文章编号:1000-7601(2025)05-0177-09 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2025.05.18

黑垆土磷素组分对长期不同施肥处理的响应

冶赓康[1],俄胜哲[1,2],袁金华[2],杨云涛[2],路港滨[1],张 鹏[1],刘雅娜[1]

(1.甘肃农业大学资源与环境学院,甘肃 兰州 730070;2.甘肃省农业科学院土壤肥料与节水农业研究所,甘肃 兰州 730070)

摘 要:为科学管理土壤磷素营养,以甘肃省泾川县的黑垆土为研究对象,设 6 个试验处理,包括不施肥(CK)、单施氮肥(N)、氮磷配施(NP)、秸秆加氮磷肥(SNP)、农家肥(M)、农家肥加氮磷肥(MNP),在长期定位施肥条件下对黑垆土进行磷组分含量测定,并进行相关性分析。结果表明:(1)与不施肥处理(CK)相比,长期施用氮磷肥(NP)、农家肥(M)、农家肥加氮磷肥(MNP)显著增加了土壤全磷含量,分别增加 212.47、382.39、600.54 mg·kg^{-1};施用磷肥的 3 个处理(NP、SNP、MNP)及施用农家肥(M)显著增加了土壤速效磷含量,分别增加 6.70、7.57、42.99、29.25 mg·kg^{-1};除单施氮肥(N)外,其他处理显著增加了 Ca_2-P、Ca_8-P、Fe-P、Al-P 含量,其中以 MNP 处理增加最多,分别增加 42.80、122.10、28.10、61.70 mg·kg^{-1}。(2)相关性分析结果表明,全磷含量与 Ca_2-P、Ca_8-P、Fe-P、Al-P 呈极显著正相关关系(P<0.01),其中 Ca_8-P 的 R^2 系数最大,解释度高达 88.88%,其次为 Ca_2-P、Al-P、Fe-P;速效磷含量与 Ca_2-P、Ca_8-P、Fe-P、Al-P 呈极显著正相关关系(P<0.01),Ca_2-P 的 R^2 系数最大,解释度高达 97.90%,其次为 Ca_8-P、Al-P 和 Fe-P。综上所述,长期不同施肥方式(NP、SNP、MNP、M)对黑垆土磷组分均有一定的影响,除单施氮肥(N)外,其他处理均可增加活性较高磷组分含量,对于 Ca_2-P、Ca_8-P、Fe-P、Al-P 含量,农家肥加氮磷肥(MNP)增加效果最佳;对于 O-P 含量,施农家肥(M)增加效果最佳。5 个施肥处理潜在磷源(Ca_{10}-P)含量较 CK 均显著降低。Ca_8-P、Ca_2-P、Al-P、Fe-P 与全磷含量呈极显著正相关关系,其中 Ca_8-P 与全磷含量相关系数最大(R^2=0.887);Ca_2-P、Al-P、Ca_8-P、Fe-P 与速效磷含量呈极显著正相关关系,其中 Ca_2-P 与速效磷相关系数最大(R^2=0.979)。

关键词:黑垆土;无机磷组分;施肥方式;长期施肥

中图分类号:S153.6; S158.3 **文献标志码**:A

Response of phosphorus components in black loessial soil to long-term different fertilization treatments

YE Gengkang[1], E Shengzhe[1,2], YUAN Jinhua[2], YANG Yuntao[2], LU Gangbin[1], ZHANG Peng[1], LIU Yana[1]

(1. *College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou, Gansu* 730070, *China*; 2. *Institute of Soil and Fertilizer and Save Water Agriculture, Gansu Academy of Agricultural Sciences, Lanzhou, Gansu* 730070, *China*)

Abstract: In order to scientifically manage soil phosphorus nutrition, the black loessial soil in Jingchuan County, Gansu Province was selected as the research object. The experiment was designed with six treatments, including no fertilization (CK), nitrogen fertilizer alone (N), nitrogen and phosphorus with fertilization (NP), straw plus nitrogen and phosphorus fertilizer (SNP), farmyard manure (M), and farmyard manure plus nitrogen and phosphorus (MNP). The determination of phosphorus component content in black loessial soil by long-term targeted fertilization was studied, and correlation analysis was conducted. The results showed that, (1) Compared with no fertilization treatment (CK), long-term application of nitrogen and phosphorus fertilizer (NP), farmyard manure (M), and farmyard manure plus nitrogen and phosphorus fertilizer (MNP) significantly increased soil total phosphorus content, with increases of 212.47 mg·kg^{-1}, 382.39 mg·kg^{-1}, and 600.54 mg·kg^{-1}, respectively. The three treatments of phosphorus fertilizer (NP, SNP, and MNP) and farmyard manure (M) significantly increased soil available phosphorus content compared with the control CK, with increases of 6.70 mg·kg^{-1}, 7.57 mg

收稿日期:2024-10-09 **修回日期**:2024-12-19

基金项目:甘肃省农业科学院科研条件建设及成果转化项目(2022GAAS39);国家自然科学基金(41661072)

作者简介:冶赓康(1998-),男,青海民和人,硕士研究生,研究方向为农业资源利用。E-mail:417696153@qq.com

通信作者:俄胜哲(1978-),男,甘肃庆阳人,副研究员,博士,主要从事植物营养与土壤生态研究。E-mail:eshengzhe@163.com

· kg^{-1}, 42.99 mg · kg^{-1}, and 29.25 mg · kg^{-1}, respectively. Except for the application of nitrogen fertilizer (N) alone, other treatments significantly increased the content of Ca_2-P, Ca_8-P, Fe-P, and Al-P. Among them, the application of farmyard manure plus nitrogen-phosphorus fertilizer (MNP) increased the most, with increases of 42.80 mg · kg^{-1}, 122.10 mg · kg^{-1}, 28.10 mg · kg^{-1}, 61.70 mg · kg^{-1}, respectively. (2) The correlation analysis results showed that the total phosphorus content had an extremely significant positive correlation with Ca_2-P, Ca_8-P, Fe-P, and Al-P ($P<0.01$), with Ca_8-P having the highest R^2 coefficient and an explanatory power of 88.88%, followed by Ca_2-P, Al-P, and Fe-P. The available phosphorus content was extremely significantly positively correlated with Ca_2-P, Ca_8-P, Fe-P, and Al-P ($P<0.01$), with Ca_2-P having the highest the R^2 coefficient and an explanatory power of 97.90%, followed by Ca_8-P, Al-P, and Fe-P. In summary, long-term different fertilizer applications had a certain effect on the phosphorus components of the black loessial soil. Except for the single application of nitrogen fertilizer (N), all other treatments could increase the content of the active phosphorus components. For the contents of Ca_2-P, Ca_8-P, Fe-P, and Al-P, the combination of farmyard manure and nitrogen-phosphorus fertilizer (MNP) had the best effect on increasing the content. For the contents of O-P, the application of farmyard manure (M) had the most significant improvement. The five fertilization treatments all significantly reduced the potential phosphorus source (Ca_{10}-P) content compared to the control (CK). Ca_8-P, Ca_2-P, Al-P, and Fe-P showed extremely significant positive correlations with the total phosphorus content. Among them, Ca_8-P had the highest correlation coefficient with the total phosphorus ($R^2=0.887$), while Ca_2-P, Al-P, Ca_8-P, and Fe-P have an extremely significant positive correlation with the available phosphorus content, with Ca_2-P having the highest correlation coefficient with the available phosphorus ($R^2=0.979$).

Keywords: black loessial soil; inorganic phosphorus component; fertilization method; long-term fertilization

土壤磷素是作物生长所必需的大量营养元素之一,缺乏磷素会导致作物产量和品质下降。我国每年有1/3的土地缺磷,施用磷肥是保持土壤供磷的主要措施之一,但大量施用磷肥会导致表土磷的积累,从而增加磷素流失进入水体,进而加重环境污染的风险[1]。土壤中的磷主要分为无机磷和有机磷两种形态,无机磷是主体,一般占土壤磷库的60%~80%[2]。在我国北方的石灰质土壤中,几乎所有的无机磷都是与不同阳离子结合形成正磷酸盐,Ca-P作为主要的无机磷,占总磷含量的70%以上[3]。磷对作物的有效性取决于磷形态,王艳玲等[4]研究表明,黑土中Ca_2-P、Al-P、Fe-P含量与Olsen-P(土壤中能够被植物直接吸收利用的磷形态)含量呈极显著相关关系,且Ca_2-P对Olsen-P贡献率最大。杨艳菊等[5]针对长期施用不同肥料对栗褐土无机磷组分的研究结果表明,栗褐土中速效磷的含量与Ca_2-P、Al-P、Ca_8-P、Fe-P的含量密切相关,其中Ca_2-P、Al-P、Ca_8-P、Fe-P对速效磷的影响较大,但不同的是其研究表明栗褐土中Ca_{10}-P也与土壤速效磷含量呈显著正相关关系,这可能与不同的土壤类型有关。王永和等[6]研究石灰性土壤有机-无机肥配施对土壤供磷的影响,认为石灰性土壤中对有效磷贡献最大的为Ca_2-P,其次为Ca_8-P。尽管砂姜黑土中Ca_2-P和Ca_8-P的活性高于Al-P,但因其含量没有Al-P高,所以对Olsen-P的贡献小于Al-P[7]。白浆土中无机磷组分以O-P、Fe-P和Al-P为主,Ca-P并不是其主要形态,长期进行培肥可扩大土壤的Al-P和Fe-P库,且随着种植年限的增加,土壤中Ca-P逐渐向其他形态转化[8]。由此可见,不同土类中磷含量、磷组分对作物的有效性不尽相同。甘肃平凉黑垆土耕作区土壤的磷肥有效利用率低,已成为制约当地农业可持续发展的关键因素,因此,深入探究长期施肥对黑垆土中磷素含量以及磷组分的影响,分析不同磷形态对作物有效性的影响,对合理利用磷肥资源、提高作物产量和减少环境风险具有重要意义。

国内外学者针对长期不同施肥处理对土壤磷素变化及其有效性做了大量研究,李冬初等[9]对长期不同施肥条件下红壤磷素变化特征的研究发现,长期不施磷肥(CK、N、NK)处理的土壤速效磷(Olsen-P)含量随着试验年限的增加呈下降趋势,土壤全磷含量无显著变化;长期施用磷肥,土壤Olsen-P和全磷含量均逐年增加。对华北地区褐潮土的研究也发现,化肥配施有机肥处理土壤中Olsen-P的增加速度明显高于化肥单施处理,有机质可通过减少有机阴离子的竞争吸附位点导致的磷吸附和通过低分子量有机酸溶解矿物相关的磷来提高土壤磷的有效性。全磷和有效磷二者为衡量土壤

供磷潜力的两个重要因素,有效磷含量与全磷含量的比值为土壤磷素活化系数(*PAC*)。黄晶[10]研究表明,在磷素投入水平相同或相近的情况下,施用化肥磷处理(NPK)较施用有机肥处理(NM、NKM、M)能够显著提高土壤全磷含量、有效磷含量和磷素活化系数。长期施肥的两种黑土中,在公主岭黑土施用化学磷肥(NP、NPK)处理的土壤有效磷含量低于 40 mg·kg^{-1},而化肥配施有机肥(NPKM)处理土壤有效磷能达到 80 mg·kg^{-1};而哈尔滨黑土施用化学磷肥(NP、NPK)和化肥配施有机肥(NPKM)3 种处理均能提高土壤有效磷含量[11]。周广业等[12]研究表明,化肥和有机肥中易溶性磷在施入土壤后进行着 Ca-P 体系和 Al-P、Fe-P 体系两方面的转化,在这两方面的转化中,Ca-P 起着主导作用。张秀芝等[13]研究表明,施加有机肥可显著增加黑土不同粒级团聚体有机磷含量,黑土有机磷主要分布在小于 0.25 mm 的微团聚体中,有机肥料的施入可以促进土壤有机磷向活性较高的形态转化,有利于提高土壤磷素的有效性。然而,针对长期不同施肥是否有助于提高黑垆土磷素含量及对无机磷组分影响的研究尚且缺乏,不同施肥量对黑垆土磷素组分的相关关系尚不清楚,特别是施肥时间超过 40 年的研究极其罕见。本研究以黑垆土为研究对象,通过长期不同施肥定位控制试验来阐明其对土壤磷素含量及土壤磷素组分相关关系的影响。因此,本研究拟回答以下 2 个问题:(1)长期不同施肥对黑垆土磷组分有什么样的影响?(2)长期施肥条件下,黑垆土各无机磷组分与全磷和速效磷之间有怎样的关系?研究拟为合理施肥及有效利用土壤中的磷提供参考依据。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

试验地位于甘肃省平凉市泾川县高平镇(107°30′ E,35°16′ N),海拔 1 150 m,年均气温 8℃,≥10℃积温 2 800℃,年均降水量 540 mm,年蒸发量 1 380mm,60%的降水量集中在 7—9 月。无霜期约 172 d,干燥度 0.39,光热资源丰富,雨热同季,属黄土高原半湿润易旱区。试验地平坦,土壤类型为旱地覆盖黑垆土。土壤颗粒组成为:砂粒(2~0.02 mm)占 23.1%、细砂粒(0.02~0.002 mm)占 43.2%、黏粒(<0.002 mm)占 33.7%。试验始于 1978 年,开始时耕层(0~20 · cm)土壤 pH 值为 8.2,有机质含量为 10.75 g·kg^{-1},全氮为 0.95 g·kg^{-1},全磷为 0.57 g·kg^{-1},全钾为 2.23 g·kg^{-1},碱解氮为 65.9 mg·kg^{-1},有效磷为 6.77 mg·kg^{-1},速效钾为 163.2 mg·kg^{-1}。

1.2　田间试验设计

试验共设 6 个处理:(1)不施肥(CK);(2)单施氮肥(N 90 kg·hm^{-2},N);(3)氮磷配施(N 90 kg·hm^{-2},P_2O_5 75 kg·hm^{-2},NP);(4)秸秆(S)加氮磷肥(S 3750 kg·hm^{-2},N 90 kg·hm^{-2},每 2 年施 P_2O_5 75 kg·hm^{-2},SNP);(5)农家肥(75 t·hm^{-2},M);(6)农家肥加氮磷(M 75 t·hm^{-2},N 90 kg·hm^{-2},P_2O_5 75 kg·hm^{-2},MNP)。试验小区面积 667 m^2,随机排列。氮肥尿素(CH_4N_2O 含氮量 46%),磷肥采用磷酸二氢铵($NH_4H_2PO_4$,以 P_2O_5 计,农业级产品的含磷量为 46%),秸秆为前茬作物小麦或玉米的秸秆,农家肥为牛、马厩肥。1979 年试验开始时测定的农家肥有机质含量为 15 g·kg^{-1},N 1.7 g·kg^{-1},P 6.8 g·kg^{-1}和 K 28 g·kg^{-1}。由于未测每年土粪的养分含量,于 2012 年和 2015 年对试验地附近农户的农家肥取样分析(农户农家肥是试验用农家肥的主要来源),其农家肥平均养分含量为:有机质 19 g·kg^{-1},N 1.6 g·kg^{-1},P 1.6 g·kg^{-1},K 15 g·kg^{-1}。玉米、小麦秸秆及其根系有机碳含量都为 450 g·kg^{-1},玉米和小麦秸秆多年平均 N 含量分别为 8.0 g·kg^{-1}和 5.2 g·kg^{-1}。

1.3　栽培管理措施

磷肥、农家肥和作物秸秆在作物播前全部基施,小麦氮肥作为基肥播前全部施入。玉米氮肥的 60%作基肥,40%作追肥。试验按 2 a 春玉米-4 a 冬小麦的一年一熟轮作周期进行。1979 年试验开始的第一季作物为玉米,1993—1998 年为冬小麦连作,1999 年种植高粱,2000 年种植大豆,2001—2022 年试验再次按 2 a 春玉米-4 a 冬小麦轮作模式进行。

1.4　样品采集

于 2023 年 7 月采集土壤样品,首先将每小区均分为 3 部分,视为 3 次重复,每部分按五点取样法取样,采集 0~20 cm 耕层的土壤样品,将 5 样点的样品充分混匀成一个混合样,剔除可见的植物残茬及石子。混合样在阴凉处风干、研磨后过 2 mm 筛,使用四分法取 1/2 的土样过孔径为 0.3 mm 筛。2 mm 土样用于测定土壤速效养分,0.3 mm 土壤样品用于测定土壤磷组分含量及土壤基本理化性质。

1.5　测定方法

采用顾益初等[14]提出的方法来提取土壤中各形态磷。具体为:0.25 mol·L^{-1} NaH_2CO_3浸提磷酸二钙(Ca_2-P),1 mol·L^{-1} NH_4Ac 浸提磷酸八钙(Ca_8-P),0.3 mol·L^{-1}柠檬酸钠-$Na_2S_2O_4$-NaOH

浸提闭蓄态磷(O-P),0.5 mol·L^{-1} H_2SO_4浸提磷酸十钙(Ca_{10}-P),0.1 mol·L^{-1} NaOH-Na_2CO_3浸提铁磷酸盐(Fe-P),0.5 mol·L^{-1} NH_4F 浸提铝磷酸盐(Al-P)。采用熔融法测定土壤全磷含量,采用 0.5 mol·L^{-1} $NaHCO_3$浸提-钼锑抗比色法测定土壤速效磷含量[15]。

1.6 数据处理

采用 Excel 2016 进行数据整理及图表绘制,采用 SPSS 19.0 软件进行方差分析、多重比较(Duncan 法)和相关性分析。对土壤全磷含量和速效磷含量与无机磷组分的关系进行冗余分析(Redundancy analysis,RDA)。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理对黑垆土磷素含量及磷活化系数的影响

土壤全磷和有效磷含量代表土壤磷素肥力水平,全磷表示土壤磷库的大小,有效磷代表可被植物吸收利用的磷素水平。长期不同施肥处理下的黑垆土磷素含量发生了不同程度的变化(表 1)。长期施氮肥(N)处理的土壤全磷、速效磷含量较 CK 均有所降低,但差异不显著,这是由于长期种植作物携出大量磷素、土壤磷素耗竭所致。长期施用氮磷肥(NP)、农家肥(M)和农家肥加氮磷肥(MNP)较 CK 处理的土壤全磷、速效磷含量和磷活化系数均显著增加(P<0.05),其中以 MNP 处理增幅最大,其全磷、速效磷含量和磷活化系数较 CK 分别显著增加 61.02%和 3 256.82%,磷活化系数增加了 2.67 个百分点。这表明有机肥配施化肥不仅可以提高黑垆土磷库的积累,还有利于磷素活化。秸秆还田加氮磷肥(SNP)处理的全磷含量较 CK 有下降趋势,而速效磷含量和磷活化系数较 CK 分别显著增加 573.48%和 615.38%。

2.2 不同施肥处理对黑垆土无机磷组分的影响

由表 2 可知,与 CK 相比,不施磷肥的 2 个处理(N、M)潜在磷源(Ca_{10}-P、O-P)含量呈相反的变化,O-P 含量均显著增加,Ca_{10}-P 含量显著降低,这表明单一施肥容易发生 O-P 的固定。与 CK 处理相比,施用氮肥(N)处理的土壤有效磷源(Ca_2-P)和中等活性磷源(Ca_8-P、Al-P、Fe-P)含量变化均不显著,而施农家肥(M)有效磷源(Ca_2-P)和中等活性磷源(Ca_8-P、Al-P、Fe-P)含量显著增加,分别增加 30.2 mg·kg^{-1}、80.4 mg·kg^{-1}、38.2 mg·kg^{-1}、22.2 mg·kg^{-1}。施用磷肥的 3 个处理(NP、SNP、MNP)的有效磷源(Ca_2-P)和中等活性磷源(Ca_8-P、Al-P、Fe-P)含量较 CK 均显著增加,其中农家肥配施氮磷肥(MNP)处理增加最多,分别增加 42.8、122.1、61.7、28.1 mg·kg^{-1},而农家肥配施氮磷肥(MNP)处理 Ca_{10}-P 含量较 CK 处理显著降低,说明配施有机肥可增加土壤磷库含量,同时促进土壤中潜在磷源(Ca_{10}-P、O-P)向中等活性磷源(Ca_8-P、Al-P、Fe-P)和有效磷源(Ca_2-P)的转化。

由无机磷占全磷比例可以发现(表 3),Ca-P 是黑垆土无机磷的主体,其中 Ca_{10}-P 占比最大,其次是 Al-P、Fe-P 和 O-P。经过长期不同施肥处理后的土壤,无机磷各组分的比例发生了一定的变化。施用氮肥(N)处理的 Ca_2-P、Ca_8-P、Al-P、Fe-P 占全磷比例较 CK 处理均未发生显著变化。施农家肥(M)处理的 Ca_2-P、Ca_8-P、Al-P 和 Fe-P 占全磷比例较 CK 均显著增加。施用磷肥的 3 个处理(NP、SNP、MNP)的 Ca_2-P、Ca_8-P、Al-P 和 Fe-P 占全磷比例较 CK 均显著增加,但增幅不同,分别增加 50.0%~650.0%、17.1%~63.2%、58.3%~125.0%和 33.3%~47.6%,以 Ca_2-P 增加幅度最显著,其中农家肥加氮磷肥(MNP)处理的 Ca_2-P 占土壤全磷比

表 1 不同施肥处理对黑垆土磷素含量及磷活化系数的影响

Table 1 Effects of different fertilizer applications on phosphorus content and phosphorus activation coefficient of black loessial soil

处理 Treatment	全磷 Total phosphorus /(mg·kg^{-1})	速效磷 Olsen-P /(mg·kg^{-1})	磷活化系数 P activation coefficient/%
CK	984.21±32.2d	1.32±0.5d	0.13e
N	914.48±35.9d	0.80±0.3d	0.09e
NP	1196.68±57.4c	8.02±0.6c	0.67d
SNP	949.24±40.9d	8.89±1.6c	0.93c
M	1366.60±49.5b	30.57±2.6b	2.24b
MNP	1584.75±35.4a	44.31±1.7a	2.80a

注:表中数据为平均值±标准差,同列中的不同小写字母表示处理间在 P<0.05 水平差异显著,下同。

Note: The data in the table are represented as mean±standard deviation. Different lowercase letters indicate significant differences among treatments at the P<0.05 level. The same as below.

表 2 不同无机磷组分含量/(mg·kg^{-1})

Table 2 Inorganic phosphorus fraction content

处理 Treatment	有效磷源 Effective phosphorus	中等活性磷源 Moderately active phosphorus			潜在磷源 Potential phosphorus	
	Ca_2-P	Ca_8-P	Al-P	Fe-P	Ca_{10}-P	O-P
CK	4.4±1.0e	74.5±1.8d	24.1±1.4d	21.0±2.5d	360.1±16.5a	13.9±1b
N	3.7±1.0e	76.3±3.1d	21.6±1.9d	21.9±3d	253.6±17.2c	24.6±7.5a
NP	7.0±0.5d	106.0±2.8c	45.5±3.2c	33.4±6.1c	252.0±1.2c	22.5±2.9a
SNP	9.2±0.5c	101.7±3.6c	45.1±0.3c	38.3±4.5bc	271.3±10.3bc	15.6±1b
M	34.6±1.5b	154.9±5.8b	62.3±8.8b	43.2±8.4ab	276.6±0.7b	24.8±7.5a
MNP	47.2±1.5a	196.6±16.3a	85.8±6.8a	49.1±2.6a	273.8±13.5bc	13.9±1b

例增幅最大,其次是 Al-P、Ca_8-P、Fe-P。与 CK 相比,各试验处理(N、NP、SNP、M、MNP)的 Ca_{10}-P 占全磷比例较 CK 处理均显著降低,且 MNP 处理最为显著,降幅为 52.7%。

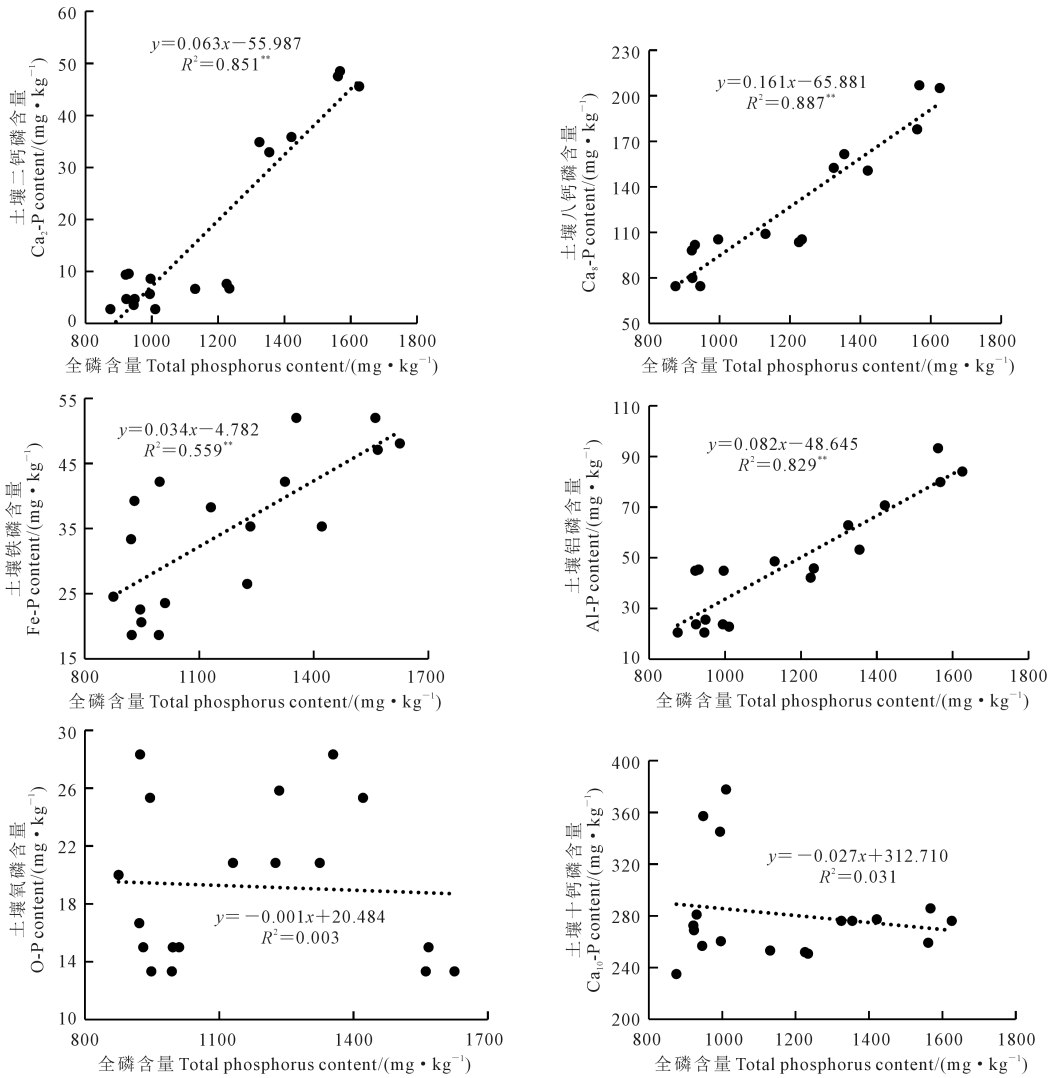
表 3　不同无机磷组分占全磷比例/%

Table 3　Different phosphorus sources accounted for the proportion of total phosphorus

处理 Treatment	Ca_2-P	Ca_8-P	Al-P	Fe-P	Ca_{10}-P	O-P
CK	0.4d	7.6d	2.4d	2.1c	36.6a	1.4c
N	0.4d	8.4cd	2.4d	2.4bc	27.7b	2.7a
NP	0.6d	8.9c	3.8c	2.8bc	21.7c	1.9b
SNP	1.0c	10.7b	4.8ab	4.0a	28.6b	1.6bc
M	2.5b	11.3b	4.6b	3.2b	20.3c	1.8bc
MNP	3.0a	12.4a	5.4a	3.1b	17.3d	0.9d

2.3　无机磷组分与全磷的关系

为探讨黑垆土全磷含量对各无机磷组分的贡献和影响,对全磷含量和各无机磷组分含量作线性回归方程(图 1)和相关性分析(图 2、表 4)。土壤 Ca_2-P、Ca_8-P、Fe-P、Al-P 与土壤全磷含量都极显著正相关,以 Ca_8-P 的 R^2 系数最大,解释度高达 88.8%,P=0.002 (表 4)(P<0.05),其次为 Ca_2-P(P>0.05)、Al-P(P>0.05)、Fe-P(P>0.05),土壤全磷含量每增加 1 mg·kg^{-1},土壤 Ca_2-P、Ca_8-P、Fe-P、Al-P 含量分别增加 0.063、0.161、0.034、0.082 mg·kg^{-1},其中 Ca_8-P 的增速最大,其次为 Al-P,Fe-P 的增速最小,它们对土壤磷有效性起着主要作用,而 Ca_{10}-P 和 O-P 的拟合方程系数为负值,且拟合方程不存在显著相关关系,说明全磷对其组分含量的影响作用较小。



注:*表示在 P<0.05 水平上显著相关,**表示在 P<0.01 水平上极显著相关,下同。

Note: * indicates significant correlation at the P<0.05 level, ** indicates highly significant correlation at the P<0.01 level, the same below.

图 1　全磷与各无机磷组分关系

Fig.1　Relationship between total phosphorus and inorganic phosphorus components

由 RDA 分析可知(图 2),用箭头表示环境因子,箭头所处的象限表示环境因子与排序轴间的正负相关性,箭头与原点的连线长度代表着某个环境因子与全磷(TP)分布间相关程度的大小,连线越长,说明相关性越大,反之越小。箭头连线和排序轴的夹角代表着某个环境因子与排序轴的相关性大小,夹角越小,相关性越高;反之越低。TP 含量与 Ca_8-P、Ca_2-P、Al-P、Fe-P 夹角一致,且 Ca_8-P 与原点的连线长度最长,表明 Ca_8-P、Ca_2-P、Al-P、Fe-P 与全磷(TP)含量是正相关关系,其中 Ca_8-P 与全磷(TP)相关性最大,O-P、Ca_{10}-P 与全磷含量呈线性负相关,对全磷(TP)含量贡献较小。

2.4 无机磷组分与速效磷的关系

为进一步探讨黑垆土速效磷与各无机磷组分的关系,将速效磷含量与磷组分含量作线性回归方程和相关性分析。结果表明,土壤速效磷与 Ca_2-P、Ca_8-P、Fe-P、Al-P 都呈极显著正相关关系,由方程可以看出(图 3),Ca_2-P 的 R^2 系数最大,解释度高达 97.90%,$P=0.002$ ($P<0.05$)(表 5),其次为 Ca_8-P ($P>0.05$)、Al-P($P>0.05$)和 Fe-P($P<0.05$),表明它们对有效磷起着直接主要的作用,而 Ca_{10}-P 和 O-P 的拟合方程系数为负,且拟合方程不显著,说明它们对有效磷的作用较小,主要是通过影响无机磷其他组分来间接影响有效磷的含量。通过拟合方程结果可知,土壤速效磷每增加 1 mg·kg^{-1},土壤中 Ca_2-P、Ca_8-P、Fe-P、Al-P 含量分别需要增加 1.032、2.680、0.588、1.302 mg·kg^{-1},Ca_8-P 的增幅最大,其次为 Al-P,Fe-P 的增幅最小。Ca_2-P 的增速和速效磷相似,说明其两者具有同源性,Ca_2-P 是土壤有效磷的主要构成。

结合无机磷组分与速效磷含量 RAD 排序图可知(图 4),土壤无机磷与速效磷(Olsen-P)中 Ca_2-P、Ca_8-P、Al-P、Fe-P 夹角一致,与速效磷(Olsen-P)夹角小于 90°,且 Ca_2-P 与原点的连线长度最长,其次是 Al-P、Ca_8-P、Fe-P,表明 Ca_2-P、Al-P、Ca_8-P、Fe-P 与速效磷(Olsen-P)呈正相关关系,而 O-P、Ca_{10}-P 与速效磷夹角大于 90°,这表明 O-P、Ca_{10}-P 与黑垆土速效磷呈负相关关系。综上,在黑垆土的整个磷库循环系统中,不同组分的无机磷之间处于一个动态平衡过程,各磷形态之间在土壤环境因子变化中相互影响和制约,而黑垆土速效磷含量的高低则主要取决于土壤各不同无机磷组分之间的比例和转化方向。

3 讨 论

3.1 长期不同施肥对黑垆土磷组分的影响

土壤磷素是限制作物生长的第二大养分因子,土壤累积磷活性取决于磷素含量多少和形态[16]。本

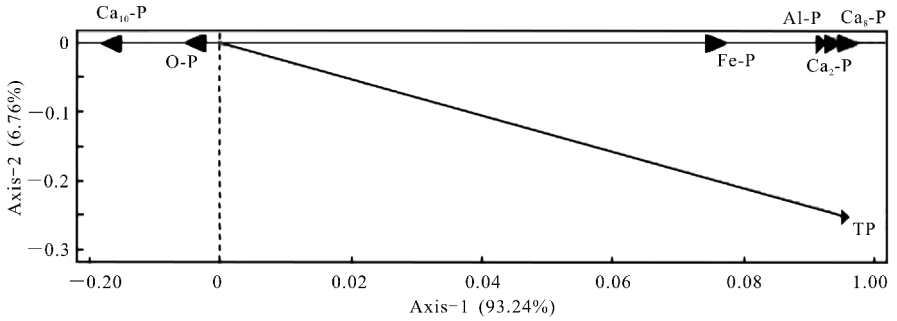


图 2 全磷含量与无机磷组分 RDA 排序图

Fig.2 RDA sequence diagram of total phosphorus content and inorganic phosphorus components

表 4 RDA 分析全磷含量与无机磷组分相关性

Table 4 Correlation between total phosphorus content and inorganic phosphorus components in RDA analysis

无机磷组分 Inorganic phosphorus	解释度 Degree of explanation/%	贡献度 Degree of contribution/%	F	P
Ca_8-P	88.8	95.0	127.0	0.002**
Fe-P	1.4	1.5	2.0	0.166
Al-P	1.2	1.3	1.9	0.184
O-P	0.8	0.8	1.2	0.312
Ca_{10}-P	1.1	1.2	1.9	0.212
Ca_2-P	0.2	0.2	0.2	0.646

研究发现,长期施氮肥(N)处理下黑垆土的全磷、速效磷和磷活化系数均有所降低,有效磷源(Ca_2-P)和中等活性磷源(Ca_8-P、Al-P、Fe-P)含量变化均不显著,潜在磷源(O-P)含量显著增加,这表明单一施用氮肥不仅对黑垆土中活性较高磷无显著影响,还会容易发生 O-P 的固定。党廷辉等[17]研究表明,在同一施磷水平下,施氮对土壤 Olsen-P 含量影响不显著。慕韩峰[18]在黄土旱塬长期定位试验也发现,随着施氮量的增加,土壤磷素含量的变化都不明显,表明施氮含量不会显著的影响土壤中磷

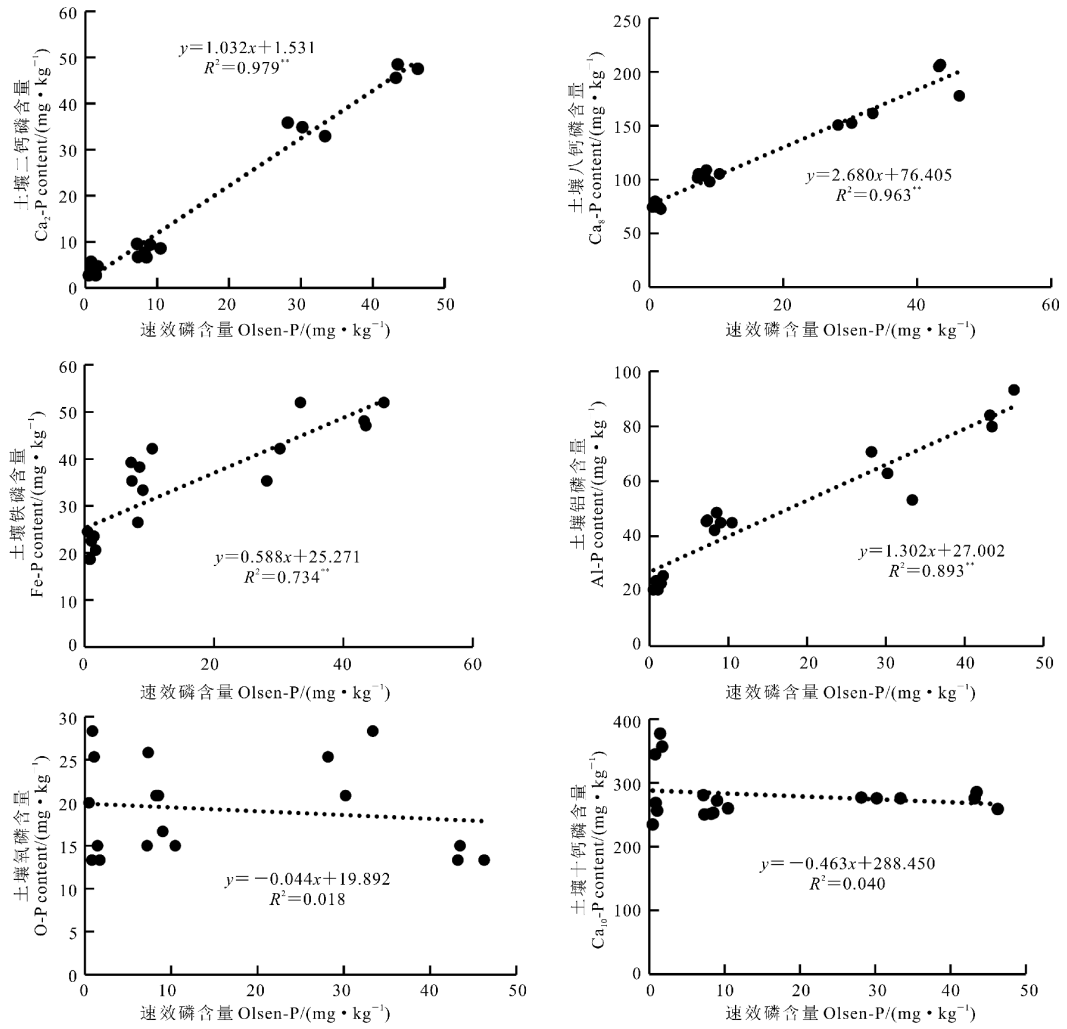


图 3　速效磷与各无机磷组分关系

Fig.3　Relationship between Olsen-P and inorganic phosphorus components

表 5　RDA 分析速效磷含量与无机磷组分相关性

Table 5　Correlation between available phosphorus content and inorganic phosphorus components in RDA analysis

无机磷组分 Inorganic phosphorus	解释度 Degree of explanation/%	贡献度 Degree of contribution /%	*F*	*P*
Ca_2-P	97.9	98.5	734.0	0.002**
Fe-P	0.7	0.8	12.9	0.002**
Ca_{10}-P	0.3	0.3	2.4	0.130
O-P	0.1	0.1	1.1	0.280
Al-P	0.3	0.3	2.4	0.170
Ca_8-P	<0.1	<0.1	0.9	0.338

素各组分的含量[19]。本研究结果表明,施磷肥的 3 个处理(NP、SNP、MNP)较 CK 处理的土壤全磷、速效磷含量和磷活化系数均显著增加,有效磷源(Ca_2-P)和中等活性磷源(Ca_8-P、Al-P、Fe-P)也显著增加,其中以 MNP 处理增幅最大,且显著降低了 Ca_{10}-P、O-P 占全磷比例,这说明有机肥与化肥长期配施不仅增加了总无机磷的量,其中大部分转化成了活性较高的 Ca_2-P、Ca_8-P、Al-P 和 Fe-P,还可以降低土壤中 Ca_{10}-P、O-P 占全磷比例。可见长期

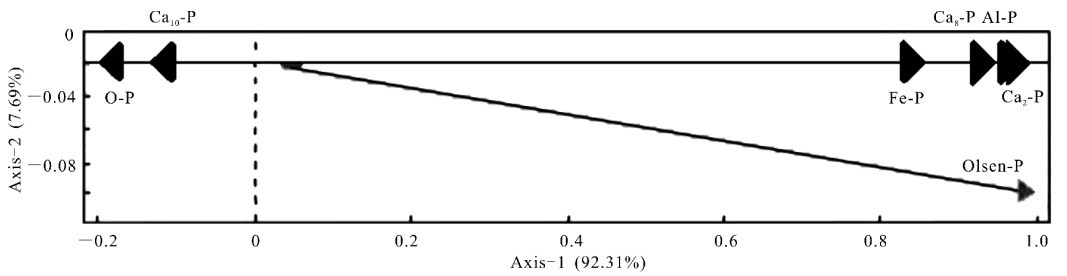


图 4　速效磷含量与无机磷组分 RAD 排序图

Fig.4　RAD sequence diagram of Olsen-P and inorganic phosphorus components

有机肥与化肥配施可以增加土壤磷素含量,有机肥对提高土壤活性较高的无机磷组分也有明显的促进作用,同时减少了磷在土壤中的固定。这是因为有机物在腐解过程中产生的有机酸可以掩蔽土壤胶体或铁铝氧化物的吸附位点,减少土壤对磷的吸附固定,在作物生长过程中会将土壤中的磷转化为容易吸收利用的磷组分,从而提高土壤中磷素的利用[20]。这一点已经在很多长期定位试验中得到验证[21-23]。在石灰质土壤中,几乎所有的无机磷都是与不同阳离子结合形成正磷酸盐,且 Ca-P 为主要的无机磷[24]。本研究表明,长期不同施肥处理增加了黑垆土各磷组分,但不同磷组分的增加幅度不同,以 Ca_8-P 增加幅度最高,Ca_{10}-P 最低,其中农家肥配施氮磷肥(MNP)增幅最显著。这说明施用有机肥主要提高了黑垆土有效性的磷源,而对潜在磷源的影响相对较小,Ca_8-P 增幅较大是由于有机肥在释放过程中会产生腐殖酸和小分子有机酸,有利于其他形态的磷向 Ca_8-P 转化。整体来看,对黑垆土不同施肥处理多年后,土壤无机磷以 Ca_{10}-P 为主,其次是 Ca_8-P,Ca_2-P 所占比例较小。

3.2 长期施肥对黑垆土磷素组分相关关系的影响

本研究表明,黑垆土中 Ca_8-P、Ca_2-P、Al-P、Fe-P 含量与全磷(TP)含量呈正相关关系。Ca_2-P、Al-P、Ca_8-P、Fe-P 与速效磷(Olsen-P)呈正相关关系,Ca_{10}-P、O-P 与全磷和速效磷均呈负相关关系,这表明 Ca_2-P 是黑垆土的最有效磷源,Ca_8-P、Al-P、Fe-P 也对全磷和速效磷起着直接主要的作用,而 Ca_{10}-P 和 O-P 对全磷和速效磷的作用较小,这主要是通过影响无机磷其他组分来间接影响全磷和速效磷的含量。这与国内外许多学者研究结果一致,吕家珑等[25]也认为 Ca_2-P 是有效磷的主体成分,Ca_2-P 与有效磷含量两者数量值接近,关系极为密切,相关关系分析系数 $R^2 = 0.9998^{**}$,达到极显著水平。邵煜庭等[26]对灌漠土的研究表明,Ca_2-P、Al-P 和 Ca_8-P 与有效磷均呈极显著或显著正相关关系,Ca_2-P、Al-P 和 Ca_8-P 均是作物利用的主要磷源,Adnan 等[27]也得到相同结论。在石灰性土壤中,Ca_8-P 为中间形态,可以转化为 Ca_2-P,也可以转化为 Ca_{10}-P,Al-P 和 Fe-P 的有效性较高,也可被作物吸收利用,而 O-P 被抗腐蚀性强的 Fe_2O_3 胶膜包裹,很难作为有效磷源被作物利用,Ca_{10}-P 化学活性较低,只能看作潜在磷源[28]。

4 结 论

长期施磷肥能显著增加黑垆土有效磷(Olsen-P)、全磷(TP)、Ca_2-P、Ca_8-P、Al-P、Fe-P 含量,施用农家肥加氮磷肥(MNP)显著增加 TP、Ca_2-P、Ca_8-P、Al-P、Fe-P 含量,较 CK 分别增加了 61.0%、972.7%、163.9%、255.9%、133.8%,显著降低土壤 Ca_{10}-P、闭蓄态磷(O-P)占全磷比例,较 CK 分别降低了52.7%、35.7%。只施氮肥(N)对土壤磷素含量影响不显著,土壤无机磷组分中以 Ca_{10}-P 为主,Ca_2-P 所占比例最小。在黑垆土中 Ca_8-P、Ca_2-P、Al-P、Fe-P 含量与全磷、有效磷含量均呈极显著正相关关系,Ca_8-P 与全磷相关性的 R^2 系数最高,Ca_2-P 与速效磷相关性的 R^2 系数最高,故 Ca_2-P 是黑垆土最为有效的磷源。

参 考 文 献:

[1] 姜波, 林咸永, 章永松. 杭州市郊典型菜园土壤磷素状况及磷素淋失风险研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2008, 34(2): 207-213.
JIANG B, LIN X Y, ZHANG Y S. Phosphorus status and index for predicting environmental risk of phosphorus leaching in typical vegetable soils of Hangzhou[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences), 2008, 34(2): 207-213.

[2] BECK M A, SANCHEZ P A. Soil phosphorus movement and budget after 13 years of fertilized cultivation in the Amazon basin[J]. Plant and Soil, 1996, 184(1): 23-31.

[3] 孙桂芳, 金继运, 石元亮. 土壤磷素形态及其生物有效性研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2011, (2): 1-9.
SUN G F, JIN J Y, SHI Y L. Research advance on soil phosphorous forms and their availability to crops in soil[J]. Soil and Fertilizer Science in China, 2011, (2): 1-9.

[4] 王艳玲, 杨有德, 赵兰坡. 黑土无机磷组分对有效磷的影响[J]. 吉林农业大学学报, 2005, 27(2): 197-201.
WANG Y L, YANG Y D, ZHAO L P. Effect of inorganic phosphates on available phosphates in blacksoil[J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2005, 27(2): 197-201.

[5] 杨艳菊, 王改兰, 张海鹏, 等. 长期施用不同肥料对栗褐土有机磷组分的影响[J]. 土壤, 2013, 45(3): 426-429.
YANG Y J, WANG G L, ZHANG H P, et al. Effects of long-term different fertilization on organic phosphorus forms in cinnamon soil[J]. Soils, 2013, 45(3): 426-429.

[6] 王永和, 曹翠玉, 史瑞和, 等. 石灰性土壤有机-无机肥配施对土壤供磷的影响[J]. 南京农业大学学报, 1993, (4): 36-42.
WANG Y H, CAO C Y, SHI R H, et al.The effect of aplication of organic manure and inorgnic fertilizers in combination on the p-supplying ability of calcareous soils[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 1993, (4): 36-42.

[7] 王道中, 郭熙盛, 刘枫, 等. 长期施肥对砂姜黑土无机磷形态的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(3): 601-606.
WANG D Z, GUO X S, LIU F, et al. Effects of long-term fertilization

on inorganic phosphorus fractions in lime concretion black soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2009, 15(3): 601-606.

[8] 向春阳, 马艳梅, 田秀平. 长期耕作施肥对白浆土磷组分及其有效性的影响[J]. 作物学报, 2005, 31(1): 48-52.
XIANG C Y, MA Y M, TIAN X P. Effects of long-term culture and fertilization on the contents of forms of phosphorus and their availability in albic Soil[J]. Acta Agronomica Sinica, 2005, 31(1): 48-52.

[9] 李冬初, 王伯仁, 黄晶, 等. 长期不同施肥红壤磷素变化及其对产量的影响[J]. 中国农业科学, 2019, 52(21): 3828-3841.
LI D C, WANG B R, HUANG J, et al. Change of phosphorus in red Soil and its effect to grain yield under long-term different fertilizations[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, 52(21): 3828-3841.

[10] 黄晶. 基于几个长期定位试验的长江上、中游水稻土磷素肥力与磷肥肥效的演变规律[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2017.
HUANG J. Evolution of phosphorus fertility and fertilizer efficiency of paddy soil in the upper and middle reaches of the Yangtzeriver based on several long-term positioning experiments[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2017.

[11] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(5968): 1008-1010.

[12] 周广业, 阎龙翔. 长期施用不同肥料对土壤磷素形态转化的影响[J]. 土壤学报, 1993, 30(4): 443-446.
ZHOU G Y, YAN L X.Effects of long-term application of fertilizers on soil phosphorus morphology and transformation[J]. Acta Pedologica Sinica, 1993, 30(4): 443-446.

[13] 张秀芝, 牛铭晨, 高纪超, 等. 黑土团聚体有机磷及其组分对长期不同施肥措施的响应[J]. 玉米科学, 2024, 32(6): 95-103.
ZHANG X Z, NIU M C, GAO J C, et al. Responses of organic phosphorus and its fractions to long-term fertilization in black soil aggregates[J]. Journal of Maize Sciences, 2024, 32(6): 95-103.

[14] 顾益初, 蒋柏藩. 石灰性土壤无机磷分级的测定方法[J]. 土壤, 1990, (2): 101-102, 110.
GU Y C, JIANG B F. Method for determination of inorganic phosphorus classification in calcareous soil[J]. Soils, 1990, (2): 101-102, 110.

[15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 76-83.
BAO S D. Soil and agricultural analysis[M].3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 76-83.

[16] 张微微. 长期不同施肥下潮土有效磷对磷盈亏的响应关系及差异机制[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020.
ZHANG W W. Response relationship of available phosphorus to phosphorus surplus and deficit in tidal soil under long-term different fertilization and its difference mechanism[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020.

[17] 党廷辉, 郝明德, 李青, 等. 定位施肥对黑垆土剖面养分的影响[J]. 水土保持通报, 1995, (6): 28-33, 59.
DANG T H, HAO M D, LI Q, et al.Effect of position fertilization on soil nutrient of Heku soil profile[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1995, (6): 28-33, 59.

[18] 慕韩锋. 黄土旱塬长期定位施肥对土壤磷素分级、空间分布及有效性的影响[D]. 西安: 西北大学, 2008.
MU H F. Effects of long-term positioning fertilization on phosphorus classification, spatial distribution and availability in loess upland[D]. Xi'an: Northwest University, 2008.

[19] SHI L L, SHEN M X, LU C Y, et al. Soil phosphorus dynamic, balance and critical P values in long-term fertilization experiment in Taihu lake region, China[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14(12): 2446-2455.

[20] 张俊清. 长期施肥对我国主要土壤有机氮磷形态与分布的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2003.
ZHANG J Q. Effects of long-term fertilization on the morphology and distribution of organic nitrogen and phosphorus in main soils in China[D]. Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2003.

[21] 孙燕. 长期施肥对紫色土磷素行为的影响研究[D]. 重庆: 西南大学, 2008.
SUN Y. Study on the effect of long-term fertilization on phosphorus behavior of purple soil[D]. Chongqing: Southwest University, 2008.

[22] ZHANG Y H, HUANG S M, GUO D D, et al. Phosphorus adsorption and desorption characteristics of different textural fluvo-aquic soils under long-term fertilization[J]. Journal of Soils and Sediments, 2019, 19(3): 1306-1318.

[23] TURNER B L. Optimizing phosphorus characterization in animal manures by solution phosphorus-31 nuclear magnetic resonance spectroscopy[J]. Journal of Environmental Quality, 2004, 33(2): 757-766.

[24] 李中阳. 我国典型土壤长期定位施肥下土壤无机磷的变化规律研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007.
LI Z Y. Study on changes of inorganic phosphorus in typical soil under long-term positioning fertilization in China[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2007.

[25] 吕家珑, 刘文革, 王旭东, 等. 长期施肥对土壤无机磷形态组成的影响[J]. 西北农业大学学报(自然科学版), 1995, 23(3): 51-54.
LV J L, LIU W G, WANG X D, et al. Effect of long term fertilization oninorganic-P form composition in soil[J]. Journal of Northwest Sci-tech University of Agriculture and Forestry (Natural Science Edition), 1995, 23(3): 51-54.

[26] 邵煜庭, 甄清香. 灌漠土磷素形态及其有效性的研究[J]. 中国农业科学, 1991, (6): 51-57.
SHAO Y T, ZHEN Q X.A study on phosphorus form and its availability in irrigated desert soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 1991, (6): 51-57.

[27] ADNAN M, FAHAD S, KHAN I A, et al. Integration of poultry manure and phosphate solubilizing bacteria improved availability of Ca bound P in calcareous soils[J]. 3 Biotech, 2019, 9(10): 368.

[28] 周宝库, 张喜林. 长期施肥对黑土磷素积累、形态转化及其有效性影响的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(2): 143-147.
ZHOU B K, ZHANG X L. Effect of long-term phosphorus fertilization on the phosphorus accumulation and distribution in black soil and its availability[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2005, 11(2): 143-147.