

靶向保护性耕作对黑土坡耕地土壤全磷、 有效磷和磷组分分布的影响

宋明珂¹, 张少良^{1,2}, 牛晓光¹, 刘智波¹, 肖梓良^{1,2}, 冯兰茜^{1,2}, 闫鹏科^{1,2}

(1. 东北农业大学资源与环境学院, 哈尔滨 150030; 2. 黑土关键物质转运与调控研究中心(东北农业大学), 哈尔滨 150030)

摘要: [目的] 揭示坡面采取不同靶向保护性耕作方式对典型黑土坡耕地土壤总磷(TP)、有效磷(Olsen-P)和磷组分分布的影响机制, 为减少坡面磷素流失, 提高土壤磷有效性等提供科技支撑。[方法] 基于典型黑土坡耕地 2 a 田间耕作试验, 研究常规耕作(CK, 当地传统耕作方式)、坡中靶向免耕秸秆覆盖(NTm)、坡中靶向免耕秸秆覆盖加生物炭(NTm+b)、坡上和坡中同时靶向免耕秸秆覆盖处理(NTtm)、坡中靶向免耕秸秆覆盖加生物炭结合坡上靶向免耕秸秆覆盖(NTtm+b)对玉米播种前和成熟期全坡面土壤 TP、Olsen-P 和磷组分分布和流失的影响。[结果] 与 CK 处理相比, NTm 和 NTm+b 措施降低坡中位置活性有机磷和中等活性有机磷含量, 但因提高坡中位置活性无机磷、中等活性无机磷含量而提高 Olsen-P 含量, 提高坡中位置稳定磷含量而提高 TP 含量。同样, NTtm 和 NTtm+b 措施降低活性有机磷和中等活性有机磷含量, 因提高坡上和坡中位置活性无机磷、中等活性无机磷含量而提高 Olsen-P 含量, 提高坡上和坡中位置稳定磷含量而提高 TP 含量。所有处理坡下则因外部输入减少而降低所有磷组分、TP 和 Olsen-P 含量。从整个坡面来看, NTtm 处理显著提高全坡面的 TP_{stock} 和 Olsen-P_{stock} ($p < 0.05$); 而 NTtm+b 处理只显著提高全坡面的 Olsen-P_{stock} ($p < 0.05$)。[结论] 在坡上和坡中实施靶向保护性耕作可以增加土壤磷储量, 并且通过增加活性磷组分提高土壤磷的有效性, 其中 NTtm 是黑土坡耕地减少磷流失、提高磷有效性和储量的优选耕作措施。

关键词: 靶向免耕秸秆覆盖; 生物炭; 黑土; 有效磷; 磷库

中图分类号: S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2026)05-0238-15

Effects of Targeted Conservation Tillage on the Distribution of Total Phosphorus, Available Phosphorus, and Phosphorus Fractions in Mollisol Sloping Farmland

Song Mingke¹, Zhang Shaoliang^{1,2}, Niu Xiaoguang¹, Liu zhibo¹, Xiao Ziliang^{1,2}, Feng Lanqian^{1,2}, Yan Pengke^{1,2}

(1. School of Resources and Environment, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 2. Research Center of Key Substances Transportation and Regulation in Mollisol (Northeast Agricultural University), Harbin 150030, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to clarify the mechanism by which different targeted conservation tillage practices on slopes affect the distribution of soil total phosphorus (TP), available phosphorus (Olsen-P), and phosphorus fractions in typical mollisol sloping farmland, providing scientific and technological support for reducing phosphorus loss and enhancing soil phosphorus availability. [Methods] Based on a two-year field tillage experiment on typical mollisol sloping farmland, this research investigated the effects of conventional tillage (CK, representing local traditional practices), targeted no-tillage with straw mulching on the middle slope (NTm), targeted middle slope no-tillage with straw mulching combined with biochar application (NTm+b), targeted middle slope no-tillage with straw mulching combined with biochar application and targeted no-tillage with straw mulching applied on top slope (NTtm), and the combination of top slope NT with middle slope (NTtm+b). The

收稿日期: 2026-02-11

修回日期: 2026-03-16

录用日期: 2026-03-28

网络首发日期(www.cnki.net): 2026-07-08

资助项目: 国家重点研发计划项目(2024YFD1501702)

第一作者: 宋明珂(2002—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀对土壤质量影响机制的研究。E-mail: songmingke2002@163.com

通信作者: 张少良(1980—), 男, 博士, 教授, 主要从事土壤侵蚀与土壤肥力研究。E-mail: shaoliang.zhang@neau.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

study examined their impacts on the distribution and loss of soil TP, Olsen-P and phosphorus fractions across the entire slope before corn sowing and at maturity. [Results] Compared with the CK treatment, NTm and NTm+b measures reduced the contents of labile organic phosphorus, and moderately labile organic phosphorus at the middle slope position. However, they increased the Olsen-P content by enhancing the levels of labile inorganic phosphorus and moderately labile inorganic phosphorus at the middle slope, and increased TP content by raising the stable phosphorus content at the middle slope. Similarly, NTtm and NTtm+b measures reduced labile organic phosphorus and moderately labile organic phosphorus contents. They increased Olsen-P content by elevating labile inorganic phosphorus and moderately labile inorganic phosphorus levels at both top and middle slope positions, and increased TP content by enhancing stable phosphorus content at these positions. At the down slope position, all treatments resulted in decreased contents of all phosphorus fractions, TP, and Olsen-P due to reduced external inputs. At the whole slope scale, NTtm treatment significantly increased the total slope's TP stock and Olsen-P stock ($p < 0.05$); while NTtm+b treatment only significantly increased the entire slopes Olsen-P stock ($p < 0.05$). [Conclusion] Targeted conservation tillage on the top and middle slopes can enhance soil phosphorus stock and improve soil phosphorus availability by increasing active phosphorus fractions. Among the strategies, NTtm is the preferred tillage measure for reducing phosphorus loss, improving phosphorus availability, and increasing phosphorus stock in mollisol sloping farmland.

Keywords: targeted no-till with straw mulching; biochar; mollisol; Olsen-P; phosphorus pool

Received: 2026-02-11

Revised: 2026-03-16

Accepted: 2026-03-28

Online(www.cnki.net): 2026-07-08

磷是作物生长发育所必需的大量营养元素之一,也是影响地表水和地下水环境质量的重要物质。磷肥施用是补充农田土壤缺磷的重要途径,然而全球土壤磷矿资源储量有限,且可能在未来100多年内耗光^[1]。因此,磷资源的开采和使用管理十分重要。由于磷肥长期施用的原因,农业土壤中磷的储量多处于较高的水平,但是磷的有效性有限,施入土壤中的磷肥大部分被土壤固定,可被植物吸收的不到20%^[2]。土壤磷储量和有效性的时空分布,除受施肥影响外,还受地形和其他农业管理措施的影响,以及其影响下的水热和土壤侵蚀的影响,导致土壤磷储量和有效性的空间异质性增加,增加农田土壤磷精准管理的难度^[3]。因此,揭示土壤磷储量和有效性时空变异规律,解析磷流失和有效性调控途径等十分重要,是科学管理磷资源,增加作物产量和降低环境污染的重要依据。

据报道^[4]保护性耕作,特别是免耕秸秆覆盖(NT),能够改善土壤结构,保持大团聚体的稳定性,增加土壤有机质含量等,进而能够有效降低耕地坡面土壤侵蚀,减少土壤养分的流失。NT措施除秸秆分解过程补充土壤磷的来源,也因增加溶解磷酸盐的微生物量和土壤磷酸酶活性,进而促进土壤中的有机磷的矿化,使有机磷转化为无机磷,增加土壤磷的有效性^[5]。但是,也有学者^[6]指出,长期NT会导致土壤板结和孔隙度降低,不利于磷的矿化,降低磷的

有效性;磷的迁移能力弱,导致磷肥施用后常富集在NT的表土层,很难被植物吸收。需要关注的是,当气温较低和土壤黏重时,如东北地区的典型黑土,NT通常会造作物减产^[7]。据报道^[8],坡面特殊坡位靶向植被覆盖可有效降低土壤侵蚀,特别是坡中聚集覆盖格局能显著降低坡面产流和产沙。因此,本研究在影响坡面侵蚀的关键坡位实行精准NT,即靶向NT,有望在减少侵蚀的同时也降低磷素流失。有研究^[9]发现,施用生物炭可增加土壤中水稳定性团聚体,改善土壤的孔隙结构,缓解免耕造成的土壤压实,增加降雨入渗,进而可有效降低土壤侵蚀。生物炭也含有大量的有效磷(Olsen-P),施入土壤中可显著提高土壤磷库储量和磷的有效性;而且其也可通过还原、络合溶解及促进微生物活性、植物根系分泌有机酸等过程,激活土壤中活性磷的含量,从而促进磷的有效性^[10]。然而,当前关于坡面靶向NT和靶向免耕秸秆覆盖结合生物炭(NT+BC)对全坡面土壤磷库储量和磷的有效性的影响尚不明确。

本研究以东北黑土区典型坡耕地为研究对象,通过连续2a的田间耕作试验,利用HEDLEY分级法(活性磷、中等活性磷和稳定磷)测定磷组分,同时测定全坡面Olsen-P和总磷(TP),研究坡面实行靶向NT和靶向NT+BC后全坡面土壤磷储量和有效性的时空分布的特征和形成机制,旨在为黑土地坡面土壤磷流失阻控、地力提升和农业环境保护等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于黑龙江省哈尔滨市香坊区向阳乡东北农业大学向阳实验基地(45°45′27″~45°46′33″N, 126°35′44″~126°55′54″E)。试验基地位于寒温带大陆性季风气候区,冬季寒冷干燥,夏季温热多雨,年平均降雨量为 553.5 mm,年平均气温 3.6℃,年平均日照时间 2 400~2 500 h。研究区的土壤类型为温带半湿润地区草原化草甸植被下黄土状黏质沉积物上发育的典型黑土,区域地形为漫川漫岗,坡度主要为 1°~5°。区域主要作物类型为玉米和大豆。

1.2 试验设计

本研究在典型黑土退化坡耕地中选择包含坡上、坡中和坡下的完整坡面,整个坡面坡长 90~120 m,平均坡度 4°,顺坡向下距坡顶距离 0~30 m 被划分为坡上,30~60 m 被划分为坡中,>60 m 被划分为坡下。在试验开始前,在坡上、坡中与坡下分别等距布设多个土壤采样点测定土壤有机碳(SOC),利用孟塞尔土壤颜色比色法初筛再结合土壤有机质含量判别法验证识别出坡中位置为侵蚀严重坡位^[11]。本研究将在侵蚀严重坡位采用保护性耕作措施命名为靶向保护性耕作。该地从 2012—2022 年全坡面采用传统耕作(秸秆粉碎后旋翻还田),施用化肥为主。2022 年 10 月 22 日玉米收获后布置试验小区,2023 年试验设置 3 种耕作处理,具体处理为:对照(CK),为当地的传统耕作方式,具体为前一年秋季作物收获后,全坡面秸秆粉碎还田深翻 20~30 cm 后旋松起垄,次年春季播种;坡中靶向免耕秸秆覆盖(NTm),在坡中(侵蚀严重区域)不耕作,留茬,秸秆全量覆盖还田,采用免耕播种机直播,其他位置采用传统耕作方式;坡中靶向免耕秸秆覆盖加生物炭(NTm+b),

2022 年秋季在坡中均匀撒施 20 t/hm² 生物炭(该施用量为该区域黑土退化修复最佳用量)^[12],使用旋耕机与 0~20 cm 土壤充分混匀,在 2023 年和 2024 年均采取免耕秸秆覆盖还田,次年春季免耕播种,其他位置采用传统耕作方式。由于 2023 年只在坡中进行靶向耕作,遇到强降雨事件,坡上汇水使全坡面减蚀效果差,且易在坡下产生侵蚀细沟,最终影响作物产量。因此,2024 年本研究在坡上和坡中同时进行靶向保护性耕作。2024 年试验共设置 3 个处理,具体处理为:对照(CK),与 2023 年相同;坡上和坡中同时靶向免耕秸秆覆盖(NTtm),在坡上和坡中不耕作,留茬,秸秆全量覆盖还田,采用免耕播种机直播,坡下为传统耕作;坡中靶向免耕秸秆覆盖加生物炭结合坡上靶向免耕秸秆覆盖(NTtm+b),坡上采用免耕秸秆覆盖处理,坡中同 2023 年,坡下为传统耕作。在 2023 年和 2024 年使用免耕播种机种植玉米,行距 65 cm,株距 28 cm。播种时一次性施用矿质复合肥料作为基肥,施量分别为 195 kg/hm² N, 75 kg/hm² P₂O₅ 和 90 kg/hm² K₂O。其他田间管理措施保持一致。

1.3 样品采集与测定

在玉米播种前和成熟期,沿垄向方向间隔 15 m 等距布设采样点,在坡上布设 2 个采样位点 T1 和 T2,坡中布设 2 个采样位点 M1 和 M2,坡下布设 3 个采样位点 B1、B2 和 B3(图 1)。每个采样位点使用五点取样法采集 0~20 cm 耕层土样,混匀后去除作物残留物、石块及其他异物,带回实验室自然阴干后研磨过 2 mm 和 0.15 mm 的筛子,用于土壤化学性质和酶活性测定。土壤全氮(TN)采用半微量凯氏定氮法^[13]测定。土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾外加热氧化法^[13]测定;土壤 pH 和 EC 分别使用 pH 计(雷磁 HS-25)和电导率仪(雷磁 DDSJ-308F)测定(水土比 5:1);土壤酸性磷酸酶的测定采用磷酸苯二钠比色法^[14]。

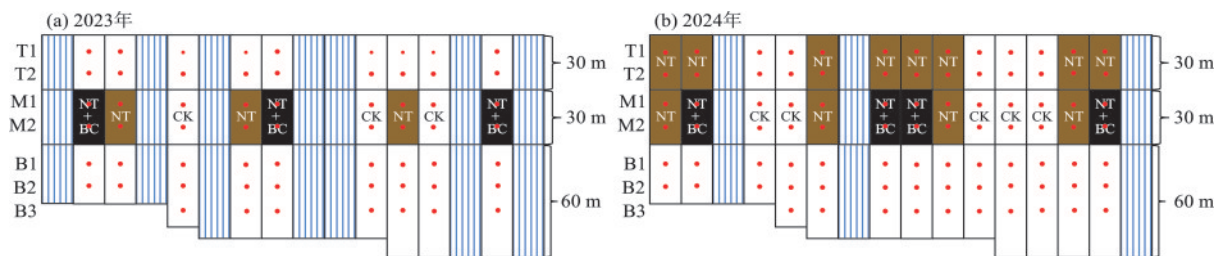


图 1 坡面小区处理分布示意

Fig.1 Sloping farmland plot treatment distribution map

Olsen-P 采用 0.5 mol/L NaHCO₃(pH=8.5)浸提-钼锑抗比色法^[12]测定;土壤 TP 采用硫酸-高氯酸混合消解钼锑抗比色法^[13]测定。土壤磷分级体系采用改进后的 Hedley 分馏法连续提取土壤磷组分^[15];称取过 100 目筛的 0.5 g 土壤样品置于 50 mL 离心管中,依次用 30 mL 超纯水、30 mL 0.5 mol/L NaHCO₃(pH=8.5)、30

mL 0.1 mol/L NaOH 和 30 mL 1 mol/L HCl 提取并放入 25℃振荡器中振荡 16 h,最后用 H₂SO₄-HClO₄消解残留的 P(Res-P)。振荡结束后以 12 000 r/min 的转速离心 10 min,过滤,获得上清液。同时将超纯水、NaHCO₃、NaOH 提取的上清液分为 2 部分:一部分用于测定 H₂O-P、NaHCO₃-Pi、NaOH-Pi,并将另一部分

NaHCO₃、NaOH提取的浸提液和HCl提取的浸提液加入过硫酸铵放入高压灭菌锅中消化,得到上清液中的总磷;从各总磷减去NaHCO₃-Pi、NaOH-Pi含量求得NaHCO₃-Po、NaOH-Po。按照不同磷组分活性又划分为活性磷组分(LP,包括H₂O-P、NaHCO₃-Pi、NaHCO₃-Po)、中等活性磷组分(MLP,包括NaOH-Pi、NaOH-Po)和稳定磷组分(NLP,包括HCl-P、Res-P)。

TP和Olsen-P的储量计算公式为:

$$TP_{stock} = \sum_{i=1}^n C_{TPi} \times BD_i \times H \times A_i \quad (1)$$

式中:TP_{stock}为土壤TP储量,kg;C_{TPi}为*i*坡位土壤TP含量,g/kg;BD为土壤体积质量,g/cm³;H为土层厚度,m;A_i为该坡位面积,m²。

$$Olsen-P_{stock} = \sum_{i=1}^n C_{Olsen-Pi} \times BD_i \times H \times A_i \times 0.001 \quad (2)$$

式中:Olsen-P_{stock}为土壤Olsen-P储量,kg;C_{Olsen-Pi}为*i*坡位土壤Olsen-P含量,mg/kg。

1.4 数据分析与处理

利用Excel 2016软件进行试验数据的整理,并用SPSS 21、Origin 2022和Rstudio软件进行统计学分析和绘图。采用单因素方差分析法(One-way ANOVA)分析靶向保护性耕作对玉米播种前、成熟期土壤磷的含量及其变化量(成熟期土壤磷含量减去播种前土壤磷含量的差值)影响,并用最小显著极差法(LSD法)进行多重比较($\alpha=0.05$)。采用皮尔逊相关性分析(Pearson)和Mantel test(R 4.3.3中的“linkET”),分析成熟期不同靶向保护性耕作、土壤磷组分、理化性质与TP、Olsen-P之间的关系;并利用R 4.3.3中的“plsrm”包构建PLS-SEM,梳理各指标之间的相互关系和对TP、Olsen-P的影响。

2 结果与分析

2.1 靶向保护性耕作对黑土坡耕地TP的影响

在2023年玉米成熟期,与CK处理相比,NTm和NTm+b处理均提高TP含量。其中NTm处理TP含量在M2位置显著增加9.82%($p<0.05$);NTm+b处理TP含量在M2位置显著增加12.88%($p<0.05$)。然而,在NTm和NTm+b处理下,B2和B3位置TP含量均显著低于CK处理($p<0.05$)。CK处理TP含量在坡下位置显著高于坡中位置($p<0.05$),而NTm和NTm+b处理降低坡下位置和坡中位置TP含量的差异(图2a)。通过分析2023年TP的变化量发现,与CK处理相比,NTm和NTm+b处理均升高TP变化量。其中,NTm处理TP变化量在M1和M2位置均分别升高50.11、41.60 mg/kg($p<0.05$)。NTm+b处理TP变化量在M1和M2位置均分别显著升高57.67、32.00 mg/kg($p<0.05$)。在NTm和NTm+b处理下,B2和B3位置TP变化量均显著低于CK处理

($p<0.05$)。CK处理TP变化量在B2和B3位置显著高于坡中位置($p<0.05$),而NTm和NTm+b处理降低在坡下位置和坡中位置TP变化量的差异(图2e)。

在2024年玉米播种前,与CK处理相比,NTm处理TP含量在T2位置显著降低6.76%($p<0.05$),而M1位置的TP含量显著提高6.02%($p<0.05$)。成熟期,与CK处理相比,NTm和NTm+b处理均提高TP含量,其中NTm处理TP含量在M1和M2位置均分别显著提高12.81%、7.29%($p<0.05$);NTm+b处理TP含量在M1和M2位置均分别显著提高11.64%、10.07%($p<0.05$)。在NTm+b处理下,B3位置的TP含量显著低于CK处理($p<0.05$)(图2b)。通过分析2024年TP的变化量发现,与CK处理相比,NTm和NTm+b处理在T1、T2、M1、M2、B1位置均显著升高TP变化量。其中NTm处理TP变化量分别提高34.22、24.84、38.75、41.13、30.12 mg/kg($p<0.05$);NTm+b处理TP变化量分别提高33.54、29.23、42.84、63.33、38.50 mg/kg($p<0.05$)。在NTm和NTm+b处理下,B2和B3位置的TP变化量显著低于CK处理($p<0.05$)。CK处理TP变化量在B2和B3位置均显著高于坡上和坡中位置($p<0.05$),而NTm和NTm+b处理降低了坡下位置与坡上、坡中位置TP变化量的差异(图2e)。

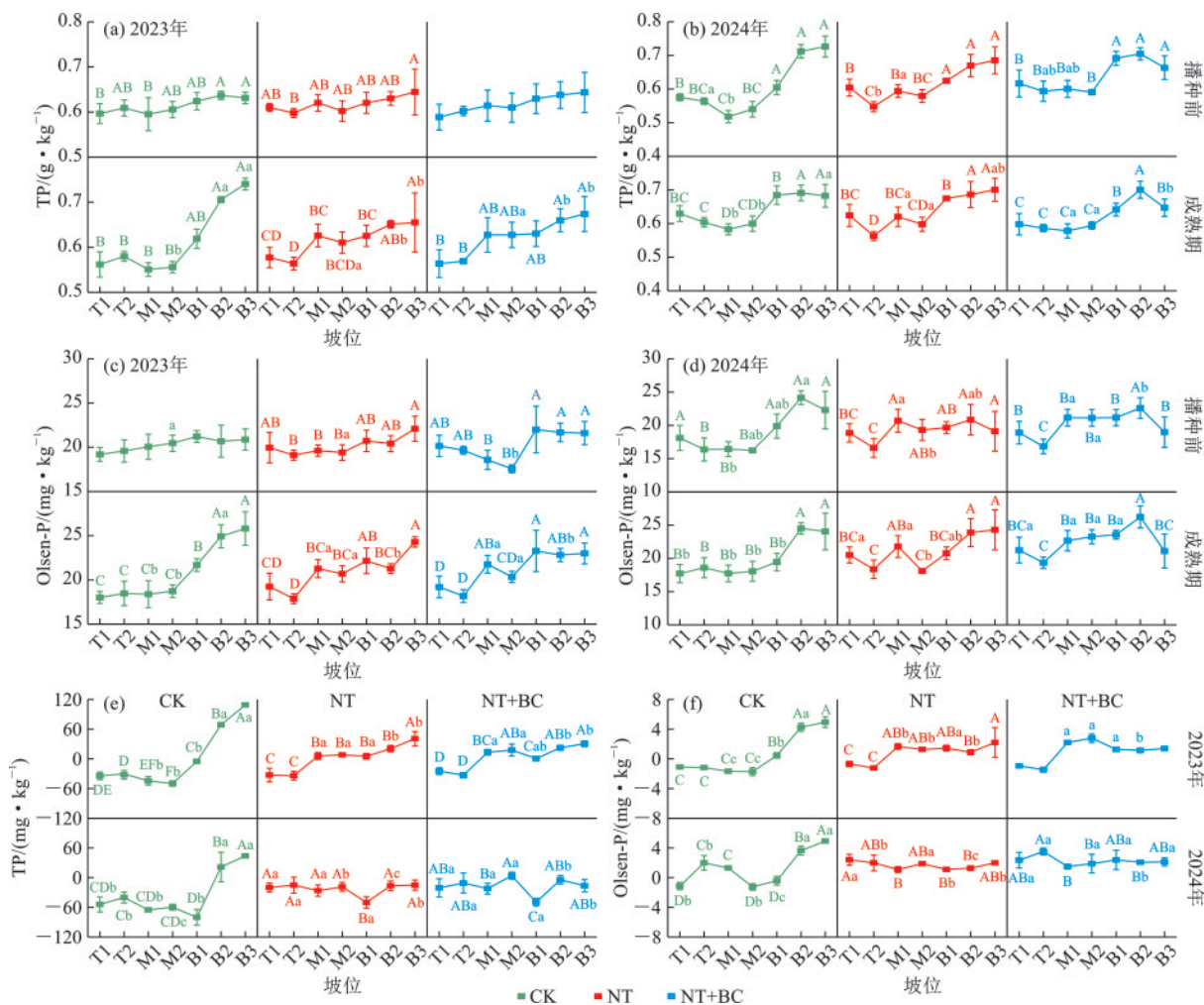
2.2 靶向保护性耕作对黑土坡耕地Olsen-P的影响

2023年,在玉米播前期,与CK处理相比,NTm+b处理Olsen-P含量在M2位置显著降低14.16%($p<0.05$)。成熟期,与CK处理相比,NTm处理和NTm+b处理均提高Olsen-P含量。NTm处理Olsen-P含量在M1和M2位置分别显著提高15.77%、10.48%($p<0.05$),NTm+b处理Olsen-P含量在M1和M2位置分别显著提高18.43%、8.60%($p<0.05$);NTm处理和NTm+b处理B2位置Olsen-P含量均显著低于CK处理($p<0.05$)(图2c)。通过分析2023年Olsen-P变化量发现,与CK处理相比,NTm处理和NTm+b处理均升高Olsen-P变化量。其中NTm处理Olsen-P变化量在M1和M2位置分别显著升高3.30、3.01 mg/kg($p<0.05$);NTm+b处理Olsen-P变化量在M1和M2位置分别显著升高3.87、4.51 mg/kg($p<0.05$),尤其是NTm+b处理Olsen-P变化量在M1和M2位置提升幅度最大,其增加值显著高于同坡位的NTm处理($p<0.05$)。然而在NTm处理和NTm+b处理下,B2和B3位置Olsen-P变化量均低于CK处理。其中在B2位置分别显著降低3.38、3.12 mg/kg($p<0.05$)。CK处理Olsen-P变化量在B2和B3位置显著高于坡中位置($p<0.05$),而NTm处理和NTm+b处理降低B2和B3位置与坡中位置Olsen-P变化量的差异(图2f)。

2024年,在玉米播种前,与CK处理相比,NTm和

NTm+b处理 Olsen-P 含量在 M1 位置分别显著提高 25.90%、28.74% ($p<0.05$) (图 2b)。成熟期,与 CK 处理相比,NTm 处理 Olsen-P 含量在 T1 和 M1 位置分别显著提高 15.75%、22.76% ($p<0.05$),NTm+b 处理 Olsen-P 含量在 T1、M1、M2 位置分别显著提高 19.93%、27.71%、28.82% ($p<0.05$) (图 2d)。通过分析 2024 年 Olsen-P 的变化量发现,与 CK 处理相比,NTm 和 NTm+b 处理可以显著提高 Olsen-P 变化

量。NTm 处理 Olsen-P 变化量在 T1 和 M2 位置分别显著升高 3.55、3.13 mg/kg ($p<0.05$),NTm+b 处理 Olsen-P 变化量在 T1、T2、M2 位置分别显著升高 3.5、1.53、3.13 mg/kg ($p<0.05$)。然而在 NTm 和 NTm+b 处理下,B2 和 B3 位置 Olsen-P 变化量均显著低于 CK 处理 ($p<0.05$)。CK 处理 Olsen-P 变化量在 B2 和 B3 位置显著高于坡中位置,而 NTm 和 NTm+b 处理降低 B2 和 B3 位置与坡中位置之间 TP 变化量的差异 (图 2f)。



注:变化量为该年份成熟期减去播种前之间的差值;不同小写字母表示相同坡位不同处理间差异显著 ($p<0.05$);不同大写字母表示相同处理不同坡位间差异显著 ($p<0.05$)。下同。

图 2 2023 年和 2024 年土壤 TP 和 Olsen-P 含量及其变化量

Fig.2 Differences in soil TP and Olsen-P content and variation in 2023 and 2024

2.3 靶向保护性耕作对黑土坡耕地 LP 的影响

2023 年,在玉米成熟期,与 CK 处理相比,NTm 处理和 NTm+b 处理均提高 H_2O -P、 $NaHCO_3$ -Pi、LP 含量。其中在 NTm 处理下,M2 位置的 H_2O -P 含量显著提高 49.58% ($p<0.05$) (图 3a);M1 和 M2 位置的 $NaHCO_3$ -Pi 含量分别显著提高 34.73%、26.77% ($p<0.05$) (图 3c), $NaHCO_3$ -Po 含量分别显著提高 18.80%、18.29% ($p<0.05$) (图 3e);在 NTm+b 处理下,M1 和 M2 位置的 $NaHCO_3$ -Pi 含量分别显著提高 33.85%、30.56% ($p<0.05$) (图 3c), $NaHCO_3$ -Po 含量

分别显著提高 15.99%、17.89% ($p<0.05$) (图 3e)。在 NTm 处理和 NTm+b 处理下,坡下位置的 $NaHCO_3$ -Po 和 LP 含量通常低于 CK 处理。尤其是 NTm 处理和 NTm+b 处理 LP 含量在 B2 和 B3 位置显著低于 CK 处理 ($p<0.05$) (图 3g)。CK 处理 $NaHCO_3$ -Pi、 $NaHCO_3$ -Po、LP 含量在 B2 和 B3 位置显著高于坡中位置 ($p<0.05$),而 NTm 处理和 NTm+b 处理降低 B2 和 B3 位置与坡中位置之间上述磷组分的差异 (图 3c、图 3e、图 3g)。通过分析 2023 年不同活性磷组分的变化量发现,与 CK 处理相比,NTm 处理和 NTm+b

处理均升高所有活性磷组分变化量。其中在NTm处理下,M2位置的 $\text{H}_2\text{O-P}$ 变化量显著增加 3.09 mg/kg ($p<0.05$);M1和M2位置的 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 变化量分别显著增加 11.50 、 13.85 mg/kg ($p<0.05$)。在NTm+b处理下,M1和M2位置的 $\text{H}_2\text{O-P}$ 变化量分别显著增加 5.91 、 4.58 mg/kg ($p<0.05$), $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 变化量分别显著增加 18.39 、 21.72 mg/kg ($p<0.05$)。在NTm处理和NTm+b处理下,坡下位置的所有磷组分变化量通常低于CK处理。其中在NTm和NTm+b处理下, $\text{H}_2\text{O-P}$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ 在B2位置均显著低于CK处理 ($p<0.05$);LP含量在B2和B3位置均显著低于CK处理 ($p<0.05$)。CK处理所有活性磷组分变化量在B2和B3位置普遍显著高于坡中位置 ($p<0.05$),而NTm和NTm+b处理显著降低活性磷组分变化量在B2和B3位置与坡中位置之间的差异。

2024年,在玉米播种前,与CK处理相比,在NTtm处理下,T1和B1位置的 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 含量分别显著降低 13.21% 、 44.69% ($p<0.05$) (图3d);M1和M2位置的 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ 含量分别显著降低 29.25% 、 39.55% ($p<0.05$) (图3f);T2位置的LP含量显著降低 19.15% ($p<0.05$) (图3h);在NTtm+b处理下,T1位置的 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 含量在显著提高 10.71% ($p<0.05$) (图3d);M1位置的 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ 含量显著降低 30.13% ($p<0.05$) (图3f);T2位置的LP含量显著降低 21.60% ($p<0.05$) (图3h)。成熟期,与CK处理相比,在NTtm处理下,T2、M1、M2位置的 $\text{H}_2\text{O-P}$ 含量分别显著提高 26.86% 、 40.90% 、 46.26% ($p<0.05$) (图3b);M2位置的 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ 含量显著降低 35.40% ($p<0.05$) (图3f);T1和M1位置的LP含量分别显著提高 31.12% 、 17.28% ($p<0.05$) (图3h)。在NTtm+b处理下,T2、M1、M2位置的 $\text{H}_2\text{O-P}$ 含量分别显著提高 18.96% 、 42.30% 、 43.24% ($p<0.05$) (图3b),LP含量分别显著升高 31.29% 、 21.98% 、 14.97% ($p<0.05$) (图3h);T1和M1位置的 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 含量分别显著提高 28.95% 、 43.56% ($p<0.05$) (图3d)。然而在NTtm和NTtm+b处理下,B2和B3位置的 $\text{H}_2\text{O-P}$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 含量均低于CK处理 (图3b、图3d)。CK处理 $\text{H}_2\text{O-P}$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 含量在B2和B3位置显著高于坡中位置 ($p<0.05$),而NTtm和NTtm+b处理降低B2和B3位置与坡下位置 $\text{H}_2\text{O-P}$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 含量的差异 (图3b、图3d)。

通过分析2024年不同活性磷组分的变化量发现,与CK处理相比,NTtm和NTtm+b处理均升高 $\text{H}_2\text{O-P}$ 、 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 、LP变化量。其中在NTtm处理下,M1位置的 $\text{H}_2\text{O-P}$ 变化量显著增加 2.79 mg/kg ($p<0.05$);坡上和坡中位置的 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 变化量分

别显著升高 22.37 、 9.18 、 17.67 、 11.95 mg/kg ($p<0.05$),LP变化量分别显著升高 23.03 、 12.20 、 19.26 、 11.96 mg/kg ($p<0.05$);M2位置的 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ 变化量显著降低 3.22 mg/kg ($p<0.05$)。在NTtm+b处理下,M1位置的 $\text{H}_2\text{O-P}$ 变化量显著增加 4.00 mg/kg ($p<0.05$);坡上和坡中位置的 $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 变化量分别升高 23.74 、 9.28 、 15.60 、 13.26 mg/kg ($p<0.05$),LP变化量分别显著升高 23.16 、 11.04 、 17.99 、 13.74 mg/kg ($p<0.05$);M2位置的 $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ 变化量显著降低 4.07 mg/kg ($p<0.05$)。然而在NTtm和NTtm+b处理下,B2和B3位置的所有磷组分变化量均低于CK处理。其中在NTtm处理下, $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 变化量在B2位置显著低于CK处理 ($p<0.05$); $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ 和LP变化量在B2和B3位置显著低于CK处理 ($p<0.05$)。在NTtm+b处理下, $\text{NaHCO}_3\text{-Pi}$ 变化量在B2位置显著低于CK处理 ($p<0.05$); $\text{NaHCO}_3\text{-Po}$ 变化量在B2和B3位置显著低于CK处理 ($p<0.05$);LP变化量在B3位置显著低于CK处理 ($p<0.05$)。CK处理所有活性磷组分变化量在B2和B3位置普遍显著低于坡中位置 ($p<0.05$),而NTtm和NTtm+b处理降低了B2和B3位置与坡中位置所有活性磷组分变化量的差异。

2.4 靶向保护性耕作对黑土坡耕地MLP的影响

2023年,在玉米播种前,与CK处理相比,坡中NTm处理和NTm+b均提高 NaOH-Po 、MLP含量。其中在NTm处理下,M2位置的 NaOH-Po 含量显著提高 14.97% ($p<0.05$) (图4c);M1和M2位置的MLP含量分别显著提高 20.16% 和 18.21% ($p<0.05$) (图4e)。成熟期,与CK处理相比,NTm处理 NaOH-Pi 含量在M1和M2位置分别显著提高 25.93% 和 22.96% ;在NTm+b处理下,M2位置的 NaOH-Pi 和 NaOH-Po 含量分别显著提高 30.99% 和 14.91% ($p<0.05$) (图4a) (图4c);M1和M2位置的MLP含量分别显著增加 18.87% 和 17.23% ($p<0.05$) (图4e)。通过分析2023年不同中等活性磷组分的变化量发现,与CK处理相比,在NTm处理下,M1和M2位置的 NaOH-Pi 变化量分别显著升高 14.45 、 15.93 mg/kg ($p<0.05$);在NTm+b处理下,M1和M2位置的 NaOH-Pi 变化量分别显著升高 20.13 、 20.98 mg/kg ($p<0.05$),尤其NTm+b处理在M1位置的提升幅度最大,其增加值显著高于NTm处理 ($p<0.05$);M1位置的 NaOH-Po 变化量降低 6.03 mg/kg ($p<0.05$)。然而,在NTm和NTm+b处理下,B2和B3位置的所有磷组分变化量均低于CK处理。其中在NTm和NTm+b处理下, NaOH-Pi 和MLP变化量在B2和B3位置显著低于CK处理 ($p<0.05$); NaOH-Po 变化量在B3位置显著低于CK处理 ($p<0.05$) (图4g~图4i)。

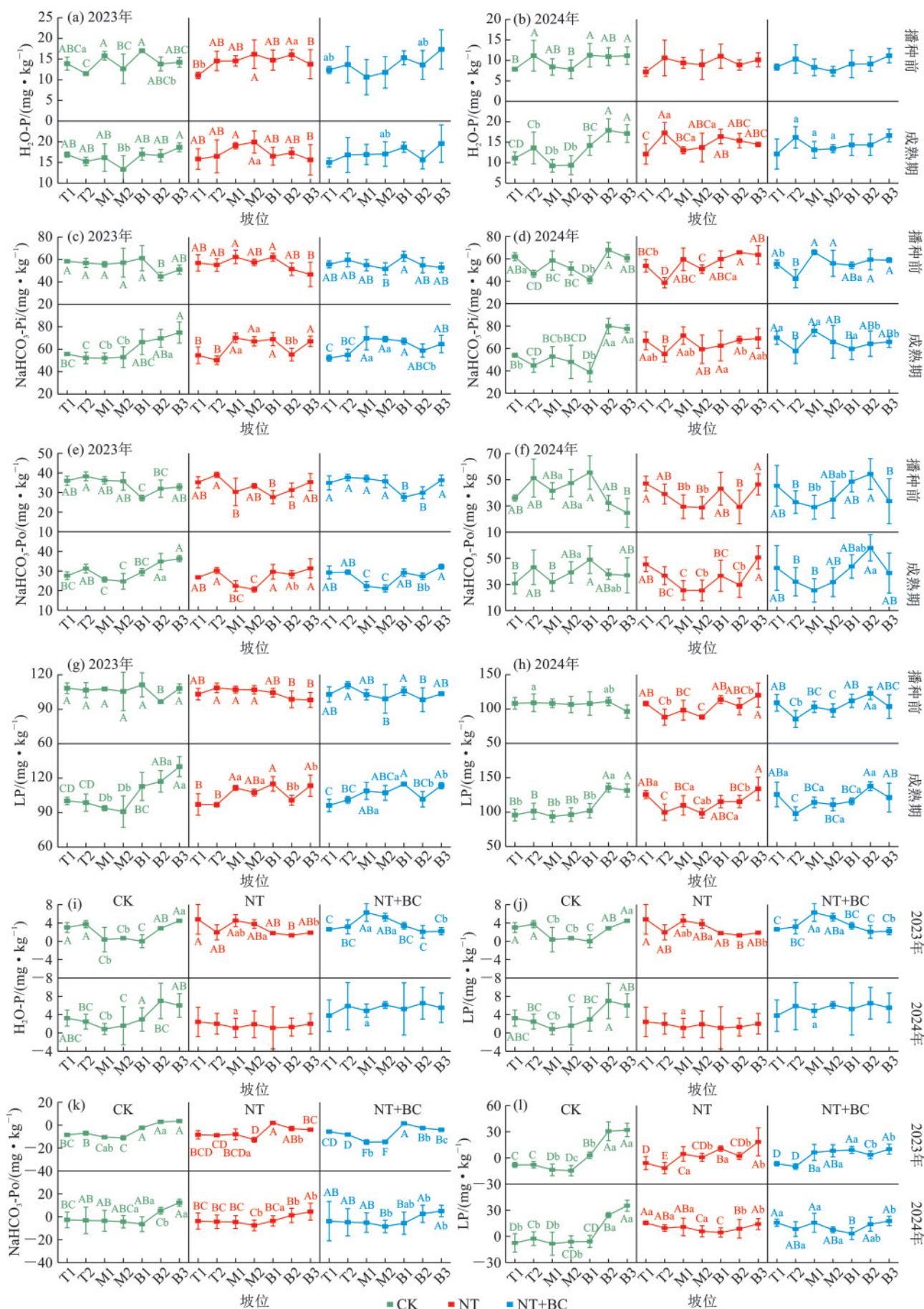


图3 2023年和2024年土壤LP含量及其变化量

Fig.3 Differences in soil LP content and variation in 2023 and 2024

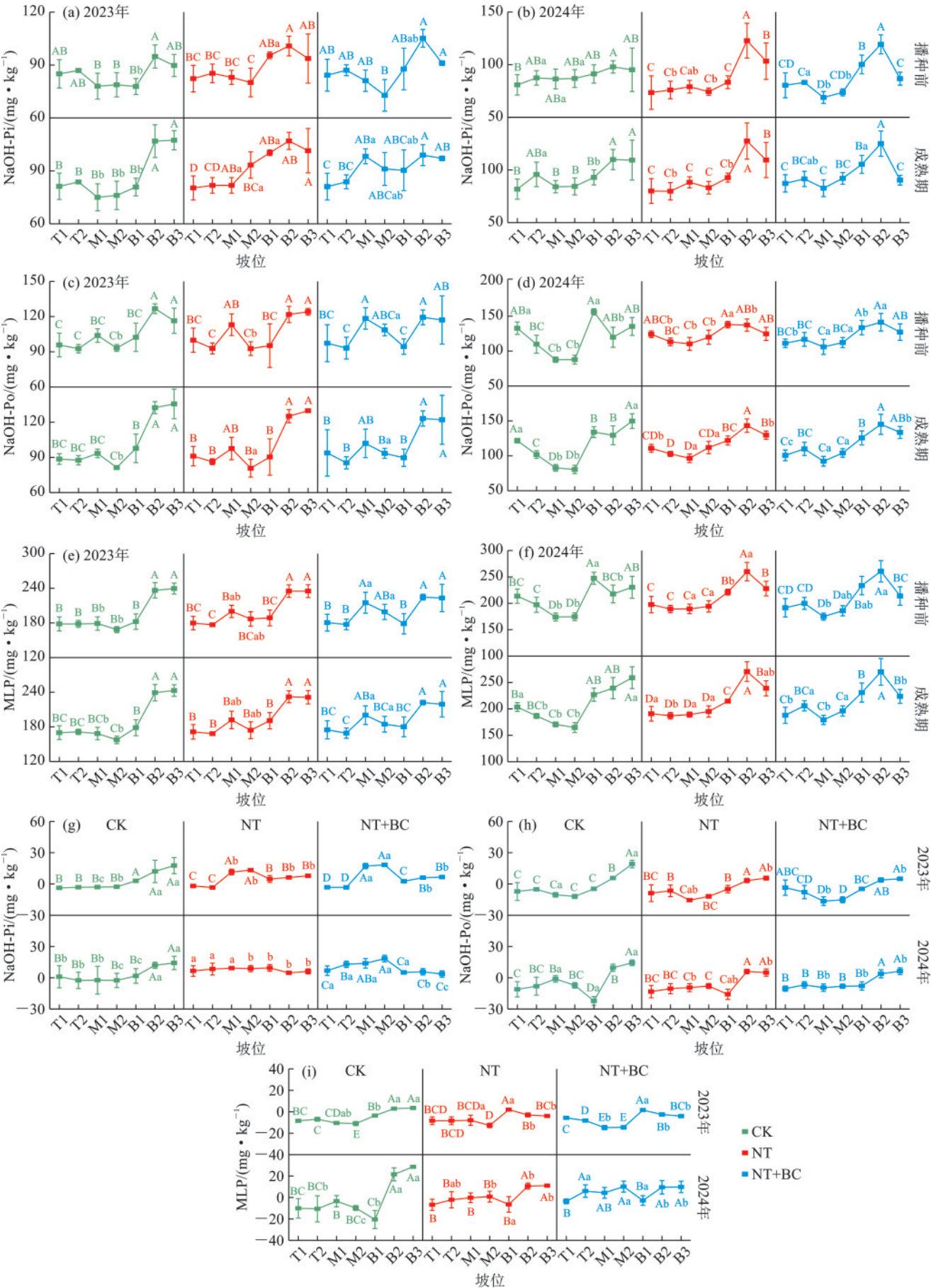


图 4 2023 年和 2024 年土壤 MLP 含量及其变化量
Fig.4 Differences in soil MLP content and variation in 2023 and 2024

2024 年,在玉米播种前,与 CK 处理相比,在 NTm 处理下,T2 和 M2 位置的 NaOH-Pi 含量分别显著降低 13.14% 和 14.42% ($p<0.05$) (图 4b);T1 位置的 NaOH-Po 含量显著降低 6.47% ($p<0.05$),M1 和 M2 位置的 NaOH-Po 含量分别显著提高 25.94%、36.58% ($p<0.05$) (图 4d);M1 和 M2 位置的 MLP 含量分别显著提高 8.84%、11.22% ($p<0.05$) (图 4f);在 NTm+b 处理下,M1 和 M2 位置的 NaOH-Pi 含量分别显著降低 20.35% 和 15.16% ($p<0.05$) (图 4b);T1 位置的 NaOH-Po 含量显著降低 16.27% ($p<0.05$),M1 和 M2 位置的 NaOH-Po 含量分别显著提高 20.92%、27.88% ($p<0.05$) (图 4d)。成熟期,与 CK 处理相比,在 NTm 处理下,T2 位置的 NaOH-Pi 含量显著降低 16.69% ($p<0.05$),M1 和 M2 位置的 NaOH-Po 含量分别提高 16.62%、29.35% ($p<0.05$);在 NTm+b 处理下,T1 位置的 NaOH-Po 含量显著降低 8.90% ($p<0.05$) (图 4d);M1 和 M2 位置的 MLP 含量分别显著降低 10.90%、18.35% ($p<0.05$) (图 4f)。通过分析 2024 年不同中等活性磷组分的变化量发现,与 CK 处理相比,NTm 和 NTm+b 处理均升高 NaOH-Pi 和 MLP 变化量,降低 NaOH-Po 变化量。其中在 NTm 处理下,坡上和坡中位置的 NaOH-Pi 变化量分别显著升高 5.53、10.81、14.45、15.93 mg/kg ($p<0.05$);M2 位置的 MLP 含量显著升高 10.65 mg/kg ($p<0.05$);M1 位置的 NaOH-Po 变化量显著降低 8.36 mg/kg ($p<0.05$);在 NTm+b 处理下,坡上和坡中位置的 NaOH-Pi 变化量分别显著升高 5.86、15.37、16.17、20.80 mg/kg ($p<0.05$),尤其是 NTm+b 处理在 M2 位置的提升幅度最大,其增加值显著高于同坡位的 NTm 处理 ($p<0.05$);T2 和 M2 位置的 MLP 变化量分别显著提高 16.59、19.94 mg/kg ($p<0.05$);M1 位置的 NaOH-Po 变化量降低 8.41 mg/kg ($p<0.05$)。然而在 NTm 和 NTm+b 处理下,B2 和 B3 位置的所有磷组分变化量普遍显著低于 CK 处理 ($p<0.05$)。

2.5 靶向保护性耕作对黑土坡耕地 NLP 的影响

2023 年,在玉米成熟期,与 CK 处理相比,NTm 和 NTm+b 处理均提高 HCl-P、NLP 含量。其中在 NTm 处理下,M1 和 M2 位置的 HCl-P 含量分别显著增加 18.38%、12.47% ($p<0.05$);在 NTm+b 处理下,M1 和 M2 位置的 HCl-P 含量分别显著增加 14.63%、15.42% ($p<0.05$) (图 5a);M2 位置的 NLP 含量显著提高 9.78% ($p<0.05$) (图 5e)。CK 处理所有稳定磷含量在 B2 和 B3 位置均显著高于坡中位置 ($p<0.05$),而 NTm 和 NTm+b 处理降低 B2 和 B3

位置与坡中位置之间存在上述磷组分含量的差异 (图 5a、图 5c、图 5e)。通过分析 2023 年不同稳定磷组分的变化量发现,NTm 和 NTm+b 处理均升高所有磷组分变化量。在 NTm 处理下,M1 和 M2 位置的 HCl-P 变化量分别显著增加 17.18、15.96 mg/kg ($p<0.05$),Res-P 变化量分别显著提高 10.23、10.85 mg/kg ($p<0.05$),NLP 变化量分别升高 27.41、26.78 mg/kg ($p<0.05$);在 NTm+b 处理下,M1 和 M2 位置的 HCl-P 变化量分别显著增加 18.70、16.54 mg/kg ($p<0.05$),Res-P 变化量分别显著提高 10.47、9.64 mg/kg ($p<0.05$),NLP 变化量分别升高 28.37、27.02 mg/kg ($p<0.05$)。然而,在 NTm 和 NTm+b 处理下,B2 和 B3 位置的所有稳定磷组分变化量均低于 CK 处理。其中在 NTm 和 NTm+b 处理下,B2 和 B3 位置的稳定磷组分变化量普遍显著低于 CK 处理 ($p<0.05$)。CK 处理所有稳定磷组分变化量在 B2 和 B3 位置均显著高于坡中位置 ($p<0.05$),而 NTm 和 NTm+b 处理降低 B2 和 B3 位置与坡中位置间 HCl-P、NLP 变化量的差异 (图 5g~图 5i)。

2024 年,在玉米播种前,与 CK 处理相比,在 NTm 处理下,T2 和 B2 位置的 HCl-P 含量分别显著降低 8.35%、11.25% ($p<0.05$),M2 位置的 HCl-P 含量显著提高 11.40% ($p<0.05$) (图 4b);M1 位置的 NLP 含量显著升高 12.31% ($p<0.05$) (图 4f);在 NTm+b 处理下,M1 位置的 NLP 含量降低 10.04% ($p<0.05$) (图 4f)。成熟期,与 CK 处理相比,NTm 和 NTm+b 处理均提高所有磷组分含量。其中,在 NTm 处理下,M1 和 M2 位置的 HCl-P 含量分别显著提高 21.30%、7.50% ($p<0.05$) (图 5b);M1 位置的 NLP 含量显著提高 16.30% ($p<0.05$) (图 5f);在 NTm+b 处理下,M1 位置的 HCl-P 含量显著提高 9.04% ($p<0.05$) (图 5b),NLP 含量显著提高 12.31% ($p<0.05$) (图 5f)。然而 NTm 和 NTm+b 处理下,所有稳定磷组分含量在 B2 和 B3 位置普遍显著低于 CK 处理 ($p<0.05$) (图 5b、图 5d、图 5f)。CK 处理 HCl-P 和 NLP 含量在 B2 和 B3 位置显著低于坡中位置 ($p<0.05$),而 NTm 和 NTm+b 处理降低 B2 和 B3 位置与坡中位置间 HCl-P 和 NLP 含量的差异 (图 5b、图 5f)。通过分析 2024 年不同稳定磷组分的变化量发现,在 NTm 处理下,M1 和 M2 位置的 HCl-P 变化量均分别显著升高 8.79、6.26 mg/kg ($p<0.05$),NLP 变化量分别显著升高 9.24、10.40 mg/kg ($p<0.05$);T1、M1、M2 位置的 Res-P 变化量分别显著升高 6.59、9.45、4.14 mg/kg ($p<0.05$);在 NTm+b 处理下,T1 和 M2 位置的 HCl-P 变化量分别显著升高 14.59、10.09 mg/kg ($p<0.05$),Res-P

变化量分别显著升高 5.42、4.13 mg/kg($p<0.05$); 在 T1、M1、M2 位置的 NLP 变化量分别显著升高 20.01、9.25、20.21 mg/kg($p<0.05$)。然而, B2 和 B3 位置的

Res-P 和 NLP 变化量均低于 CK 处理。其中在 NTtm 和 NTtm+b 处理下, B3 位置的 Res-P 和 NLP 变化量显著低于 CK 处理($p<0.05$)(图 5g~图 5i)。

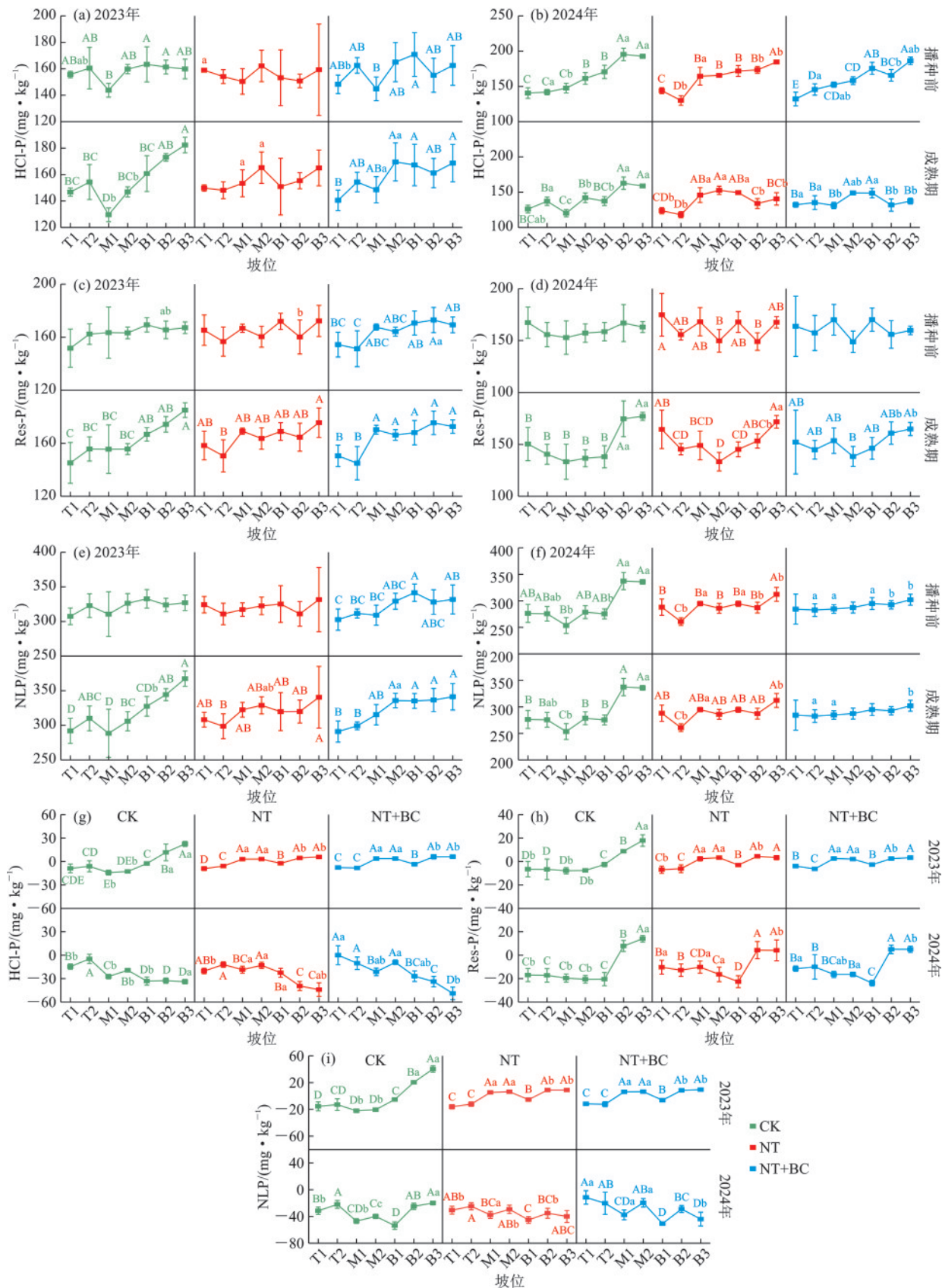


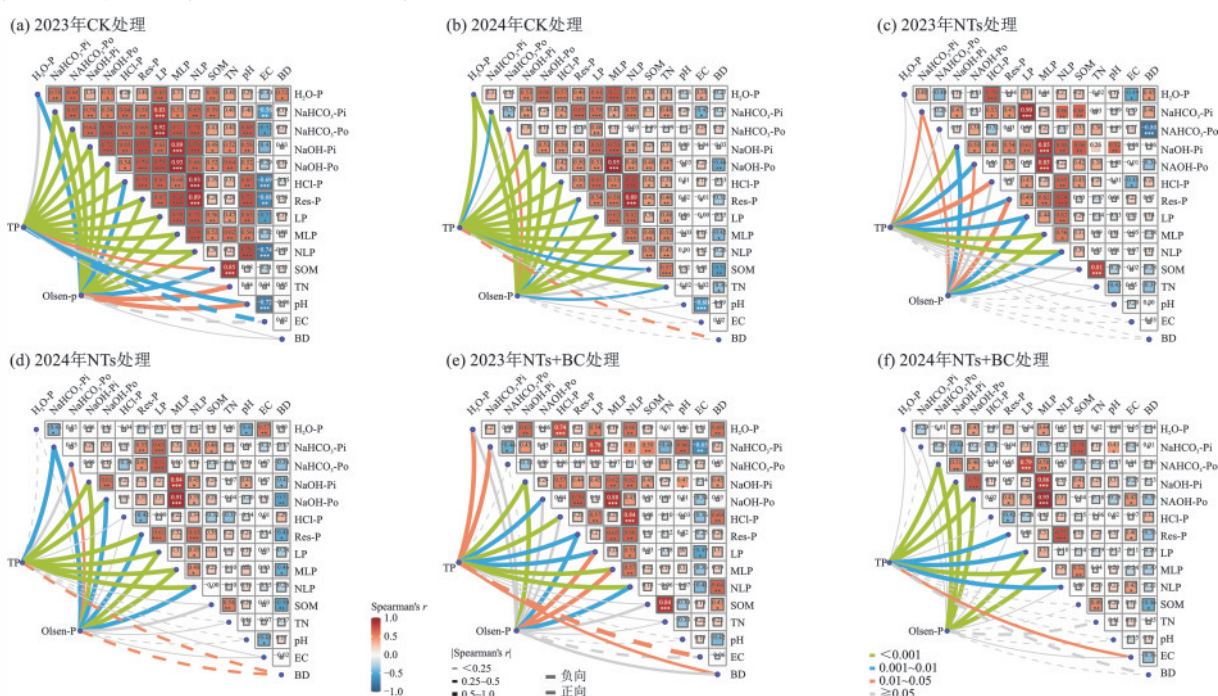
图 5 2023 和 2024 年土壤 NLP 含量及其变化量
Fig.5 Differences in soil NLP content and variation in 2023 and 2024
<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

3 讨论

3.1 靶向保护性耕作对土壤磷组分含量变化的影响

本研究结果发现,与CK处理相比,坡中靶向免耕秸秆覆盖、坡中靶向免耕秸秆覆盖加生物炭、坡上和坡中同时靶向免耕秸秆覆盖、坡中靶向免耕秸秆覆盖加生物炭结合坡上靶向免耕秸秆覆盖等措施均提高该坡位活性无机磷、中等活性无机磷、稳定磷含量(其中在靶向免耕秸秆覆盖加生物炭措施下增幅大于同坡位靶向免耕秸秆覆盖措施),但在未施加处理的坡下区域上述磷组分普遍降低(图3~图5)。本试验靶向免耕秸秆覆盖结果与朱玉伟^[16]在黑土区全坡面免耕秸秆覆盖对无机磷组分影响的研究结果一致,说明靶向免耕秸秆覆盖同样可以达到全坡面免耕秸秆覆盖的效果。靶向免耕秸秆覆盖提高活性无机磷、中等活性无机磷、稳定磷含量的原因可能是:一方面地表作物残茬覆盖,直接缓冲雨滴对表土的侵蚀,秸秆覆盖增强地表粗糙度而降低径流流速^[17];免耕减少耕作对大孔隙的破坏作用(蚯蚓和根系孔道),增加入渗能力,减少地表径流量,均降低随地表

径流和土壤侵蚀流失的可溶性磷和颗粒吸附态磷,从而减少磷损失^[18];另一方面,免耕有助于减少土壤扰动和对土壤团聚体的破坏,提高团聚体稳定性,增强团聚体对土壤磷的物理保护作用,减少磷流失风险,促进磷组分在土壤中的固持与积累^[19]。靶向免耕秸秆覆盖加生物炭可能会使这些磷组分的增幅更大,因为生物炭自身的多孔结构可以吸附土壤磷,从而减少磷流失^[20]。添加生物炭可以直接贡献稳定的碳库,增加土壤有机质含量,强化上述团聚体稳定机制^[21]。生物炭能有效改善土壤的pH,降低土壤胶体表面铁、铝氧化物的活性,进而减少其对磷酸根离子的吸附和化学固定,从而提高土壤中活性无机磷和中等活性无机磷^[22](图6~图8)。本研究中,坡中靶向免耕秸秆覆盖、坡中靶向免耕秸秆覆盖加生物炭、坡上和坡中同时靶向免耕秸秆覆盖、坡中靶向免耕秸秆覆盖加生物炭结合坡上靶向免耕秸秆覆盖等措施均有效减少土壤侵蚀,导致坡下失去重要的外部磷输入,造成坡下位置的土壤活性无机磷、中等活性无机磷及稳定磷含量低于CK处理。



注: *表示 $p < 0.05$; **表示 $p < 0.01$; ***表示 $p < 0.001$ 。下同。

图6 2023年和2024年成熟期土壤理化性质、P组分和Olsen-P、TP之间的关系

Fig.6 Relationship between soil physicochemical properties, P fractions, and Olsen-P and TP during the 2023 and 2024 maturity stage

本研究发现,与坡中靶向免耕秸秆覆盖、坡中靶向免耕秸秆覆盖加生物炭、坡上和坡中同时靶向免耕秸秆覆盖、坡中靶向免耕秸秆覆盖加生物炭结合坡上靶向免耕秸秆覆盖等措施均降低全坡面土壤活性有机磷、中等活性有机磷含量。与CK处理相比,坡中靶向免耕秸秆覆盖、坡中靶向免耕秸秆覆盖加生物炭、坡上和坡中同时靶向免耕秸秆覆盖、坡中靶向免耕秸秆覆盖

盖加生物炭结合坡上靶向免耕秸秆覆盖等措施均提高坡上和坡中位置的酸性磷酸酶活性(图3~图5、图9)。本研究施加靶向措施的坡位活性与中等活性有机磷含量降低的结果与黄土区全坡面都施加免耕秸秆覆盖处理的研究^[23]结果有所不同,可能是因为免耕秸秆覆盖措施下,有机质的持续输入和积累会提高土壤微生物的数量和代谢活性。微生物活动会分泌大量低

分子量有机酸,这些有机酸本身能够络合金属离子间接促进磷活化,更重要的是在有机质降解过程中也增强土壤磷酸酶的活性,磷酸酶又催化土壤中的矿化过程,从而将活性与中等活性有机磷库中的磷迅速转化为可被植物直接吸收利用的无机磷^[24]。施加生物炭则进一步增加微生物的数量和代谢活性,生物炭还可以调节土壤 pH 使土壤环境更接近于磷酸酶活性的最适范围,从而增强上述生物转化过程的调控。生物炭吸附有机分子后可能改变其可降解性,间接影响其矿化动力^[25]。免耕秸秆覆盖和生物炭这些因素协同作用,加速有机磷库向无机磷库的转化,从而导致本研究中施加靶向处理坡位的活性有机磷与中等活性有机磷含量的降低。

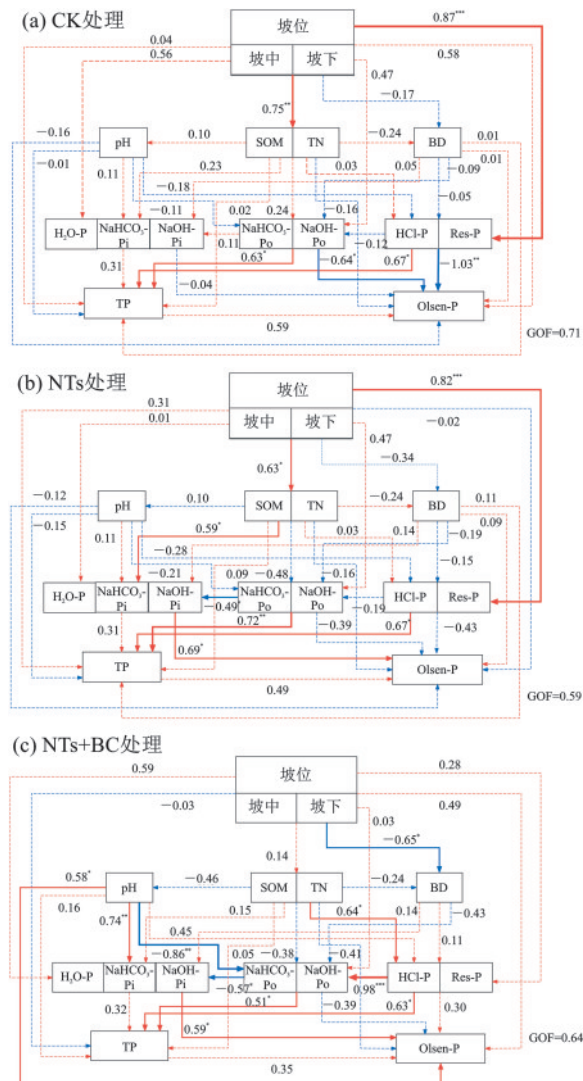


图7 2023年成熟期不同坡位、土壤理化性质和P组分与土壤Olsen-P和TP的关系

Fig.7 Relationship between soil physicochemical properties, P fractions, and Olsen-P and TP during the 2023 maturity stage

坡下位置降低土壤活性有机磷和中等活性有机磷的原因和上述无机磷一致,靶向免耕秸秆覆盖措

施有效减少侵蚀,导致坡下位置失去重要的外部磷输入,从而造成各处理坡下位置活性有机磷与中等活性有机磷含量的降低。

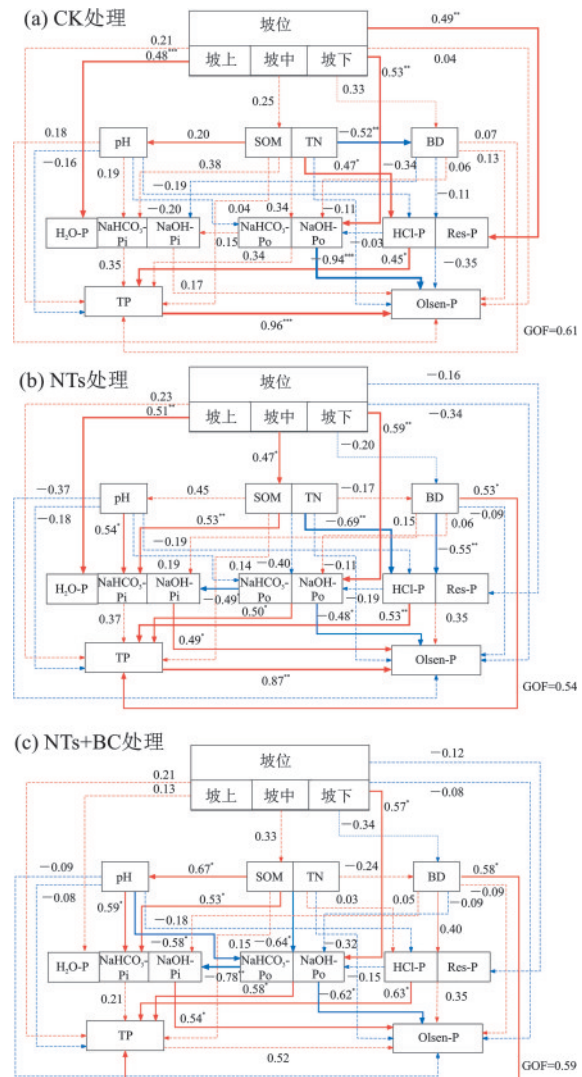


图8 2024年成熟期不同坡位、土壤理化性质和P组分与土壤Olsen-P和TP的关系

Fig.8 Relationship between soil physicochemical properties, P fractions, and Olsen-P and TP during the 2024 maturity stage

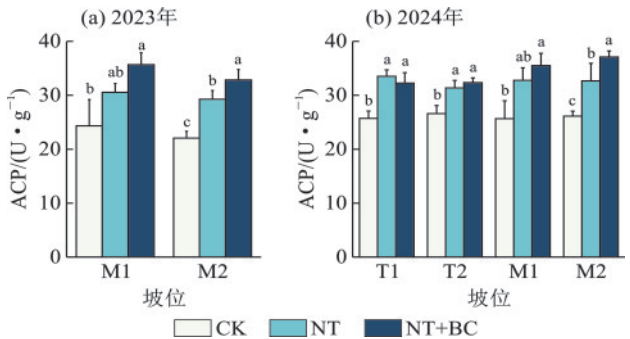


图9 2023和2024年成熟期土壤酸性磷酸酶含量

Fig.9 Differences in soil Acid Phosphatase Content in 2023 and 2024 maturity stage

3.2 靶向保护性耕作对土壤磷库和有效性的影响

本研究结果发现,与CK处理相比,坡中靶向免耕秸秆覆盖、坡中靶向免耕秸秆覆盖加生物炭、坡上和坡中同时靶向免耕秸秆覆盖、坡中靶向免耕秸秆覆盖加生物炭结合坡上靶向免耕秸秆覆盖等靶向措施均提高该坡位TP含量(其中在靶向免耕秸秆覆盖加生物炭处理下增幅大于同坡位靶向免耕秸秆覆盖)($p<0.05$),但在未施加处理的B2和B3位置显著降低TP含量($p<0.05$)(图2)。本研究中靶向免耕秸秆覆盖和靶向免耕秸秆覆盖加生物炭处理TP、Olsen-P和磷组分之间通常也存在显著的相关关系($p<0.05$)(图6)。尤为值得注意的是,本研究的所有磷组分中,中等活性有机磷与稳定磷对TP积累表现出最显著的正向直接效应(图7、图8)。然而与朱玉伟^[16]全坡面免耕秸秆覆盖对TP的研究结果有所不同,造成此现象的原因可能是本研究中稳定磷占土壤TP比例最高,其微小变化显著引起TP动态变化。其次,从化学性质而言,稳定磷的化学形态非常稳定,移动性和生物有效性极低,难以被植物直接吸收或在短期内参与循环,从而倾向于在土壤中长期累积^[26]。本研究发现,免耕秸秆覆盖和免耕秸秆覆盖加生物炭处理均有效提升土壤有机质含量并改善了团聚体结构,这种环境更利于通过物理保护(如团聚体包裹)和化学固持(如与稳定有机质结合)等方式,直接减少稳定磷的流失^[17](图7、图8)。因此,本研究中2种处理均主要通过增加稳定磷含量来影响土壤TP含量变化。本研究通过面积加权法计算磷库储量发现,与CK处理相比,2023年各处理并没有显著提高0~20 cm土层TP_{stock}($p<0.05$),然而,2024年坡上和坡中同时靶向免耕秸秆覆盖处理TP_{stock}却显著增加4.37%($p<0.05$)(图10)。说明坡上和坡中同时实施靶向免耕秸秆覆盖措施能有效增加土壤磷库储量。本试验坡上和坡中同时靶向免耕秸秆覆盖处理研究结果与Yang等^[27]全坡面实行免耕秸秆覆盖对TP_{stock}的研究结果一致,说明坡上和坡中同时靶向免耕秸秆覆盖处理同样可达到全坡面免耕秸秆覆盖的效果,而坡中靶向免耕秸秆覆盖效果有限。这是因为2023年,尽管在坡中(关键侵蚀坡位)实施免耕秸秆覆盖和免耕秸秆覆盖加生物炭处理,且观测到该处TP含量显著提升,但因磷投入有限(如坡上没有秸秆还田),以及坡中的减流、固磷增汇效应尚不足以改变整个坡面磷库储量。相反,2024年,坡上和坡中同时实施靶向保护性耕作措施,不仅秸秆还田增加磷的还田量,坡上和坡中蓄水、减流、减沙也减少磷流失。免耕秸秆覆盖处理下,SOM的持续积累和

稳定团聚体比例增加,也显著增强土壤对磷的保存容量,尤其是在坡中的增幅效果最大,最终在坡面尺度上实现磷储量的净增长。因此,相较于全坡面保护性耕作,在坡上和坡中同时实施靶向免耕秸秆覆盖是一种更高效的管理策略,不仅能有效提升土壤磷储量,还通过减少秸秆覆盖面积,有助于规避增加土壤体积质量和低温冷害等减产风险。

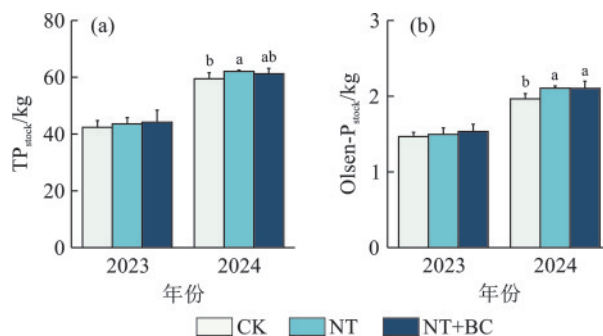


图 10 2023、2024 年成熟期 TP 和 Olsen-P 储量

Fig. 10 TP and Olsen-P stock during the 2023 and 2024 maturity stage

土壤 Olsen-P 是指可以被植物直接吸收利用的 P,反映土壤中 P 有效性的。本研究结果发现,与CK处理相比,坡中靶向免耕秸秆覆盖、坡中靶向免耕秸秆覆盖加生物炭、坡上和坡中同时靶向免耕秸秆覆盖、坡中靶向免耕秸秆覆盖加生物炭结合坡上靶向免耕秸秆覆盖等措施均显著提高 Olsen-P 含量(其中在靶向免耕秸秆覆盖处理下增幅大于同坡位靶向免耕秸秆覆盖)($p<0.05$),但在B2和B3位置显著降低 Olsen-P 含量($p<0.05$)(图2)。基于PLS-SEM发现靶向免耕秸秆覆盖、靶向免耕秸秆覆盖加生物炭处理活性无机磷和中等活性无机磷可以显著直接影响 Olsen-P($p<0.05$)(图7、图8)。本试验靶向免耕秸秆覆盖与前人^[26]在黑土区全坡面免耕秸秆覆盖对 Olsen-P 的研究结果一致,说明靶向免耕秸秆覆盖同样可以达到全坡面免耕秸秆覆盖的效果。可能是因为H₂O-P与NaHCO₃-Pi在土壤磷的有效性序列中构成最直接、最快速的“即时可用”与“短期补给”的动态关系。NaOH-Pi是土壤中主要的“潜在有效磷库”或“缓冲池”,其含量高低是评估土壤长期供磷潜力的关键指标^[28]。综上所述,本研究靶向免耕秸秆覆盖与靶向免耕秸秆覆盖加生物炭处理通过增加地表覆盖、减少扰动,直接提升土壤有机质含量并促进了稳定团聚体的形成^[17],不仅减少磷随水土的径流与淋溶损失,也为微生物活动提供了有利环境,活化土壤中的有机磷,促进其向无机磷的矿化^[18]。其中,生物炭的添加不仅能进一步优化土壤结构,还通过其碱性特质调节土壤pH,降低铁铝氧化物对磷

酸根的专性吸附,从而将更多被固定的磷释放到具有更高活性的无机磷库中,最终增加 Olsen-P 含量^[29]。此结果揭示靶向免耕秸秆覆盖和靶向免耕秸秆覆盖加生物炭处理影响 Olsen-P 的核心机制是通过提升活性无机磷和中等无机磷来实现。本研究对全坡面 Olsen-P_{stock} 的分析发现,2023 年,与 CK 处理相比,各处理并未显著提高 Olsen-P_{stock} ($p>0.05$),然而,2024 年坡上和坡中同时靶向免耕秸秆覆盖和坡中靶向免耕秸秆覆盖加生物炭结合坡上靶向免耕秸秆覆盖 Olsen-P_{stock} 分别显著提高 7.18% 和 7.02% ($p<0.05$) (图 10)。说明坡上和坡中同时靶向免耕秸秆覆盖和坡中靶向免耕秸秆覆盖加生物炭结合坡上靶向免耕秸秆覆盖措施能有效增加 Olsen-P_{stock}。造成该结果的原因和 TP_{stock} 相似,2023 年因 P 投入有限(如坡上没有秸秆还田),以及坡中的减流、固磷增汇效应尚不足以改变整个坡面 Olsen-P 库储量。而 2024 年,在坡上和坡中同时实施靶向保护性耕作措施,不仅因秸秆还田增加磷的还田量,也因坡上和坡中蓄水、减流、减沙,进而减少磷流失。免耕秸秆覆盖处理下,有机质的持续积累和稳定团聚体比例增加,也显著增强土壤对磷的保存容量,生物炭的添加也降低磷酸根离子的吸附和化学固定,从而释放出更多的 Olsen-P^[25]。坡上和坡中同时靶向免耕秸秆覆盖和坡中靶向免耕秸秆覆盖加生物炭结合坡上靶向免耕秸秆覆盖措施尤其是在坡中的增幅效果最大,最终在坡面尺度上实现 Olsen-P 储量的净增长。

4 结 论

1) 与传统耕作相比,坡中靶向免耕秸秆覆盖、坡中靶向免耕秸秆覆盖加生物炭、坡上和坡中同时靶向免耕秸秆覆盖、坡中靶向免耕秸秆覆盖加生物炭结合坡上靶向免耕秸秆覆盖措施,均因提高覆盖位置活性无机磷、中等活性无机磷含量而提高 Olsen-P 含量,均因提高覆盖位置稳定磷含量而提高 TP 含量。靶向免耕秸秆覆盖和靶向免耕秸秆覆盖加生物炭措施还降低覆盖位置活性有机磷和中等活性有机磷含量,且因为外部磷输入减少而导致 4 个处理的坡下区域所有磷组分、TP、Olsen-P 含量均降低。

2) 从整个坡面来看,坡上和坡中同时靶向免耕秸秆覆盖显著提高全坡面的 TP_{stock} 和 Olsen-P_{stock} ($p<0.05$);而坡中靶向免耕秸秆覆盖加生物炭结合坡上靶向免耕秸秆覆盖只显著提高全坡面的 Olsen-P_{stock} ($p<0.05$)。坡上和坡中同时靶向免耕秸秆覆盖是黑土坡耕地减少 P 流失、提高 P 有效性和储量的优选耕作措施。

参考文献:

- [1] 张宇恬,张琳婧,史珑燕,等.森林植被恢复方式对石质山地土壤磷含量及组分的影响[J].生态学报,2025,45(18):9203-9215.
Zhang Yutian, Zhang Linjing, Shi Longyan, et al. Effects of forest vegetation restoration methods on soil phosphorus content and fractions in rocky mountainous areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(18): 9203-9215.
- [2] McDowell R W, Haygarth P M. Soil phosphorus stocks could prolong global reserves and improve water quality [J]. Nature Food, 2025, 6(1): 31-35.
- [3] Ringeval B, Demay J, Goll D S, et al. A global dataset on phosphorus in agricultural soils[J]. Scientific Data, 2024, 11: e17.
- [4] 鲁悦,鲍雪莲,霍海南,等.免耕条件下不同量秸秆覆盖还田提高东北黑土区玉米光合性能和产量的效应[J].植物营养与肥料学报,2023,29(5):840-847.
Lu Yue, Bao Xuelian, Huo Hainan, et al. Effects of different amounts of stover mulching on improving photosynthetic characteristics and yield of maize in mollisol of Northeast China under long-term no-tillage[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2023, 29(5): 840-847.
- [5] Hallama M, Pekrun C, Pilz S, et al. Interactions between cover crops and soil microorganisms increase phosphorus availability in conservation agriculture [J]. Plant and Soil, 2021, 463(1): 307-328.
- [6] Giannini A P, Andriulo A E, Wyngaard N, et al. Long-term tillage impact on soil phosphorus under different crop sequences[J]. Soil Use and Management, 2024, 40: e13018.
- [7] Liu Shuaikang, Wu Bingyan, Niu Biao, et al. Regional suitability assessment for different tillage practices in Northeast China: A machine learning aided meta-analysis [J]. Soil and Tillage Research, 2024, 240: e106094.
- [8] 霍云霁,朱冰冰.坡面草被覆盖对侵蚀产沙影响的模拟试验[J].水土保持研究,2022,29(5):14-20.
Huo Yunpei, Zhu Bingbing. Experimental study on impacts of vegetation patterns on sediment yield of slope [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(5): 14-20.
- [9] Gholamhadi B, Jeffery S, Gonzalez-Pelayo O, et al. Biochar impacts on runoff and soil erosion by water: A systematic global scale meta-analysis [J]. Science of the Total Environment, 2023, 871: e161860.
- [10] 隋龙.施用生物炭对寒区黑土磷素迁移转化行为影响及机制研究[D].哈尔滨:东北农业大学,2022.
Sui Long. Effects and mechanism of application biochar on phosphorus migration and transformation in black soil of cold region [D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2022.
- [11] Dharumarajan S, Gomez C, Lalitha M, et al. Assessing the utility of munsell soil color in building and evaluating spectral models for soil clay content prediction [J]. Soil Science

- Society of America Journal, 2024, 88(4): 1186-1199.
- [12] Yan Sihua, Zhang Shaoliang, Yan Pengke, et al. Effect of biochar application method and amount on the soil quality and maize yield in mollisols of northeast China[J]. Biochar, 2022, 4(1): e56.
- [13] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 106-107.
- Bao Shidan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 106-107.
- [14] 沈桂琴. 土壤中磷酸酶活性的测定方法[J]. 土壤肥料, 1987(1): 40-42.
- Shen Guiqin. Determination method of phosphatase activity in soil[J]. Soils and Fertilizers, 1987(1): 40-42.
- [15] Yang Fan, Tang Chunyu, Antonietti M. Natural and artificial humic substances to manage minerals, ions, water, and soil microorganisms[J]. Chemical Society Reviews, 2021, 50(10): 6221-6239.
- [16] 朱玉伟. 保护性耕作对黑土磷转化及磷有效性的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
- Zhu Yuwei. Effect of different tillage methods on transformation of phosphorus in mollisol and growth of maize at seedling stage[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2018.
- [17] Xin Yan, Xie Yun, Liu Yuxin, et al. Impact of incorporated residues on runoff and soil erosion in black soil under simulated rainfall[J]. Journal of Soils and Sediments, 2024, 24(2): 760-768.
- [18] Wang Ying, Zhao Ziao, Wang Jingbo, et al. Study on the dynamics of phosphorus adsorption and the risk of release in black soils by conservation tillage[J]. Scientific Reports, 2025, 15: e18417.
- [19] Wang Tao, Ren Wei, Yang Feng, et al. Effects of different tillage and residue retention measures on silage maize yield and quality and soil phosphorus in karst areas[J]. Agronomy, 2023, 13(9): e2306.
- [20] 廖启元, 李粤丰, 詹慧秀, 等. 生物炭配施硝化/脲酶抑制剂及秸秆覆盖对红壤茶园氮磷淋失影响[J]. 水土保持学报, 2025, 39(5): 116-127.
- Liao Qiyuan, Li Yuefeng, Zhan Huixiu, et al. Effects of biochar combined with nitrification/urease inhibitor and straw mulching on nitrogen and phosphorus leaching in red soil tea plantations[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(5): 116-127.
- [21] Yang Caidi, Lu Shenggao. Straw and straw biochar differently affect phosphorus availability, enzyme activity and microbial functional genes in an Ultisol[J]. Science of the Total Environment, 2022, 805: e150325.
- [22] Yang Fan, Sui Long, Tang Chunyu, et al. Sustainable advances on phosphorus utilization in soil *via* addition of biochar and humic substances[J]. Science of the Total Environment, 2021, 768: e145106.
- [23] 刘生忠, 王林林, 司佳昂, 等. 长期保护性耕作对陇中旱农区小麦田土壤磷组分的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2024, 59(4): 82-90.
- Liu Shengzhong, Wang Linlin, Si Jiaang, et al. Effects of long-term conservation tillage on soil phosphorus fraction in rainfed wheat field of Longzhong[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2024, 59(4): 82-90.
- [24] 张万年, 杨子, 严玉鹏, 等. 土壤有机磷的矿化及其调控研究进展[J]. 土壤学报, 2025, 62(2): 334-347.
- Zhang Wannian, Yang Zi, Yan Yupeng, et al. Research progress on soil organic phosphorus mineralization and its regulation[J]. Acta Pedologica Sinica, 2025, 62(2): 334-347.
- [25] Yuan Jiahui, Chen Hao, Chen Guanglei, et al. Long-term biochar application influences phosphorus and associated iron and sulfur transformations in the rhizosphere[J]. Carbon Research, 2024, 3(1): e25.
- [26] 张梦月, 张钊玮, 杨毅轩, 等. 黄土塬区不同土地利用方式对土壤理化性质的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(5): 192-202.
- Zhang Mengyue, Zhang Zhaowei, Yang Yixuan, et al. Effects of different land use patterns on soil physicochemical properties in the Loess Plateau area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5): 192-202.
- [27] Yang Qinqing, Ai Xiaoyan, Sheng Meihua, et al. Differences in the distribution, availability, and sorption-desorption isotherms of phosphorus fractions in soil aggregates from cut slopes with different restoration methods[J]. Soil and Tillage Research, 2023, 234: e105822.
- [28] Mahmood M, Mehmood S, Ahmed W, et al. Impact of long-term nitrogen and phosphorus fertilization on cropland and fallow land[J]. Sustainability, 2023, 15(16): e12342.
- [29] 高倩倩, 杨孜奕, 潘芳莹, 等. 生物炭施用下亚热带红壤铁还原及磷形态转化关系研究[J]. 林业科学研究, 2023, 36(5): 149-159.
- Gao Qianqian, Yang Ziyi, Pan Fangying, et al. Relationship between iron reduction and phosphorus transformation in subtropical red soil under biochar application[J]. Forest Research, 2023, 36(5): 149-159.