桥, 等. 保护性耕作对黄土高原旱地土壤总磷及组分的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(4): 254-260.

XU Y, ZHANG R Z, ZHANG B Q, et al. Effects of conservation tillage on soil total phosphorus and phosphorus fractions of dry land in the Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016, 30(4): 254-260.

[45] 徐悦, 陈翔, 王擎运, 等. 小麦玉米秸秆长期还田对砂姜黑土磷库组成的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(8): 1768-1777.

XU Y, CHEN X, WANG Q Y, et al. Effects of long-term wheat and maize straw incorporation on phosphorus fractions in lime concretion black soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(8): 1768-1777.

[46] 刘瑾, 杨建军. 近三十年农田土壤磷分子形态的研究进展[J]. *土壤学报*, 2021, 58(3): 558-567.

LIU J, YANG J J. Molecular speciation of phosphorus in agricultural soils: Advances over the last 30 years [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58(3): 558-567.

[47] BETENCOURT E, DUPUTEL M, COLOMB B, et al. Intercropping promotes the ability of durum wheat and chickpea to increase rhizosphere phosphorus availability in a low P soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 46: 181-190.