

秸秆覆盖还田保护性耕作对黄土旱塬土壤磷素组分的影响

李千雪, 李春越, 张文婷, 窦祥祥, 薛英龙, 寇钊阳, 王益, 党廷辉

引用本文:

李千雪, 李春越, 张文婷, 窦祥祥, 薛英龙, 寇钊阳, 王益, 党廷辉. 秸秆覆盖还田保护性耕作对黄土旱塬土壤磷素组分的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43(2): 368–377.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0210>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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>

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>

长期施肥对黄土旱塬农田土壤微生物量碳、氮、磷的影响

李春越, 郝亚辉, 薛英龙, 王益, 党廷辉

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1783–1791 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0240>

磷高效转基因水稻对潮土无机磷形态的影响

倪土, 李刚, 修伟明, 魏琳琳, 侯萌瑶, 杨殿林, 赵建宁

农业环境科学学报. 2017, 36(8): 1551–1556 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-0126>

碱活化载镁橘皮生物炭除磷后对土壤的改良作用

王波, 罗婷, 勾曦, 唐勇, 姜飞, 吴桐, 谢燕华

农业环境科学学报. 2021, 40(1): 155–162 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0627>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李千雪, 李春越, 张文婷, 等. 秸秆覆盖还田保护性耕作对黄土旱塬土壤磷素组分的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(2): 368–377.

LI Q X, LI C Y, ZHANG W T, et al. Effects of conservation tillage with straw mulching on soil phosphorus components in the Loess Plateau [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2024, 43(2): 368–377.



开放科学 OSID

秸秆覆盖还田保护性耕作对黄土旱塬土壤磷素组分的影响

李千雪¹, 李春越^{1*}, 张文婷¹, 窦祥祥¹, 薛英龙¹, 寇钊阳¹, 王益², 党廷辉³

(1. 陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710119; 2. 中国科学院地球环境研究所, 西安 710061; 3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为探究秸秆覆盖保护性耕作对黄土旱塬土壤磷素组分及碱性磷酸酶 $phoD$ 基因的影响,本研究以陕西省咸阳市长武县境内的中国科学院长武黄土高原农业生态试验站为研究平台,设置无秸秆覆盖(CK)、每年7、8、9月高量秸秆覆盖(St_{90})、全生育期低量秸秆覆盖(S_{45})、全生育期高量秸秆覆盖(S_{90})4个处理,探讨不同秸秆覆盖模式下0~20 cm表层土壤基本理化性质、土壤磷素、有机磷组分、无机磷组分、碱性磷酸酶 $phoD$ 基因拷贝数数量特征及其影响机理。结果表明:相同覆盖时间下,全磷(TP)、速效磷(AP)、无机磷、 Ca_2 -P、中等活性有机磷(MLOP)含量均随着秸秆覆盖量的增加而显著增加; Ca_{10} -P是主要的无机磷组分,占比66.03%~72.34%,MLOP是主要的有机磷组分,占比70.70%~78.23%;秸秆覆盖使无机磷中的有效磷源 Ca_2 -P在无机磷中所占的比例显著增加,其他组分占比以及有机磷各组分占比并无显著变化。播种前后的短期覆盖相比于全年长期覆盖更有利于微生物的代谢,从而加快土壤有机磷的合成。不同秸秆覆盖处理土壤无机磷含量为985.33~1 043.33 $mg \cdot kg^{-1}$,显著大于有机磷。冗余分析表明,土壤pH、全碳(TC)、有机碳(SOC)、含水率(SWC)与MLOP含量呈负相关关系,与高稳性有机磷(HSOP)呈正相关关系, Ca_2 -P与SWC、SOC、pH、TP呈正相关关系, Ca_{10} -P与pH、 NH_4^+ -N呈正相关关系。秸秆覆盖可以提高碱性磷酸酶 $phoD$ 基因拷贝数,但全生育期覆盖与高量秸秆覆盖的叠加作用,对碱性磷酸酶 $phoD$ 基因有抑制作用。研究表明,秸秆覆盖可显著改变有机磷各组分含量,全生育期高量秸秆覆盖显著增加无机磷有效组分 Ca_2 -P含量,土壤有机磷与无机磷组分含量变化受土壤TC和pH的影响最大。

关键词:黄土旱塬;农田生态系统;秸秆覆盖;磷素组分;磷酸酶基因

中图分类号:S345;S153.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2024)02-0368-10 doi:10.11654/jaes.2023-0210

Effects of conservation tillage with straw mulching on soil phosphorus components in the Loess Plateau

LI Qianxue¹, LI Chunyue^{1*}, ZHANG Wenting¹, DOU Xiangxiang¹, XUE Yinglong¹, KOU Zhaoyang¹, WANG Yi², DANG Tinghui³

(1. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 2. Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: To explore the impact of straw mulching conservation tillage on the soil phosphorus composition and alkaline phosphatase $phoD$ gene in the Loess Plateau, this study used the research platform of the Changwu Loess Plateau Agricultural Ecological Experiment Station, President of Chinese Sciences in Changwu County, Xianyang City, Shaanxi Province. Four treatments were set up: uncovered (CK), high

收稿日期:2023-03-21 录用日期:2023-05-04

作者简介:李千雪(2000—),女,内蒙古通辽人,硕士研究生,从事土壤环境微生物相关研究。E-mail:qianxueli@snnu.edu.cn

*通信作者:李春越 E-mail:chunyue_li@snnu.edu.cn

基金项目:陕西省科技重点项目(2022NY-074);国家自然科学基金项目(41501255);西安市科技农业攻关项目(21NYYF0033);中央高校基本科研业务费专项资金项目(SYJS202224)

Project supported: Project of Science and Technology Department of Shaanxi Province (2022NY-074); National Natural Science Foundation of China (41501255); Xi'an Science and Technology Project (21NYYF0033); Fundamental Research Funds for the Central Universities (SYJS202224)

straw coverage (S_{190}) every July, August, and September, low straw coverage (S_{45}) throughout the growth period, and high straw coverage (S_{90}) throughout the growth period. The basic physical and chemical properties, the soil phosphorus, total organic phosphorus components, total inorganic phosphorus components, and number of copies of alkaline phosphatase *phoD* genes, and their impact mechanisms in the 0–20 cm topsoil layer under different straw mulching modes were studied. The results showed that, with the same coverage time, the contents of total phosphorus (TP), available phosphorus (AP), inorganic phosphorus, Ca_2 -P, and moderately labile organic phosphorus (MLOP) increased significantly with the increase in the coverage amount; Ca_{10} -P was the main inorganic phosphorus component, accounting for 66.03%–72.34%, while MLOP was the main organic phosphorus component, accounting for 70.70%–78.23%. Straw mulching significantly increased the proportion of effective phosphorus source Ca_2 -P in inorganic phosphorus, while there was no significant change in the proportion of the other components in inorganic phosphorus and the proportion of organic phosphorus components. Short-term mulching before and after sowing was more beneficial to microbial metabolism than long-term mulching throughout the year, thereby accelerating the synthesis of soil organic phosphorus. The inorganic phosphorus content of soil under different straw mulching treatments ranged from 985.33 $mg \cdot kg^{-1}$ to 1 043.33 $mg \cdot kg^{-1}$, which was significantly higher than that of organic phosphorus. Redundancy analysis showed that the soil pH, total carbon (TC), soil organic carbon (SOC), and soil water content (SWC) were negatively correlated with the MLOP content, while they were positively correlated with highly stable organic phosphorus (HSOP). Ca_2 -P was positively correlated with SWC, SOC, pH, and TP. Ca_{10} -P was positively correlated with pH and NH_4^+-N . Straw mulching could increase the copy number of the alkaline phosphatase *phoD* gene, but the superposition of the full growth period mulching and high amount of straw mulching could inhibit the production of the alkaline phosphatase *phoD* gene. Straw mulching could significantly change the contents of organic phosphorus components, and high straw mulching significantly increased the content of inorganic phosphorus components, such as Ca_2 -P, throughout the growth period. The changes in the contents of soil organic and inorganic phosphorus components were most affected by soil TC and pH.

Keywords: Loess Plateau; farmland ecosystem; straw mulching; phosphorus fraction; phosphatase gene

磷是植物生长发育所必需的营养元素,在作物生长代谢过程中发挥着重要作用^[1]。土壤是作物体内磷素的主要来源,对磷有很强的吸附和固定作用。在农田生态系统中外施的磷肥不仅易被土壤微生物转化为有机磷,还会被土壤中的重金属离子固定成难溶的无机磷,从而使得土壤速效磷的含量较低,导致肥料无法被完全利用,甚至形成磷胁迫^[2]。研究表明磷胁迫会延缓作物生长,导致作物产量下降^[3]。磷胁迫与不同形态磷转化密切相关,而不同形态的磷在土壤中的有效转化能力不同,其被作物利用程度也不同。在固磷能力较强的土壤中,土壤通过矿化作用可将有机磷转化为可被作物直接利用的速效磷。微生物量磷作为土壤磷的活性组分,可通过微生物自身循环转变而被作物利用;有机磷与无机磷组分的变化对磷素肥力具有重要影响;全磷表征土壤磷素总水平,上述磷素可作为研究土壤磷肥力供应及磷素有效性的重要因子。土壤有机磷不能直接被植物利用,需先在碱性磷酸酶作用下转化为无机磷才可用于植物生长代谢,磷酸酶活性高低直接影响着土壤中有机磷的分解转化及其生物有效性^[4]。土壤磷素有效性是植物生长发育的主要限制性因素,许多作物通过有机物磷素循环来获取所需磷素^[5]。因此,提高磷利用率不论是在作物生长发育方面,还是在增加作物产量、减少环境污染方面都具有重要意义^[6]。

秸秆覆盖作为常见的农田管理模式,对土壤微生物的活性及其介导的有机质和养分周转具有重要影响^[7]。秸秆覆盖不仅可以调节土壤水热平衡、提高水分利用率和矿质营养元素有效性,实现作物稳产和增产^[8],同时还可以减少秸秆不合理利用引发的环境污染问题^[9]。国内外关于秸秆覆盖后土壤磷素变化的研究已取得一定的进展。李飞等^[10]从秸秆对土壤氮磷元素的阻控方面进行研究,发现秸秆覆盖对颗粒态磷的磷素流失的阻控率超过85%,其在维持土壤养分与防止面源污染方面都有贡献。Li等^[11]对2 a休耕期水稻田研究后发现,秸秆覆盖能够显著增加土壤有机磷含量,促进水稻土壤中无机磷向不稳定态转化分解。Lan等^[12]指出秸秆还田通过影响土壤速效磷含量从而对作物产量造成影响。Tu等^[13]的研究表明,与常规施肥秸秆不还田相比,秸秆还田后土壤微生物活性、生物量分别提高了42%和64%。虽然秸秆覆盖对土壤磷素影响及其转化的研究较多,但其多集中在土壤磷吸附解吸过程方面^[14],而对不同生育期、不同秸秆覆盖量处理下土壤磷素组分的研究仍然较少。因此,本研究以陕西省长武黄土高原农田生态试验站为研究平台,设置不同秸秆覆盖方式,探究不同秸秆覆盖方式下土壤磷素组分及碱性磷酸酶基因丰度的变化,以期为提高土壤磷素利用效率和合理应用秸秆覆盖方式提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验区位于陕西省咸阳市长武县境内的中国科学院长武黄土高原农业生态试验站(35°14'N, 107°41'E)。该地区属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均降水量580 mm,年均气温9.1℃,无霜期171 d,地下水位50~80 m,试验田土壤为黑垆土。试验站始建于1984年,小麦为该地区主要作物。试验区初始耕层土壤有机质含量为10.50 g·kg⁻¹,全氮(TN)含量为0.80 g·kg⁻¹,全磷(TP)含量为1.26 g·kg⁻¹,速效磷(AP)含量为3.00 mg·kg⁻¹,pH为8.10。

1.2 试验设计

本试验起始于2008年,已进行连续10 a覆盖处理,试验区共有4个处理,每个处理3个重复,随机区组设计,样方面积为4 m×6 m,每个样方间距1 m。4个处理分别是:①对照无秸秆覆盖(CK);②每年7、8、9月高量秸秆覆盖(S_{t90});③全生育期低量秸秆覆盖(S₄₅);④全生育期高量秸秆覆盖(S₉₀)。秸秆覆盖为小麦秸秆粉碎后100%表面覆盖,7、8、9月采取小麦播种前覆盖方式,低量秸秆覆盖处理的小区秸秆覆盖量为45 kg·hm⁻²,高量秸秆覆盖处理的小区秸秆覆盖量为90 kg·hm⁻²。各处理施用的氮肥为尿素(纯N量为90 kg·hm⁻²)、磷肥为过磷酸钙(P₂O₅量为135 kg·hm⁻²)。每年度试验处理相同,种植制度为小麦连作,常规耕作。7、8、9月秸秆覆盖为覆盖后将秸秆移除。

1.3 样品采集

样品采集时间为2019年6月小麦收获季末。采用五点采样法,使用土钻采集0~20 cm处耕层土壤。将所采集的土壤样品密封标记后,及时带回实验室进行处理。剔除土壤中的动物残体、碎小石子、植物枯枝、杂草及其他杂质。土壤过2 mm筛后,取部分土样进行风干处理,用于测定土壤理化指标,剩余土样在4℃冰箱保存,并尽早进行微生物量测定。

1.4 试验方法

采用土壤熏蒸提取法^[15]测定土壤微生物量磷(MBP),Olsen法^[16]测定AP;土壤TP采用浓硫酸-高氯酸消煮钼锑抗比色法测定;有机磷采用烧灼法测定;土壤全碳(TC)采用TOC仪测定;土壤有机碳(SOC)采用高温外加热重铬酸钾氧化-容量法测定;土壤TN采用全自动凯氏定氮仪测定;土样经K₂SO₄溶液浸提后,采用连续流动分析仪(Autoanalyzer 3, Bran-Luebbe, 德国)测定土壤铵态氮(NH₄⁺-N)和硝态氮(NO₃⁻-

N)含量;土壤pH采用pH计(水土比2.5:1)测定;土壤含水率(SWC)采用105℃条件下烘干法测定;土壤田间持水量(FC)采用差量法测定;土壤无机磷分级测定采用顾益初-蒋柏藩法;土壤有机磷分级测定使用Bowman-Cole法,有机磷主要包括中等活性有机磷(Moderately labile organic phosphorus, MLOP)、活性有机磷(Labile organic phosphorus, LOP)、中稳性有机磷(Moderately stable organic phosphorus, MSOP)、高稳性有机磷(High stable organic phosphorus, HSOP)。上述方法具体参见《土壤农化分析》^[17]。碱性磷酸酶基因丰度检验:取0.5 g新鲜土壤样品,每个样本设置3组平行,按照Fast DNA[®] SPIN Kit for Soil试剂盒(MP BIOMEDICALS, 美国)的操作步骤进行DNA提取,并检测DNA质量,采用荧光染料掺入法(SYBR green)进行实时荧光定量PCR测定^[18]。

1.5 数据处理

采用SPSS 26.0对不同处理进行单因素方差分析和最小差异显著性检验(LSD),采用Origin 2018及派森诺基因云平台进行图的绘制。

2 结果与分析

2.1 不同秸秆覆盖对土壤基本理化性质的影响

长期秸秆覆盖处理下土壤理化性质见表1。秸秆覆盖处理下土壤TN、NH₄⁺-N和NO₃⁻-N较CK均有不同程度的降低。除S₄₅处理外,其他处理条件下土壤TC含量均降低。秸秆覆盖处理显著提高了土壤pH与SOC,但各覆盖处理间差异不显著。长期不同覆盖处理间土壤SWC差异显著,其中S₉₀处理下土壤的SWC最高。秸秆覆盖处理显著降低了FC, S_{t90}处理下FC最低。

2.2 不同秸秆覆盖对土壤全磷、速效磷、微生物量磷的影响

长期秸秆覆盖处理下土壤部分磷素含量见表2。不同秸秆覆盖处理下土壤TP存在差异,与CK相比, S_{t90}、S₄₅处理土壤TP含量降低, S₉₀处理TP显著高于其他处理;秸秆覆盖对土壤AP有显著影响,但3组秸秆覆盖处理下土壤AP含量并无显著差异,说明覆盖时长对土壤AP影响不大;不同秸秆覆盖处理土壤MBP变化显著, S_{t90}处理土壤MBP含量显著高于其余处理, S₄₅、S₉₀处理的MBP含量显著低于其余处理,说明7、8、9月短期秸秆覆盖对土壤MBP含量具有显著影响。

2.3 不同秸秆覆盖处理对土壤无机磷及其组分的影响

不同秸秆覆盖处理土壤无机磷含量为985.33~

表1 不同处理土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of soil under different treatments

处理 Treatment	pH	全氮 TN/(g·kg ⁻¹)	全碳 TC/(g·kg ⁻¹)	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N/(g·kg ⁻¹)	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N/(mg·kg ⁻¹)	有机碳 SOC/(mg·kg ⁻¹)	含水率 SWC/%	田间持水量 FC/%
CK	7.81±0.01b	1.14±0.09a	17.91±0.15ab	0.24±0.02a	74.97±2.26a	7.08±0.09b	8.66±0.04d	44.95±0.18a
St ₉₀	8.10±0.03a	1.01±0.05b	17.03±0.15c	0.11±0.02d	19.12±0.30b	7.78±0.42ab	10.29±0.11c	39.09±0.22d
S ₄₅	8.12±0.03a	1.04±0.04ab	18.45±0.53a	0.19±0.02b	18.25±0.73bc	7.97±0.70a	11.15±0.04b	44.13±0.10b
S ₉₀	8.14±0.01a	1.00±0.03b	17.53±0.26bc	0.15±0.01c	15.71±0.16c	8.46±0.32a	12.57±0.15a	39.98±0.16c

注:同列不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different letters in the same column indicate significant differences between treatments at the 0.05 level. The same below.

表2 不同处理土壤磷素含量

Table 2 Phosphorus content of soil under different treatments

处理 Treatment	全磷 TP/(mg·kg ⁻¹)	速效磷 AP/(mg·kg ⁻¹)	微生物量磷 MBP/(mg·kg ⁻¹)
CK	1 193.00±2.83b	47.00±0.92b	11.88±2.39b
St ₉₀	1 184.67±10.61b	51.90±0.50a	18.36±2.40a
S ₄₅	1 170.00±5.52b	51.90±0.50a	8.39±0.88c
S ₉₀	1 242.00±9.19a	52.80±1.06a	7.26±1.08c

1 043.33 mg·kg⁻¹(图1A)。St₉₀、S₄₅处理无机磷含量均比CK有所降低,分别较CK减少了26.33、46.33 mg·kg⁻¹;与此相反,S₉₀处理下无机磷含量显著高于St₉₀、S₄₅处理。由图1B可知,不同秸秆覆盖处理的土壤无机磷组分比例情况为:Ca₁₀-P所占比例最大,为66.03%~72.34%,显著高于其他组分;Ca₈-P所占比例次之,为12.87%~13.90%;Al-P与Ca₂-P的占比为4.42%~11.29%;Fe-P与AP所占比例最低,为1.40%~3.11%,显著低于其他4个无机磷组分。

由图1C到图1H可知,不同秸秆覆盖处理的土壤无机磷各个组分含量均发生了改变。Ca₁₀-P含量变化不显著,St₉₀、S₄₅、S₉₀的Ca₁₀-P含量分别较CK处理降低了11.33、14.83、20.33 mg·kg⁻¹;Ca₈-P、Al-P、Fe-P、O-P含量在不同秸秆覆盖条件下变化均不显著;与CK相比,秸秆覆盖处理下Ca₂-P含量均显著升高,其中S₉₀处理含量最高,比CK处理高45.17 mg·kg⁻¹。

2.4 不同秸秆覆盖处理对土壤有机磷及其组分的影响

秸秆覆盖处理可提高土壤有机磷含量,但差异并不显著(图2A),与CK相比,S₄₅处理有机磷增加量最多。由图2B可知,不同秸秆覆盖的土壤有机磷组分比例情况为MLOP>LOP>MSOP>HSOP,MLOP所占比例最大,显著高于其他有机磷组分,HSOP所占比例显著低于其他3个有机磷组分所占比例。由图2可知,不同秸秆覆盖的土壤有机磷各个组分均发生了改变。覆盖前后LOP含量并无显著性变化,其中St₉₀处

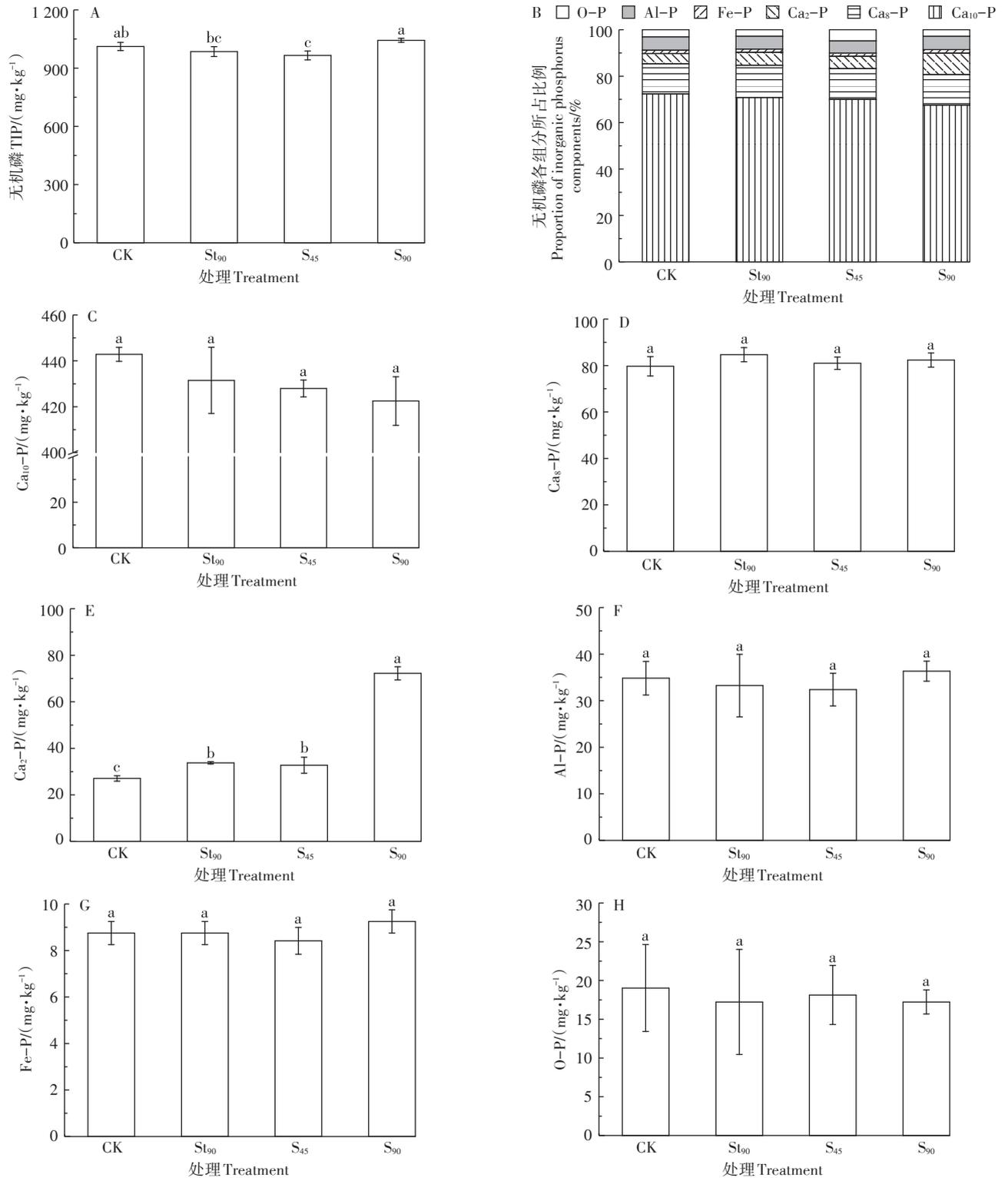
理的LOP含量高于S₄₅处理;MLOP含量分布在106.48~160.46 mg·kg⁻¹,其中S₄₅处理的土壤MLOP含量显著低于其他3组处理,仅有106.48 mg·kg⁻¹,相比于CK处理减少了33.64%;MSOP含量分布在12.83~18.96 mg·kg⁻¹,其中St₉₀处理比CK处理含量显著增加了43.08%,其余处理间差异不显著;HSOP含量分布在10.06~11.33 mg·kg⁻¹,S₄₅处理比CK处理显著增加了12.63%。

2.5 不同秸秆覆盖对土壤碱性磷酸酶 $phoD$ 基因的影响

由图3和表2可知,不同秸秆覆盖处理土壤碱性磷酸酶 $phoD$ 基因拷贝数量的变化规律与土壤TP的变化规律相反。St₉₀、S₄₅处理土壤碱性磷酸酶 $phoD$ 基因拷贝数量均高于CK处理,S₉₀处理碱性磷酸酶 $phoD$ 基因拷贝数量最少,随覆盖量增加碱性磷酸酶 $phoD$ 基因拷贝数量显著降低。热图表明,土壤碱性磷酸酶 $phoD$ 基因拷贝数量与土壤TP含量之间呈极显著负相关关系,与无机磷含量之间呈显著负相关关系,与其他因子不相关。

2.6 基于冗余分析的不同秸秆覆盖对土壤磷素组分影响的因素分析

以不同秸秆覆盖处理土壤有机磷组分含量为响应变量,以土壤基本理化性质为解释变量进行RDA,结果表明,轴1和轴2分别占总变异的68.58%和19.89%(图4A)。根据RDA中的质心原理和距离法则,HSOP含量与SWC、TC、SOC和pH呈正相关,与TP、TN、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N含量呈负相关;MSOP含量与pH呈正相关,与SWC、TC、TP、TN、SOC、NO₃⁻-N和NH₄⁺-N含量呈负相关;MLOP与NO₃⁻-N、TP和TN含量呈正相关,与其他因子呈负相关;而土壤LOP含量与上述土壤基本性质均呈负相关。依据图4B可知土壤TC和pH是土壤有机磷组分含量大小的主要影响因素。以土壤无机磷组分含量为响应变量进行RDA的结果表明,轴1和轴2分别占总变异的72.56%和8.08%(图4C)。



不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同。

Different letters indicate significant differences between treatments at the 0.05 level. The same below.

图1 不同处理土壤无机磷及其组分含量

Figure 1 Content of inorganic phosphorus and its components in soil under different treatments

Ca₂-P和Fe-P含量与土壤TP、pH、SWC、SOC呈正相关,与TC、TN、NO₅-N、NH₄⁺-N含量呈负相关;O-P和

Ca₁₀-P与NH₄⁺-N和pH呈正相关,与土壤其他因子呈负相关;Ca₈-P含量与TC、TN、NO₅-N、TP含量呈正相

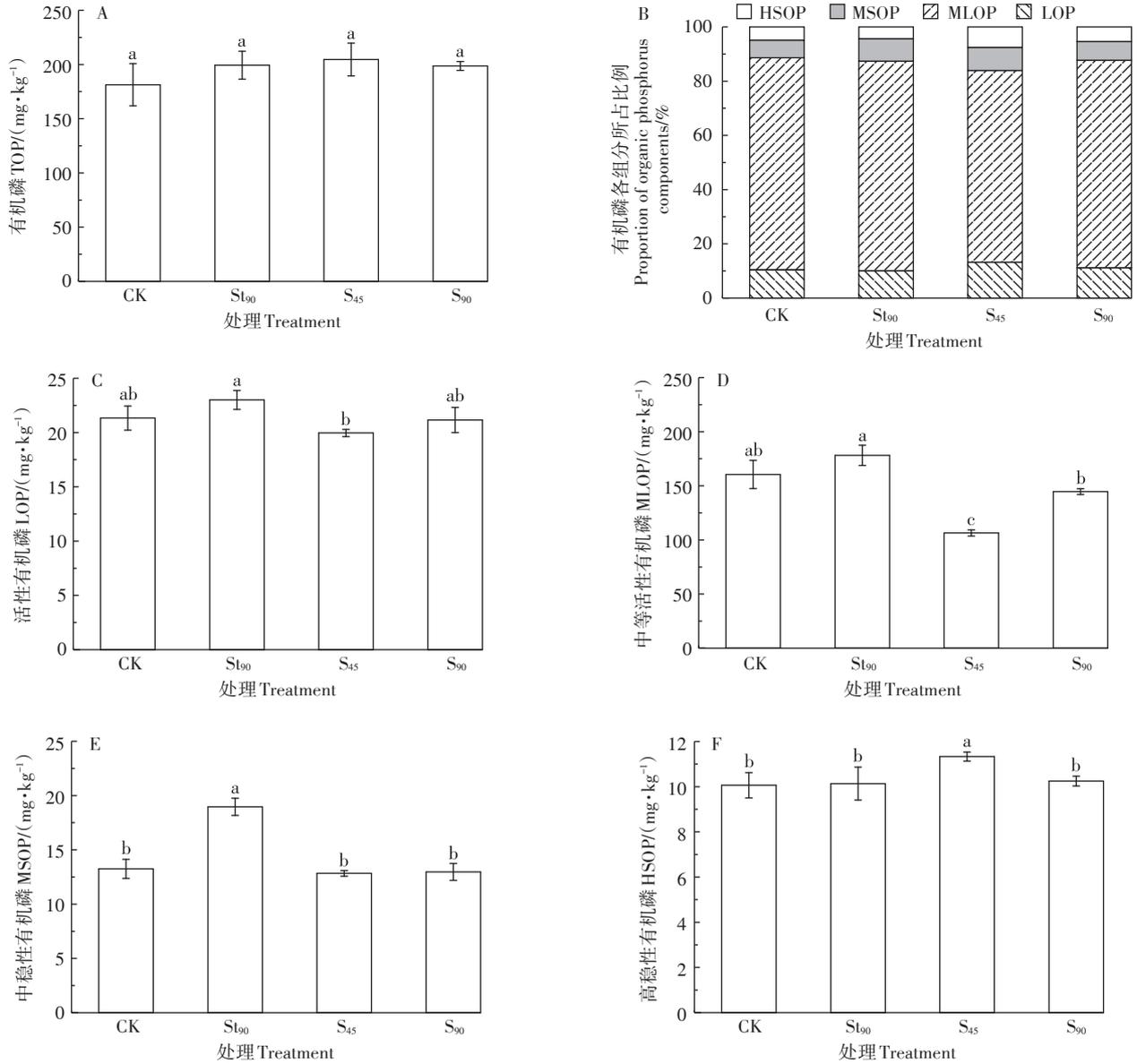


图2 不同处理土壤有机磷及其组分含量

Figure 2 Contents of soil organic phosphorus and its components under different treatments

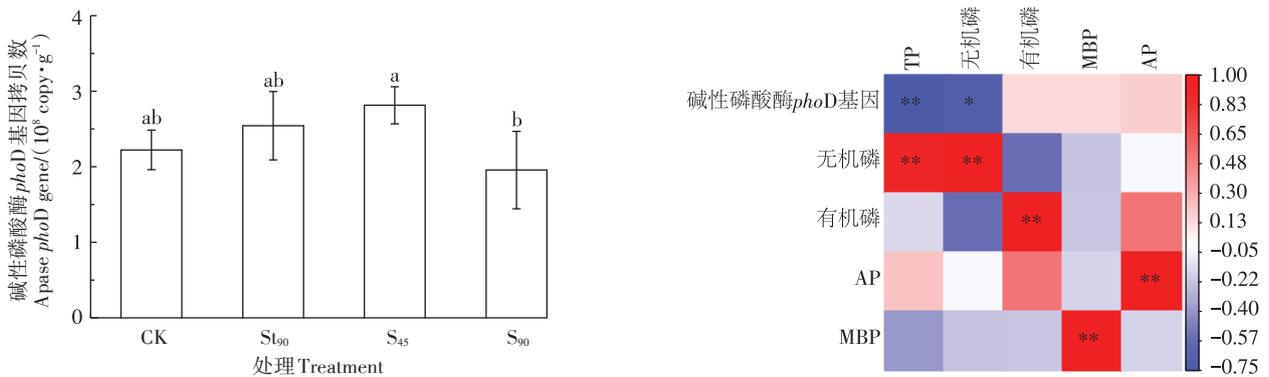


图3 不同处理土壤碱性磷酸酶 *phoD* 基因拷贝数量及其与磷素相关性分析

Figure 3 Copy number of soil alkaline phosphatase *phoD* gene under different treatments and its correlation with soil phosphorus

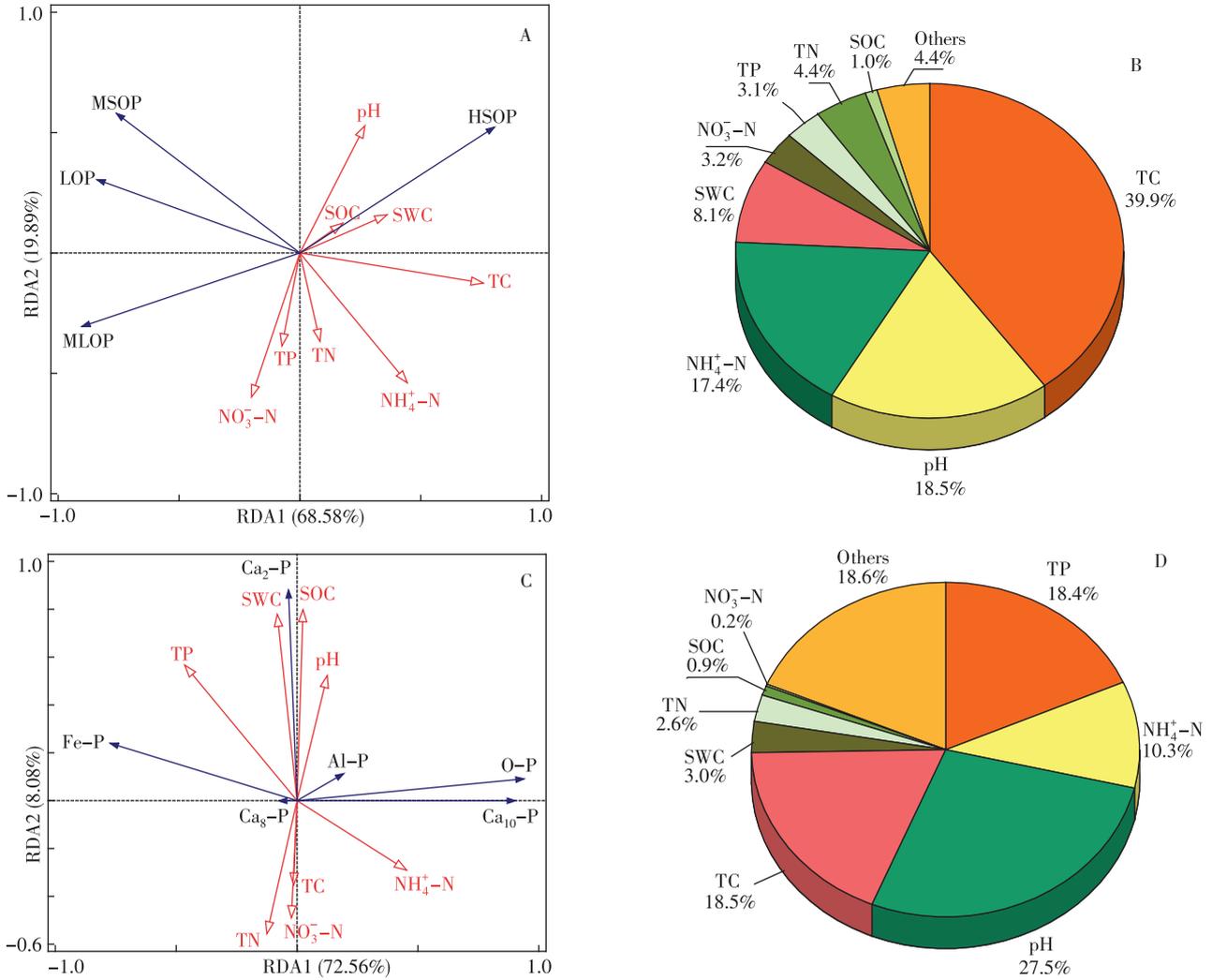


图4 土壤理化因子与土壤有机磷组分(A和B)和无机磷组分(C和D)的冗余分析

Figure 4 Redundancy analysis of soil physicochemical factors and soil organic phosphorus components(A and B) and inorganic phosphorus components(C and D)

关;而Al-P与pH、SOC、SWC、NH₄⁺-N含量呈正相关关系。依据图4D可知,pH、TC和TP是影响土壤无机磷组分含量的主要因素。

3 讨论

3.1 不同秸秆覆盖处理对土壤磷素含量的影响

植物生长发育所需部分或全部磷素可通过MBP的周转完成,MBP是土壤磷库中最为活跃的部分,其对土壤环境变化十分敏感^[19]。研究发现,秸秆还田可以显著提高土壤MBP含量^[20]。本试验中,与CK相比,St₉₀处理下MBP含量显著提升,说明不同生育期秸秆覆盖对土壤微生物具有显著影响,播种前及播种时进行秸秆覆盖,秸秆为微生物生长提供了丰富的碳源,有效激发了微生物群落活性,为其生长代谢提供

了良好的生存环境。S₄₅、S₉₀处理与之相反,表明全生育期秸秆覆盖可能对土壤微生物具有抑制作用。虽然秸秆含有较高的磷,但秸秆腐解只将少量的磷释放到土壤中,秸秆中仍有大部分结构复杂难降解的磷素及营养物质,土壤微生物生命活动所需养分减少可能是造成土壤MBP降低的原因。另外,本研究还发现不同秸秆覆盖处理下土壤SWC含量显著提高,土壤理化性质发生变化对土壤微生物的生存环境造成影响,长期覆盖引起的水热条件变化也可能是影响土壤MBP含量的原因之一。TP含量反映了土壤磷库的大小,AP可被植物直接利用^[21]。本试验中,S₉₀处理的TP含量显著高于其他处理,这可能与秸秆覆盖后水热条件发生改变引起的磷活化有关,土壤温度升高对有机磷含量起主要作用。李世朋等^[22]的研究中提到即使

短时间的提取过程,温度也会对有机磷含量产生显著影响。成臣等^[23]的研究表明,秸秆还田条件下土壤AP含量呈逐年递增趋势,但不同年限间含量变化没有显著差异。孙星等^[24]的研究发现,长期秸秆还田能够显著增加土壤TP和AP的含量,但短期模式下对土壤TP的影响并不显著,说明长期秸秆覆盖才可以显著增加土壤TP与AP含量,这与本研究结果一致。本研究还发现不同秸秆覆盖处理对土壤无机磷的影响远大于有机磷,说明无机磷是影响黄土旱塬农田土壤磷素供应能力的敏感磷源。

3.2 不同秸秆覆盖处理对有机磷组分与无机磷组分的影响

土壤中不同形态无机磷的含量不同,其有效性也不同。本研究对不同秸秆覆盖处理后的土壤样品进行无机磷分级测定,发现不同秸秆覆盖后的土壤Ca₂-P含量相对于CK样本均有显著性增长,且随着秸秆覆盖量与覆盖时间的增加,S₉₀处理的Ca₂-P含量也比St₉₀、S₄₅有显著性提高。Ca₁₀-P含量随覆盖处理变化而变化,但各处理间差异并不显著。王玉平等^[14]对5~10 cm土样的无机磷组分进行研究,发现免耕与覆盖对稳定性无机磷和高稳定性无机磷无显著影响,这与本研究结果一致。Ca₂-P增加可能与秸秆分解过程产生的过磷酸钙有关,过磷酸钙的主要成分是一水磷酸钙,其进入土壤后与土壤胶体上的交换性Ca作用首先生成的就是Ca₂-P;此外秸秆覆盖显著增加土壤pH,冗余分析显示Ca₂-P与pH呈正相关关系,pH是影响无机磷组分变化的主要因子,据此推测Ca₂-P的增加可能也与pH相关,pH越大Ca₂-P含量越多。以往研究表明磷在碱性、石灰性和中性土壤中大多会转化为Ca-P^[25],而在酸性土壤条件下更多地会转化为Fe-P和Al-P^[26],这些研究结果验证了这一推测。此外Ca₁₀-P含量与Ca₂-P含量变化相反,推测秸秆覆盖可以促进无效态的Ca₁₀-P向有效态的Ca₂-P转化。

土壤有机磷同样是土壤磷素的重要组成部分,其具有移动性强、土壤组分被固定程度低的特点^[27]。微生物对有机磷的作用一方面是对有机磷的矿化分解,使其转变为无机磷再吸收,另一方面是微生物代谢过程中产生的磷酸酶会促进稳定态有机磷向活性有机磷转化^[28]。高志强等^[29]研究发现总有机磷含量、LOP含量与MLOP含量在免耕条件下秸秆覆盖处理均显著高于传统耕作处理。本研究对不同秸秆覆盖处理后的样品进行有机磷分级测定,发现LOP、MLOP以

及MSOP含量为St₉₀>CK>S₉₀>S₄₅。这种现象与本试验对MBP的猜测一致,由于土壤经St₉₀处理后土壤微生物处于适宜的环境条件,代谢加快,HSOP、LOP、MLOP以及MSOP发生转变,从而出现St₉₀处理下的各有机磷组分含量要高于S₉₀处理的现象。MLOP含量占据总有机磷含量的75.71%,是主要的有机磷组分,这与前人研究结果相似^[30]。MLOP在S₉₀处理下的含量显著高于S₄₅处理,说明其随着覆盖量的增加而增加。冗余分析表明pH和TC是影响土壤有机磷组分变化的重要环境因子,而LOP、MLOP以及MSOP与pH、TC呈现负相关关系,说明秸秆覆盖主要通过驱动pH、TC而影响有机磷组分变化。

3.3 不同秸秆覆盖处理对土壤碱性磷酸酶*phoD*基因的影响

*phoD*是微生物编码碱性磷酸酶的关键基因,受农业管理与环境因素的显著影响^[31]。本试验S₄₅处理的碱性磷酸酶*phoD*基因丰度高于S₉₀,说明与低量秸秆覆盖相比高量秸秆覆盖会导致土壤碱性磷酸酶*phoD*基因丰度下降,这可能是由于过量秸秆覆盖会提高土壤TP含量,促进土壤有机磷向无机磷转化,土壤可利用的磷素增加,而*phoD*基因属于磷饥饿诱导基因,在土壤TP含量增高的情况下,*phoD*基因表达受到抑制,使得*phoD*基因丰度降低^[32]。此外本研究发现生育期秸秆覆盖时间(即7、8、9月覆盖和全生育期覆盖)也会对碱性磷酸酶*phoD*基因丰度产生影响,说明碱性磷酸酶*phoD*基因丰度不仅与秸秆覆盖量有关,而且与地表温度、土壤水热条件、秸秆覆盖时间、土壤pH等多种因素有关^[33]。土壤碱性磷酸酶是土壤中最主要的水解酶,是鉴别土壤有机磷转化能力的指标,其活性高低直接影响土壤磷素状况^[34]。Li等^[35]的研究表明*phoD*基因丰度与土壤碱性磷酸酶活性呈极显著正相关,携带*phoD*基因的细菌是土壤碱性磷酸酶的主要生产者。战厚强等^[36]研究发现,不同秸秆覆盖量处理均增加了土壤碱性磷酸酶活性,但半量秸秆还田处理的碱性磷酸酶活性均高于原倍数还田处理,这与本研究低量秸秆覆盖土壤碱性磷酸酶*phoD*基因丰度高于高量秸秆覆盖的结果相似,说明秸秆还田对碱性磷酸酶活性的影响主要是通过改变*phoD*基因完成的。

4 结论

(1) 秸秆覆盖对土壤理化性质具有显著影响,覆盖时间越长,覆盖量越大,土壤pH与含水率越高。

(2)全磷、无机磷、无机磷中的有效磷源 Ca_2-P 含量均随着覆盖量的增加而显著增加。7、8、9月高量秸秆覆盖可有效提高有机磷组分含量。不同秸秆覆盖处理土壤无机磷含量显著大于有机磷。

(3)土壤全碳和 pH 是影响土壤有机磷与无机磷组分含量的主要因素。

(4)秸秆覆盖可以提高碱性磷酸酶 *phoD* 基因拷贝数,但全生育期覆盖与高量秸秆覆盖的叠加作用,对碱性磷酸酶 *phoD* 基因有抑制作用。碱性磷酸酶 *phoD* 基因主要受土壤全磷的负向驱动。

参考文献:

- [1] GHOSH A, DIPAK R B, RANJAN B, et al. Recycling rice straw enhances the solubilisation and plant acquisition of soil phosphorus by altering rhizosphere environment of wheat[J]. *Soil and Tillage Research*, 2023, 228: 105647.
- [2] 朱春权, 魏倩倩, 党彩霞, 等. 水杨酸通过一氧化氮途径调控水稻缓解低磷胁迫[J]. *中国水稻科学*, 2022, 36(5): 476-486. ZHU C Q, WEI Q Q, DANG C X, et al. Salicylic acid alleviates low phosphorus stress in rice via a nitric oxide-dependent manner[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2022, 36(5): 476-486.
- [3] LIANG L Y, LIU B X, HUANG D, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi alleviate low phosphorus stress in maize genotypes with contrasting root systems[J]. *Plants*, 2022, 11(22): 3105.
- [4] CAO N, ZHI M L, ZHAO W Q, et al. Straw retention combined with phosphorus fertilizer promotes soil phosphorus availability by enhancing soil P-related enzymes and the abundance of *phoC* and *phoD* genes[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 220: 105390.
- [5] SURIYAGODA L D B, RYAN M H, RENTON M, et al. Plant responses to limited moisture and phosphorus availability: a meta-analysis[J]. *Advances in Agronomy*, 2014, 124: 143-200.
- [6] TIAN J, WANG X, TONG Y, et al. Bioengineering and management for efficient phosphorus utilization in crops and pastures[J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2012, 23(6): 866-871.
- [7] SONG C W, DU H S. Effects of corn straw cover years on soil organic matter and compactness in typical black soil areas of Songnen Plain[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2022, 16(1): 44.
- [8] CHEN Z, WANG H, LIU X, et al. Changes in soil microbial community and organic carbon fractions under short-term straw return in a rice-wheat cropping system[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 165: 121-127.
- [9] ZHAO X M, HE L, ZHANG Z D, et al. Simulation of accumulation and mineralization (CO_2 release) of organic carbon in chernozem under different straw return ways after corn harvesting[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 156: 148-154.
- [10] 李飞, 韩兴, 马秀兰, 等. 秸秆覆盖对东北黑土区坡耕地产流产沙及氮磷流失的阻控[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(4): 37-42. LI F, HAN X, MA X L, et al. Straw mulch controls runoff and nitrogen and phosphorus loss from slope farmland in black soil region of northeast China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(4): 37-42.
- [11] LI F, LIANG X, ZHANG H, et al. The influence of no-till coupled with straw return on soil phosphorus speciation in a two-year rice-fallow practice[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 195: 104389.
- [12] LAN Z, LIN X, WANG F, et al. Phosphorus availability and rice grain yield in a paddy soil in response to long-term fertilization[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2012, 48(5): 579-588.
- [13] TU C, RISTAINO J B, HU S. Soil microbial biomass and activity in organic tomato farming systems: effects of organic inputs and straw mulching[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(2): 247-255.
- [14] 王玉平, 郑丽娜, 沈禹颖. 免耕和秸秆覆盖对黑垆土磷素形态组分的影响[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(5): 149-154. WANG Y P, ZHENG L N, SHEN Y Y. Effects of no-till and stubble retention on phosphorus fractions of heilu soil[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2015, 35(5): 149-154.
- [15] VANCE E D, BROOKES P C, JENKINSON D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1987, 19(6): 703-707.
- [16] 杨俐苹, 自由路, 王磊, 等. 基于常规土壤有效磷(Olsen法)分析的高效测试技术研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2011(3): 87-91. YANG L P, BAI Y L, WANG L, et al. Study on the method of determining available phosphorus (Olsen-P) with high testing efficiency[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2011(3): 87-91.
- [17] 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 agrochemical analysis[M]. 3th Edition. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [18] YANG L, DU L L, LI W J, et al. Divergent responses of phod- and pqqc-harboring bacterial communities across soil aggregates to long fertilization practices[J]. *Soil and Tillage Research*, 2023, 228: 105634.
- [19] PENG Y, DUAN Y S, HUO W G, et al. Soil microbial biomass phosphorus can serve as an index to reflect soil phosphorus fertility[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2021, 57(5): 657-669.
- [20] WANG K K, REN T, YAN J Y, et al. Straw returning mediates soil microbial biomass carbon and phosphorus turnover to enhance soil phosphorus availability in a rice-oilseed rape rotation with different soil phosphorus levels[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2022, 335: 107991.
- [21] 裴瑞娜, 杨生茂, 徐明岗, 等. 长期施肥条件下黑垆土有效磷对磷盈亏的响应[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(19): 4008-4015. PEI R N, YANG S M, XU M G, et al. Response of Olsen-P to P balance in black loessial soil under long-term fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(19): 4008-4015.
- [22] 李世朋, 蔡祖聪, 杨浩, 等. 长期定位施肥与地膜覆盖对土壤肥力和生物学性质的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(5): 2489-2498. LI S P, CAI Z C, YANG H, et al. Effects of long-term fertilization and plastic film covering on some soil fertility and microbial properties[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(5): 2489-2498.
- [23] 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.
- [24] 孙星, 刘勤, 王德建, 等. 长期秸秆还田对土壤肥力质量的影响[J]. 土壤, 2007(5):782-786. SUN X, LIU Q, WANG D J, et al. Effect of long-term straw application on soil fertility[J]. *Soils*, 2007(5):782-786.
- [25] SHEN J, LI R, ZHANG F, et al. Crop yields, soil fertility and phosphorus fractions in response to long-term fertilization under the rice monoculture system on a calcareous soil[J]. *Field Crops Research*, 2003, 86(2):225-238.
- [26] HAVLIN J H, TISDALE S L, NELSON W L. Soil fertility and fertilizers: an introduction to nutrient management[M]. 7th Edition. Singapore: Prentice Hall, 2006.
- [27] ZHU X Y, ZHAO X R, LIN Q M, et al. Distribution characteristics of soil organic phosphorus fractions in the Inner Mongolia Steppe[J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2020, 20(4):2394-2405.
- [28] 盛荣, 肖和艾, 谭周进, 等. 土壤解磷微生物及其磷素有效性转化机理研究进展[J]. 土壤通报, 2010, 41(6):1505-1510. SHENG R, XIAO H A, TAN Z J, et al. Advance in phosphorus-dissolving microorganisms and the mechanisms on phosphorus transformation and availability[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010, 41(6):1505-1510.
- [29] 高志强, 蔡立群, 武均, 等. 长期不同耕作措施下陇中黄土高原旱作农田土壤磷的组分特征[J]. 甘肃农业大学学报, 2018, 53(3):58-63. GAO Z Q, CAI L Q, WU J, et al. Effects of long-term different tillage methods on characteristics of soil phosphorus fractions of rain-fed farmland on Loess Plateau of central Gansu Province[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2018, 53(3):58-63.
- [30] 曹璇, 臧怀敏, 赵云丽, 等. 磷高效转基因水稻全生育期根际土壤磷组分特征差异[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(10):1951-1957. CAO X, ZANG H M, ZHAO Y L, et al. Phosphorus fractions in rhizospheric soil of high-phosphorus efficiency transgenic rice during its growth period[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(10):1951-1957.
- [31] ZHANG T X, QIN M Y, WEI C, et al. Suspended particles *phoD* alkaline phosphatase gene diversity in large shallow eutrophic Lake Taihu[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 728:138615.
- [32] 王蕊, 吴宪, 李刚, 等. 东北丘陵区林地转型耕地对土壤编码碱性磷酸酶基因的细菌群落的影响[J]. 微生物学报, 2020, 60(10):2211-2225. WANG R, WU X, LI G, et al. Effect of conversion of forest to arable land in the hilly region, northeast China on soil alkaline phosphatase gene encoding bacterial community[J]. *Acta Microbiologica Sinica*, 2020, 60(10):2211-2225.
- [33] ZHANG T X, WANG J Y, ZHOU S Q, et al. Spatio-temporal dynamic diversity of bacterial alkaline phosphatase *phoD* gene and its environmental drivers in sediments during algal blooms: a case study of shallow Lake Taihu[J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 336:117595.
- [34] LUO G W, LING N, NANPIERI P, et al. Long-term fertilisation regimes affect the composition of the alkaline phosphomonoesterase encoding microbial community of a vertisol and its derivative soil fractions[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2017, 53(4):375-388.
- [35] LI Y, YU X T, LIU H, et al. The spatio-temporal distribution of alkaline phosphatase activity and *phoD* gene abundance and diversity in sediment of Sancha Lake[J]. *Scientific Reports*, 2023, 13(1):3121.
- [36] 战厚强, 颜双双, 王家睿, 等. 水稻秸秆还田对土壤磷酸酶活性及速效磷含量的影响[J]. 作物杂志, 2015(2):78-83. ZHAN H Q, YAN S S, WANG J R, et al. Effects of rice straw returning on activities of soil phosphatase and available P values in soil[J]. *Crops*, 2015(2):78-83.

(责任编辑:李丹)