

耕作方式对豫西旱地麦-豆轮作田 土壤理化特性和酶活性的影响

李爽,李文娜,关皓月,李梦瑶,吴金芝,
赵凯男,张军,黄明,李友军

(河南科技大学农学院,河南 洛阳 471023)

摘要:为探明耕作方式对豫西旱地麦-豆轮作田不同土层土壤理化特性和土壤酶活性的影响,设置免耕(NT)、旋耕(RT)和翻耕(PT)3种耕作方式,分析了定位试验9 a(2009—2019年)后小麦收获期的土壤容重、孔隙度和有机质、全氮、有效磷和速效钾含量,以及土壤脲酶、蛋白酶、转化酶和碱性磷酸酶活性,并运用相关分析和通径分析研究了土壤理化性质与土壤酶活性的关系。结果表明:不同耕作方式对土壤理化特性和酶活性具有显著的调控作用,其调控效应与其作业深度相关。RT较PT有利于降低0~15 cm土层但增加15~35 cm土层容重,NT较RT和PT显著降低了0~5、15~35、35~60 cm土层的土壤容重,土壤孔隙度变化规律与容重相反。各处理间土壤有机质、全氮、有效磷含量以及土壤脲酶、蛋白酶、转化酶和碱性磷酸酶活性在0~5 cm土层和15~35 cm土层规律一致,0~5 cm土层均以NT最优,分别较最低值处理(PT)显著提高16.7%、53.2%、15.9%、23.6%、18.0%、34.7%和29.0%;15~35 cm土层均以PT最优,分别较最低值处理(NT)显著提高18.3%、23.4%、53.4%、5.8%、16.6%、29.0%和21.6%。在5~15 cm土层,土壤有机质、全氮、有效磷含量和土壤蛋白酶活性的规律一致且均以RT最优,分别较最低值处理(NT)显著提高13.8%、23.0%、16.0%和10.7%,土壤速效钾含量及土壤脲酶、转化酶和碱性磷酸酶的活性的规律一致且均以RT最优,分别较最低值处理(PT)显著提高6.8%、14.8%、14.8%和12.8%。相关性分析和通径分析结果表明:土壤容重与土壤酶活性极显著负相关,土壤孔隙度、土壤养分含量与土壤酶活性极显著正相关;土壤有机质对土壤脲酶和转化酶有较大的直接正效应,是土壤蛋白酶和碱性磷酸酶的主要限制因子;土壤全氮是土壤蛋白酶的主要决定因子;土壤有效磷是土壤脲酶和转化酶的主要限制因子;土壤速效钾是土壤脲酶和碱性磷酸酶的主要决定因子。综上可知,NT、RT、PT分别有利于优化0~5、5~15、15~35 cm土层的容重、孔隙度和养分含量,进而调控相应土层的酶活性,且不同养分对土壤酶的调控效应不同。旱作区麦-豆轮作田应因地制宜选用不同耕作方式以实现土壤理化性状和土壤酶的均衡分布。

关键词:旱地;轮作田;耕作方式;土壤理化性质;土壤酶

中图分类号:S344; S158.3 **文献标志码:**A

Effects of tillage methods on soil physical and chemical properties and enzyme activities in wheat-soybean rotation filed in dryland of western Henan Province

LI Shuang, LI Wenna, GUAN Haoyue, LI Mengyao, WU Jinzhi,

ZHAO Kainan, ZHANG Jun, HUANG Ming, LI Youjun

(College of Agriculture, Henan University of Science and Technology, Luoyang, Henan 471023, China)

Abstract: To explore the effects of tillage methods on soil physical and chemical properties and soil enzyme activities in different soil layers of wheat-soybean rotation field in dryland of western Henan Province, three tillage methods of no-tillage (NT), rotary tillage (RT) and plowing tillage (PT), were set up in Luoyang City, Henan

收稿日期:2022-12-29

修回日期:2023-02-21

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0300400,2018YFD0300700);河南省旱地绿色智慧农业特色骨干学科群建设项目(17100001)

作者简介:李爽(1998-),男,河南固始人,硕士研究生,研究方向为旱地小麦高产栽培技术。E-mail:lishuang_199828@163.com

通信作者:黄明(1980-),男,河南新县人,副教授,主要从事旱地节水农业和高产栽培技术研究。E-mail:huangming_2003@126.com

李友军(1962-),男,河南宜阳人,教授,主要从事旱地节水农业和高产栽培技术研究。E-mail:lyj@haust.edu.cn

Province. The soil bulk density, porosity, and the contents of organic matter, total nitrogen, available phosphorus and available potassium as well as the activities of soil urease, protease, invertase and alkaline phosphatase were analyzed after 9-year-located tillage management (2009–2019). Moreover, the relationship between soil physical and chemical properties and soil enzyme activities was studied by correlation and path analysis. The results showed that tillage methods had significant regulatory effects on soil physical and chemical properties and enzyme activities, and their regulatory effects were related to the depth of tillage. Compared with PT, RT reduced the soil bulk density in 0~15 cm soil layer but increased the soil bulk density in 15~35 cm soil layer. Compared with RT and PT, NT significantly reduced the soil bulk density in 0~5, 15~35 cm and 35~60 cm soil layers. The change tendency of soil porosity was opposite to that of soil bulk density. The effects of different treatments on contents of soil organic matter, total nitrogen, available phosphorus and activities of soil urease, protease, invertase and alkaline phosphatase were consistent in 0~5 cm soil layer and 15~35 cm soil layer. NT showed the best performance in the 0~5 cm soil layer, which was significantly increased by 16.7%, 53.2%, 15.9%, 23.6%, 18.0%, 34.7% and 29.0%, respectively, compared with that in PT (the lowest treatment). PT had the best performance in the 15~35 cm soil layer, which was significantly increased by 18.3%, 23.4%, 53.4%, 5.8%, 16.6%, 29.0% and 21.6%, respectively, compared with that in NT (the lowest treatment). In the 5~15 cm soil layer, the regulative effects of treatments on contents of soil organic matter, total nitrogen, available phosphorus and soil protease activity were consistent and the best performance was observed in RT, which were significantly increased by 13.8%, 23.0%, 16.0% and 10.7%, respectively, compared with that in NT (the lowest treatment), however, the regulative effects on soil available potassium content and the activities of soil urease, invertase and alkaline phosphatase were consistent and the best performance was observed in RT, which were significantly increased by 6.8%, 14.8%, 14.8% and 12.8%, respectively, compared with that in PT (the lowest treatment). The results of correlation and path analysis showed that tillage method could directly or indirectly affected soil enzyme activity via regulating soil nutrient content. Among them, soil bulk density was significantly negatively correlated with soil enzyme activity, but soil porosity and the measured soil nutrient contents were significantly positively correlated with soil enzyme activity. Soil organic matter had a great direct positive effect on soil urease and invertase, and it was the main limiting factor of soil protease and alkaline phosphatase. Soil total nitrogen was the main determinant of soil protease. Soil available phosphorus was the main limiting factor of soil urease and invertase. Soil available potassium was the main determinant of soil urease and alkaline phosphatase. In all, NT, RT and PT optimized the bulk density, porosity and nutrient content of 0~5, 5~15 cm and 15~35 cm soil layers, respectively, and thus regulated the enzyme activities in the corresponding soil layers. However, the effects of nutrient contents on soil enzymes were different for different indexes. Different tillage methods should be selected according to local conditions for realizing the balance distribution of physico-chemical properties and enzymes in wheat-soybean rotation fields in dry farming areas.

Keywords: dryland; rotation field; farming methods; soil physical and chemical properties; soil enzymes

豫西是河南省重要的粮食产区和中低产田分布区^[1],土壤贫瘠问题严重制约着该地区农业生产水平的提高^[2]。因此采取有效措施改善农田土壤特性对豫西地区实现“藏粮于地、藏粮于技”和农业可持续发展具有重要意义。耕作是调节土壤性状的有效途径,其不仅可通过机械扰动调节土壤物理特性,还可通过肥料的翻埋影响土壤养分分布,从而有效协调土壤水、肥、气、热^[3],改变土壤养分矿化能力和微生物特性,影响土壤理化特性和酶活性^[4-5]。由于不同耕作方式对土壤的作用深度不同,如旋耕一般为10~15 cm,深翻一般为25~35

cm,免耕则只对播种带产生扰动,其对土壤性状的调节作用存在显著差异^[4]。李彤等^[6]在西北旱区的研究表明,与翻耕相比,免耕显著提高了0~20 cm土层土壤全氮含量和土壤脲酶、转化酶的活性。王恒飞等^[7]指出,12 a和17 a长期免耕定位试验条件下,免耕较翻耕均可显著提高0~20 cm土层土壤的有机质、有效磷和速效钾含量以及土壤脲酶、过氧化氢酶和转化酶活性。贾梦圆等^[8]研究表明,持续频繁翻耕导致表层(0~20 cm)土壤矿化分解加速,从而该土层土壤有机质、全氮和有效磷含量较旋耕和免耕显著降低。蒲境等^[9]认为翻耕深度小于20

cm 使耕作层以下土壤容重变大,而深翻(翻耕深度大于 20 cm)较免耕和常规耕作显著提高了土壤孔隙度,且有助于增加深层(20~40 cm)土壤有机质、有效磷和速效钾含量,而免耕下土壤有机质、有效磷和速效钾主要集中于表层(0~20 cm)土壤。综合来看,前人关于耕作方式的研究多采用传统的等间距分层(0~20 cm、20~40 cm 等)取样的方法,得到的研究结果与不同耕作方式所作用土层的土壤特性变化存在一定差别。近年来,有学者依据耕作深度采用不等间距分层取样方法开展研究,如李华伟等^[10]在麦-玉轮作田的研究表明,旋耕较翻耕降低了 0~15 cm 土层土壤容重;翻耕较旋耕降低了 15~25 cm 土层土壤容重,但显著提高了该土层的碱解氮、有效磷含量,以及脲酶、转化酶、碱性磷酸酶活性;徐阳春等^[11]研究指出,长期免耕较翻耕降低了 0~20 cm 土层土壤容重,造成土壤养分在表层(0~5 cm)富集,在 10~20 cm 土层明显降低。此外,还有研究表明,耕作对土壤理化性质和土壤酶活性的调控作用因作物轮作茬口和轮作体系的不同而异,如武际等^[12]发现在麦-稻轮作体系中,小麦季免耕较翻耕提高了 0~10 cm 土层但降低了 10~20 cm 土层土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾含量;水稻季两种耕作方式间土壤有机质和全氮含量的变化趋势与小麦季相同,但有效磷和速效钾含量却表现为翻耕大于免耕。曾玲玲等^[13]研究表明,在小麦-大豆-玉米轮作体系中,小麦茬口下土壤蔗糖酶和过氧化氢酶活性表现为免耕大于常规耕作,而大豆和玉米茬口下两种耕作方式间土壤酶活性没有显著差异。

冬小麦-夏大豆(简称麦-豆)轮作是一种典型的禾本科与豆科作物、非固氮与固氮作物、高淀粉作物与高蛋白作物轮换种植模式,既具有较好的保持水土、培肥地力和提高产量的作用,又可发挥豆科作物固氮作用,还可推动大豆种植、减轻中国大豆进口的压力,广泛分布于旱地农业生产区^[14-16]。然而,前人研究多集中于单作或麦-玉轮作下不同耕作方式对作物生产、土壤理化性状和土壤酶活性的影响,且多采用等间距分土层取样方法,关于麦-豆轮作模式下长期定位耕作的培肥效应研究较少。因此,本研究依托设置在豫西旱作雨养区的麦-豆轮作耕作模式长期定位试验,研究免耕、旋耕和翻耕对 0~5、5~15、15~35、35~60 cm 土层土壤理化性状及酶活性的影响,旨在提升旱地土壤质量提供理论依据和技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在河南省洛阳市河南科技大学开元校区试验场(112.25°E, 34.36°N)进行,该地区属于半湿润易旱区,海拔 150 m,年均气温 14.6℃,年降水量 400~800 mm,且 60%左右集中于 7~9 月。田间定位试验开始于 2009 年 10 月,一直采用麦-豆两熟复种轮作。试验地土壤为壤质土,试验开始前 0~20 cm 土层含有机质 15.9 g·kg⁻¹,碱解氮 36.3 mg·kg⁻¹,有效磷 21.0 mg·kg⁻¹,速效钾 120.0 mg·kg⁻¹,pH 值为 8.1。

1.2 试验设计

试验设免耕(NT)、旋耕(RT)和翻耕(PT)3种耕作处理,具体操作方法见表 1。随机区组排列,小区面积为 60 m²(20 m×3 m),3 次重复。供试小麦和大豆品种分别为‘洛旱 6 号’和‘中黄 13’。冬小麦于每年 10 月中下旬播种,次年 5 月下旬或 6 月初收获;播量为 180 kg·hm⁻²,行距为 20 cm,深度为 4~5 cm。夏大豆于每年 6 月上中旬播种,9 月底或 10 月初收获;行距 40 cm,株距 13~15 cm。两种作物均采用平作机械条播种植。2009 年 10 月开始全程不进行灌溉,所用肥料为复合肥(N:P₂O₅:K₂O=20:15:10),施用量为麦季 900 kg·hm⁻²,折合成 N、P₂O₅、K₂O 分别为 180、135、90 kg·hm⁻²;大豆季 300 kg·hm⁻²,折合成 N、P₂O₅、K₂O 分别为 60、45、30 kg·hm⁻²。其他田间管理措施同当地丰产田。

1.3 测定项目和方法

1.3.1 土壤容重和孔隙度的测定 土壤容重采用环刀法测定,于 2018—2019 年度冬小麦收获后用体积为 100 cm³的环刀,分 0~5、5~15、15~35、35~60 cm 共 4 个土层采集原状土样,每个土层 4 次重复,各小区 3 次重复,密封带回实验室,105℃条件下烘 24 h 后称质量,测定土壤容重和土壤孔隙度。土壤比重近似值为 2.65 g·cm⁻³。

土壤容重(g·cm⁻³)=烘干土样重/环刀体积
土壤孔隙度(%)=(1-土壤容重/土壤比重)×100%

1.3.2 土壤养分含量和酶活性的测定 测定土壤容重的同时进行土壤采样。用土钻取 0~5、5~15、15~35、35~60 cm 共 4 个土层的土壤样品,每个小区取 5 个样点,同一土层土样混合均匀后留 400 g,剔除杂物并分成两份,一份置于-20℃冰箱保存,用于测定土壤酶活性;一份风干,分别磨碎过 1.00 mm 和 0.15 mm 尼龙筛,用于测定土壤养分含量。土壤全

表 1 试验处理及其操作方法
Table 1 Experimental treatments and operation methods

代码 Code	处理 Treatment	具体操作方法 Specific operation methods
NT	免耕 No tillage	人工模拟免耕施肥播种一体机将肥料条施于 2 行作物中间并压实后按照设计量播种,出苗前将粉碎过的前茬作物秸秆(5 cm 左右小段)均匀覆盖于原小区。小麦季和大豆季均采用免耕。 Simulated the no-tillage fertilization and seeding integrated machine, the fertilizer was manually strip applied and compacted to the middle of the two rows of crops, and then the seeds according to the designed amount were sowed immediately. Before emergence, the crushed previous crop straw (about 5 cm) was evenly covered in the initial plot. No-tillage was adopted in both wheat and soybean seasons.
		前茬作物收获后将秸秆从小区移出并收集,均匀撒施肥料后立即旋耕(12~15 cm),再进行播种,出苗前将粉碎过的前茬秸秆(5 cm 左右小段)均匀地覆盖于原小区。小麦季和大豆季均采用旋耕。 After harvest of the previous crop, the straw was removed from the plot and collected. The rotary tillage (12~15 cm) was carried out immediately after evenly spread fertilizer by hand, and then the seeds was sowed. Before the emergence, the crushed previous straw (about 5 cm) was evenly covered in the initial plot. Rotary tillage was used in both wheat and soybean seasons.
RT	旋耕 Rotary tillage	前茬作物收获后将秸秆从小区移出并收集,均匀撒施肥料后立即翻耕(30~35 cm),再进行播种,出苗前将粉碎过的前茬秸秆(5 cm 左右小段)均匀地覆盖于原小区。小麦季和大豆季均采用翻耕。 After harvest of the previous crop, the straw was removed from the plot and collected. The plowing tillage (30~35 cm) was carried out immediately after evenly spread fertilizer by hand, and then the seeds was sowed. Before the emergence, the crushed previos straw (about 5 cm) was evenly covered in the initial plot. Plowing tillage was used in both wheat and soybean seasons.
PT	翻耕 Plowing tillage	

氮含量采用 K₂SO₄-CuSO₄-Se 催化剂和浓硫酸硝化-微量凯氏定氮法,有机质含量采用重铬酸钾外加热法,有效磷含量采用 NaHCO₃ 浸提-钼锑抗比色法,速效钾含量采用 NH₄OAc 浸提-火焰光度法测定^[17];土壤脲酶活性采用靛酚蓝比色法,蛋白酶活性采用茚三酮比色法,转化酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法,碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定^[18]。

1.4 统计分析

数据采用 SPSS 17.0 统计分析软件进行差异显著性检验(LSD 法),并用 Microsoft Excel 2010 软件绘制图表。

2 结果与分析

2.1 不同耕作方式对麦-豆轮作田土壤容重和孔隙度的影响

由表 2 可知,土壤容重随着土层深度增加呈逐渐增加趋势,土壤孔隙度变化与之相反。NT 处理有利于降低土壤容重,提高土壤孔隙度,其中 0~5 cm 土层 NT 与 PT 和 RT 的差异均达显著水平;15~35 cm 土层 NT 容重较 RT 显著降低 7.6%,孔隙度显著提高 9.8%;35~60 cm 土层 NT 容重较 PT 显著降低 6.3%,孔隙度显著提高 8.6%;5~15 cm 土层,不同耕作方式之间土壤容重无显著差异,但 NT 和 RT 土壤孔隙度较 PT 显著提高。与 RT 相比,PT 的土壤容重在 0~15 cm 和 35~60 cm 土层增加,在 15~35 cm 土层降低,但两者差异均不显著。结果表明,NT 较 PT 和 RT 有降低 0~60 cm 土层土壤容重、提高土壤

孔隙度的作用,RT 有增加 15~35 cm、PT 有增加 35~60 cm 土层土壤容重的趋势。

2.2 不同耕作方式对麦-豆轮作田土壤养分含量的影响

2.2.1 对麦-豆轮作田土壤有机质和全氮含量的影响 各处理土壤有机质和全氮含量均随着土层深度增加而逐渐降低(图 1A、B)。在 0~5 cm 土层,土壤有机质和全氮含量均表现为 NT>RT>PT,其中,NT 较 PT 显著提高 16.7%和 53.2%、较 RT 仅全氮含量显著提高 25.2%。在 5~15 cm 土层,土壤有机质和全氮含量均表现为 RT>PT>NT,其中,RT 较 NT 分别显著提高 13.8%和 23.0%、较 PT 分别显著提高 8.2%和 21.6%,PT 与 NT 之间差异不显著。在 15~35 cm 土层,土壤有机质和全氮含量均表现为 PT>RT>NT,与 NT 相比,PT 的土壤有机质和全氮含量分别显著提高 18.3%和 23.4%,RT 的全氮含量显著提高 10.9%;PT 较 RT 土壤有机质和全氮含量分别显著提高 16.3%和 11.3%。在 35~60 cm 土层,土壤有机质含量表现为 PT>NT>RT,土壤全氮含量表现为 RT>PT>NT,与 NT 相比,PT 和 RT 的土壤全氮含量分别显著提高 7.3%和 16.4%;PT 较 RT 土壤有机质含量显著提高 6.0%,而土壤全氮含量显著降低 7.8%。可见,NT 有利于提高 0~5 cm 土层、RT 利于提高 5~15 cm 土层、PT 利于提高 15~35 cm 土层的土壤有机质和全氮含量。

2.2.2 对麦-豆轮作田土壤有效磷和速效钾含量的影响 由图 1C、D 可以看出,除 NT 处理土壤速效钾含量随着土层增加呈先降后升外,其他处理土壤有

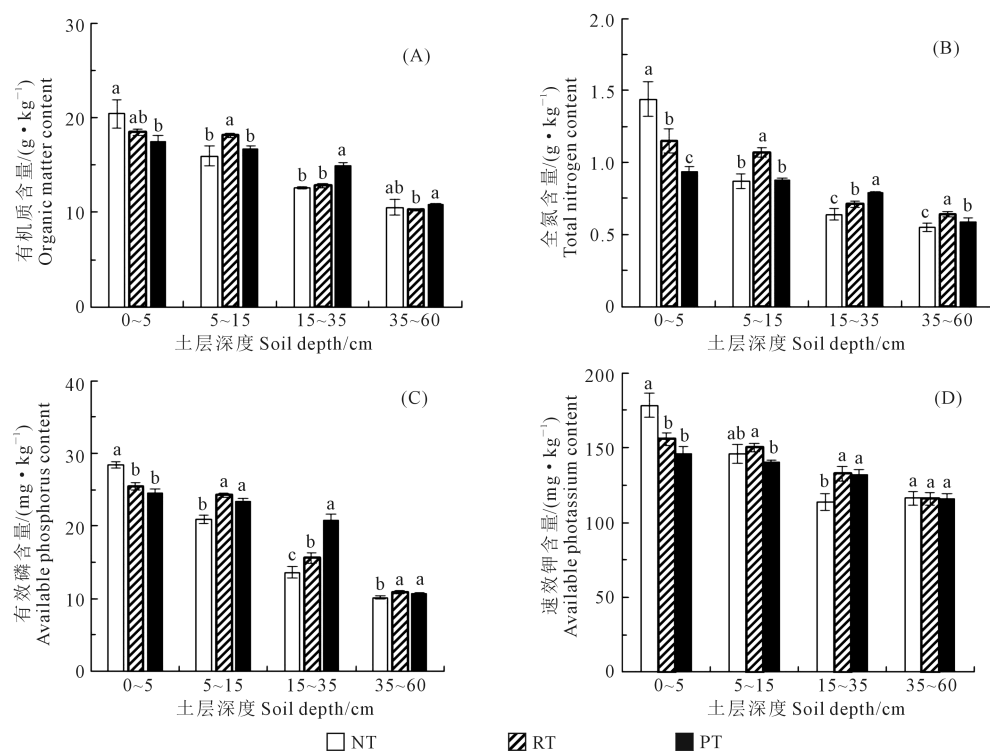
效磷和速效钾含量均随着土层增加呈逐渐下降的趋势。在 0~5 cm 土层,土壤有效磷和速效钾含量均表现为 NT>RT>PT,NT 较 RT 分别显著提高 11.6%和 14.7%、较 PT 分别显著提高 15.9%和 21.9%,RT 和 PT 差异不显著。在 5~15 cm 土层,与 NT 相比,RT 和 PT 的土壤有效磷含量分别显著提高 16.0%和12.2%,但土壤速效钾含量无显著差异;RT 较 PT 土壤速效钾含量显著提高 6.8%。在 15~35 cm 土层,土壤有效磷含量表现为 PT>RT>NT,土壤速效钾含量表现为 RT>PT>NT,与 NT 相比,PT

和 RT 的土壤有效磷含量分别显著提高 53.4%和 14.5%,土壤速效钾含量分别显著提高 16.1%和 16.6%;与 RT 相比,PT 的土壤有效磷含量显著提高 34.0%,但两者间土壤速效钾含量无显著差异。在 35~60 cm 土层,耕作对土壤有效磷和速效钾含量的影响效应降低,仅 PT 和 RT 土壤有效磷含量较 NT 分别显著提高 6.4%和 7.5%。综上可知,NT 有利于提高 0~5 cm 土层、PT 和 RT 有利于提高深层土壤的有效磷和速效钾含量,且 PT 较 RT 可显著提高 15~35 cm 土层的有效磷含量。

表 2 不同处理对旱作区麦-豆轮作田土壤物理性质的影响

Table 2 Effects of different treatments on soil physical properties in wheat-soybean rotation field in dry farming area		土层深度 Soil depth/cm			
指标 Index	处理 Treatment	0~5	5~15	15~35	35~60
土壤容重/(g·cm ⁻³) Soil bulk density	NT	1.290±0.002b	1.352±0.009a	1.380±0.008b	1.431±0.020b
	RT	1.342±0.002a	1.359±0.006a	1.494±0.046a	1.475±0.032ab
	PT	1.348±0.007a	1.366±0.011a	1.422±0.048ab	1.528±0.031a
土壤孔隙度/% Soil porosity	NT	51.32±0.08a	49.03±0.08a	47.92±0.30a	45.99±0.76a
	RT	49.33±0.10b	48.72±0.21a	43.64±1.76b	44.33±2.11ab
	PT	49.13±0.26b	48.25±0.27b	46.31±1.82ab	42.34±2.17b

注:数据格式为平均值±标准差。同一项目同列数据后的不同小写字母表示处理间差异在 $P<0.05$ 水平显著。
Note: The data format is mean ± standard deviation. For the same item, different lowercase letters after data in the same column indicate the difference among treatments is significant at the $P<0.05$ level.



注:柱上不同字母表示同一土层深度不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同。
Note: Different lowercase letters above bars within each soil layer indicate significant differences among treatments at $P<0.05$. The same below.

图 1 不同耕作方式对旱作区麦-豆轮作田土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾含量的影响
Fig.1 Effects of different tillage methods on soil organic matter, total nitrogen, available phosphorus and available potassium in wheat-soybean rotation field in dry farming area

2.3 不同耕作方式对麦-豆轮作田土壤酶活性的影响

由图 2A 可知,与其他土层相比,PT 和 RT 的土壤脲酶活性在 5~15 cm 土层最高,NT 则在 0~5 cm 土层最高。在 0~5 cm 土层,土壤脲酶活性表现为 NT>RT>PT,且三者之间差异显著($P<0.05$),NT 较 RT 显著提高 7.8%,较 PT 显著提高 23.6%。在 5~15 cm 土层,土壤脲酶活性表现为 RT>NT>PT,RT 较 PT 显著提高 14.8%、较 NT 提高 11.7%,两者差异不显著。在 15~35 cm 土层,土壤脲酶活性表现为 PT>RT>NT,与 NT 相比,PT 和 RT 分别显著提高 5.8%和 4.6%,但 PT 和 RT 间差异不显著。在 35~60 cm 土层,土壤脲酶活性表现为 PT>RT>NT,PT 较 NT 仅显著提高 3.7%。

由图 2B~D 可知,土壤蛋白酶活性、转化酶和碱性磷酸酶活性随着土层加深而降低,各土层处理间变化有所不同,35~60 cm 土层不同处理间差异均不显著。对土壤蛋白酶活性而言,在 0~5 cm 土层,NT 较 RT 显著提高 13.6%、较 PT 显著提高 18.0%;在 5~15 cm 土层,RT 较 NT 显著提高 10.7%、较 PT 显著提高 5.2%;在 15~35 cm 土层,PT 与 RT、RT 与 NT 处理间无显著差异,但 PT 较 NT 显著提高 16.6%。不同处理间土壤转化酶和碱性磷酸酶活性规律基

本相似,在 0~5 cm 土层,两种酶活性均表现为 NT>RT>PT,其中,NT 较 RT 分别显著提高 11.4%和 14.4%,较 PT 分别显著提高 34.7%和 29.0%。在 5~15 cm 土层,两种酶活性表现为 RT>NT>PT,其中,RT 较 PT 分别显著提高 14.8%和 12.8%,而 RT 较 NT 仅土壤转化酶活性显著提高 6.9%。在 15~35 cm 土层,土壤转化酶和碱性磷酸酶活性均表现为 PT>RT>NT,其中,PT 较 RT 分别显著提高 16.5%和 10.8%、较 NT 分别显著提高 29.0%和 21.6%。综上可知,NT 利于 0~5 cm 土层、RT 利于 5~15 cm 土层、PT 利于 15~35 cm 土层土壤脲酶、蛋白酶、转化酶和碱性磷酸酶活性的提高,此外 PT 还有利于提高 35~60 cm 土层土壤脲酶活性。

2.4 麦-豆轮作田土壤理化性质和土壤酶活性的通径分析

2.4.1 土壤理化性质和土壤酶活性的相关分析
通过分析土壤理化因子与土壤酶活性的相关性(表 3)可知,土壤容重与有机质、全氮、有效磷和速效钾含量以及土壤脲酶、蛋白酶、转化酶和碱性磷酸酶活性之间均存在极显著负相关关系,但土壤孔隙度与上述土壤养分含量和酶活性间均表现为极显著正相关关系;土壤养分含量、土壤酶活性各指标间也均呈极显著正相关关系。

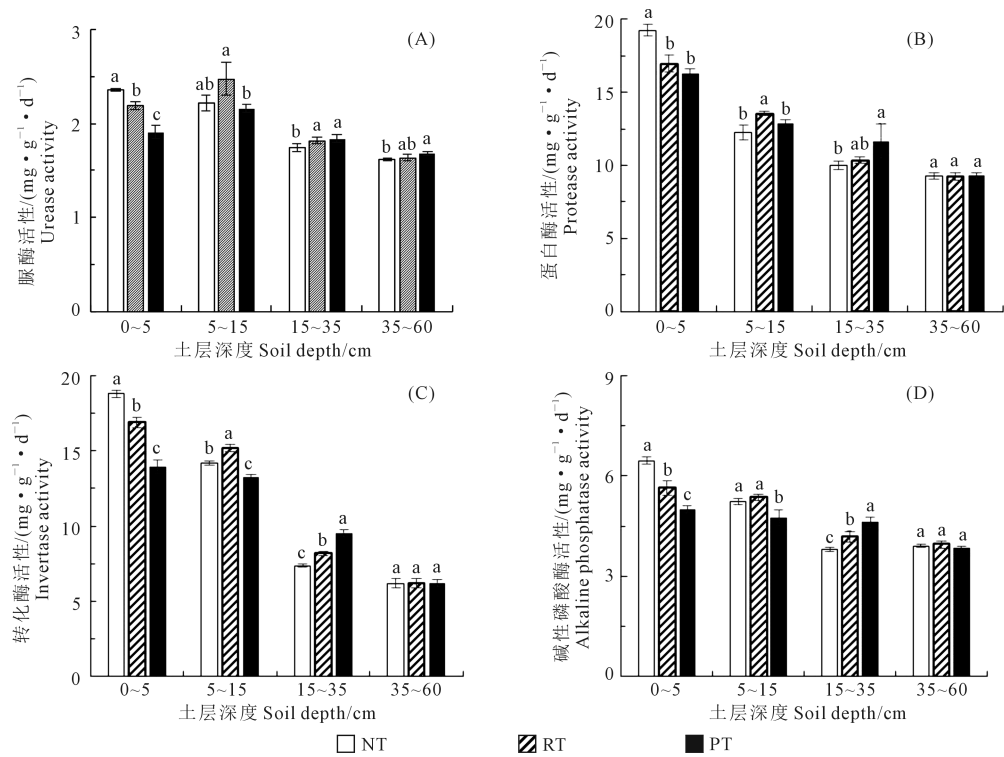


图 2 不同耕作方式对旱作区麦-豆轮作田土壤酶活性的影响

Fig.2 Effect of different tillage methods on soil enzyme activity in wheat-soybean rotation field in dry farming area

表 3 麦-豆轮作田土壤理化性质与土壤酶活性的相关系数
Table 3 Correlation coefficients between soil physical and chemical properties
and soil enzyme activities in wheat-soybean rotation field

指标 Index	容重 Soil bulk density	土壤孔隙度 Soil porosity	有机质 Organic matter	全氮 Total nitrogen	有效磷 Available phosphorus	速效钾 Available potassium	脲酶 Urease	蛋白酶 Protease	转化酶 Invertase	碱性磷酸酶 Alkaline phosphatase
容重 Soil bulk density	1.000	-1.000 **	-0.864 **	-0.805 **	-0.832 **	-0.784 **	-0.759 **	-0.822 **	-0.867 **	-0.818 **
土壤孔隙度 Soil porosity		1.000	0.864 **	0.805 **	0.832 **	0.784 **	0.759 **	0.823 **	0.867 **	0.818 **
有机质 Organic matter			1.000	0.942 **	0.990 **	0.947 **	0.895 **	0.933 **	0.978 **	0.942 **
全氮 Total nitrogen				1.000	0.915 **	0.974 **	0.859 **	0.950 **	0.954 **	0.978 **
有效磷 Available phosphorus					1.000	0.931 **	0.864 **	0.916 **	0.957 **	0.920 **
速效钾 Available potassium						1.000	0.870 **	0.937 **	0.965 **	0.985 **

注：* * 表示在 0.01 水平(双尾)相关性显著。
Note: * * indicates significant correlation at 0.01 level (two-tailed).

2.4.2 土壤理化性质与土壤酶活性的直接和间接关系 为了准确分析各土壤理化因子对土壤酶活性的直接影响和间接影响,及其影响效应的大小,将土壤理化性质与土壤酶活性进行多元回归分析(表 4),结果表明土壤理化因子能解释 84.2%的土壤脲酶活性、92.0%的土壤蛋白酶活性、97.8%的土壤转化酶活性和 98.0%的土壤碱性磷酸酶活性。

通径分析结果(表 5)表明,土壤理化因子中有有机质(X_2)对脲酶活性具有最大的直接正效应(2.682),容重、全氮、有效磷、速效钾通过其他理化因子对土壤脲酶的间接作用之和远大于直接作用。土壤全氮对蛋白酶活性具有较大的直接正效应(0.661),容重和有机质通过影响全氮和有效磷的间接作用也大于直接作用,有效磷对蛋白酶活性的影响主要通过其对全氮的间接作用产生,速效钾对蛋白酶的影响主要通过其他土壤理化因子的间接作用产生。对于土壤转化酶活性而言,有机质的直接作用大于其对其他理化因子间接作用,而其他理化因子的影响都是通过对有机质和有效磷的间接作用产生的。土壤理化因子对碱性磷酸酶活性直接影响力为速效钾(0.683)>全氮(0.338)>有机质(-0.238)>容重(-0.131)>有效磷(0.103),虽然容重、有机质、全氮、有效磷对碱性磷酸酶的直接影响均小于速效钾,但其通过影响其他理化因子产生的间接作用达到 0.641 以上。由决策系数可知,有机质(X_2)是土壤转化酶的主要决定因子,是土壤蛋白酶和碱性磷酸酶的主要限制因子;全氮(X_3)是土壤蛋白酶的主要决定因子;有效磷(X_4)是土壤脲酶的主要限制因子;速效钾(X_5)是土壤脲酶和碱性磷酸酶的主要决定因子。

表 4 土壤理化性状与土壤酶活性的多元回归方程

Table 4 Multiple regression equation of soil physical and chemical properties and soil enzyme activity

回归方程 Regression equation	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>R</i> ²
$U_1 = 0.169X_1 + 2.682X_2 - 0.406X_3 - 1.622X_4 + 0.368X_5$	6.377	<0.05	0.842
$U_2 = -0.136X_1 - 0.278X_2 + 0.661X_3 + 0.406X_4 + 0.072X_5$	13.867	<0.01	0.920
$U_3 = -0.117X_1 + 0.875X_2 - 0.1X_3 - 0.357X_4 + 0.474X_5$	52.713	<0.01	0.978
$U_4 = -0.131X_1 - 0.238X_2 + 0.338X_3 + 0.103X_4 + 0.683X_5$	58.385	<0.01	0.980

注: U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4 为因变量,分别表示标准化的土壤脲酶活性、蛋白酶活性、转化酶活性和碱性磷酸酶活性; X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 为自变量,分别表示标准化的容重、有机质、全氮、有效磷和速效钾含量。因土壤容重与孔隙度呈现相关系数为-1 的极显著负相关,在多元回归方程中自动剔除土壤孔隙度。

Note: U_1 , U_2 , U_3 and U_4 are dependent variables, which represent standardized soil urease activity, protease activity, invertase activity and alkaline phosphatase activity, respectively. X_1 , X_2 , X_3 , X_4 and X_5 are independent variables, which represent standardized bulk density, organic matter, total nitrogen, available phosphorus and available potassium, respectively. Because soil bulk density and porosity showed a very significant negative correlation with a correlation coefficient of -1, soil porosity was automatically eliminated in the multiple regression equation.

3 讨 论

3.1 耕作方式对旱地麦-豆轮作田土壤容重和孔隙度的影响

土壤容重是土壤孔隙数量及分布特征、土壤颗粒结构及组合特征的综合反映,其大小直接关系土

表 5 麦-豆轮作田土壤理化性质与土壤酶活性的通径系数

Table 5 Path coefficients of soil physical and chemical properties and soil enzyme activities in wheat-soybean rotation field								
因变量 Dependent variable	自变量 Independent variable	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	间接总和 The sum of indirect path coefficients	决策系数 Decision coefficient
		$X_1 \rightarrow y$	$X_2 \rightarrow y$	$X_3 \rightarrow y$	$X_4 \rightarrow y$	$X_5 \rightarrow y$		
U_1	X_1	<u>0.169</u>	-2.317	0.327	1.350	-0.289	-0.929	-0.29
	X_2	-0.146	<u>2.682</u>	-0.382	-1.606	0.348	-1.786	-2.39
	X_3	-0.136	2.526	<u>-0.406</u>	-1.484	0.358	1.265	-0.86
	X_4	-0.141	2.655	-0.371	<u>-1.622</u>	0.343	2.486	-5.43
	X_5	-0.132	2.540	-0.395	-1.510	<u>0.368</u>	0.502	0.50
U_2	X_1	<u>-0.136</u>	0.240	-0.532	-0.338	-0.056	-0.686	0.21
	X_2	0.118	<u>-0.278</u>	0.623	0.402	0.068	1.210	-0.60
	X_3	0.109	-0.262	<u>0.661</u>	0.371	0.070	0.289	0.82
	X_4	0.113	-0.275	0.605	<u>0.406</u>	0.067	0.510	0.58
	X_5	0.107	-0.263	0.644	0.378	<u>0.072</u>	0.865	0.13
U_3	X_1	<u>-0.117</u>	-0.756	0.081	0.297	-0.372	-0.750	0.19
	X_2	0.101	<u>0.875</u>	-0.094	-0.353	0.449	0.102	0.95
	X_3	0.094	0.824	<u>-0.100</u>	-0.327	0.462	1.053	-0.20
	X_4	0.097	0.866	-0.092	<u>-0.357</u>	0.441	1.313	-0.81
	X_5	0.092	0.829	-0.097	-0.332	<u>0.474</u>	0.491	0.69
U_4	X_1	<u>-0.131</u>	0.206	-0.272	-0.086	-0.535	-0.688	0.20
	X_2	0.113	<u>-0.238</u>	0.318	0.102	0.647	1.180	-0.51
	X_3	0.105	-0.224	<u>0.338</u>	0.094	0.665	0.641	0.55
	X_4	0.109	-0.236	0.309	<u>0.103</u>	0.636	0.819	0.18
	X_5	0.103	-0.225	0.329	0.096	<u>0.683</u>	0.302	0.88

注: U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4 为因变量,分别表示标准化的土壤脲酶活性、蛋白酶活性、转化酶活性和碱性磷酸酶活性; X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 为自变量,分别表示标准化的容重、有机质、全氮、有效磷和速效钾。划横线的数据为直接通径系数,其他为间接通径系数。

Note: U_1 , U_2 , U_3 and U_4 are dependent variables, which represent standardized soil urease activity, protease activity, invertase activity and alkaline phosphatase activity, respectively. X_1 , X_2 , X_3 , X_4 and X_5 are independent variables, which represent standardized bulk density, organic matter, total nitrogen, available phosphorus and available potassium, respectively. The data crossed are direct path coefficients and others are indirect path coefficients.

壤通气性、蓄水能力以及作物根系的穿透阻力、水肥的利用效率等方面^[19]。容重较小且孔隙度较大的土壤,透气性较好,利于根系下扎,更适于作物生长^[20]。由于不同耕作方式对土壤扰动的次数、深度和强度均不相同,对土壤剪切、挤压、结构破碎程度也会不同,影响了耕作土壤的孔隙分布、容重、持水性及作物生长状况^[21],且其效应与耕作年限有关。张锡洲等^[22]指出,随着免耕年限增加,0~15 cm 土层土壤容重较翻耕呈现降低趋势,并在免耕 7~8 a 后趋于稳定,而 15~30 cm 土层土壤容重无显著变化。也有研究表明,在秸秆还田条件下免耕多年后土壤容重较翻耕增加,总孔隙度下降^[23]。连年免耕覆盖的土壤其容重只在初始年份增加较为显著,随年限增加,容重变幅减小^[24]。苏丽丽等^[25]通过连续 3 a 试验发现,翻耕较旋耕能显著降低 0~30 cm 土层土壤容重,从而增加土壤孔隙度。王成宝等^[26]在连续 8 a 翻耕的试验田中设置连续 4 a 的旋耕和翻耕试验,结果表明旋耕较翻耕显著降低 0~20 cm 土层土壤容重,增加土壤孔隙度,但在 20~30 cm 土层则表现相反。本研究发现,免耕 (NT) 相较于旋耕 (RT) 和翻耕 (PT) 能降低各土层土壤容重,提高土壤孔隙度,尤其在 0~5 cm 土层差异达到显著水平,

这可能是由于在秸秆覆盖量充足的情况下,免耕不仅具有延缓土壤自然沉实的能力^[27],还能依靠土壤微生物的培肥作用,达到提高土壤稳定性、改善土壤孔隙结构的目的^[28]。也有研究认为免耕覆盖下土壤动物(如蚯蚓)的增多有利于降低表层土壤容重,提高土壤孔隙度^[29-30]。此外,本研究中虽然旋耕和翻耕间的土壤容重和孔隙度的差异未达显著水平,但旋耕在 15~35 cm 土层、翻耕在 35~60 cm 土层有增加土壤容重和降低土壤孔隙度的趋势,可能是由于耕作机械在破碎耕作层土壤的同时,也会在一定程度上压实下层土壤^[21],这与前人研究结果基本一致^[26]。

3.2 耕作方式对旱地麦-豆轮作田土壤养分含量的影响

土壤养分含量可以直观反映土壤的肥力状况。前人围绕耕作措施调控土壤养分含量做了大量研究。王改玲等^[31]对黄土高原麦田的研究表明,免耕较传统翻耕可显著增加 0~10 cm 土层土壤氮素和钾素含量,且全氮、碱解氮和速效钾含量随着免耕年限的增加而增加,但 11 a 免耕覆盖和 15 a 免耕覆盖处理 0~10 cm 土层有效磷含量分别比传统翻耕处理降低了 56.1% 和 51.9%。姜学兵等^[32]通过连

续 7 a 麦-玉轮作耕作试验发现,与传统翻耕相比,免耕措施基本对土壤无扰动,使养分主要累积在表层,表现出表层养分富集现象,提高了表层(0~20 cm)土壤有机质含量,而深层(20~60 cm)土壤有机质的含量和储量降低。苏丽丽等^[25]在连续 3 a 麦-豆轮作耕作试验中发现,免耕和旋耕较翻耕均能显著增加 0~20 cm 土层土壤有机质和全氮含量但降低 0~40 cm 土层有效磷含量,而免耕较旋耕仅能显著提高 0~20 cm 土层有机质含量。张德喜等^[33]则表明,免耕较翻耕和旋耕显著降低 0~10 cm 土层土壤有机质、全氮和有效磷的含量。本研究发现,不同耕作方式对旱地麦-豆轮作区土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾含量均具有显著的调控效应,其中免耕、旋耕、翻耕分别在 0~5、5~15、15~35 cm 土层表现最优,这与前人发现的免耕使土壤养分表层富集^[11,32],旋耕有利于提高 0~15 cm 土层、翻耕有利于提高 15 cm 以下土层养分含量^[10]的结果一致。其原因主要是各耕作方式对土壤扰动和肥料翻埋的深度不同,造成养分向不同耕作区富集,同时引起土壤矿化、作物利用的差异所致^[34]。此外,本研究中采用的是麦-豆轮作种植体系,此体系中耕作降低土壤容重、增加土壤孔隙度的作用显著增强了大豆的共生固氮作用^[35],减少了作物生产对土壤氮素的消耗,从而提高土壤全氮含量,这利于作物可持续生产,进而影响土壤中有有机质、有效磷和速效钾的含量和空间分布^[36]。

3.3 耕作方式对旱地麦-豆轮作田土壤酶活性的影响及其与土壤理化因子的关系

酶活性是评价土壤生物特性的重要指标,土壤脲酶、蛋白酶、转化酶、碱性磷酸酶等水解酶活性能够表征土壤碳、氮、磷等养分的循环状况^[37],且对土壤耕作措施的响应比较灵敏^[38]。张德喜等^[33]研究表明,翻耕和旋耕较免耕均能显著提高 0~10 cm 土层土壤转化酶、脲酶活性。李华伟等^[10]研究表明,旋耕较翻耕可显著增加 0~15 cm 土层土壤脲酶、转化酶和碱性磷酸酶活性,而翻耕较旋耕则利于增加 15 cm 以下土层土壤酶活性。关于耕作对土壤酶活性影响的研究多为短期效应,土壤酶活性受外界环境干扰较大,靠短期结果难以准确把握其对耕作措施的响应规律^[39]。本研究通过 9 a 长期定位试验发现,相较于旋耕和翻耕,免耕可显著提高 0~5 cm 土层土壤脲酶、蛋白酶、转化酶和碱性磷酸酶活性,这可能是由于免耕下土壤扰动小,加之长期覆盖的秸秆及其腐解物一直处在土壤表层,培肥和保墒效果好,为土壤微生物维持生命活动提供了充足的营

养和良好的水热环境,微生物数量显著提高,土壤酶活性也随之提高^[40]。而旋耕和翻耕可分别显著提高 5~15、15~35 cm 土层的酶活性,究其原因可能是长期耕作和秸秆覆盖还田的累积作用既改善了耕作层的土壤孔隙状况,又可使有机物质和养分向耕作扰动层富集,这不仅能改善微生物活动环境,还会增加土壤微生物分泌转化过程中所需的底物,最终使土壤酶活性增强^[33]。本研究中的土壤孔隙度和各养分指标与土壤酶活性极显著正相关的结果也说明土壤理化性质的改善有助于土壤酶活性的提高。

通过通径分析发现,耕作方式导致的各土层土壤养分差异也会直接或者间接影响土壤酶活性,土壤有机质对土壤脲酶和转化酶有较大的直接正效应,是土壤转化酶的主要决定因子,也是土壤蛋白酶和碱性磷酸酶的主要限制因子;土壤全氮对土壤蛋白酶有较大的直接正效应,也是其主要决定因子;土壤有效磷是土壤脲酶和转化酶的主要限制因子;土壤速效钾对土壤碱性磷酸酶有较大的直接正效应,并且是土壤脲酶和碱性磷酸酶的主要决定因子。结果表明,旱地麦-豆轮作下耕作方式引起的土壤理化因子的影响会调节与之对应的土壤酶活性,其作用机制如何,还有待进一步探讨。

4 结 论

与旋耕和翻耕措施相比,长期免耕会降低 0~60 cm 土层土壤容重,提高 0~5 cm 土层土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾含量和脲酶、蛋白酶、转化酶、碱性磷酸酶的活性,表现出明显的表层养分和酶活性富集。与免耕措施相比,旋耕利于提高 5~15 cm 土层、翻耕利于提高 15~60 cm 土层土壤养分含量和酶活性。与旋耕措施相比,翻耕有提高 15~60 cm 土层土壤养分含量和酶活性的作用。耕作措施引起的土壤养分变化可解释土壤酶活性的变化,且不同土壤养分对土壤酶的调控效果不同。综合来看,不同耕作方式下土壤养分的富集土层与耕作深度基本吻合,旱作区应因地制宜选用不同耕作方式以实现土壤理化性状和土壤酶的均衡分布。

参 考 文 献:

[1] 乔鑫鑫,李乾云,王艳芳,等. 豆-麦复种模式对豫西丘陵区土壤团聚体及碳氮含量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2021, 39(3): 145-153.
QIAO X X, LI Q Y, WANG Y F, et al. Effects of legume-wheat multi-cropping system on the soil aggregates and carbon and nitrogen contents in the hilly area of western Henan province[J]. Agricultural

- Research in the Arid Areas, 2021, 39(3): 145-153.
- [2] 张洁, 姚宇卿, 吕军杰, 等. 豫西旱坡地长期保护性耕作土壤酶活性及其与肥力关系[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(2): 142-146. ZHANG J, YAO Y Q, LV J J, et al. Effects of long-term conservation tillage on soil enzyme activity of sloping dryland and its relation to soil fertility[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(2): 142-146.
- [3] 尹宝重, 甄文超, 马燕会. 深松一体化播种对夏玉米农田土壤水热特征及微生物动态的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(3): 285-293. YIN B C, ZHEN W C, MA Y H. Effects of subsoiling-seeding on soil water, temperature and microbial characteristics of summer maize field [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(3): 285-293.
- [4] 吕瑞珍, 黄明, 熊瑛, 等. 豆麦轮作下耕作方式对土壤理化性状及酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2015, 43(1): 100-103. LYU R Z, HUANG M, XIONG Y, et al. Effects of tillage methods on soil physical and chemical properties and enzyme activities under soybean wheat rotation[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2015, 43(1): 100-103.
- [5] 李林海, 邱莉萍, 梦梦. 黄土高原沟壑区土壤酶活性对植被恢复的响应[J]. 应用生态学报, 2012, 23(12): 3355-3360. LI L H, QIU L P, MENG M. Responses of soil enzyme activities to revegetation in gully loess plateau of northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(12): 3355-3360.
- [6] 李彤, 王梓廷, 刘露, 等. 保护性耕作对西北旱区土壤微生物空间分布及土壤理化性质的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(5): 859-870. LI T, WANG Z T, LIU L, et al. Effect of conservation tillage practices on soil microbial spatial distribution and soil physico-chemical properties of the northwest dryland[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2017, 50(5): 859-870.
- [7] 王恒飞, 张永清, 吴忠红, 等. 长期免耕对褐土理化性质和酶活性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(2): 136-141. WANG H F, ZHANG Y Q, WU Z H, et al. Effects of long-term zero-tillage on soil physicochemical properties and enzyme activities in cinnamon soil[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(2): 136-141.
- [8] 贾梦圆, 黄兰媚, 李琦聪, 等. 耕作方式对农田土壤理化性质、微生物学特性及小麦营养品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(11): 1964-1976. JIA M Y, HUANG L M, LI Q C, et al. Effects of tillage methods on physico-chemical and microbial characteristics of farmland soil and nutritional quality of wheat[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2022, 28(11): 1964-1976.
- [9] 蒲境, 史东梅, 姜义宝, 等. 不同耕作深度对红壤坡耕地耕层土壤特性的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 8-14. PU J, SHI D M, LOU Y B, et al. Effect of different tillage depth on soil properties of ploughing layer in slope cultivated land of red soil [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(5): 8-14.
- [10] 李华伟, 徐月, 司纪升, 等. 耕层优化双行匀播对麦田土壤理化特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(10): 1406-1412. LI H W, XU Y, SI J S, et al. Influence of topsoil modification and double row sowing technology on soil physical and chemical properties of wheat field [J]. Journal of Triticeae Crops, 2014, 34(10): 1406-1412.
- [11] 徐阳春, 沈其荣, 雷宝坤, 等. 水旱轮作下长期免耕和施用有机肥对土壤某些肥力性状的影响[J]. 应用生态学报, 2000, 11(4): 549-552. XU Y C, SHEN Q R, LEI B K, et al. Effect of long-term no-tillage and application of organic manure on some properties of soil fertility in rice/wheat rotation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(4): 549-552.
- [12] 武际, 郭熙盛, 张祥明, 等. 麦稻轮作下耕作模式对土壤理化性质和作物产量的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 87-93. WU J, GUO X S, ZHANG X M, et al. Effects of tillage patterns on crop yields and soil physicochemical properties in wheat-rice rotation system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(3): 87-93.
- [13] 曾玲玲, 张兴梅, 洪音, 等. 长期施肥与耕作方式对土壤酶活性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2008, (2): 27-30, 60. ZENG L L, ZHANG X M, HONG Y, et al. Effect of long-term fertilization and tillage system on soil enzyme activities[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2008, (2): 27-30, 60.
- [14] 黄明, 吴金芝, 李友军, 等. 耕作方式和秸秆覆盖对旱地麦豆轮作下小麦籽粒产量、蛋白质含量和土壤硝态氮残留的影响[J]. 草业学报, 2018, 27(9): 34-44. HUANG M, WU J Z, LI Y J, et al. Effects of tillage method and straw mulching on grain yield and protein content in wheat and soil nitrate residue under a winter wheat and summer soybean crop rotation in drylands [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(9): 34-44.
- [15] 李欣欣, 许锐能, 廖红. 大豆共生固氮在农业减肥增效中的贡献及应用潜力[J]. 大豆科学, 2016, 35(4): 531-535. LI X X, XU R N, LIAO H. Contributions of symbiotic nitrogen fixation in soybean to reducing fertilization while increasing efficiency in agriculture[J]. Soybean Science, 2016, 35(4): 531-535.
- [16] 李可懿, 王朝辉, 赵护兵, 等. 黄土高原旱地小麦与豆科绿肥轮作及施氮对小麦产量和籽粒养分的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(2): 110-116, 123. LI K Y, WANG C H, ZHAO H B, et al. Effect of rotation with legumes and N fertilization on yield and grain nutrient contents of wheat in dryland of the Loess Plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(2): 110-116, 123.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 30-114. BAO S D. Agrochemical analysis of the soil[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1999: 30-114.
- [18] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 274-324. GUAN S Y. Soil enzymes and their research methods[M]. Beijing: Agricultural Press, 1986: 274-324.
- [19] 刘丽媛, 徐艳, 朱书豪, 等. 有机肥配施对中国农田土壤容重影响的整合分析[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(5): 867-873. LIU L Y, XU Y, ZHU S H, et al. Meta-analysis on the responses of soil bulk density to supplementation of organic fertilizers in croplands in China [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2021, 38(5): 867-873.
- [20] 葛双洋. 水稻土深松对土壤物理性质及小麦生长影响的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2017. GE S Y. Effects of subsoiling on paddy soil physical properties and growth of wheat[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2017.
- [21] 杜满聪, 李江涛, 李淑玲, 等. 不同耕作方式对华南坡耕地土壤孔隙结构和抗穿透强度影响[J]. 广州大学学报(自然科学版), 2018, 17(6): 74-80. DU M C, LI J T, LI S L, et al. Effects of different tillage methods on soil pore structure and penetration resistance of slope farmland in

South China[J]. Journal of Guangzhou University (Natural Science Edition), 2018, 17(6): 74-80.

[22] 张锡洲, 李廷轩, 余海英, 等. 水旱轮作条件下长期自然免耕对土壤理化性质的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 145-147. ZHANG X Z, LI T X, YU H Y, et al. Effects of long-term natural no-tillage on soil physiochemical properties in rice/wheat rotation systems[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(6): 145-147.

[23] DA VEIGA M, HORN R, REINERT D J, et al. Soil compressibility and penetrability of an oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage systems[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 92(1/2): 104-113.

[24] 李洪文, 陈君达, 高焕文. 旱地农业三种耕作措施的对比研究[J]. 干旱地区农业研究, 1997, 15(1): 7-11. LI H W, CHEN J D, GAO H W. A comparison of three tillage methods in dryland farming[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 1997, 15(1): 7-11.

[25] 苏丽丽, 李亚杰, 徐文修, 等. 耕作方式对土壤理化性状及夏大豆产量的影响分析[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(3): 43-48, 58. SU L L, LI Y J, XU W X, et al. Effects of tillage methods on soil physical and chemical properties and yield of summer soybean[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(3): 43-48, 58.

[26] 王成宝, 温美娟, 杨思存, 等. 耕作方式对灌耕灰钙土耕层物理性质和玉米产量的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(3): 170-177. WANG C B, WEN M J, YANG S C, et al. Effects of different tillage practices on physical characteristics of irrigated sierozem soil and maize yield[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, 40(3): 170-177.

[27] 汤秋香, 谢瑞芝, 章建新, 等. 典型生态区保护性耕作主体模式及影响农户采用的因子分析[J]. 中国农业科学, 2009, 42(2): 469-477. TANG Q X, XIE R Z, ZHANG J X, et al. Analysis of conservation tillage pattern and the factors influencing farmers adoption in typical ecological region in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(2): 469-477.

[28] LI H W, GAO H W, WU H D, et al. Effects of 15 years of conservation tillage on soil structure and productivity of wheat cultivation in northern China[J]. Australian Journal of Soil Research, 2007, 45(5): 344-350.

[29] SO H B, GRABSKI A, DESBOROUGH P. The impact of 14 years of conventional and no-till cultivation on the physical properties and crop yields of a loam soil at Grafton NSW, Australia[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 104(1): 180-184.

[30] CAVALIERI K M V, DA SILVA A P, TORMENA C A, et al. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 103(1): 158-164.

[31] 王改玲, 郝明德, 许继光, 等. 保护性耕作对黄土高原南部地区小麦产量及土壤理化性质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 539-544. WANG G L, HAO M D, XU J G, et al. Effect of conservation tillage on wheat yield and soil physicochemical properties in the South of Loess Plateau[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2011, 17(3): 539-544.

[32] 姜学兵, 李运生, 欧阳竹, 等. 免耕对土壤团聚体特征以及有机碳储量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(3): 270-278. JIANG X B, LI Y S, OU YANG Z, et al. Effect of no-tillage on soil aggregate and organic carbon storage[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2012, 20(3): 270-278.

[33] 张德喜, 吴卿. 不同耕作方式对农田土壤养分含量及土壤酶活性的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(11): 234-237. ZHANG D X, WU Q. Effects of different tillage methods on soil nutrients contents and enzyme activity in farmland[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(11): 234-237.

[34] 杨培培, 杨明欣, 董文旭, 等. 保护性耕作对土壤养分分布及冬小麦吸收与分配的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 755-759. YANG P P, YANG M X, DONG W X, et al. Effect of conservation tillage on wheat and soil nutrient distribution and absorption[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(4): 755-759.

[35] 彭西红, 陈平, 杜青, 等. 减量施氮对带状套作大豆土壤通气环境及结瘤固氮的影响[J]. 作物学报, 2022, 48(5): 1199-1209. PENG X H, CHEN P, DU Q, et al. Effects of reduced nitrogen application on soil aeration and root nodule growth of relay strip intercropping soybean [J]. Acta Agronomica Sinica, 2022, 48(5): 1199-1209.

[36] 房彦飞, 徐文修, 符小文, 等. 麦-豆周年不同施氮组合对复播大豆土壤肥力及周年产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022, (6): 64-72. FANG Y F, XU W X, FU X W, et al. Effects of different nitrogen application combinations of wheat and beans on soil fertility and annual yield[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2022, (6): 64-72.

[37] 杨江山, 张恩和, 黄高宝, 等. 保护性耕作对麦药轮作土壤酶活性和微生物数量的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(3): 824-829. YANG J S, ZHANG E H, HUANG G B, et al. Effects of conservation tillage on soil microbes quantities and enzyme activities in wheat-herb rotation system[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(3): 824-829.

[38] 苗琳. 保护性耕作对旱地土壤酶活性的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2008. MIAO L. Effects of conservation tillage on soil enzymatic activities in dryland[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2008.

[39] 董秀, 张燕, MUNYAMPIRWA T, 等. 长期保护性耕作对黄土高原旱作农田土壤碳含量及转化酶活性的影响[J]. 中国农业科学, 2023, 56(5): 907-919. DONG X, ZHANG Y, MUNYAMPIRWA T, et al. Effects of long-term conservation tillage on soil carbon content and invertase activity in dry farmland on the loess plateau[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2023, 56(5): 907-919.

[40] 赵雪淞, 宋王芳, 高欣, 等. 秸秆还田和耕作方式对花生土壤微生物量、酶活性和产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2020, (3): 126-132. ZHAO X S, SONG W F, GAO X, et al. Effects of straw returning and tillage methods on soil microbial biomass, enzyme activity and yield of peanut[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2020, (3): 126-132.