

小麦玉米秸秆长期还田对砂姜黑土磷库组成的影响

徐悦, 陈翔, 王擎运, 罗来超, 张朝春, 李金才, 叶新新, 郜红建, 柴如山

引用本文:

徐悦, 陈翔, 王擎运, 罗来超, 张朝春, 李金才, 叶新新, 郜红建, 柴如山. 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.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1504>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

生物炭调节盐化水稻土磷素形态及释放风险研究

曹殿云, 兰宇, 杨旭, 赫天一, 刘遵奇, 陈温福, 蔡丹丹, 温秋香

农业环境科学学报. 2019, 38(11): 2536–2543 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0682>

黑土活性有机碳库与土壤酶活性对玉米秸秆还田的响应

贺美, 王立刚, 王迎春, 朱平, 李强, 沈欣

农业环境科学学报. 2018, 37(9): 1942–1951 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1725>

磷高效转基因水稻全生育期根际土壤磷组分特征差异

曹璇, 臧怀敏, 赵云丽, 修伟明, 李刚, 杨殿林, 刘惠芬, 赵建宁

农业环境科学学报. 2015(10): 1951–1957 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.10.016>

秸秆和秸秆炭对黑土肥力及氮素矿化过程的影响

朱兴娟, 李桂花, 涂书新, 杨俊诚, 郭康莉, 冀拯宇, 刘晓, 张建峰, 姜慧敏

农业环境科学学报. 2018, 37(12): 2785–2792 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0165>

玉米秸秆添加畜禽粪便田间条带堆腐对黑土活性有机碳的影响

李虎, 吴景贵, 李建明

农业环境科学学报. 2021, 40(9): 1944–1953 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0023>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

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.



开放科学 OSID

小麦玉米秸秆长期还田对砂姜黑土磷库组成的影响

徐悦¹, 陈翔², 王擎运¹, 罗来超¹, 张朝春^{1,3}, 李金才², 叶新新¹, 郜红建¹, 柴如山^{1*}

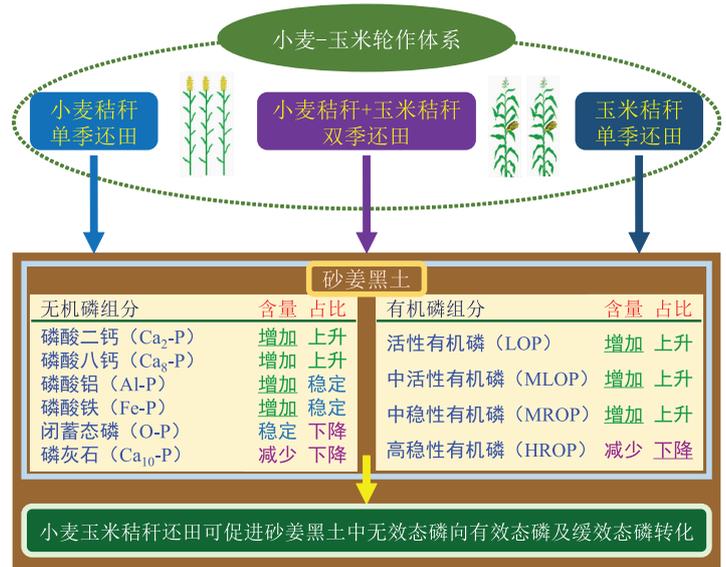
(1. 安徽农业大学资源与环境学院/农田生态保育与污染防治安徽省重点实验室/自然资源部江淮耕地资源保护与生态修复重点实验室/安徽省绿色磷肥智能制造与高效利用工程研究中心, 合肥 230036; 2. 安徽农业大学农学院, 合肥 230036; 3. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100193)

摘要:为优化管理小麦-玉米轮作体系秸秆还田条件下的土壤磷素,本研究依托皖北砂姜黑土区秸秆还田定位试验,设置不施肥(CK)、常规施肥(F)、常规施肥+小麦秸秆单季还田(FWS)、常规施肥+玉米秸秆单季还田(FMS)、常规施肥+小麦玉米秸秆双季还田(FWMS)5个处理,采用蒋柏藩-顾益初法及Bowman-Cole法分别测定了砂姜黑土无机磷和有机磷组分含量,运用相关分析和通径分析探究了土壤不同磷组分与有效磷之间的关系。结果表明:小麦玉米秸秆还田显著提高了砂姜黑土全磷和有效磷含量及土壤磷活化系数。秸秆还田可显著提高砂姜黑土无机磷组分中磷酸二钙(Ca₂-P)、磷酸铝(Al-P)及磷酸铁(Fe-P)的含量,与F处理相比,FWS、FMS和FWMS的土壤Ca₂-P含量分别增加32.3%、28.4%和43.8%,Al-P含量分别增加15.3%、10.7%和13.4%。土壤有机磷组分中活性有机磷(LOP)、中活性有机磷(MLOP)和中稳性有机磷(MROP)含量在秸秆还田条件下均明显增加。秸秆还田下砂姜黑土闭蓄态磷(O-P)含量无显著变化,FMS和FWMS处理的磷酸八钙(Ca₈-P)含量显著增加,磷灰石(Ca₁₀-P)和高稳性有机磷(HROP)含量下降。秸秆还田可显著增加砂姜黑土中Ca₂-P所占比例,降低O-P、Ca₁₀-P和HROP的占比。砂姜黑土中Al-P、Fe-P、Ca₂-P及MLOP与有效磷呈极显著正相关关系,其中Al-P、Ca₂-P和MLOP对有效磷的正向直接影响较大。研究表明,小麦-玉米轮作制中秸秆单季或双季还田均可促进砂姜黑土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,秸秆单季和双季还田处理在砂姜黑土磷素活化效果方面无显著差异。

土壤有机磷组分中活性有机磷(LOP)、中活性有机磷(MLOP)和中稳性有机磷(MROP)含量在秸秆还田条件下均明显增加。秸秆还田下砂姜黑土闭蓄态磷(O-P)含量无显著变化,FMS和FWMS处理的磷酸八钙(Ca₈-P)含量显著增加,磷灰石(Ca₁₀-P)和高稳性有机磷(HROP)含量下降。秸秆还田可显著增加砂姜黑土中Ca₂-P所占比例,降低O-P、Ca₁₀-P和HROP的占比。砂姜黑土中Al-P、Fe-P、Ca₂-P及MLOP与有效磷呈极显著正相关关系,其中Al-P、Ca₂-P和MLOP对有效磷的正向直接影响较大。研究表明,小麦-玉米轮作制中秸秆单季或双季还田均可促进砂姜黑土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,秸秆单季和双季还田处理在砂姜黑土磷素活化效果方面无显著差异。

关键词: 秸秆还田; 砂姜黑土; 无机磷组分; 有机磷组分

中图分类号: S141.4; S153 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2022)08-1768-10 **doi:** 10.11654/jaes.2021-1504



收稿日期: 2021-12-29 录用日期: 2022-04-01

作者简介: 徐悦(1997—),女,河南周口人,硕士研究生,主要从事秸秆还田下土壤磷循环研究。E-mail: 939292739@qq.com

*通信作者: 柴如山 E-mail: rschai@ahau.edu.cn

基金项目: 安徽省科技重大专项(202103a06020012); 中国工程科技发展策略安徽研究院咨询研究项目(2020-05); 农田生态保育与污染防治安徽省重点实验室开放基金项目(FECP202001)

Project supported: The Key Science and Technology Project of Anhui Province(202103a06020012); The Consulting Project of Anhui Research Institute of China Engineering Science and Technology Development Strategy(2020-05); The Open Fund of Anhui Province Key Laboratory of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention(FECP202001)

Effects of long-term wheat and maize straw incorporation on phosphorus fractions in lime concretion black soil

XU Yue¹, CHEN Xiang², WANG Qingyun¹, LUO Laichao¹, ZHANG Chaochun^{1,3}, LI Jincai², YE Xinxin¹, GAO Hongjian¹, CHAI Rushan^{1*}

(1. College of Resources and Environment, Anhui Agricultural University / Anhui Province Key Laboratory of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention / Key Laboratory of Jianghuai Arable Land Resources Protection and Eco-restoration, Ministry of Natural Resources / Anhui Engineering Research Center for Intelligent Manufacture and Efficient Utilization of Green Phosphorus Fertilizer, Hefei 230036, China; 2. College of Agronomy, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China; 3. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: In order to provide reference for optimal management of phosphorus levels under straw return in typical wheat-maize rotation systems, inorganic and organic phosphorus forms of lime concretion black soil were analyzed with Jiang Bofan-Gu Yichu's method and Bowman-Cole's method under five treatments selected from a long-term field experiment located in north Anhui. The five treatments included no fertilization (CK), conventional fertilization (F), conventional fertilization plus wheat straw return (FWS), conventional fertilization plus maize straw return (FMS), and conventional fertilization plus wheat and maize straw return (FWMS). Correlation analysis and path analysis were applied to examine the relationships between soil phosphorus fractions and available phosphorus. The results showed that wheat and maize straw return significantly increased the contents of total phosphorus and available phosphorus in lime concretion black soil and soil phosphorus activation coefficient. The contents of soil inorganic phosphorus ($\text{Ca}_2\text{-P}$, Al-P , and Fe-P) and organic phosphorus components (labile, moderately labile, and moderately resistant organic phosphorus) were significantly increased by straw return. The soil $\text{Ca}_2\text{-P}$ contents under the FWS, FMS, and FWMS treatments increased by 32.3%, 28.4%, and 43.8%, respectively, compared with those under the F treatment. Soil Al-P contents under the three treatments (FWS, FMS, and FWMS) increased by 15.3%, 10.7%, and 13.4%, respectively. Wheat and maize straw incorporation had no significant influence on soil O-P contents in the lime concretion black soil. Furthermore, in comparison with the F treatment, the soil $\text{Ca}_8\text{-P}$ contents under FMS and FWMS treatments significantly increased, while the contents of $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ and highly resistant organic phosphorus decreased. Besides, the proportions of $\text{Ca}_2\text{-P}$ in lime concretion black soil were significantly elevated by wheat and maize straw return, while the proportions of O-P , $\text{Ca}_{10}\text{-P}$, and highly resistant organic phosphorus decreased. Correlation analysis showed that soil Al-P , Fe-P , $\text{Ca}_2\text{-P}$, and moderately labile organic phosphorus were significantly positively correlated with the soil available phosphorus content. Path analysis indicated that soil Al-P , $\text{Ca}_2\text{-P}$, and moderately labile organic phosphorus were the major direct contributors to soil available phosphorus. On the basis of these results, it can be concluded that wheat and maize straw incorporation is an effective way to promote the conversion of unavailable phosphorus into available phosphorus and slowly available phosphorus in lime concretion black soil. There were no significant differences among single-season and double-season straw return treatments in terms of soil phosphorus activation.

Keywords: straw return; lime concretion black soil; inorganic phosphorus fractions; organic phosphorus fractions

我国小麦和玉米施用磷肥的增产率分别为14.3%和12.2%,但磷肥利用率仅为16.9%和15.3%^[1]。这主要是因为磷肥施入农田后易被土壤固定,难以被作物有效利用,从而造成磷肥当季利用率较低。随着磷肥的逐年施用,土壤中累积盈余的磷素在一定条件下向水体的迁移存在引发水体富营养化的潜在风险^[2-4]。因此,农田土壤中磷素的转化循环以及土壤中累积态磷的有效化备受重视^[5]。有研究显示,秸秆还田会对土壤磷库组成及磷有效性产生影响,有利于提升土壤供磷能力^[6-7]。安徽省是我国重要的商品粮生产基地,皖北为全省小麦和玉米主产区,耕作制度主要为小麦-玉米轮作,小麦和玉米秸秆资源丰富,分别占全省小麦和玉米秸秆总产量的70.0%和88.1%^[8]。该区域主要土壤类型为砂姜黑土,其在全

国砂姜黑土总面积中占比高达50%左右^[9]。砂姜黑土具有质地黏重、干缩湿胀、耕性差等不良属性,是我国黄淮海平原主要中低产土壤之一。相关研究表明,秸秆还田在砂姜黑土改良和培肥方面可发挥积极作用^[10-11]。在砂姜黑土水稻-小麦轮作区开展的3a定位试验发现,秸秆还田配施化肥显著提高了磷酸二钙和磷酸铁的含量及占比,降低了磷灰石的含量和占比,秸秆还田可促进缓效态无机磷向高活性无机磷的转化^[12]。在砂姜黑土小麦-大豆轮作制度上的定位试验结果表明,小麦秸秆长期还田显著增加了土壤有机磷总量及活性有机磷、中活性有机磷和中稳性有机磷的含量,其中活性有机磷和中稳性有机磷的占比在秸秆还田处理下的增幅较大^[13]。然而,目前在皖北地区小麦-玉米轮作体系下秸秆还田对砂姜黑土磷库组

成与磷素形态转化的影响尚不明晰,缺乏较为系统的研究。土壤磷库由无机磷和有机磷两部分组成,不同磷组分的含量和比例决定着土壤供磷能力。土壤磷分级是分析土壤磷库特征与评价土壤磷素有效性的重要手段^[4]。本研究依托皖北典型砂姜黑土区秸秆还田长期定位试验,探讨小麦秸秆覆盖还田和玉米秸秆粉碎旋耕还田对砂姜黑土磷素含量及形态转化的影响,以期对砂姜黑土累积态磷的活化及秸秆还田条件下的化学磷肥合理配施与农田磷素优化管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本研究在安徽省亳州市蒙城县农业科技示范场(33°09' N, 116°33' E)内进行,试验地所在区域位于华北平原南部,属暖温带半湿润季风气候,年平均气温 14.8 °C,年平均日照时数 2 410 h,年平均降水量 733 mm。试验地土壤类型为砂姜黑土,定位试验始于 2008 年,试验初始耕层(0~20 cm)土壤 pH 6.5,有机质 12.5 g·kg⁻¹,全氮 0.99 g·kg⁻¹,碱解氮 80.2 mg·kg⁻¹,有效磷 15.4 mg·kg⁻¹,速效钾 100.3 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

田间试验采用该区域典型的小麦-玉米一年两熟轮作制度,供试小麦品种为“烟农 19”,玉米品种为“郑单 958”。试验设置 5 个处理:不施肥(CK)、常规施肥(F)、常规施肥+小麦秸秆单季还田(FWS)、常规施肥+玉米秸秆单季还田(FMS)、常规施肥+小麦玉米秸秆双季还田(FWMS)。常规施肥量为:小麦季 N 240.0 kg·hm⁻², P₂O₅ 90.0 kg·hm⁻², K₂O 90.0 kg·hm⁻²;玉米季 N 300.0 kg·hm⁻², P₂O₅ 67.5 kg·hm⁻², K₂O 67.5 kg·hm⁻²。小麦及玉米季磷、钾肥均以基肥形式一次性施入,小麦季氮肥基肥、拔节期追肥用量分别为 132.0 kg·hm⁻²(占比 55.0%)和 108.0 kg·hm⁻²(占比 45.0%),玉米季氮肥基肥、6 叶展期追肥和 12 叶展期追肥用量分别为 67.5(占比 22.5%)、112.5 kg·hm⁻²(占比 37.5%)和 120.0 kg·hm⁻²(占比 40.0%)。部分氮肥及全部磷、钾肥以复合肥(N、P₂O₅、K₂O 比例为 15:15:15)形式施入,氮肥不足部分由尿素补充。小麦秸秆还田方式为全量粉碎覆盖还田,还田量约为 7 500 kg·hm⁻²;玉米秸秆还田方式为全量粉碎旋耕还田,还田量约为 12 000 kg·hm⁻²。小麦播种量为 135 kg·hm⁻²,玉米播种量为 37.5 kg·hm⁻²。除施肥差异外,各处理病虫害草害等其他田间管理措施按照当地常规操作进行并保持一致。

考虑到机械化播种、收获及秸秆粉碎还田的可操作性,试验设置为大区试验,取样时将每个大区划分为 3 块区域(5.4 m×8.5 m),作为 3 次重复。

1.3 测定项目与方法

于 2020 年 5 月底小麦成熟期采用五点取样法用土钻采集各试验小区耕层(0~20 cm)土壤,剔除可见的植物根系和有机残体及石砾等杂物,置于室内阴凉处自然风干,碾碎磨细后一部分过 2 mm 筛,用于测定土壤有效磷含量及有机磷分级,另一部分过 0.149 mm 筛,用于测定土壤全磷含量及无机磷分级。土壤有效磷含量采用 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法测定,土壤全磷含量采用 NaOH 熔融-钼锑抗比色法测定。土壤无机磷分级采用蒋柏藩和顾益初提出的石灰性土壤无机磷分级方法^[5],分级顺序依次为磷酸二钙(Ca₂-P, 0.25 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 浸提)、磷酸八钙(Ca₈-P, 0.5 mol·L⁻¹ NH₄OAc 浸提)、磷酸铝(Al-P, 0.5 mol·L⁻¹ NH₄F 浸提)、磷酸铁(Fe-P, 0.1 mol·L⁻¹ NaOH-0.1 mol·L⁻¹ Na₂CO₃ 浸提)、闭蓄态磷(O-P, 0.3 mol·L⁻¹ Na₃C₆H₅O₇+0.5 mol·L⁻¹ NaOH 浸提)、磷灰石(Ca₁₀-P, 0.25 mol·L⁻¹ H₂SO₄ 浸提)。土壤有机磷分级采用 Bowman-Cole 有机磷分级体系^[6],将有机磷分为活性有机磷(0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 浸提)、中活性有机磷(1.0 mol·L⁻¹ H₂SO₄+0.5 mol·L⁻¹ NaOH 浸提)、中稳性有机磷(0.5 mol·L⁻¹ NaOH 浸提,在 pH 1.0~1.8 条件下不发生沉淀的富里酸态有机磷)和高稳性有机磷(0.5 mol·L⁻¹ NaOH 浸提,在 pH 1.0~1.8 条件下发生沉淀的胡敏酸态有机磷)。

1.4 数据统计分析

土壤磷活化系数=土壤有效磷含量(mg·kg⁻¹)/土壤全磷含量(mg·kg⁻¹)×100%

相关试验数据处理和图表制作由 Excel 2016 软件完成,利用 SPSS 24.0 软件中的 Duncan 法进行处理间差异显著性检验,在 DPS 10.0 软件中采用相关分析和通径分析方法明确不同磷组分对有效磷的贡献大小及作用方式。

2 结果与分析

2.1 不同处理对砂姜黑土磷素含量及磷活化系数的影响

由表 1 可知,常规施肥+秸秆还田处理(FWS、FMS、FWMS)与常规施肥处理(F) 12 a 后的土壤磷素含量及磷活化系数均显著高于不施肥处理(CK)($P < 0.05$)。与 F 处理相比,小麦和玉米秸秆还田对土壤

全磷、无机磷、有机磷、有效磷含量及磷活化系数均有显著的提升效果。FWS、FMS和FWMS处理的土壤全磷含量较F处理分别增加了12.6%、7.5%和16.6%,以FWMS处理的土壤全磷含量最高;FWS、FMS和FWMS的无机磷总量分别增加了10.3%、5.6%和8.1%;有机磷总量分别增加了9.6%、14.9%和9.1%;有效磷含量的增加幅度较大,分别为17.6%、16.4%和21.6%。FWS和FWMS处理的土壤无机磷总量与有机磷总量的比值与F处理无明显差异。FWS、FMS及FWMS处理的土壤磷活化系数均显著高于F处理,分别增加了13.9%、20.4%和14.0%。这表明秸秆还田可促进土壤中全磷向有效磷的转化,有助于提高土壤中磷的有效性。不同秸秆还田处理间土壤无机磷、有机磷总量和有效磷含量及磷活化系数无显著差异。

2.2 不同处理对砂姜黑土无机磷组分含量的影响

与CK处理相比,F处理下的土壤各无机磷组分含量均发生了不同程度的变化,其中Al-P、Fe-P和Ca₂-P的含量显著增加($P<0.05$),Ca₈-P和O-P含量略有增加,Ca₁₀-P含量略有下降(表2)。在常规施肥的基础上进行秸秆还田均显著提高了土壤Ca₂-P、Al-P及Fe-P含量,与F处理相比,FWS、FMS和FWMS处理Ca₂-P含量分别增加了32.3%、28.4%和43.8%,Al-P含量分别增加了15.3%、10.7%和13.4%,Fe-P含量的增加幅度分别为14.6%、9.2%和9.6%。FWS、FMS和

FWMS处理的Ca₈-P含量均高于F处理,分别增加了19.0%、91.7%和61.4%,其中FMS和FWMS处理与F处理相比差异显著。秸秆还田条件下4种土壤无机磷组分的绝对增量排序为Ca₂-P>Al-P>Fe-P>Ca₈-P,相对增幅排序则为Ca₈-P>Ca₂-P>Al-P>Fe-P。小麦玉米秸秆还田对土壤O-P含量的影响不显著;与F处理相比,FMS和FWMS处理的土壤Ca₁₀-P含量下降。

2.3 不同处理对砂姜黑土有机磷组分含量的影响

由表3可知,与CK处理相比,F处理土壤活性有机磷、中活性有机磷和中稳性有机磷含量分别显著增加了110.8%、43.2%和32.0%,土壤高稳性有机磷含量在F处理下有所降低。FWS、FMS、FWMS处理土壤活性有机磷、中活性有机磷和中稳性有机磷含量均显著高于F处理,其中土壤活性有机磷含量分别增加了

表3 不同处理下的砂姜黑土有机磷组分含量(mg·kg⁻¹)

Table 3 Contents of organic phosphorus fractions in lime concretion black soil under different treatments (mg·kg⁻¹)

处理 Treatment	活性有机磷 LOP	中活性有机磷 MLOP	中稳性有机磷 MR0P	高稳性有机磷 HR0P
CK	7.4±0.6c	80.7±7.6d	17.5±2.1c	25.0±6.8a
F	15.6±4.8b	115.6±4.6c	23.1±6.0b	23.3±7.4ab
FWS	20.0±4.0a	127.3±2.0b	28.5±2.5a	18.9±5.6b
FMS	18.3±4.1a	142.7±15.6a	32.2±1.5a	10.9±2.4c
FWMS	18.2±1.3a	137.2±7.3ab	29.9±0.7a	8.4±1.5c

表1 不同处理下的土壤磷素含量和磷活化系数

Table 1 Contents of soil phosphorus and phosphorus activation coefficient (PAC) under different treatments

处理 Treatment	全磷 Total P/(mg·kg ⁻¹)	无机磷 Inorganic P/(mg·kg ⁻¹)	有机磷 Organic P/(mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available P/(mg·kg ⁻¹)	磷活化系数 PAC/%
CK	403.8±9.0e	251.8±4.4c	130.7±7.3c	9.8±1.1c	2.42±0.25c
F	582.5±10.3d	360.5±21.5b	177.6±7.9b	42.6±4.2b	7.00±0.76b
FWS	656.1±14.0b	397.6±13.5a	194.6±5.3a	50.1±4.8a	7.97±0.89a
FMS	626.4±8.0c	380.6±20.5a	204.0±14.8a	49.6±6.3a	8.43±0.98a
FWMS	679.0±6.8a	389.8±15.1a	193.7±10.0a	51.8±7.5a	7.98±1.07a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments at $P<0.05$. The same below.

表2 不同处理下的砂姜黑土无机磷组分含量(mg·kg⁻¹)

Table 2 Contents of inorganic phosphorus fractions in lime concretion black soil under different treatments (mg·kg⁻¹)

处理 Treatment	Ca ₂ -P	Ca ₈ -P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca ₁₀ -P
CK	21.7±2.1c	5.76±0.78b	15.4±0.9c	35.6±5.3c	44.2±0.8a	129.1±13.4a
F	44.3±7.4b	6.16±0.12b	68.1±4.6b	71.0±1.2b	48.1±2.7a	122.1±19.6ab
FWS	58.6±3.4a	7.33±1.92b	78.5±3.0a	81.4±5.8a	45.8±1.6a	126.1±15.7a
FMS	56.9±4.0a	11.81±1.86a	75.4±8.8a	77.5±6.4a	48.9±1.8a	111.2±10.6c
FWMS	63.7±7.7a	9.94±1.52a	77.2±13.0a	77.8±5.2a	44.2±2.7a	116.0±13.7bc

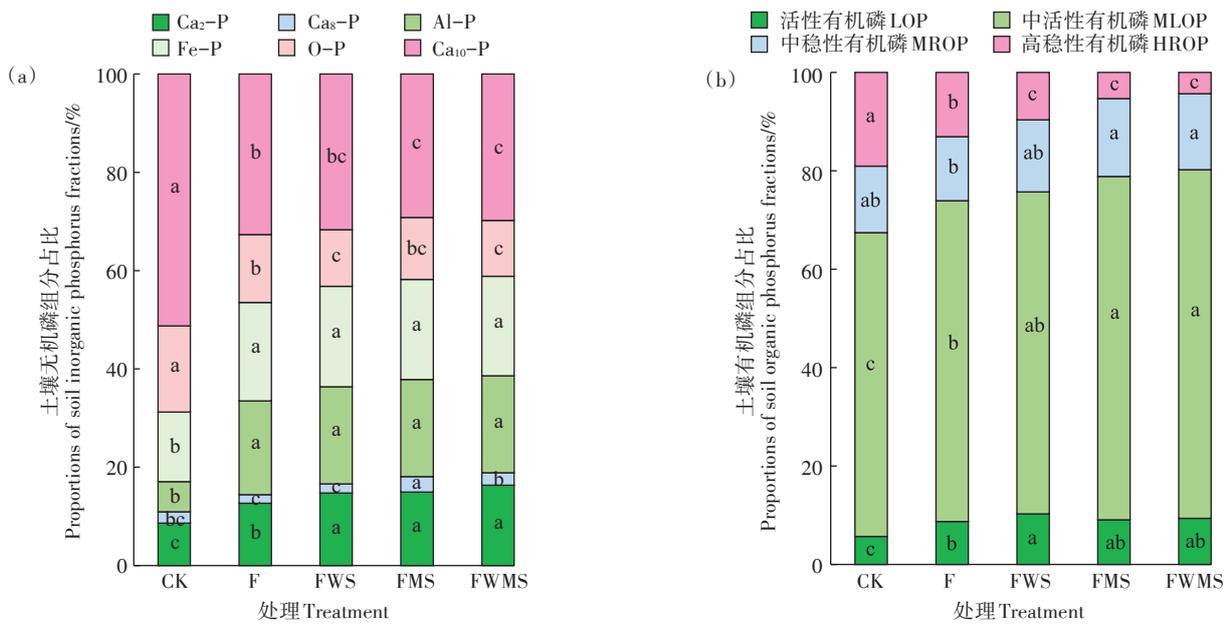
28.2%、17.3%和16.7%，中活性有机磷含量分别增加了10.1%、23.4%和18.7%，中稳性有机磷含量分别增加了23.4%、39.4%和29.4%，3种土壤有机磷组分的绝对增量排序为中活性有机磷>中稳性有机磷>活性有机磷，相对增幅排序为中稳性有机磷>中活性有机磷>活性有机磷。相较于F处理，FWS、FMS和FWMS处理土壤高稳性有机磷含量分别降低了18.9%、53.2%和64.0%，其中FMS和FWMS两个处理达显著水平。

2.4 不同处理对砂姜黑土磷组分比例的影响

由图1可知，CK处理下砂姜黑土无机磷组分中以Ca₁₀-P的占比(51.3%)最高，其次为O-P(17.5%)和Fe-P(14.2%)，而Ca₂-P、Al-P和Ca₈-P的占比相对较低，分别为8.6%、6.1%和2.3%。F处理下Ca₁₀-P的占比为32.7%，Fe-P和Al-P的占比较为接近，分别为20.0%和19.1%，O-P和Ca₂-P的占比分别为13.8%和12.7%，而Ca₈-P的占比(1.7%)最低。与CK相比，F处理下Al-P、Fe-P和Ca₂-P的占比显著增加，Ca₁₀-P与O-P的占比显著下降。FWS、FMS和FWMS处理下砂姜黑土各无机磷组分占比从高到低排序依次为Ca₁₀-P(29.2%~31.7%)>Fe-P(20.2%~20.4%)>Al-P(19.7%~19.8%)>Ca₂-P(14.8%~16.3%)>O-P(11.4%~12.6%)>Ca₈-P(1.8%~3.1%)。相较于F处理，FWS、

FMS、FWMS处理下Ca₂-P占比分别增加16.5%、18.1%和28.3%；Al-P和Fe-P占比也有上升趋势，但与F处理相比差异不显著；O-P和Ca₁₀-P的占比下降，其中FWS和FWMS处理O-P占比分别显著下降了16.7%和17.4%，FMS和FWMS处理Ca₁₀-P占比分别显著下降了10.7%和8.9%。

各处理砂姜黑土有机磷组分中均以中活性有机磷的占比最高，为61.8%~70.8%(图1)，CK处理土壤高稳性有机磷和中稳性有机磷占比分别为19.1%和13.5%，活性有机磷的占比最低，仅为5.7%。F处理下4种土壤有机磷组分占比从高到低排序依次为中活性有机磷(65.2%)>高稳性有机磷(13.1%)≈中稳性有机磷(13.0%)>活性有机磷(8.7%)。与CK相比，F处理下活性有机磷和中活性有机磷占比显著增加，而高稳性有机磷占比显著下降。秸秆还田处理下土壤有机磷组分占比从高到低排序依次为中活性有机磷(65.4%~70.8%)>中稳性有机磷(14.6%~15.8%)>活性有机磷(9.1%~10.3%)>高稳性有机磷(4.3%~9.7%)。相较于F处理，秸秆还田下中稳性有机磷、中活性有机磷及活性有机磷的占比有不同程度的增加，同时高稳性有机磷组分的占比显著下降。FMS和FWMS处理下中活性有机磷组分占比分别比F处理显著增加了7.1%和8.5%，中稳性有机磷组分占比分别显著增



不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)
Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at P<0.05

图1 不同处理对砂姜黑土无机磷和有机磷组分占比的影响

Figure 1 Proportions of inorganic and organic phosphorus fractions in lime concretion black soil under different treatments

加了21.5%和18.5%。

2.5 砂姜黑土磷组分与有效磷的关系分析

相关性分析结果表明,与砂姜黑土有效磷含量相关性较大的磷组分包括 Al-P、Fe-P、Ca₂-P、中活性有机磷、活性有机磷、中稳性有机磷和高稳性有机磷(表4)。其中 Al-P、Fe-P 和 Ca₂-P 这3种无机磷组分以及中活性有机磷、活性有机磷和中稳性有机磷这3种有机磷组分与土壤有效磷含量呈极显著正相关关系($P < 0.01$),而高稳性有机磷与土壤有效磷含量呈显著负相关关系($P < 0.05$)。由此可知,砂姜黑土有效磷含量高低与 Al-P、Fe-P、Ca₂-P 和中活性有机磷含量关系较为紧密。此外,中活性有机磷组分与 Ca₂-P、Al-P 和 Fe-P 这3种无机磷组分均呈极显著正相关关系($P < 0.01$),Fe-P 和 Ca₂-P 均与 Al-P 呈极显著正相关关系

($P < 0.01$)。

通径分析结果表明(表5),砂姜黑土中对有效磷直接影响较大的磷组分为 Al-P(0.63) > Ca₂-P(0.38) > Fe-P(-0.28) > 中活性有机磷(0.20),由此可知,对砂姜黑土有效磷直接正向贡献较大的磷组分为 Al-P 和 Ca₂-P,其次为中活性有机磷。Fe-P 对砂姜黑土有效磷的直接通径系数为负值,但其可通过 Al-P 和 Ca₂-P 对有效磷产生较大的正向间接影响。同时,Ca₂-P 及中活性有机磷和活性有机磷通过 Al-P 影响有效磷的正向间接通径系数均较大。高稳性有机磷对有效磷的直接贡献为负效应,而且高稳性有机磷通过 Al-P、Ca₂-P 及中活性有机磷对有效磷的间接通径系数均为较大的负值。综合相关分析及通径分析的结果,可以认为本研究砂姜黑土中 Al-P、Ca₂-P、Fe-P 及中活

表4 砂姜黑土不同磷组分与有效磷的相关关系

Table 4 Correlation between phosphorus fractions and available P in lime concretion black soil

磷组分 Phosphorus fraction	有效磷 Available P	Ca ₂ -P	Ca ₈ -P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca ₁₀ -P	活性有机磷 LOP	中活性有机磷 MLOP	中稳性有机磷 MROP
Ca ₂ -P	0.95**									
Ca ₈ -P	0.48	0.59*								
Al-P	0.98**	0.93**	0.49							
Fe-P	0.96**	0.93**	0.51*	0.96**						
O-P	0.32	0.19	0.11	0.30	0.34					
Ca ₁₀ -P	-0.28	-0.41	-0.53*	-0.29	-0.32	-0.27				
活性有机磷 LOP	0.83**	0.75**	0.45	0.83**	0.87**	0.27	-0.20			
中活性有机磷 MLOP	0.92**	0.93**	0.64**	0.90**	0.90**	0.22	-0.41	0.74**		
中稳性有机磷 MROP	0.80**	0.81**	0.74**	0.77**	0.76**	0.30	-0.16	0.70**	0.81**	
高稳性有机磷 HROP	-0.60*	-0.67**	-0.72**	-0.51*	-0.56*	-0.02	0.28	-0.50*	-0.64**	-0.71**

注:**和*分别表示在0.01和0.05水平下显著相关。

Note:** and * indicate correlation is significant at the level of 0.01 and 0.05, respectively.

表5 砂姜黑土不同磷组分对有效磷的通径系数

Table 5 Path analysis of phosphorus fractions and available P in lime concretion black soil

磷组分 Phosphorus fraction	直接通径系数 Direct path coefficient	间接通径系数 Indirect path coefficient									
		Ca ₂ -P	Ca ₈ -P	Al-P	Fe-P	O-P	Ca ₁₀ -P	活性有机磷 LOP	中活性有机磷 MLOP	中稳性有机磷 MROP	高稳性有机磷 HROP
Ca ₂ -P	0.38		-0.07	0.59	-0.26	0.03	-0.04	0.10	0.19	-0.08	0.10
Ca ₈ -P	-0.11	0.23		0.31	-0.14	0.01	-0.05	0.06	0.13	-0.07	0.11
Al-P	0.63	0.36	-0.06		-0.26	0.04	-0.03	0.11	0.18	-0.07	0.08
Fe-P	-0.28	0.36	-0.06	0.60		0.05	-0.03	0.12	0.18	-0.07	0.09
O-P	0.14	0.07	-0.01	0.19	-0.09		-0.02	0.04	0.04	-0.03	0.00
Ca ₁₀ -P	0.09	-0.16	0.06	-0.19	0.09	-0.04		-0.03	-0.08	0.02	-0.04
活性有机磷 LOP	0.14	0.29	-0.05	0.52	-0.24	0.04	-0.02		0.15	-0.07	0.08
中活性有机磷 MLOP	0.20	0.36	-0.07	0.56	-0.25	0.03	-0.04	0.10		-0.08	0.10
中稳性有机磷 MROP	-0.10	0.31	-0.09	0.49	-0.21	0.04	-0.01	0.10	0.16		0.11
高稳性有机磷 HROP	-0.15	-0.26	0.08	-0.32	0.15	0.00	0.02	-0.07	-0.13	0.07	

性有机磷和活性有机磷是有效磷源, $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 O-P 和中稳性有机磷是缓效磷源, 高稳性有机磷和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 是难以利用的无效磷源。

3 讨论

作物秸秆是粮食生产的副产物, 同时也是一种重要的有机物料。秸秆还田是向土壤输入磷素的一种途径, 可在一定程度上扩增土壤磷养分库容^[17]。长期秸秆还田可增加土壤全磷含量及无机磷和有机磷含量^[7, 13, 18]。更进一步的研究表明, 土壤磷素含量对秸秆还田的响应受到土壤磷素盈亏状况的影响^[19-20]。在河北潮土小麦-玉米轮作体系中, 当土壤输入磷量低于作物输出磷量时, 秸秆长期还田对土壤全磷和无机磷含量的影响不显著; 而在土壤磷素收支盈余的情况下, 秸秆还田能显著增加土壤全磷和无机磷含量^[19]。在南方黄泥田上开展的定位试验也显示, 在土壤磷素亏缺时, 水稻秸秆长期还田下土壤全磷、无机磷和有机磷含量无明显变化^[20]。在秸秆还田对土壤磷素有效性的影响方面, 相关研究表明, 不同轮作制度下秸秆还田都能提高土壤有效磷含量^[21-23]。在江西双季稻区, 秸秆还田第1年土壤有效磷含量有升高的趋势, 到第2年土壤有效磷含量有较为明显的增加^[21]。湖北水稻-油菜轮作制度下, 秸秆还田促进土壤磷素有效化的效果从第2年开始显现, 秸秆还田4 a后土壤有效磷含量显著提高^[22]。在山东小麦-玉米轮作条件下, 玉米秸秆连续5 a单季还田可显著提高耕层土壤速效磷含量^[23]。本研究中小麦玉米秸秆长期还田显著提高了土壤全磷、无机磷和有机磷含量, 而且土壤有效磷含量在秸秆还田条件下大幅增加, 这与相关研究结果较为一致。土壤有机质含量是影响土壤磷有效性的重要因素之一, 土壤中有机组分能减缓高活性无机磷的化学固定。Meta分析结果显示, 秸秆还田可提升土壤有机质含量^[24], 有利于维持土壤磷素的有效性。同时秸秆碳向土壤的输入及土壤有机质含量的增加也为磷转化相关微生物提供了较为丰富的碳素营养, 可以促进有机磷的矿化和难溶性无机磷向有效磷源的转化, 提高土壤无效态磷的生物转化率。此外, 秸秆还田后在腐解过程中会产生有机酸类物质, 有研究表明, 作物根系分泌物中有机酸总量在秸秆还田后明显上升^[25], 这些过程在一定程度上会导致土壤pH值的降低^[26], 从而使土壤中难溶性磷化合物的溶解度得到提高。有机酸还可与土壤中铁、铝或钙离子络合, 避免这些阳离子对磷酸根的固定, 同时占

据土壤颗粒表面吸附位点, 降低磷酸根的吸附量。有机酸在有机磷的矿化及促进高稳性、中稳性有机磷向中活性、活性有机磷形态转化方面也发挥着重要作用^[27]。本定位试验的前期研究结果表明, 砂姜黑土的有机质含量在小麦玉米秸秆还田条件下得到提升, 同时土壤pH值有所下降^[10, 28]; 另有研究显示, 小麦秸秆覆盖还田能显著提高砂姜黑土中溶磷菌数量^[29]。秸秆还田的这些效应有益于砂姜黑土中累积态磷的活化。

土壤磷库包括无机磷和有机磷两部分, 土壤中无机磷和有机磷各组分处于动态平衡之中, 其转化方向在很大程度上决定着土壤磷素的有效性。潮土土壤无机磷组分中的 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 、 Al-P 和 Fe-P 的含量均随磷肥施用量的增加显著增加, 而 O-P 和 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 的含量无显著变化^[19]。对灰漠土的研究发现, 施用磷肥可以显著提高与土壤有效磷极显著正相关的无机磷组分 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 Fe-P 的含量, 而对 O-P 的含量无显著影响^[30]。本研究结果显示, 与不施肥处理相比, 常规施肥处理下砂姜黑土 O-P 含量无显著变化, Al-P 、 Fe-P 和 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 含量显著增加, 这表明施入土壤中的磷肥主要分配在这3种磷组分中。秸秆还田作为秸秆资源化利用及培肥地力的一种重要措施, 对土壤磷形态转化过程也具有重要影响。在河南潮土小麦玉米轮作体系下开展的长期定位试验表明, 玉米秸秆还田下土壤无机磷组分中缓效态磷 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 的含量及所占比例明显上升, 而难溶性无效态磷 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 的含量和占比下降^[7]。砂姜黑土稻麦轮作下的3 a秸秆还田定位试验表明, 在常规施肥条件下, 秸秆还田使砂姜黑土中 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 和 Fe-P 的含量及占比上升, 同时 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 的含量及占比下降, 促进了潜在磷源向有效磷源的转化^[12]。但也有研究发现, 在南方黄泥田, 水稻秸秆长期还田对土壤无机磷与有机磷组分的含量及占比无显著影响^[20]。秸秆还田对土壤中各形态磷的影响程度可能与土壤磷素盈亏状况有关, 如在河北潮土小麦玉米轮作制中, 土壤磷素为盈余条件时, 长期秸秆还田能显著增加土壤无机磷组分 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 和 Al-P 的含量, 当土壤磷亏缺时, 秸秆还田下除 $\text{Ca}_8\text{-P}$ 的含量有所增加外, 其他无机磷组分含量无显著变化^[19]。本研究发现, 小麦玉米秸秆还田能显著提高砂姜黑土中有效磷源 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 、 Al-P 和 Fe-P 的含量及 $\text{Ca}_2\text{-P}$ 的占比, 降低缓效磷源 O-P 及无效磷源 $\text{Ca}_{10}\text{-P}$ 的占比, 与前述研究结果较为一致。在秸秆还田对土壤有机磷组分影响的研究方面, 皖北砂姜黑土上的长期定位试

验结果表明,小麦-大豆轮作下小麦秸秆长期还田显著增加了土壤活性有机磷、中活性有机磷及中稳性有机磷的含量,其中,活性有机磷和中稳性有机磷的增幅较大^[13];黄棕壤稻麦轮作下秸秆与化肥长期配合施用可提高土壤活性有机磷、中活性有机磷和中稳性有机磷含量,而高稳性有机磷组分的占比则下降^[6]。本研究中小麦玉米秸秆还田显著增加了砂姜黑土活性有机磷、中活性有机磷及中稳性有机磷的含量,其中,中稳性有机磷含量的增幅最大,高稳性有机磷组分的占比在秸秆还田条件下显著降低,与上述研究的结果基本一致。值得注意的是,本试验发现,小麦玉米秸秆双季还田处理的土壤全磷含量高于秸秆单季还田处理,这可能主要是由于秸秆双季还田条件下的土壤磷素输入量相对较大,但秸秆双季还田与秸秆单季还田在砂姜黑土磷活化系数的提升效果方面无显著差异,而且秸秆双季还田与单季还田下有效磷源 Al-P、Ca₂-P、Fe-P 及活性有机磷的含量较为接近。土壤微生物是土壤磷素形态转化的关键驱动因子^[31]。在皖北地区开展的长期施肥试验表明,砂姜黑土中具有溶磷作用的拟杆菌门(Bacteroidetes)及 *Flavisolibacter*、*Terracoccus* 两个属的相对丰度与土壤有机碳含量呈显著或极显著相关^[32]。本定位试验的前期研究发现,砂姜黑土中有机碳的累积速率较慢,秸秆双季还田与单季还田处理下的土壤有机质含量无明显差异^[33]。而从短期来看,秸秆双季还田与单季还田的差异主要体现在周年的秸秆还田量上。在皖北砂姜黑土区进行的大田试验发现,土壤中溶磷菌数量随秸秆当季还田量的增加呈先增加后下降的趋势,当秸秆还田量增加到一定程度后,对土壤磷酸酶活性的影响不再明显^[29]。这些研究的结论可在一定程度上解释本试验得到的结果。

本研究明确了小麦和玉米秸秆还田条件下砂姜黑土磷形态转化特征,秸秆还田可促进难利用无效磷源向有效态磷及缓效态磷转化,有助于构建可利用磷占比较高的土壤磷库,但其机理有待进一步探究。今后可重点关注秸秆还田条件下砂姜黑土中驱动磷素循环的关键微生物类群的变化特征及其主要影响因素,这将有助于从微生物学角度揭示秸秆还田提高土壤磷有效性的内在机理,也可为土壤磷素循环过程的定向调控提供理论依据。在我国北方麦区布置的多点试验表明,在土壤有效磷含量为 25~30 mg·kg⁻¹ 时,小麦产量达到最高,土壤有效磷含量过高反而导致小麦穗数和千粒质量下降^[34]。同时在土壤有效磷含量

较高的情况下,农田磷素迁移并引发水体富营养化的风险加大^[35]。本研究秸秆还田处理下的土壤有效磷含量在 50 mg·kg⁻¹ 左右,处于较高的磷素水平,需引起关注。相关研究表明,在保证作物产量的前提下,秸秆还田可替代一定比例的化学磷肥投入^[36]。建议在皖北砂姜黑土区通过秸秆还田结合化学磷肥适量减施的方式,促进土壤累积态磷释放,提高磷素利用率并降低磷流失风险,实现农田系统磷素优化管理和小麦、玉米绿色生产。

4 结论

(1) 小麦-玉米轮作制中秸秆单季或双季还田均可显著提升砂姜黑土全磷、有效磷含量及土壤磷活化系数,增加幅度分别为 7.5%~16.6%、16.4%~21.6% 和 13.9%~20.4%;显著提高有效磷源 Ca₂-P、Al-P、Fe-P、活性有机磷和中活性有机磷的含量,其中 Ca₂-P 和活性有机磷含量的增幅分别高达 28.4%~43.8% 和 16.7%~28.2%;小麦玉米秸秆还田可增加 Ca₂-P 和中活性有机磷的占比,降低缓效磷源 O-P 及无效磷源 Ca₁₀-P 和高稳性有机磷的占比。

(2) 砂姜黑土中 Al-P、Fe-P、Ca₂-P 和中活性有机磷与有效磷呈极显著正相关关系,其中 Al-P 和 Ca₂-P 对有效磷的直接影响最大,两者对有效磷的直接通径系数分别为 0.63 和 0.38, Fe-P 可通过 Al-P 和 Ca₂-P 间接影响有效磷。

参考文献:

- [1] 闫湘,金继运,梁鸣早.我国主要粮食作物化肥增产效应与肥料利用效率[J].土壤,2017,49(6):1067-1077. YAN X, JIN J Y, LIANG M Z. Fertilizer use efficiencies and yield-increasing rates of grain crops in China[J]. *Soils*, 2017, 49(6):1067-1077.
- [2] HUANG J, XU C C, RIDOUTT B G, et al. Nitrogen and phosphorus losses and eutrophication potential associated with fertilizer application to cropland in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 159:171-179.
- [3] MA J, LIU Y, HE W, et al. The long-term soil phosphorus balance across Chinese arable land[J]. *Soil Use and Management*, 2018, 34(3):306-315.
- [4] 卫凯平,武慧君,黄莉,等.农业生产系统氮磷环境影响分析——以安徽省为例[J].农业环境科学学报,2018,37(8):1802-1810. WEI K P, WU H J, HUANG L, et al. Analysis of environmental impact derived from nitrogen and phosphorus in agricultural production systems: A case study of Anhui Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(8):1802-1810.
- [5] ZHU J, LI M, WHELAN M. Phosphorus activators contribute to legacy phosphorus availability in agricultural soils: A review[J]. *Science of the*

- Total Environment*, 2018, 612:522–537.
- [6] 徐阳春, 沈其荣, 茆泽圣. 长期施用有机肥对土壤及不同粒级中有机磷含量与分配的影响[J]. 土壤学报, 2003, 40(4):593–598. XU Y C, SHEN Q R, MAO Z S. Influences of long-term fertilization on the contents and distributions of forms of organic P in soil and soil particle sizes[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(4):593–598.
- [7] 郭斗斗, 黄绍敏, 张珂珂, 等. 有机无机外源磷素长期协同使用对潮土磷素有效性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(6):1651–1659. GUO D D, HUANG S M, ZHANG K K, et al. Effects of long-term synergistic use of organic and inorganic exogenous P on phosphorus availability in fluvo-aquic soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24(6):1651–1659.
- [8] 柴如山, 徐悦, 程启鹏, 等. 安徽省主要作物秸秆养分资源量及还田利用潜力[J]. 中国农业科学, 2021, 54(1):95–109. CHAI R S, XU Y, CHENG Q P, et al. Nutrient resource quantity of main crop straw and utilization potential under straw returning in Anhui Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(1):95–109.
- [9] 李德成, 张甘霖, 龚子同. 我国砂姜黑土土种的系统分类归属研究[J]. 土壤, 2011, 43(4):623–629. LI D C, ZHANG G L, GONG Z T. On taxonomy of Shajiang black soils in China[J]. *Soils*, 2011, 43(4):623–629.
- [10] 王擎运, 陈景, 杨远照, 等. 长期秸秆还田对典型砂姜黑土胀缩特性的影响机制[J]. 农业工程学报, 2019, 35(14):119–124. WANG Q Y, CHEN J, YANG Y Z, et al. Effect mechanism of long-term straw returning on shrinkage characteristic in typical Shajiang black soil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(14):119–124.
- [11] 饶继翔, 陈昊, 吴兴国, 等. 不同秸秆还田方式对土壤线虫群落特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(10):2473–2480. RAO J X, CHEN H, WU X G, et al. Effects of different straw returning methods on soil nematode community characteristics[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(10):2473–2480.
- [12] 赵庆雷, 信彩云, 王瑜, 等. 稻麦轮作区连续秸秆还田和施肥条件下砂姜黑土无机磷分布特征[J]. 草业学报, 2018, 27(12):58–68. ZHAO Q L, XIN C Y, WANG Y, et al. Characteristics of inorganic phosphorus in lime concretion black soils under continuous straw-return and fertilization in a rice-wheat rotation area[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(12):58–68.
- [13] 王道中, 郭熙盛. 长期施肥对砂姜黑土有机磷组分及其有效性的影响[J]. 土壤, 2009, 41(1):79–83. WANG D Z, GUO X S. Effects of long-term fertilization on organic phosphorus fractions and availability in Shajiang black soil[J]. *Soils*, 2009, 41(1):79–83.
- [14] 汪洪, 宋书会, 张金尧, 等. 土壤磷形态组分分级及³¹P-NMR技术应用研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(2):512–523. WANG H, SONG S H, ZHANG J Y, et al. Research advance in soil phosphorus fractionations and their characterization by chemical sequential methods and ³¹P-NMR techniques[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(2):512–523.
- [15] 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. Methods of agrochemical analysis of soil[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [16] BOWMAN R A, COLE C V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils[J]. *Soil Science*, 1978, 125(2):95–101.
- [17] 柴如山, 程启鹏, 陈翔, 等. 安徽省县域麦稻玉米秸秆时空分异特征与还田养分输入量测算[J]. 农业工程学报, 2021, 37(20):234–247. CHAI R S, CHENG Q P, CHEN X, et al. Spatio-temporal variations of wheat, rice and maize straw in major grain-producing counties of Anhui Province and utilization potential of straw nutrient returning to field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(20):234–247.
- [18] 韩晓飞, 高明, 谢德体, 等. 长期定位施肥条件下紫色土无机磷形态演变研究[J]. 草业学报, 2016, 25(4):63–72. HAN X F, GAO M, XIE D T, et al. Inorganic phosphorus in a regosol (purple) soil under long-term phosphorus fertilization[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2016, 25(4):63–72.
- [19] 黄欣欣, 廖文华, 刘建玲, 等. 长期秸秆还田对潮土土壤各形态磷的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(3):779–789. HUANG X X, LIAO W H, LIU J L, et al. Effects of long-term straw return on various fractions of phosphorus in fluvo-aquic soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(3):779–789.
- [20] 林诚, 王飞, 何春梅, 等. 长期不同施肥对南方黄泥田磷库及其形态的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(3):541–549. LIN C, WANG F, HE C M, et al. Effects of long term fertilization on phosphorus pools and forms in yellow paddy fields of southern China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2014, 20(3):541–549.
- [21] 成臣, 汪建军, 程慧煌, 等. 秸秆还田与耕作方式对双季稻产量及土壤肥力质量的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(1):247–257. CHENG C, WANG J J, CHENG H H, et al. Effects of straw returning and tillage system on crop yield and soil fertility quality in paddy field under double-cropping-rice system[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(1):247–257.
- [22] 王昆昆, 廖世鹏, 任涛, 等. 连续秸秆还田对油菜水稻轮作土壤磷素有效性及作物磷素利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2020, 53(1):94–104. WANG K K, LIAO S P, REN T, et al. Effect of continuous straw returning on soil phosphorus availability and crop phosphorus utilization efficiency of oilseed rape-rice rotation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(1):94–104.
- [23] 陈金, 庞宏伟, 韩明明, 等. 耕作模式对土壤生物活性与养分有效性及冬小麦产量的影响[J]. 作物学报, 2017, 43(8):1245–1253. CHEN J, PANG D W, HAN M M, et al. Effects of tillage patterns on soil biological activity, availability of soil nutrients and grain yield of winter wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(8):1245–1253.
- [24] BERHANE M, XU M, LIANG Z Y, et al. Effects of long-term straw return on soil organic carbon storage and sequestration rate in north China upland crops: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(4):2686–2701.
- [25] 徐国伟, 李帅, 赵永芳, 等. 秸秆还田与施氮对水稻根系分泌物及氮素利用的影响研究[J]. 草业学报, 2014, 23(2):140–146. XU G W, LI S, ZHAO Y F, et al. Effects of straw returning and nitrogen fertilizer application on root secretion and nitrogen utilization of rice[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(2):140–146.

- [26] ZHAO X, LIU B Y, LIU S L, et al. Sustaining crop production in China's cropland by crop residue retention: A meta-analysis[J]. *Land Degradation & Development*, 2019, 31(6):694-709.
- [27] 王永壮, 陈欣, 史奕, 等. 低分子量有机酸对土壤磷活化及其机制研究进展[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(7):2189-2198. WANG Y Z, CHEN X, SHI Y, et al. Review on the effects of low-molecular-weight organic acids on soil phosphorus activation and mechanisms[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(7):2189-2198.
- [28] 陈曦, 张敬智, 张雅洁, 等. 小麦-玉米秸秆连续还田对土壤有机质红外光谱特征及氮素形态的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(8):973-978. CHEN X, ZHANG J Z, ZHANG Y J, et al. Effect of continuous wheat and maize straw incorporation on soil nitrogen and Fourier transform infrared spectroscopic (FTIR) characterization of soil organic matter[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(8):973-978.
- [29] 张向前, 陈欢, 赵竹, 等. 不同秸秆覆盖水平对砂姜黑土生物学性状的影响[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(4):610-616. ZHANG X Q, CHEN H, ZHAO Z, et al. Effects of different straw mulching levels on biological characteristics of lime concretion black soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(4):610-616.
- [30] 赵靛, 侯振安, 柴颖, 等. 长期施磷对灰漠土无机磷形态的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(3):236-242. ZHAO J, HOU Z A, CHAI Y, et al. Effect of P rate on soil inorganic phosphorus forms in grey desert soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(3):236-242.
- [31] RICHARDSON A E, SIMPSON R J. Soil microorganisms mediating phosphorus availability[J]. *Plant Physiology*, 2011, 156(3):989-996.
- [32] 马垒, 郭志彬, 王道中, 等. 长期三水平磷肥施用梯度对砂姜黑土细菌群落结构和酶活性的影响[J]. *土壤学报*, 2019, 56(6):1459-1470. MA L, GUO Z B, WANG D Z, et al. Effect of long-term application of phosphorus fertilizer on soil bacterial community structure and enzymatic activity in lime concretion black soil relative to P application rate[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(6):1459-1470.
- [33] 王擎运, 杨远照, 徐明岗, 等. 长期秸秆还田对砂姜黑土矿质复合态有机质稳定性的影响[J]. *土壤学报*, 2019, 56(5):1108-1117. WANG Q Y, YANG Y Z, XU M G, et al. Effects of long-term straw returning on stability of mineral-complexed organic matter in Shajiang black soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(5):1108-1117.
- [34] 马悦, 田怡, 于杰, 等. 北方麦区土壤有效磷阈值及小麦产量、籽粒氮磷钾含量对监控施肥的响应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, 27(10):1675-1691. MA Y, TIAN Y, YU J, et al. Threshold of soil available P and the response of wheat yield and grain N, P, and K concentrations to test-integrated fertilizer application in the northern wheat production region of China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(10):1675-1691.
- [35] ZHOU J, ZHANG Y F, WU K B, et al. National estimates of environmental thresholds for upland soil phosphorus in China based on a meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 780:146677.
- [36] WEI K, CHEN Z H, JIANG N, et al. Effects of mineral phosphorus fertilizer reduction and maize straw incorporation on soil phosphorus availability, acid phosphatase activity, and maize grain yield in north-east China[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2021, 67(1):66-78.

(责任编辑:宋潇)