doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.01.041

冻融作用下土壤改良剂对东北典型土壤磷素的综合影响

付　强[1]　王子怡[1]　李天霄[1]　侯仁杰[1]　何　泽[2]　李　旭[3]

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030; 2. 哈尔滨工业大学环境学院, 哈尔滨 150006;
3. 黑龙江省水利科学研究院, 哈尔滨 150080)

摘要: 全球变暖加剧了季节性冻土区冻融格局的变化,磷(Phosphorus,P)是农田生态系统响应气候变暖的主要限制性元素。本研究以室内试验为基础,以黑龙江省 3 种典型土壤(黑土、黑钙土、白浆土)为研究对象,以腐熟秸秆(F)和生物炭(B)为外源介质,进行为期 50 次的冻融循环试验,评估冻融循环作用下外源土壤改良剂对黑龙江省 3 种典型土壤磷素有效性的影响。试验结果表明:在冻融循环过程中,3 种类型土壤中外源介质的施加显著改变了土壤的理化性质,并在不同程度上增加了土壤磷素有效性。随着冻融循环次数的增加,土壤速效磷(Olsen - P)含量呈现先增加后减小再增加趋势,在黑土、黑钙土、白浆土中增幅最大的处理分别为 F、F + B、F + B;土壤 pH 值、含水率、冻融循环次数及酸性磷酸酶活性是影响土壤 Olsen - P 含量的重要因素。根据 HEDLEY 磷分级结果发现,在冻融循环条件下,黑土、黑钙土、白浆土中 F、F + B、F 处理活性磷组分平均含量最高;不同活性磷库中,稳定磷组分含量在 3 种土壤中均显著高于活性磷含量与中等不稳定磷组分含量。研究结果对于农作物秸秆的综合利用具有理论参考价值。

关键词: 磷素有效性; 冻融循环; 活性磷组分; 秸秆衍生物

中图分类号: S156　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)01-0434-11　　**OSID**:

Comprehensive Effects of Soil Amendments on Phosphorus in Typical Soil in Northeast China under Freeze-thaw Action

FU Qiang[1]　WANG Ziyi[1]　LI Tianxiao[1]　HOU Renjie[1]　HE Ze[2]　LI Xu[3]

(1. *School of Water Conservancy and Civil Engineering*, *Northeast Agricultural University*, *Harbin* 150030, *China*
2. *School of Environment*, *Harbin Institute of Technology*, *Harbin* 150006, *China*
3. *Heilongjiang Institute of Water Conservancy Research*, *Harbin* 150080, *China*)

Abstract: Global warming intensifies the change of freeze-thaw pattern in seasonal permafrost areas, and phosphorus (P) is the main limiting element of farmland ecosystem response to climate warming. Based on laboratory experiments, taking three typical soils in Heilongjiang Province: black soil, chernozem and white clay as the research object, and using decomposed straw (F) and biochar (B) as exogenous media, the freeze-thaw cycle test was carried out for a period of 50 times, aiming to evaluate the effects of foreign soil amendments on phosphorus availability of three typical soils in Heilongjiang Province under freeze-thaw cycles. The experimental results showed that the application of foreign media in the three types of soil significantly changed the physical and chemical properties of the soil and increased the availability of soil phosphorus in different degrees during the freeze-thaw cycle. With the increase of freeze-thaw cycles, the Olsen - P content of soil showed a trend of first increasing, then decreasing and then increasing. In black soil, chernozem soil and white clay the treatments with the largest increases were F, F + B and F + B, respectively. Soil pH value, water content, freeze-thaw cycles and acid phosphatase activity were important factors affecting soil Olsen - P content. According to the results of HEDLEY phosphorus classification, the average content of F, F + B and F treated active phosphorus components was the highest in black soil, chernozem and white clay under freeze-thaw cycle. The content of stable P in different active P reservoirs was significantly higher than that of active P and moderately unstable P in the three soils. The research results can provide theoretical reference for the comprehensive utilization of crop straw.

Key words: phosphorus availability; freeze-thaw cycle; active phosphorus component; straw derivative

收稿日期: 2024 - 08 - 26　修回日期: 2024 - 09 - 23

基金项目: 国家自然科学基金区域联合基金重点项目(U20A20318)、国家杰出青年科学基金项目(51825901)、国家自然科学基金项目(52179033、52279035)和黑龙江省优秀青年科学基金项目(YQ2020E002)

作者简介: 付强(1973—),男,教授,博士生导师,主要从事农业水土资源高效利用研究,E-mail: fuqiang0629@126.com

0　引言

磷是全球第二大土壤养分限制性元素，植物组织所需要的能量与土壤磷库密切相关[1-2]。SUI 等[3]改进的 HEDLEY 磷素连续浸提分级法是目前较为常用的磷分级方法，该方法重新定义了各组分磷素的有效性，极大程度上降低了试验成本，并使土壤磷素回收率达到 90% 以上。

气候需求/供应假说认为“气候变化引起的高磷需求和低磷供应可能会导致磷素限制”[4]。IPCC 第六次报告指出，根据 2021 年 10 月前宣布的国家自主贡献推算，东亚地区冬季地表气温在 21 世纪将上升约 3.6℃，并表明冬季可能出现大幅升温[5]。持续的全球变暖会增加季节性冻土区土壤冻融循环(Freeze-thaw cycle，FTC)强度和频率，它可以直接或间接地改变土壤的理化性质和生物学性质[6]。FTC 通过改变土壤中速效磷含量影响土壤磷素的有效性[7]。同时研究发现，FTC 也会通过破坏土壤团聚体结构来影响土壤磷素的迁移转化，进一步使土壤中的磷从固相释放到液相[8]。QIAN 等[9]通过研究发现，冻融循环加剧了土壤不稳定磷组分的转化，包括酶解磷组分的转化，在冻融早期尤其明显。由此可见，冻融循环可以通过影响土壤磷素有效性，进而影响作物生长。

在我国农业生态系统中，绝大多数土壤供磷能力不足，需要补充外源磷素。施用磷肥会使土壤中的磷含量以每年 11% 的速度增加，但有效性却不足 20%，不能被作物吸收利用的磷会导致农业非点源污染，如水体富营养化、土壤板结等问题[10-11]。因此，目前急需寻找替代策略来解决这一问题。中国每年农作物秸秆产量约 1.0×10^9 t，其中总磷含量约 2.56×10^6 t，可替代 24% 的磷肥使用[12]。与传统农业相比，有机农业可以减小农业生产对人工肥料的依赖、提高土壤肥力。近年来，诸多研究人员发现农作物秸秆加工而成的土壤改良剂在可持续农业发展中能发挥重要作用[13]。但是，作物秸秆直接施入土壤分解缓慢，由于分解不完全带来的病虫害，影响作物生长发育。有研究发现，农作物秸秆的发酵产物中既含有稳定磷组分，也保留了部分活性磷组分[14]。所以，与秸秆直接还田相比，微生物菌剂处理作物秸秆是一种有效的办法，不仅可以提高土壤中各磷组分的相对含量，又加速了作物秸秆的降解速度，提高了农作物秸秆中磷的生物利用度，使土壤磷组分更好地被植物吸收利用[15]。苏露涯等[16]的研究表明，施加秸秆发酵产物的土壤速效磷含量显著高于对照组，并通过 Pearson 相关分析发现，速效磷含量与磷酸酶活性呈显著正相关。秸秆碳化近年来被认为是提高磷有效性的潜在方法之一，生物炭是一种稳定的富碳有机物质，由农作物秸秆等在高温热解条件下产生，在热解过程中，生物质木质部组织在碳化过程中释放磷酸盐，生物炭中的磷增加到原作物秸秆的 2 ~ 3 倍，可以使生物炭成为土壤磷素的直接来源[17]。

当前对冻融期土壤磷素的研究大多集中在速效磷上，探究土壤中各磷组分的分布与研究速效磷含量对于全面准确地评价土壤磷素的有效性同等重要[18]。基于上述分析，本文以黑龙江省 3 种典型土壤为研究对象，在每种土壤中设置 4 种处理，开展室内冻融循环试验，采用 HEDLEY 磷分级与速效磷相结合的方法，确定冻融循环作用下外源土壤改良剂添加对土壤磷素有效性的影响，分析不同类型土壤中速效磷含量及各组分磷素含量的影响因素。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

黑龙江省是我国温度最低的省份，冬季寒冷漫长，夏季温热湿润，最高气温可达 35℃，最低气温低至 -36℃，年平均气温 2.4℃，年降水量为 500 ~ 600 mm，属于典型的寒温带与温带大陆性季风气候。每年 10 月中旬土壤进入冻结期，到次年 4 月融化期开始，冻融影响显著。黑土、黑钙土、白浆土是黑龙江省典型耕地土壤并分布广泛。黑土是主要耕地土壤，黑龙江省各地均有分布，耕地面积约为 $3.606\,2\times10^6$ hm^2；黑钙土主要分布在松嫩平原，耕地面积约为 $1.589\,1\times10^6$ hm^2；白浆土主要分布在三江平原和东部山区，耕地面积约为 $1.163\,6\times10^6$ hm^2[19]。本研究选取黑土、黑钙土、白浆土这 3 种具有代表性的土壤为试验土壤。

1.2　试验方案

结合 1965—2022 年黑龙江省气象资料，将试验土壤的冻结温度和融化温度分别设置为 -22℃ 和 14℃，冻融循环周期为 24 h，即冻结 12 h，融化 12 h。在试验选取的黑土、黑钙土、白浆土中设置 4 种不同处理：施加腐熟秸秆(F)、施加生物炭(B)、混施腐熟秸秆及生物炭(F + B)、无外源介质施加(CK)。根据哈尔滨市阿城试验基地秸秆全量还田量和土壤含水率，F 处理中施加腐熟秸秆量占原始风干土壤的 0.5%，B 处理中施加生物炭量占原始风干土壤的 0.5%，F + B 处理中混施腐熟秸秆及生物炭量分别占原始风干土壤的 0.25%，并加入去离子水调节

土壤含水率为20%。试验装置如图1所示,土样承载装置为直径30 cm、高20 cm的PVC圆柱筒,四周裹上一层保温棉模拟土壤单向冻结,试验全程在人工气候室内进行,通过顶部的温度监测控制系统及空气制冷压缩机(DD-15型,越冰制冷设备有限公司)自动调节温度,控温误差保证在±0.1℃内。将土壤表面用塑料薄膜密封,防止水分蒸发;同时扎10个小孔通气,防止形成厌氧环境激发土壤呼吸作用致试验结果不准确。为使受试土壤与冬季初期冻结前的自然状况相接近,将所有装填完毕的土壤样品先后在15、10、5℃培养箱各培养7 d做低温驯化处理[20]。土壤取样分别在试验开始后0、5、15、25、35、50次冻融循环进行。将每种处理的3个平行样品均匀混合,分成两份,一份在24 h内完成鲜土指标测定,另一份风干、研磨备用。

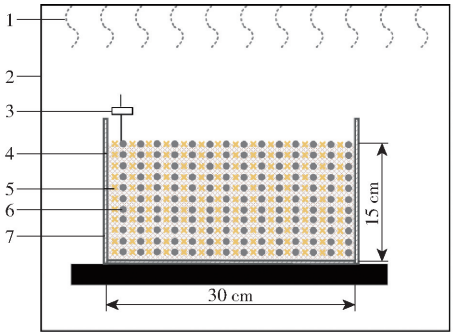

图1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic of test device

1. 制冷压缩机 2. 人工气候室 3. 取土装置 4. PVC圆柱筒 5. 腐熟秸秆 6. 生物炭 7. 保温材料

1.3 试验材料制备

本试验所用的腐熟秸秆以东北农业大学试验田的玉米秸秆为堆肥原料,以尿素为氮源,生物菌肥腐熟发酵剂作为外源微生物进行辅助发酵。将风干的玉米秸秆粉碎,在5 kg秸秆粉中加入50 g尿素调节碳氮比,再加入腐熟发酵剂,喷洒去离子水调节发酵堆含水率达到60%~65%,将秸秆、尿素和去离子水混合均匀后,转入规格(长×宽×高)为75 cm×65 cm×55 cm的保温保湿泡沫箱,泡沫箱下方垫起,顶端挖孔以便通风。堆肥开始后,每2 d翻堆1次。发酵14 d后,堆内温度逐渐冷却到室温(20℃),发酵完成。

本试验所用的生物炭采购于吉林宏源嘉廉禾生物质能源有限公司,原料为玉米秸秆,在高温500~600℃下裂解而成。

1.4 指标测定方法

1.4.1 土壤理化性质及酶活性测定

0.5 mol/L $NaHCO_3$(pH值为8.5)以速度180 r/min提取30 min,使用流动分析仪(Autoanalaser Ⅲ, Bran Lucbbe Co., Ltd.,德国)测定土壤中速效磷含量。采用H_2SO_4-$HClO_4$消煮法和连续流动分析仪测定土壤全磷含量。采用重铬酸钾容量法测定土壤有机质含量。采用上海通蔚土壤酸性磷酸酶试剂盒(TW30408)测定酸性磷酸酶活性。土壤pH值、电导率(Electric conductivity, EC)分别采用体积比2.5∶1和5∶1水土法,后使用914 pH/Conductometer检测器测定。采用环刀法测量土壤干容重。采用干燥法测量土壤含水率(Soil moisture content, SWC)。3种土壤、秸秆和生物炭初始理化性质如表1所示。

1.4.2 土壤磷分级

磷形态连续浸提法是参照SUI等[3]在HEDLEY磷分级法基础上改进的顺序磷分馏法。称取风干土样0.5 g置于50 mL离心管中。依次使用去离子水、$NaHCO_3$、NaOH、HCl溶液连续提取,每次加入浸提液后,在25℃、180 r/min振荡频率下持续浸提16 h。振荡结束后,将离心管以转速8 000 r/min离心5 min后提取上清液,使用流动分析仪分别测定水提取磷(H_2O-P)、碳酸氢钠可提取无机磷($NaHCO_3$-Pi)、氢氧化钠可提取有机磷(NaOH-Pi)、盐酸可提取磷(HCl-P)含量。在$NaHCO_3$、NaOH离心后,将上清液分为两等份,一份直接测定磷含量,另一份加入过硫酸铵,在高温高压灭菌锅中以120 kPa、121℃消化1 h和1.5 h后测定总磷含量,碳酸氢钠可提取有机磷($NaHCO_3$-P_0)含量、氢氧化钠可提取有机磷(NaOH-P_0)含量为二者差值。每次提取后,使用30 mL饱和NaCl洗去土样中游离态磷。最后,采用H_2SO_4-$HClO_4$消解方法提取土壤残留态磷(Res-P)含量。

表1 土壤、腐熟秸秆和生物炭理化性质

Tab. 1 Presents physical and chemical properties of three types of soil, decomposed straw and biochar

参数	黑土	黑钙土	白浆土	生物炭	腐熟秸秆
全磷含量(质量比)/(g·kg^{-1})	1.35±0.03	1.14±0.05	1.17±0.02	—	—
土壤干容重/(g·cm^{-3})	1.32±0.14	1.29±0.26	1.24±0.44	—	—
土壤自然含水率/%	23.50±0.56	21.20±0.19	18.50±0.56	—	—
有机质含量(质量比)/(g·kg^{-1})	27.46±0.66	26.77±0.74	23.38±0.74	362.34±1.25	399.42±0.74
pH值	6.27±0.15	6.16±0.24	5.46±0.17	9.14±0.05	4.37±0.02

注:数据均以平均值±标准差(n=3)表示;—表示未检测。

1.5　数据分析

采用 SPSS 26.0 软件进行统计分析。采用单因素方差分析(ANOVA)对样本进行显著性分析，$P<0.05$ 认为差异有统计学意义，$P<0.01$ 认为差异显著。采用线性相关分析(Simple Fit)对土壤磷的有效性与土壤理化性质进行分析。采用主成分分析(Principal component analysis，PCA)评价各调控模式在不同土壤中的得分。所有统计图均使用 Origin 2021 绘制。

2　结果与分析

2.1　土壤速效磷(Olsen－P)含量变化特征

图 2 为黑土、黑钙土、白浆土中 Olsen－P 含量在冻融循环过程中的动态变化，图中不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)，下同。随着冻融循环次数的增加，黑土和黑钙土的 Olsen－P 含量呈现先增加后减小再增加趋势；白浆土 F 处理在冻融循环 50 次时下降、F＋B 处理在冻融循环 25 次后持续下降。黑土中 F 处理 Olsen－P 含量在整个冻融循环期间最大，相较于 CK 处理增加 37.45%；黑钙土中 F＋B 处理 Olsen－P 含量在整个冻融循环期间相较于 CK 处理增加 32.69%，在冻融循环 25～35 次时 B 处理 Olsen－P 含量高于其他 3 组处理，在整个冻融循环期间相较于 CK 处理增加 29.67%；白浆土中 F＋B 处理 Olsen－P 含量整个冻融循环期间相较于 CK 处理增加 21.69%，而在冻融循环 35～50 次 B 处理 Olsen－P 含量高于其他 3 组处理，相较于 CK 处理增加 24.91%。由此可知，同种土壤中施加不同外源介质对 Olsen－P 含量的增加幅度不同，且不同类型土壤增加幅度最大的处理也不同。

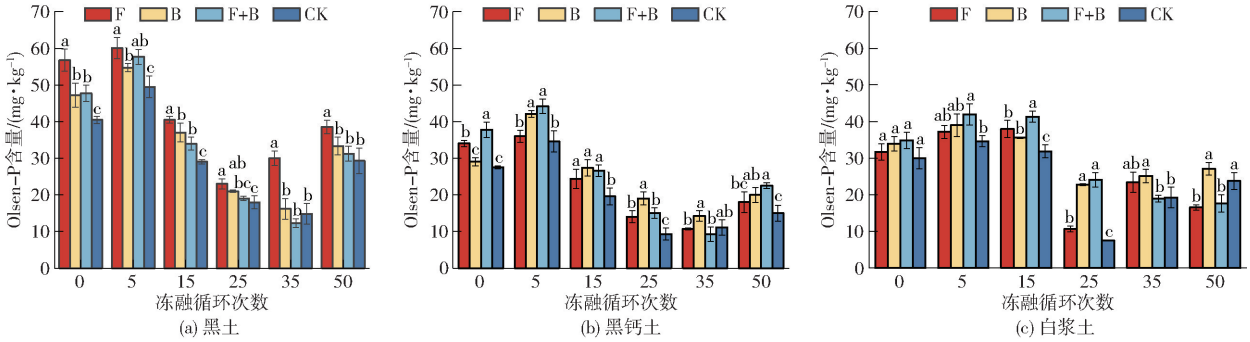

图 2　冻融循环条件下 3 种土壤 Olsen－P 含量变化特征

Fig. 2　Variations in Olsen－P content within three soil types during freeze-thaw cycle

2.2　各组分磷变化特征

添加不同外源土壤改良剂后，3 种土壤各级磷素组分含量发生变化(图 3)。

2.2.1　磷组分含量变化特征

如图 3a 所示，随着冻融循环次数的增加，3 种土壤 H_2O－P 含量总体上呈减小趋势，但在第 35 次冻融循环时略有增大。在 0～15 次冻融循环间，黑土中 H_2O－P 含量 F 处理最高，在第 25 次冻融循环后，B 处理高于其他 3 组处理；黑钙土、白浆土中，土壤 H_2O－P 含量最高的处理分别为 F、F＋B 处理。F、B、F＋B 处理在整个冻融循环期间与 CK 组相比，H_2O－P 含量分别增加 7.48%、8.94%、34.60%。如图 3b 所示，随着冻融循环次数增加，3 种土壤 $NaHCO_3$–Pi 含量总体上呈增加趋势，在第 50 次冻融循环时有所下降。在黑土中，F、F＋B 处理高于其他 2 组处理；黑钙土、白浆土中，土壤 $NaHCO_3$－Pi 含量最高的处理分别为 B、F 处理，3 种土壤在整个冻融循环期间与 CK 组相比，F、B、F＋B 处理 $NaHCO_3$－Pi 含量分别增加 45.78%、47.12%、25.90%。如图 3c 所示，3 种土壤的 $NaHCO_3$－Po 含量在第 5 次冻融循环时下降后，在第 15 次冻融循环时出现显著增加而后降低。与 $NaHCO_3$－Pi 恰恰相反，外源土壤改良剂的施加减小了土壤 $NaHCO_3$－Po 含量。

如图 3d 所示，NaOH－Pi 含量在第 15 次冻融循环时最大，在黑土、黑钙土、白浆土中，土壤 NaOH－Pi 平均含量最高处理分别为 B、F＋B、F 处理；如图 3e 所示，随着冻融循环次数增加，3 种土壤 NaOH –Po 含量呈先减小后增加趋势，在第 35 次冻融循环时达到最小值，3 种土壤中，NaOH－Po 平均含量最高的处理均为 F＋B。

如图 3f、3g 所示，有外源介质施加的处理 HCl－P 含量与 Res－P 含量均在总体上高于 CK 组。

2.2.2　各组分磷素稳定性变化特征

活性磷组分包括 H_2O－P、$NaHCO_3$－Pi、$NaHCO_3$－Po。

由图 4 可知，在冻融循环过程中，黑土中 F、B、F＋B、CK 处理活性磷组分平均含量分别为 270.11、249.93、259.50、228.55 mg/kg；黑钙土中 F、B、F＋B、CK 处理活性磷组分平均含量分别为 188.38、191.99、168.51、169.71 mg/kg；白浆土中 F、B、F＋

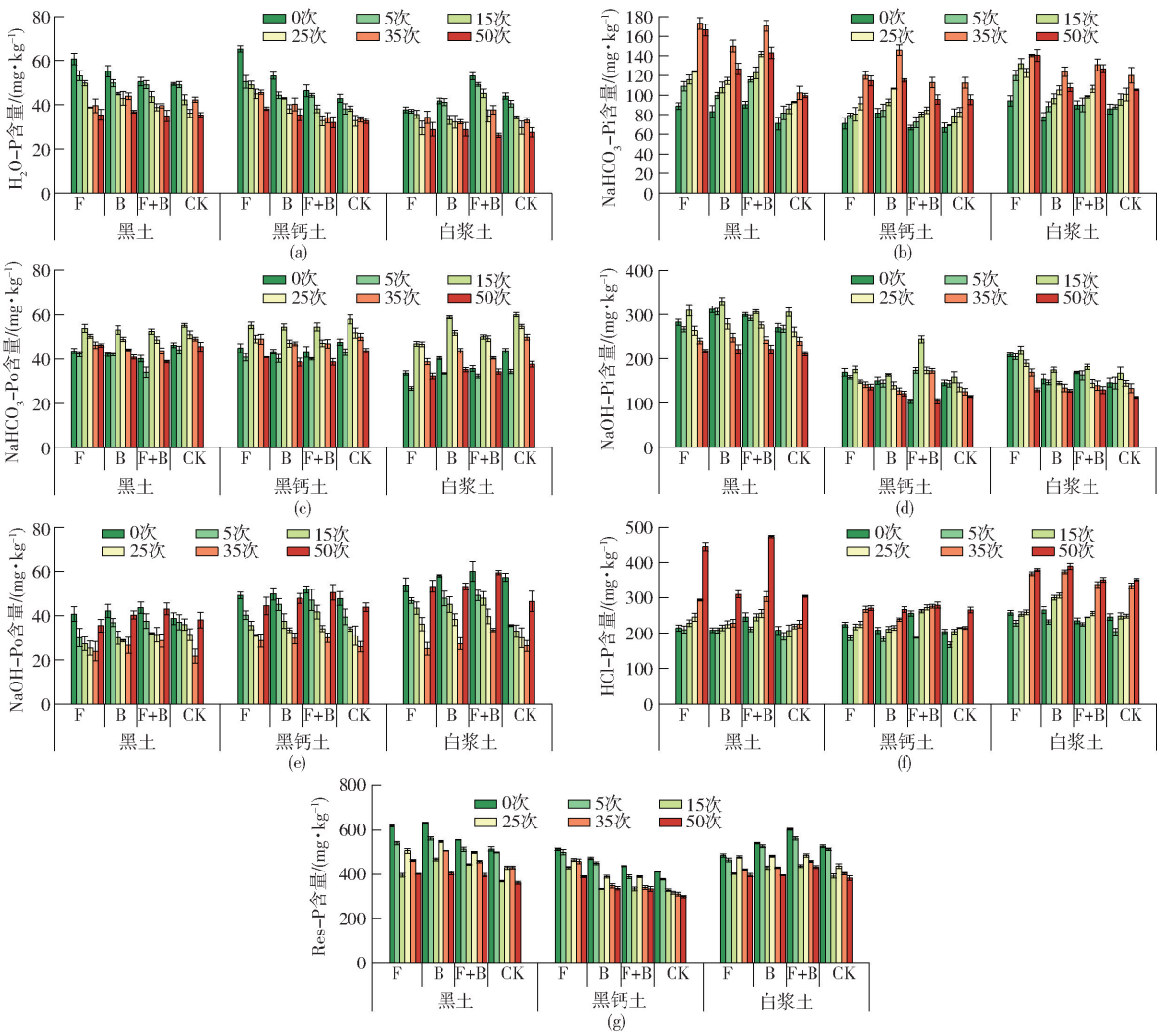

图 3 冻融循环条件下 3 种土壤 HEDLEY 各级磷组分含量变化

Fig. 3 Changes of phosphorus content of HEDLEY in three soils during freeze-thaw cycle

B、CK 处理活性磷组分平均含量分别为 196.46、178.74、188.48、180.86 mg/kg。由此得出,黑土、黑钙土、白浆土在冻融循环过程中,活性磷组分平均含量最高的处理分别为 F、F + B、F 处理。

中等不稳定磷组分包括 NaOH - Pi 和 NaOH - Po。在冻融循环过程中,黑土中 F、B、F + B、CK 处理中等不稳定磷组分平均含量分别为 294.39、317.21、309.51、293.29 mg/kg;黑钙土中 F、B、F + B、CK 处理中等不稳定磷组分平均含量分别为 193.15、181.77、204.77、174.36 mg/kg;白浆土中 F、B、F + B、CK 处理中等不稳定磷组分平均含量分别为 230.21、192.39、202.88、179.88 mg/kg。由此得出,黑土、黑钙土、白浆土在冻融循环过程中,中等不稳定磷组分平均含量最高的处理分别为 B、F + B、F 处理。

稳定磷组分包括 HCl - P 和 Res - P,3 种土壤磷库中稳定磷组分含量均显著高于活性磷与中等不稳定磷组分含量。

2.3 Olsen - P 与各级磷组分影响因素识别

2.3.1 土壤酸性磷酸酶活性及其与 Olsen - P 含量相关性

磷酸酶是介导土壤有机磷矿化的酶,根据磷酸酶催化反应最适 pH 值的不同,将其分为酸性磷酸酶、中性磷酸酶和碱性磷酸酶[21]。由于试验土壤为酸性土壤,酸性磷酸酶(Acid phosphatase,ACP)在土壤有机磷矿化过程中占主导地位。ACP 活性随冻融循环次数变化如图 5 所示。结果表明,3 种土壤 ACP 活性最大值均在 25 ~ 35 次冻融循环期间,其中黑土 B 处理、黑钙土 F + B 处理和白浆土 B 处理分别达到 85.48、92.01、88.83 μmol/(d·g)。在整个冻融循环过程中,与 CK 相比黑土中 F 处理 ACP 活性平均增长率比其他两组大,为 30.44%;黑钙土和白浆土中 B 处理 ACP 活性平均增长率最大,分别为 13.74%、39.89%。直至第 50 次冻融循环结束后,3 种土壤的 B 处理 ACP 活性分别为 74.82、76.14、60.49 μmol/(d·g),高于同组其他 3 种处理。与 CK

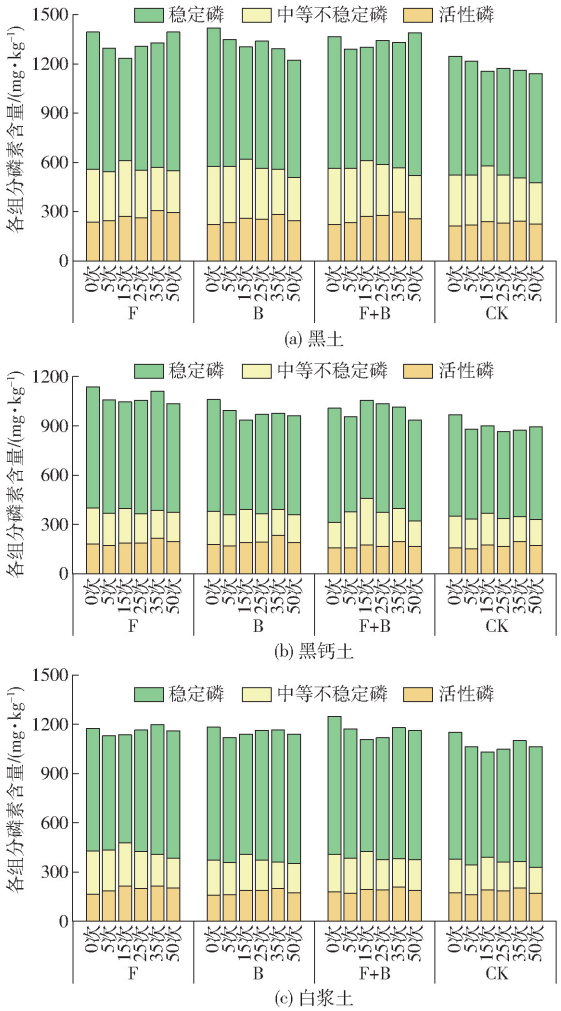

图 4　冻融循环条件下 3 种土壤各组分磷素含量变化

Fig. 4　Changes of phosphorus content in each component of three soils under freeze-thaw cycle

组相比，腐熟秸秆和生物炭的施入均显著提高了土壤 ACP 活性（$P<0.05$）。

采用回归分析对 3 种土壤 ACP 活性与 Olsen－P 含量的关系进行拟合（图 6，图中不同颜色的阴影带表示 95% 逐点置信区间）。土壤 ACP 活性与 Olsen－P 含量呈负相关关系（决定系数 R^2 分别为 0.24、0.40、0.25，$P<0.05$），随着土壤 ACP 活性的增加，Olsen－P 含量线性降低。

2.3.2　不同处理条件下土壤 pH 值、EC、含水率及其与 Olsen－P 含量相关性

表 2 为在冻融循环过程中，各处理土壤 pH 值、EC、SWC 含量的变化。根据其理化性质的变化，采用回归分析方法对 3 种土壤 pH 值、EC、SWC、冻融循环次数与 Olsen－P 含量的关系进行分析。土壤 pH 值与土壤磷的有效性密切相关，在 3 种土壤中，Olsen－P 含量与土壤 pH 值呈显著正相关（R^2 为 0.639 5、0.757 2、0.620 9，$P<0.01$，图 7a）。随着土壤 pH 值的增加，Olsen－P 含量呈线性增加，因此在冻融条件下的酸性土壤中，较高的 pH 值可以进一步加强土壤磷的有效性；Olsen－P 含量也与 SWC 呈显著正相关，并随着 SWC 增加线性增加（R^2 分别为 0.734 5、0.637 1、0.546 3，$P<0.01$，图 7c）；Olsen－P 含量与土壤冻融循环次数呈显著负相关（R^2 分别为 0.415 1、0.530 4、0.440 3，$P<0.01$，图 7d），随着冻融循环次数的增加线性降低。由此可以推断土壤 pH 值、SWC、冻融循环次数是影响土壤 Olsen－P 含量的重要环境因子。但无论是哪种土壤，EC 与 Olsen－P 含量之间都没有相关关系（图 7b）。

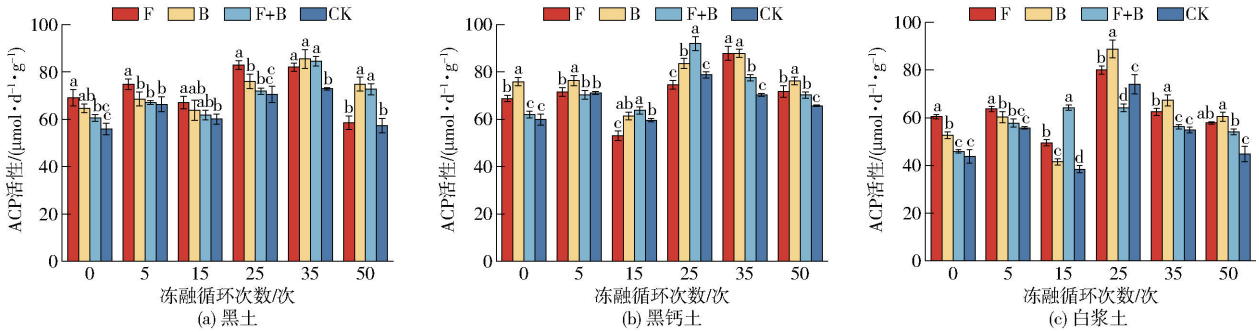

图 5　冻融循环条件下 3 种土壤酸性磷酸酶活性变化特征

Fig. 5　Change characteristics of acid phosphatase activity in three soils under freeze-thaw cycle

2.3.3　3 种土壤各磷组分主成分分析

PCA 可以对高维变量系统进行最佳的综合与简化，客观地确定各个指标的权数并避免主观随意性[22]。根据 PCA 可知，土壤磷组分数据矩阵中大部分变化可以由 PC 解释，不同冻融循环次数在各组分磷中存在明显差异，变量被归类为 4 个区分良好的组。如图 8a 所示，黑土整个冻融循环过程累计贡献率为 75.5%，PC1（49.9%）为方差贡献率最高的主成分；如图 8b 所示，黑钙土整个冻融循环过程累计贡献率为 63.5%，PC1（37.3%）为方差贡献率最高的主成分；如图 8c 所示，白浆土整个冻融循环过程累计贡献率为 68%，PC1（47.1%）为方差贡献率最高的主成分。在 3 种土壤中所有土壤样品都沿着 PC1、PC2 被清楚地分开。由图可以明显看出，相同冻融循环次数的样品紧密相连，不同次数则区分开来。说明在本研究中，冻融循环次数是 3 种土壤 7 个磷组分含量变化的驱动因素。

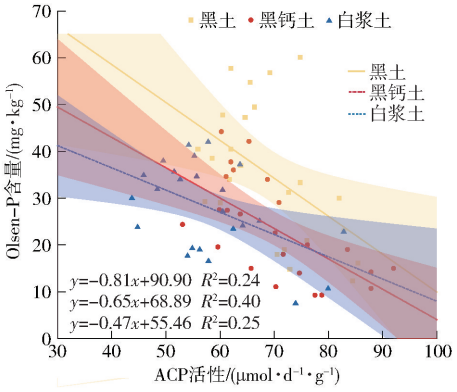

图 6 土壤 Olsen－P 含量与土壤酸性磷酸酶活性之间的关系

Fig. 6 Relationship between soil Olsen－P content and soil acid phosphatase activity

3 讨论

3.1 冻融循环与不同外源介质对 Olsen－P 含量的影响

试验结果表明,在冻融循环过程中,外源土壤改良剂的施加会影响土壤 Olsen－P 含量。有研究表明,冻融循环会造成土壤团聚体的破碎,团聚体中的 Olsen－P 会被释放出来,使土壤中 Olsen－P 含量增加,随着冻融循环次数的增加,原来被破坏的团聚体细粒会重新聚集,形成沙粒,此时 Olsen－P 含量会降低[23];连续的冻融循环会破坏土壤结构,导致土壤中微生物的死亡,在冻融循环初期,微生物群落遭到破坏,细胞壁破碎后养分流失并进入土壤,土壤中 Olsen－P 含量会显著上升,反复冻融后微生物大量死亡,土壤养分的有效性会显著降低[24]。此过程在冻融中循环往复,这是造成土壤中 Olsen－P 含量变化的原因,由于白浆土团聚体本身较小,其对冻融循环的响应程度也与其他土壤有所差别[25]。黑土 F 处理 Olsen－P 含量在整个过程中均高于其他 3 组。这是因为秸秆在腐熟过程中产生大量有机酸和腐殖质,有研究表明,腐殖质可以在 Fe、Al 表面形成一层保护膜,这能减小土壤对磷的固定作用,增大土壤溶液中 Olsen－P 含量;有机酸对土壤矿物质有一定的溶解作用,可以促进土壤风化,提高土壤速效磷含量[26]。黑钙土与白浆土 F＋B 处理的 Olsen－P 含量在冻融循环前期高于其他 3 组,可能是因为腐熟秸秆和生物炭之间的交互作用会增加酸性土壤中速效磷含量[27]。生物炭可以通过提高土壤 pH 值,促进土壤中活性磷的释放来提高土壤有效磷含量,这也是黑钙土与白浆土在冻融循环后期 B 处理 Olsen－P 含量高于其他 3 组处理的原因[28]。

3.2 冻融循环与不同外源介质对 HEDLEY 各级磷组分的影响

根据图 3 可知,随着冻融循环次数的增加,不同磷组分含量发生了显著变化,例如3 种土壤的 H_2O－P 含量均呈减小趋势,$NaHCO_3$－Pi 含量大体上呈增加趋势,NaOH－Po 含量呈先减小后增加趋势,而还有些磷组分并无明显趋势。造成这种现象的原因可能有:①冻融破坏了土壤结构,导致稳定磷组分增加,土壤表面吸附位点竞争加剧,磷元素吸附能力减弱。②冻融作用使土壤颗粒变小,增多了表面吸附位点,进而增加吸附能力。③冻融破坏土壤胶结作用,铁铝化合物的破坏增强了磷元素的吸附作用[29-30]。以上原因在试验过程中同时发生相互制约,导致在冻融循环过程中各组分磷素含量变化结果存在差异。

对于 3 种土壤来说,施加不同外源介质对土壤活性磷组分含量的影响有显著差异。黑土与白浆土中 F 处理活性磷组分平均含量最高,这是因为腐熟秸秆中含有大量腐殖酸,腐殖酸中的羧基、酚羟基等酸性官能团可以与磷酸基团竞争土壤胶体表面的吸附位点,对土壤中磷形态的转变具有重大影响,有利于增加土壤活性磷组分含量[31]。黑钙土中 B 处理活性磷组分平均含量最高,主要原因包括:①施用生物炭的土壤易形成适宜微生物生存的土壤环境,可以防止生物活动被冻融循环打扰。②施用生物炭使酸性土壤 pH 值升高,造成的可交换钙沉淀显著影响土壤磷组分[32]。在土壤可利用磷素资源匮乏时,中等不稳定磷组分能及时转化成植物所需的磷素形态,同样在土壤中可利用磷素丰富时,活性磷组分也会向中等不稳定磷组分转化。对于土壤中的稳定磷组分来说,它们稳定存在于土壤中,难以被植物所吸收利用,故而对农作物生长发育无显著影响[33]。

3.3 土壤类型对不同调控模式磷素有效性差异分析

通过上述分析发现,不同类型土壤磷素的有效性对不同调节方式的响应程度不同。这说明在不同类型土壤中磷素有效性的调节机制存在显著差异。黑土与黑钙土最主要的区别在于土壤中碳酸钙含量,碳酸钙含量会影响土壤 pH 值,此外,其他性质大多比较相似[34];白浆土具有“酸、粘、重”的特点,养分含量低、物理性状差,大团聚体少,使其 pH 值、含水率等性质较黑土和黑钙土都存在一定差别(表 1、2,图 7)[35]。土壤磷素的有效性与这些性质有着密不可分的联系。土壤 pH 值可以直接作用于土壤磷素的形态,进而影响磷素有效性[36]。酸性土

表 2　不同处理条件下土壤 pH 值、EC 和 SWC

Tab. 2　Soil pH value, EC and SWC under different treatment conditions

处理	冻融循环次数	pH 值			EC/(μS·cm^{-1})			SWC/%		
		黑土	黑钙土	白浆土	黑土	黑钙土	白浆土	黑土	黑钙土	白浆土
F	0	(6.03 ± 0.16)^{abc}	(6.37 ± 0.17)^{a}	(5.39 ± 0.24)^{a}	(78.34 ± 2.11)^{b}	(225.2 ± 0.38)^{a}	(83.16 ± 1.60)^{a}	(21.5 ± 0.56)^{b}	(22.0 ± 0.19)^{a}	(20.0 ± 0.48)^{bc}
	5	(6.50 ± 0.33)^{abc}	(6.18 ± 0.15)^{ab}	(5.14 ± 0.21)^{ab}	(61.78 ± 3.02)^{d}	(178.5 ± 1.57)^{d}	(45.27 ± 2.86)^{d}	(23.3 ± 0.90)^{a}	(22.6 ± 0.58)^{d}	(22.4 ± 0.20)^{a}
	15	(5.78 ± 0.13)^{bc}	(5.77 ± 0.11)^{bc}	(4.88 ± 0.30)^{b}	(69.45 ± 2.89)^{c}	(180.0 ± 3.08)^{cd}	(53.17 ± 1.14)^{c}	(21.1 ± 0.26)^{bc}	(20.9 ± 0.43)^{b}	(22.2 ± 0.25)^{a}
	25	(5.62 ± 0.32)^{c}	(5.55 ± 0.26)^{c}	(4.08 ± 0.23)^{c}	(58.38 ± 2.09)^{d}	(173.2 ± 2.26)^{e}	(61.95 ± 1.25)^{b}	(19.3 ± 0.21)^{d}	(19.4 ± 0.39)^{c}	(19.8 ± 0.43)^{c}
	35	(5.82 ± 0.43)^{bc}	(5.67 ± 0.34)^{c}	(4.19 ± 0.20)^{c}	(69.94 ± 3.25)^{c}	(183.3 ± 2.39)^{cd}	(49.34 ± 1.63)^{c}	(20.0 ± 0.8)^{cd}	(21.0 ± 0.28)^{b}	(20.7 ± 0.23)^{bc}
	50	(6.28 ± 0.26)^{abc}	(6.22 ± 0.29)^{ab}	(4.73 ± 0.04)^{c}	(85.89 ± 2.94)^{a}	(209.7 ± 1.57)^{b}	(81.08 ± 2.91)^{a}	(21.6 ± 0.79)^{b}	(20.8 ± 0.73)^{b}	(19.7 ± 0.52)^{c}
B	0	(5.72 ± 0.34)^{abc}	(5.95 ± 0.12)^{ab}	(5.35 ± 0.06)^{a}	(244.9 ± 2.03)^{c}	(370.7 ± 3.25)^{b}	(234.4 ± 2.74)^{b}	(20.0 ± 0.6)^{bc}	(20.0 ± 0.36)^{b}	(20.0 ± 0.35)^{c}
	5	(6.12 ± 0.06)^{abc}	(6.23 ± 0.23)^{a}	(5.39 ± 0.17)^{a}	(233.0 ± 1.37)^{d}	(335.1 ± 3.16)^{cd}	(200.2 ± 3.21)^{c}	(22.2 ± 0.6)^{a}	(21.2 ± 0.25)^{a}	(21.8 ± 0.21)^{a}
	15	(5.45 ± 0.38)^{abc}	(5.59 ± 0.14)^{bc}	(4.93 ± 0.28)^{ab}	(217.7 ± 1.36)^{e}	(308.8 ± 1.82)^{d}	(192.0 ± 2.01)^{b}	(21.0 ± 0.5)^{ab}	(19.2 ± 0.37)^{cd}	(21.4 ± 0.24)^{a}
	25	(5.31 ± 0.32)^{b}	(5.58 ± 0.15)^{bc}	(4.33 ± 0.24)^{c}	(253.3 ± 1.09)^{d}	(303.4 ± 0.58)^{e}	(190.0 ± 0.31)^{d}	(19.7 ± 0.83)^{bc}	(19.1 ± 0.39)^{d}	(20.6 ± 0.27)^{b}
	35	(5.47 ± 0.45)^{abc}	(5.60 ± 0.25)^{bc}	(4.43 ± 0.30)^{bc}	(229.7 ± 2.77)^{d}	(294.1 ± 2.71)^{f}	(232.8 ± 1.43)^{b}	(19.4 ± 0.077)^{d}	(19.8 ± 0.4)^{bc}	(20.4 ± 0.26)^{bc}
	50	(5.85 ± 0.41)^{abc}	(5.87 ± 0.35)^{ab}	(5.08 ± 0.37)^{a}	(269.0 ± 3.57)^{a}	(386.3 ± 2.56)^{a}	(364.4 ± 1.82)^{a}	(19.0 ± 0.82)^{cd}	(19.3 ± 0.14)^{cd}	(20.0 ± 0.30)^{c}
F + B	0	(6.20 ± 0.23)^{abc}	(6.26 ± 0.30)^{a}	(5.44 ± 0.19)^{a}	(186.5 ± 2.01)^{b}	(254.6 ± 2.11)^{b}	(156.4 ± 0.76)^{b}	(23.5 ± 0.69)^{b}	(20.0 ± 0.33)^{b}	(20.0 ± 0.50)^{c}
	5	(6.31 ± 0.21)^{abc}	(6.03 ± 0.11)^{ab}	(5.38 ± 0.16)^{a}	(178.3 ± 0.23)^{c}	(230.4 ± 3.07)^{cd}	(135.1 ± 2.17)^{c}	(23.1 ± 0.53)^{b}	(21.7 ± 0.45)^{a}	(23.0 ± 0.34)^{a}
	15	(5.78 ± 0.20)^{bc}	(5.72 ± 0.46)^{bc}	(5.35 ± 0.35)^{a}	(162.4 ± 0.67)^{d}	(230.2 ± 1.71)^{cd}	(128.3 ± 3.82)^{d}	(21.6 ± 0.62)^{cd}	(19.2 ± 0.42)^{bc}	(23.5 ± 0.50)^{a}
	25	(5.30 ± 0.29)^{c}	(5.42 ± 0.19)^{c}	(4.11 ± 0.26)^{c}	(175.7 ± 3.77)^{c}	(214.4 ± 0.45)^{e}	(151.7 ± 2.72)^{d}	(20.7 ± 0.53)^{cd}	(19.5 ± 0.39)^{b}	(21.6 ± 0.30)^{b}
	35	(5.37 ± 0.17)^{c}	(5.41 ± 0.08)^{c}	(3.97 ± 0.06)^{c}	(143.2 ± 2.51)^{e}	(222.6 ± 2.2)^{d}	(139.7 ± 2.95)^{b}	(18.6 ± 0.75)^{e}	(18.6 ± 0.31)^{c}	(20.7 ± 0.21)^{c}
	50	(5.93 ± 0.41)^{ab}	(5.75 ± 0.12)^{bc}	(4.59 ± 0.18)^{b}	(183.0 ± 1.87)^{b}	(298.0 ± 3.59)^{a}	(218.1 ± 2.45)^{a}	(19.7 ± 0.78)^{de}	(19.2 ± 0.6)^{bc}	(18.9 ± 0.23)^{d}
CK	0	(5.67 ± 0.27)^{ab}	(6.26 ± 0.14)^{a}	(5.26 ± 0.35)^{a}	(75.13 ± 3.02)^{a}	(223.5 ± 2.00)^{b}	(60.19 ± 2.21)^{d}	(20.0 ± 0.63)^{ab}	(20.0 ± 0.32)^{ab}	(20.0 ± 0.37)^{ab}
	5	(6.07 ± 0.35)^{a}	(6.22 ± 0.41)^{a}	(4.90 ± 0.23)^{ab}	(65.46 ± 1.7)^{bc}	(182.0 ± 2.14)^{cd}	(61.18 ± 1.08)^{d}	(20.9 ± 0.63)^{a}	(20.7 ± 0.16)^{a}	(20.4 ± 0.30)^{a}
	15	(5.38 ± 0.11)^{bc}	(5.76 ± 0.37)^{ab}	(4.65 ± 0.42)^{bc}	(67.71 ± 1.03)^{b}	(178.0 ± 1.95)^{d}	(69.67 ± 2.94)^{c}	(19.8 ± 0.88)^{ab}	(20.0 ± 0.36)^{bd}	(20.5 ± 0.37)^{a}
	25	(5.33 ± 0.47)^{bc}	(5.48 ± 0.07)^{bc}	(4.23 ± 0.18)^{cd}	(62.42 ± 2.22)^{c}	(173.4 ± 2.04)^{e}	(58.18 ± 1.52)^{d}	(18.7 ± 0.37)^{bc}	(19.6 ± 0.43)^{bc}	(18.8 ± 0.47)^{c}
	35	(5.65 ± 0.13)^{ab}	(5.51 ± 0.21)^{bc}	(4.05 ± 0.35)^{d}	(72.28 ± 2.02)^{a}	(179.9 ± 1.02)^{cd}	(66.14 ± 2.56)^{c}	(18.6 ± 0.92)^{cd}	(19.1 ± 0.54)^{c}	(19.4 ± 0.13)^{bc}
	50	(6.03 ± 0.28)^{a}	(5.85 ± 0.36)^{ab}	(4.85 ± 0.09)^{ab}	(73.75 ± 2.44)^{a}	(227.3 ± 1.86)^{f}	(67.24 ± 3.69)^{c}	(18.4 ± 0.51)^{d}	(19.9 ± 0.17)^{b}	(20.0 ± 0.28)^{ab}

注：所有数据均以平均数 ± 标准差（$n=3$）表示，同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著（$P<0.05$）。

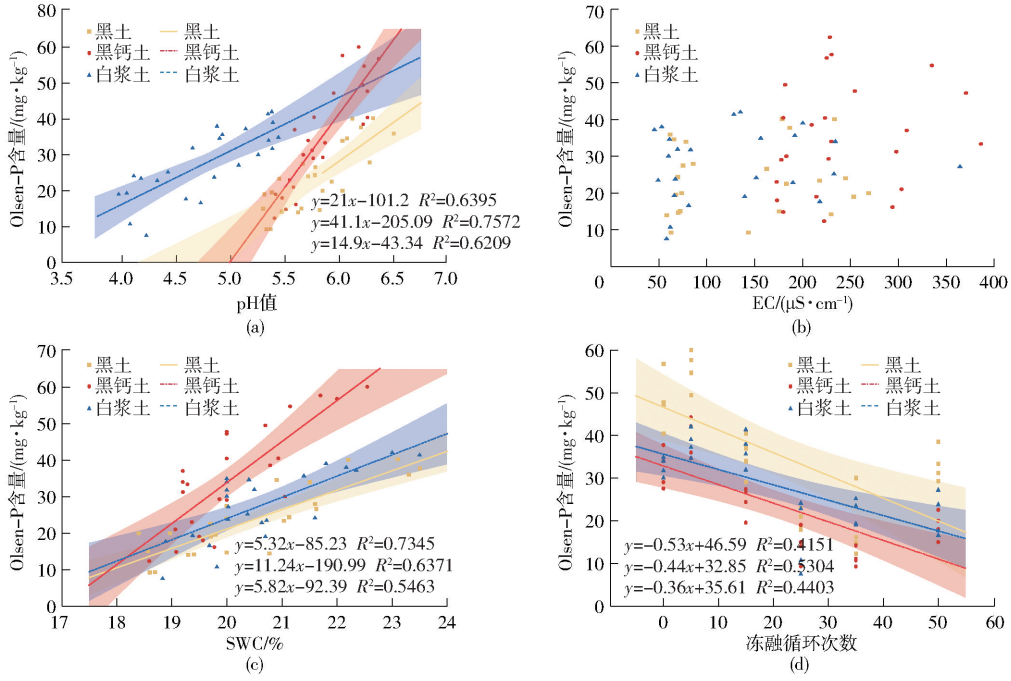

图 7 土壤 Olsen－P 含量与 pH 值、电导率、含水率、冻融循环次数间关系

Fig. 7 Relationship between soil Olsen－P and pH value, electrical conductivity, water content and number of freeze-thaw cycles

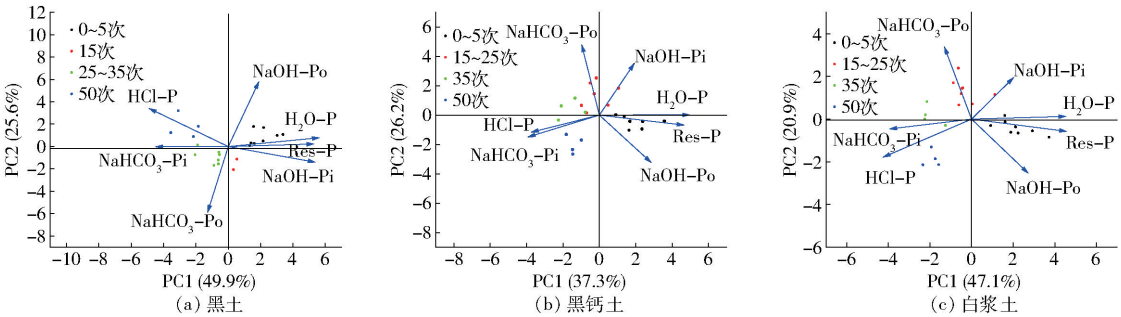

图 8 3 种土壤各组分磷素与冻融循环次数的主成分分析(PCA)

Fig. 8 Principal component analysiss (PCA) of phosphorus in each component of three soils and number of freeze-thaw cycles

壤中,磷通常是不稳定的,活性磷组分很难溶解,随着土壤 pH 值降低,磷酸盐被土壤中的铁、铝、锰化合物吸附沉淀,致使 Olsen－P 含量减小,土壤磷有效性降低[37]。HE 等[38]通过水分管理培养试验发现,土壤磷素有效性极易受土壤含水率的影响,水分管理对土壤速效磷的调节作用十分显著。

酸性磷酸酶是土壤中一种诱导酶,可以促进有机磷磷酯键水解,释放无机磷与相应醇,从而影响土壤磷素的有效性[39]。不同类型土壤中 ACP 活性存在明显不同(图 5),这可能也是导致不同类型土壤磷素有效性存在差异的原因之一。由图 6 可以看出,本研究 ACP 活性与 Olsen－P 含量呈负相关关系。这与前人试验中酸性磷酸酶活性增加,土壤中速效磷含量增加的结论相反。造成该现象的原因可能与冻融循环相关,长期的冻融循环导致了土壤团聚体破碎及部分微生物死亡,使土壤 ACP 活性减小,同时也释放出包括可溶性有机碳、无机氮以及 Olsen－P 等营养物质,土壤中各种养分含量的增加,使得存活的微生物无需释放过多磷酸酶提供能量,进一步减小了土壤中酸性磷酸酶活性[23]。

ÖZGÜL 等[40]研究发现,冻融循环次数对土壤磷有效性有明显的长、短期影响,并与土壤类型相关;YU 等[41]也通过研究发现,土壤类型与冻融的相互作用显著影响了磷库中活性磷组分含量,这均与本试验的研究结果一致。综上所述,黑土、黑钙土、白浆土由于其自身 pH 值、SWC、ACP 活性等性质的不同,造成了冻融循环条件下对不同外源介质响应效果的差异。

4 结论

(1)在冻融循环作用下,不同类型土壤 Olsen－P 含量增加幅度最大的处理不同。黑土、黑钙土、白浆土 F、F + B、F + B 处理 Olsen－P 含量分别增加 37.45%、32.69%、24.91%,为各组最大。

(2)施用不同外源介质可使土壤中各组分磷素含量存在不同程度的增加。根据 HEDLEY 磷分级结果得出,黑土、黑钙土、白浆土在冻融循环过程中,活性磷组分平均含量最高的处理分别为 F 处理(270.11 mg/kg)、B 处理(191.99 mg/kg)、F 处理(196.46 mg/kg);中等不稳定磷组分平均含量最高的处理分别为 B 处理(317.21 mg/kg)、F + B 处理(204.77 mg/kg)、F 处理(230.21 mg/kg)。

(3)冻融循环和外源介质的添加会改变土壤 pH 值、电导率、含水率及酸性磷酸酶活性,导致 Olsen - P 与各磷组分含量变化。通过线性回归分析发现,土壤 Olsen - P 含量与土壤 pH 值、含水率呈显著正相关关系,与冻融循环次数和酸性磷酸酶活性具有负相关关系,与 EC 无相关关系;通过主成分分析发现,冻融循环次数为 3 种土壤 9 个磷组分含量变化的驱动因素。

参 考 文 献

[1] KOUR D, RANA K L, KAUR T, et al. Biodiversity, current developments and potential biotechnological applications of phosphorus solubilizing and mobilizing microbes: a review[J]. Pedosphere, 2021, 31(1): 43 - 75.

[2] 夏桂敏, 王宇佳, 王淑君, 等. 灌溉方式与生物炭对花生根系、磷素利用及产量的影响[J]. 农业机械学报,2022, 53(2): 316 - 326.
XIA Guimin, WANG Yujia, WANG Shujun, et al. Effects of irrigation methods and biochar on peanut root, phosphorus utilization and yield[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(2): 316 - 326. (in Chinese)

[3] SUI Y, THOMPSON M L, SHANG C. Fractionation of phosphorus in a mollisol amended with biosolids[J]. Soil Science Society of America Journal, 1999, 63(5): 1174 - 1180.

[4] HOU E Q, WEN D Z, JIANG L F, et al. Latitudinal patterns of terrestrial phosphorus limitation over the globe[J]. Ecology Letters, 2021, 24(7): 1420 - 1431.

[5] FORSTER P M, SMITH C, WALSH T, et al. Indicators of Global Climate Change 2023: annual update of key indicators of the state of the climate system and human influence[J]. Earth System Science Data, 2024, 16(6): 2625 - 2658.

[6] PENG X Q, FRAUENFELD O W, CAO B, et al. Response of changes in seasonal soil freeze/thaw state to climate change from 1950 to 2010 across China[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2016, 121(11): 1984 - 2000.

[7] 王子龙, 孙秋雨, 姜秋香, 等. 冬季增温对东北农田黑土氮磷有效性的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(9): 91 - 101.
WANG Zilong, SUN Qiuyu, JIANG Qiuxiang, et al. Effects of winter warming on the nitrogen and phosphorus availability of black soil in northeast farmland[J]. Transactions of the CSAE, 2023, 39(9): 91 - 101. (in Chinese)

[8] 崔虎. 退耕还湿条件下土壤团聚体中磷的赋存及释放特征研究[D]. 北京:中国科学院大学, 2019.
CUI Hu. Distribution and release of phosphorus fractions associated with soil aggregate structure in restored wetlands[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Science, 2019. (in Chinese)

[9] QIAN D, FAN H, ZHOU L, et al. Effects of freeze-thaw cycles on phosphorus adsorption and desorption characteristic in brown earth[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2012, 26(2): 279 - 283.

[10] KEJUN S, BING Z, QIMING L U, et al. Study on release characteristics, fertilizer effect and activated mechanism of activated phosphoric fertilizers[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007, 40(8): 1722 - 1729.

[11] 栾江, 仇宏伟, 赵静. 中国农业生产中化肥过度使用状况及地域分布差异[J]. 青岛农业大学学报, 2018, 35(1): 40 - 48.
LUAN Jiang, QIU Hongwei, ZHAO Jing. Excessive use of fertilizer and its difference of geographical distribution in China agricultural production[J]. Journal of Qingdao Agricultural University, 2018, 35(1): 40 - 48. (in Chinese)

[12] LI R, TAN H, XIE R, et al. Main problems of maize tillage system in northeast China and the prospect of new tillage system [J]. Journal of Maize Science, 2021, 29(6): 105 - 111.

[13] ZHANG Y F, DOU S, NDZELU B S, et al. Effects of returning corn straw and fermented corn straw to fields on the soil organic carbon pools and humus composition[J]. Soil, 2022, 8(2): 605 - 619.

[14] 刘兴斌, 马宗海, 闫治斌, 等. 不同秸秆发酵还田对制种玉米田土壤肥力质量和玉米品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(5): 230 - 241.
LIU Xingbin, MA Zonghai, YAN Zhibin, et al. Effects of different fermented straws returning on soil fertility and maize quality in seed maize field[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(5): 230 - 241. (in Chinese)

[15] 宋建宇, 张书红, 周群生, 等. 秸秆还田配施腐熟剂对小麦生长发育及土壤理化性状的影响[J]. 肥料与健康, 2024, 51(1): 18 - 22.
SONG Jianyu, ZHANG Shuhong, ZHOU Qunsheng, et al. The effect of straw returning to field and applying decomposing agents on wheat growth and soil physicochemical properties[J]. Fertilizer & Health, 2024, 51(1): 18 - 22. (in Chinese)

[16] 苏露涯, 魏晓梦, 邓扬悟, 等. 南荻秸秆厌氧发酵产物含磷量对旱作红壤磷有效性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2023, 29(7): 1333 - 1342.
SU Luya, WEI Xiaomeng, DENG Yangwu, et al. Phosphorous content in anaerobic fermentation products of *Triarrhena lutarioriparia* straw influence the phosphorus availability in red upland soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023, 29(7): 1333 - 1342. (in Chinese)

[17] 刘慧, 苏航, 温小艳, 等. 黑土区坡耕地生物炭应用模式综合效益研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(7): 325 - 336.
LIU Hui, SU Hang, WEN Xiaoyan, et al. Comprehensive benefit of biochar application modes on slope farmland in black soil region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 325 - 336. (in Chinese)

[18] 姚欢丽. 土壤磷素研究进展[J]. 农业与技术, 2023, 43(22): 80 - 83.
YAO Huanli. Research progress of soil phosphorus[J]. Agriculture and Technology, 2023, 43(22): 80 - 83. (in Chinese)

[19] 杨贺平, 赵小静, 孙江军. 近 40 年黑龙江省两大平原土壤有机质时空变化规律[J]. 物探与化探, 2024, 48(4): 1103 - 1113.
YANG Heping, ZHAO Xiaojing, SUN Jiangjun. Spatiotemporal changes of soil organic matter in the Songnen and Sanjiang plains of Heilongjiang Province over 40 years[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 2024, 48(4): 1103 - 1113. (in Chinese)
[20] 陈哲, 徐巍, 门双, 等. 祁连山岛状冻土活动层土壤氮库对模拟冻融响应[J]. 草地学报, 2023, 31(1): 19 - 28.
CHEN Zhe, XU Wei, MEN Shuang, et al. Response of soil nitrogen pools to a simulated freeze-thaw test in the active layer of segregaled permafrost on the Qilian mountains[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(1): 19 - 28. (in Chinese)
[21] KATHURIA S, MARTINY A C. Prevalence of a calcium-based alkaline phosphatase associated with the marine cyanobacterium *Prochlorococcus* and other ocean bacteria[J]. Environmental Microbiology, 2011, 13(1): 74 - 83.
[22] 陈吉, 赵炳梓, 张佳宝, 等. 主成分分析方法在长期施肥土壤质量评价中的应用[J]. 土壤, 2010, 42(3): 415 - 420.
CHEN Ji, ZHAO Bingzi, ZHANG Jiabao, et al. Application of principal component analysis in evaluation of soil quality under different long-term fertilization[J]. Soils, 2010, 42(3): 415 - 420. (in Chinese)
[23] 郑昕雨, 陈鹏, 韩金吉, 等. 冻融循环对土壤团聚体与微生物特性影响研究进展[J]. 江苏农业学报, 2023, 39(4): 1080 - 1088.
ZHENG Xinyu, CHEN Peng, HAN Jinji, et al. Effects of freeze-thaw cycles on soil aggregates and microbial properties: a review[J]. Jiangsu J. of Agr. Sci., 2023, 39(4): 1080 - 1088. (in Chinese)
[24] YANAI Y, TOYOTA K, OKAZAKI M. Effects of successive soil freeze-thaw cycles on soil microbial biomass and organic matter decomposition potential of soils[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2004, 50(6): 821 - 829.
[25] 范昊明, 靳丽, 周丽丽, 等. 冻融循环作用对黑土有效磷含量变化的影响[J]. 水土保持通报, 2015, 35(3): 18 - 22.
FAN Haoming, JIN Li, ZHOU Lili, et al. Influence of freezing and thawing on available phosphorus content of black soil[J]. Bulletion of Soil and Water Conservation 2015, 35(3): 18 - 22. (in Chinese)
[26] YANG X Y, KONG Y H, GUO E H, et al. Organic acid regulation of inorganic phosphorus release from Mollisols with different organic matter contents[J]. Soil Use and Management, 2022, 38(1): 576 - 583.
[27] 苗欢, 乔云发, 唐煜杰, 等. 短时暴雨条件下秸秆和生物炭还田对水稻磷素表观利用率的影响[J]. 水土保持研究, 2023, 30(6): 241 - 246.
MIAO Huan, QIAO Yunfa, TANG Yujie, et al. Effects of straw and biochar return on the apparent utilization efficiency of phosphorus in rice under the condition of short-time rainstorm[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 241 - 246. (in Chinese)
[28] 巢军委, 王建国, 戴敏, 等. 生物炭对水稻土 Olsen - P 的影响[J]. 土壤, 2015, 47(4): 670 - 674.
CHAO Junwei, WANG Jianguo, DAI Min, et al. Effects of biochar amendment on phosphorus availability in paddy soil[J]. Soils, 2015, 47(4): 670 - 674. (in Chinese)
[29] SUN B Y, REN F P, DING W F, et al. Effects of freeze-thaw on soil properties and water erosion[J]. Soil and Water Research, 2021, 16(4): 205 - 216.
[30] 李垒, 孟庆义. 冻融作用对土壤磷素迁移转化影响研究进展[J]. 生态环境学报, 2013, 22(6): 1074 - 1078.
LI Lei, MENG Qingyi. Reviews of phosphorus transport and transformation in soil under freezing and thawing actions[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(6): 1074 - 1078. (in Chinese)
[31] ZHANG Y F, DOU S, MA R, et al. Effects of returning corn straw incorporated with fungi, and fermented corn straw on soil humic acid structural characteristics[J]. Journal of Soils and Sediments, 2023, 23(5): 2048 - 2064.
[32] 董志杰. 长期施用生物炭和氮肥对土壤磷组分及功能微生物的影响[D]. 北京:中国农业科学院, 2023.
DONG Zhijie. Effect of long-term application of biochar and nitrogen fertilizer on soil phosphorus fractions and functional microorganisms[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2023. (in Chinese)
[33] 查庆南, 申昊, 李虹颖, 等. 高磷小麦秸秆提高砂姜黑土磷有效性并促进土壤磷素的转化[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(11): 2001 - 2010.
ZHA Qingnan, SHEN Hao, LI Hongying, et al. High-P wheat straw increases the availability and turnover of phosphorus in lime concretion black soil[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(11): 2001 - 2010. (in Chinese)
[34] 赵玉明, 程立平, 李加加, 等. 东北典型黑土区的土类界定依据分析[J]. 中国水土保持科学, 2020, 18(4): 123 - 129.
ZHAO Yuming, CHENG Liping, LI Jiajia, et al. Research on the definition of soil types in typical black soil regions of Northeast China[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2020, 18(4): 123 - 129. (in Chinese)
[35] 张旭. 生物炭土壤改良剂对白浆土理化性质及其微观结构的影响[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2021.
[36] DU Z Y, ZHOU J M, WANG H Y, et al. Effect of nitrogen fertilizers on movement and transformation of phosphorus in an acid soil[J]. Pedosphere, 2005, 15(4): 424 - 431.
[37] MA F, ZHENG X, ZHANG J, et al. Adsorption of phosphate from aqueous solution by sludge biochar[J]. China Environmental Science, 2024, 44(3): 1347 - 1356.
[38] HE Y, FAN J, LI C, et al. Effect of soil moisture and phosphorus application on concentration of available phosphorus in red soil under areobic rice cultivation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(6): 1196 - 1202.
[39] 包金美, 陈法霖, 杨龙超, 等. 凋落物和根系对沂蒙山区三种森林恢复方式土壤酸性磷酸酶动力学特征的影响[J]. 生态学报, 2024, 44(12): 5294 - 5306.
BAO Jinmei, CHEN Falin, YANG Longchao, et al. Effects of litter and roots on soil acid phosphatase kinetics under three forest restoration types in the Yimeng mountainous area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(12): 5294 - 5306. (in Chinese)
[40] ÖZGÜL M, GÜNES A, ESRINGÜ A, et al. The effects of freeze-and-thaw cycles on phosphorus availability in highland soils in Turkey[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2012, 175(6): 827 - 839.
[41] YU X F, ZOU Y C, JIANG M, et al. Response of soil constituents to freeze-thaw cycles in wetland soil solution[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2011, 43(6): 1308 - 1320.