



杨佳鹤, 何进宇, 石伟业, 杨青青, 杨海林, 李王成, 何进勤, 陈彦云. 粉垄耕作对土壤养分及酶活性的影响[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(12):237-253.
YANG Jiahe, HE Jinyu, SHI Weiye, YANG Qingqing, YANG Hailin, LI Wangcheng, HE Jinqin, CHEN Yanyun. Effects of Fenlong cultivation on soil nutrients and enzyme activities[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(12):237-253.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2024.12.21

粉垄耕作对土壤养分及酶活性的影响

杨佳鹤¹ 何进宇^{1,2,3*} 石伟业⁴ 杨青青¹ 杨海林¹ 李王成^{1,2,3} 何进勤⁵ 陈彦云⁶

(1. 宁夏大学 土木与水利工程学院, 银川 750021;

2. 旱区现代农业水资源高效利用教育部工程研究中心, 银川 750021;

3. 宁夏节水灌溉与水资源调控工程技术研究中心, 银川 750021;

4. 宁夏大学 农学院, 银川 750021;

5. 宁夏农林科学研究院, 银川 750100;

6. 宁夏大学 生命科学学院, 银川 750021)

摘 要 针对宁夏北部干旱地区土地耕层变浅、深层土壤板结等问题, 以传统旋耕(耕作深度约 15 cm)为对照(CK), 设置粉垄耕作深度为 30 cm(FL30)、40 cm(FL40)、50 cm(FL50)和 60 cm(FL60)4 个处理, 监测在不同处理下玉米各个生育期土壤养分(碱解氮、速效磷、速效钾、有机质)和土壤酶活性(脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶、碱性磷酸酶)的变化规律。结果表明: 粉垄耕作下土壤碱解氮、速效磷、速效钾含量显著高于 CK, 且各养分含量的下降速度显著低于 CK, 尤其能显著提高较深处土壤(20~60 cm)的养分含量, 其中碱解氮含量平均提高 16.94 mg/kg, 速效磷含量平均提高 12.28 mg/kg, 速效钾含量平均提高 10.41 mg/kg, 有机质含量平均提高 6.34 g/kg; 粉垄耕作下土壤过氧化氢酶含量显著高于 CK, 平均提高了 0.69 mL/g; 粉垄耕作对 20~60 cm 土层内脲酶、蔗糖酶的活性影响显著高于 CK, 分别平均提高 1.17 mg/(g·d)、1.27 mg/(g·d)。由于粉垄耕作显著改善了土壤的关键物理属性及内部环境, 因此, 粉垄后土壤养分均高于原土, 且活化深层土壤的关键酶活性, 在增加了土地耕作层厚度、疏松了土壤结构的基础上, 为作物的生长提供了良好的生长环境。本研究为干旱地区粉垄耕作技术应用推广及土壤环境可持续发展提供了理论依据。

关键词 粉垄耕作; 玉米; 土壤养分; 土壤酶活性; 土壤环境

中图分类号 S152.7; Q945.11

文章编号 1007-4333(2024)12-0237-17

文献标志码

Effects of Fenlong cultivation on soil nutrients and enzyme activities

YANG Jiahe¹, HE Jinyu^{1,2,3*}, SHI Weiye⁴, YANG Qingqing¹, YANG Hailin¹,
LI Wangcheng^{1,2,3}, HE Jinqin⁵, CHEN Yanyun⁶

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

2. Engineering Research Center for Efficient Utilization of Modern Agricultural Water Resources in Arid Areas, Ministry of Education, Yinchuan 750021, China;

3. Ningxia Water Saving Irrigation and Water Resource Regulation Engineering Technology Research Center, Yinchuan 750021, China;

4. School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China;

5. Ningxia Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Yinchuan 750100, China;

6. School of Life Sciences, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

收稿日期: 2024-01-02

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1900601-02-04); 宁夏重点研发计划重大(重点)项目(2019BBF02006-01); 宁夏高等学校一流学科建设项目(NXYLXK2021A03)

第一作者: 杨佳鹤(ORCID:0009-0006-1558-0644), 硕士研究生, E-mail: 18695305396@163.com

通讯作者: 何进宇(ORCID:0000-0002-9712-8945), 副教授, 主要从事农业水土资源高效利用研究, E-mail: hejinyu2017@163.com

Abstract In response to the problems such as shallowness of land cultivation layer and compaction of deep soil layers in the arid areas of northern Ningxia, the changes of soil nutrients and enzyme activity during the entire growth period of maize under the use of Fenlong cultivation were investigated. Using traditional Fenlong cultivation (with a tillage depth of about 15 cm) as a control (CK), four treatments were set with a Fenlong depth of 30 cm (FL30), 40 cm (FL40), 50 cm (FL50), and 60 cm (FL60), respectively. The changes in soil nutrients (alkaline nitrogen, available phosphorus, available potassium, organic matter) and soil enzyme activity (urease, catalase, sucrase, alkaline phosphatase) at different growth stages of maize were monitored under different treatments. The results showed that: The contents of alkaline hydrolyzed nitrogen, available phosphorus, and available potassium in the soil under Fenlong cultivation were significantly higher than those of CK. The rate of decline of each nutrient content was significantly lower than that of CK, especially in the deeper soil (20 to 60 cm), where the average alkaline hydrolyzed nitrogen content increased by 16.94 mg/kg, the average available phosphorus content increased by 12.28 mg/kg, the average available potassium content increased by 10.41 mg/kg, and the average organic matter content increased by 6.34 g/kg; The content of soil catalase under Fenlong cultivation was significantly higher than that under CK, with an average increase of 0.69 mg/kg; The effect of Fenlong cultivation on the activity of urease and sucrase in the 20 to 60 cm soil layer was significantly higher than that of CK, with an average increase of 1.17 mg/(g·d) and 1.27 mg/(g·d), respectively. In conclusion, Fenlong cultivation significantly improved the key physical properties and internal environment of soil. The nutrients in the soil after Fenlong cultivation were higher than those in the original soil, and the key enzyme activities in the deep soil were activated. Based on increasing the thickness of the tillage layer and loosening the soil structure, it provided a good ecological environment for crop growth. This study provides a theoretical basis for the application and promotion of Fenlong cultivation in arid areas and the sustainable development of the soil environment.

Keywords Fenlong cultivation; corn; soil nutrients; soil enzyme activity; soil environment

土壤环境是制约农作物生长的决定性因素。我国西北干旱地区多采用浅翻、旋耕等传统耕作措施,长期使用导致耕层变浅、犁底层上移、土壤紧实度增加及透水透气性能变差等问题频现,从而影响作物根系发育和对水分养分的吸收利用,降低了作物的产量,制约了农业经济的可持续发展^[1]。通过改进耕作措施,进而改变土壤耕层的结构,调节土壤的紧实程度和三相比,协调土壤内部水-肥-气-热的关系,是改善土壤状况和作物生长公认的有效措施^[2-4]。

粉垄耕作区别于传统耕作措施,该耕作方法利用专用机械配套垂直螺旋型钻头,按照作物的种植需求将土壤在水平方向旋磨粉碎,被机体细碎的土壤下落后自然悬浮成垄。粉垄耕作在尽可能不打乱土层的情况下打破犁底层,一次作业即完成深松、深耕与整地,简化了耕地作业的程序,是解决长期制约作物生长问题和改善土壤耕层结构的一种新型耕作措施^[5]。本研究团队前期研究表明,粉垄耕作可显著改善土壤物理结构与水分状况^[6],进而促进作物根系对水分与养分的吸收,最终起到提高

作物产量与品质的目的^[7]。目前,粉垄耕作已在小麦^[8]、水稻^[9]、马铃薯^[10]及甘蔗^[11]等作物种植上推广,达到较好的应用效果。

针对我国西北干旱地区耕作层变浅、土壤板结等问题,本研究拟应用粉垄耕作技术,采用大田单因素随机区组试验,调查在不同处理下玉米各个生育期土壤养分和土壤酶活性的变化规律,探明粉垄耕作对玉米田土壤养分及酶活性的影响机理,揭示粉垄耕作提高养分利用效率与促进作物吸收的内在规律,以期为典型干旱地区粉垄耕作技术应用推广和农业土壤环境可持续发展提供理论更多支撑。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

宁夏银川市宁夏农垦集团暖泉实验农场地处106°11'E、38°42'N,海拔1 113 m,属于典型干旱地区,年均降水量188 mm,年均蒸发量1 845 mm,年均气温10.2℃,年均最高气温为32.4℃,年均最低气温为5.8℃,全年日照时数2 726.9 h。试验地2021年作物生长关键月份降水量和气温变化情况如图1

所示。试验地供试土壤为灰钙土,0~60 cm 土壤初始理化性质如表 1 所示。

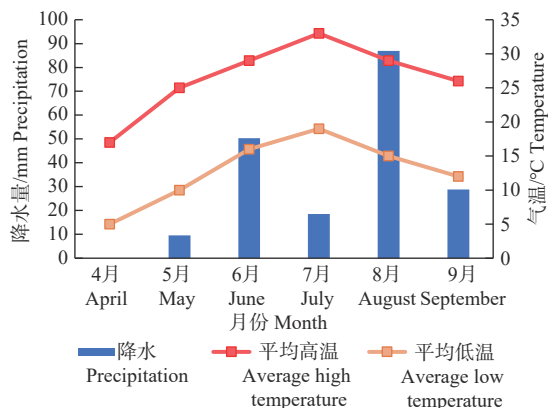


图 1 试验地月降水量和气温

Fig. 1 Monthly precipitation and air temperature in the test site

1.2 试验设计

大田试验采用单因素随机区组试验,以传统旋耕(耕作深度约 15 cm)为对照(CK),分别设置粉垄耕作深度 30 cm(FL30)、40 cm(FL40)、50 cm(FL50)和 60 cm(FL60)4 个处理,每个处理重复 3 次,共 18 个小区,试验区长 100 m,宽 38 m,试验地处理四周设置保护行。

2021 年 4 月 16 日采用“自走分体式粉垄机”(广西农科院研发、广西五丰机械有限公司生产)进行粉垄作业,5 月 7 日使用“播种-施肥-铺管一体机”进行玉米种植作业,种植模式为宽窄行,行距 40 cm,垄距 70 cm。供试玉米品种为天赐 19 号(甘肃武威甘鑫物种有限公司),具有较好的抗病性和防虫性。

灌溉水源就近引用自流黄河水,进行沉沙-澄清-过滤后进行滴灌,全生育期内灌水 14 次,灌水定额为 180 m³/hm²;采用水肥一体化技术,施用复合水溶性肥($w(N+P_2O_5+K_2O) \geq 50\%$),在全生育期(共 6 次)施用量为:氮(纯 N)60 kg/hm²,磷(P₂O₅)

52 kg/hm²,钾(K₂O)59 kg/hm²。试验周期为 2021 年 5 月 7 日播种,9 月 27 日收获,生育期共 143 d。

1.2.1 观测指标与方法

1) 土壤养分指标。在试验地粉垄耕作前及玉米不同生育期(苗期、喇叭口期、抽雄期、灌浆期、成熟期),按“五点交叉取样法”分别采集 0~20、20~40 及 40~60 cm 等 3 个深度范围的土壤样品,重复 3 次,土样混合后按“四分法”每个处理留 1 kg,经风干-除杂-研磨后,进行养分测定。其中,土壤碱解氮使用碱解扩散法,速效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法,速效钾采用乙酸铵浸提-火焰光度法^[12],有机质采用重铬酸钾容量法-硫酸氧化法^[13]。

2) 土壤酶活性指标。在试验地粉垄耕作前及玉米不同生育时期(苗期、喇叭口期、抽雄期、灌浆期、成熟期),按“五点交叉取样法”分别采集 0~20、20~40 及 40~60 cm 等 3 个深度范围的土壤样品,重复 3 次,土样利用附有冰袋的保温取样箱带回实验室内,筛去杂质后,进行土壤酶活性测定。其中土壤脲酶活性采用靛酚比色法,蔗糖转化酶活性采用茚三酮比色法^[14],碱性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法^[15],过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法。

3) 数据分析。数据的整理和作图采用 Microsoft Excel 2021 进行,方差分析和主成分分析采用 IBM SPSS 25.0 进行,多重比较采用 Duncan 法进行。

2 结果与分析

2.1 不同粉垄耕作对土壤养分的影响

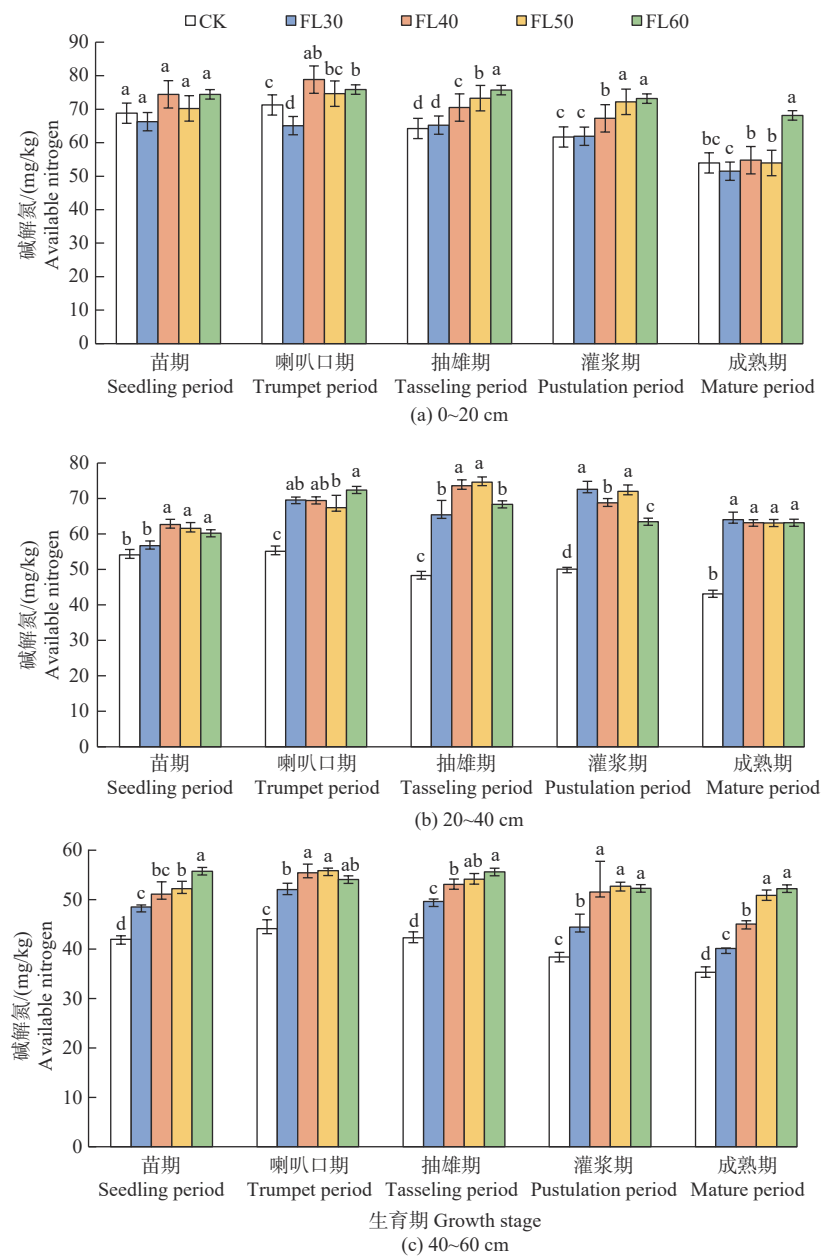
2.1.1 土壤碱解氮

粉垄耕作对不同生育期土壤碱解氮的影响如图 2 所示。可见随着生育时期的推进,不同试验处理的各层次土壤碱解氮含量整体呈现下降趋势,且含量随土层深度的增加而降低。其中:1)0~20 cm

表 1 初始土壤理化性质

Table 1 Physicochemical properties of initial soil

土层深度/cm Soil depth	容重/ (g/cm ³) BD	碱解氮/ (mg/kg) AHN	速效磷/ (mg/kg) AP	速效钾/ (mg/kg) AK	有机质/ (g/kg) OM	水溶性盐/ (g/kg) SS
0~20	1.38	37.65	17.34	100.03	19.32	0.83
20~40	1.39	30.23	15.52	95.74	17.43	0.81
40~60	1.37	28.50	15.30	85.60	12.07	0.91
平均 Average	1.38	32.13	16.05	93.79	16.27	0.85



FL30、FL40、FL50和FL60指粉垄深度分别为30、40、50和60 cm。柱形图上方不同小写字母代表各处理间差异达到 $P < 0.05$ 显著水平。下同。
The ridge depths of FL30, FL40, FL50 and FL60 are 30, 40, 50 and 60 cm, respectively. Different small letters above the bar represent significant differences among treatments at $P < 0.05$ level. The same below.

图2 不同粉垄耕作深度对不同生育期土壤碱解氮的影响

Fig. 2 Effects of different Fenlong cultivation depths on alkaline-hydrolysable-nitrogen of soil at different growth stages

土层内,FL40在苗期和喇叭口期的碱解氮含量最高,分别比CK高8.13%、10.61%;FL60在抽雄期到成熟期的含量最高,比CK分别高17.82%、18.56%、26.28%;FL50只在抽雄期和灌浆期显著高于CK,分别高14.09%、17.00%,其他时期均不显著;2)20~40 cm土层中,各粉垄处理碱解氮含量均显著高于CK,苗期FL40最高,较FL30和CK差

异显著,分别高10.41%和15.73%;喇叭口期FL60最高,与其他处理差异显著,较CK最高增加31.30%;抽雄期FL50最高,与CK、FL30、FL60差异显著,分别提高54.56%、14.12%、9.19%;灌浆期FL30最高,与其他处理差异显著,较CK、FL40、FL50和FL60分别提高45.07%、5.60%、0.81%和14.45%;成熟期FL30最高,较CK分别增加

48.45%、46.46%、46.28%、46.42%；3) 40~60 cm 土层内,各粉垄处理碱解氮含量也均显著高于CK, FL60 分别在苗期、抽雄期和成熟期最高,较CK 分别高 32.79%、31.47% 和 47.99%；FL50 在喇叭口期和灌浆期最高,较CK 分别高 26.65%、37.32%。

综上,虽然 0~20 cm 土层内CK 与粉垄处理的差异不显著,但随着土层深度的增加,不同生育期内粉垄处理过的土壤碱解氮含量始终高于CK,且表现为粉垄处理深度越深碱解氮含量减少的越少。FL40 在 20~40 cm 土层碱解氮含量较为稳定,平均含量为 67.53 mg/kg,比CK 高 17.38 mg/kg,是比较适合该层深度的粉垄深度。FL50、FL60 在 40~60 cm 土层碱解氮含量较为稳定,平均含量 53.19 和 53.99 mg/kg,高于CK 分别为 12.75 和 13.56 mg/kg。由此可见,粉垄耕作的处理丰富了较深处土壤中的有机质和营养物质,使土壤更容易储存氮素,从而提高了计划耕作层内土壤环境质量,为促进作物生长与提高产量奠定基础。

2.1.2 土壤速效磷

粉垄耕作对土壤速效磷的影响如图 3 所示,可见各处理土壤耕层速效磷含量整体随生育时期推进逐渐下降,且随深度的增加而降低。其中:1) 各处理 0~20 cm 土层,苗期、喇叭口期和成熟期都以 FL30 速效磷含量最高,分别比 CK 高 19.83%、12.14%、7.68%,且与 CK 无显著性差异;抽雄期和灌浆期 CK 的速效磷含量成为最高,其次便是 FL30 处理,分别比 FL30 高 5.38% 和 8.03%,其余 3 个粉垄处理与 CK 和 FL30 差异显著。2) 20~40 cm 土壤耕层,各粉垄处理土壤速效磷含量显著高于CK,除喇叭口期 FL30 显著高于CK 外,其他时期 FL60 速效磷含量最高,按时期依次比 CK 高 62.89%、55.93%、69.08% 和 84.17%；FL40、FL50 都与 FL60 差异不显著。3) 40~60 cm 土层规律与 20~40 cm 相似,除苗期 FL30 最高,其余时期均为 FL60 速效磷含量最高,比 CK 高 10.08 mg/kg,高了 97%。总体分析可知,CK 中 20~40 cm 速效磷含量较 0~20 cm 下降了 15.79 mg/kg,下降了 90%；40~60 cm 较 20~40 cm 下降了 7.14 mg/kg,下降了 70%,而 FL60 则下降了 8.07 mg/kg,下降了不到 40%。

可见,传统旋耕下土壤养分具有一定的表聚性,因而在 0~20 cm 土层土壤中速效磷含量比粉垄处理稍高,但相较于传统旋耕,粉垄耕作可以显著

增加深层土壤(20~60 cm)速效磷的含量,使土壤养分达到更均匀的分布。

2.1.3 土壤速效钾

本试验中不同处理对各生育期土壤速效钾含量影响规律如图 4 所示。由此可见,粉垄耕作疏松了深层土壤结构并增大了土壤孔隙,从而增加了土壤中速效钾的含量并促进了速效钾的有效分布。其中:1) 0~20 cm 土壤耕层中,各粉垄处理及 CK 的速效钾含量相差不大,FL30 在苗期、灌浆期和成熟期的含量是最高的,分别比 CK 高 5.17%、3.98% 和 8.00%；FL40、FL50 和 FL60 在该耕层差异不显著。2) 20~40 cm 土层 CK 含量显著低于粉垄处理,其中在苗期和喇叭口期 FL60 最高,分别比 CK 高 22.89% 和 17.16%,其次是 FL40,分别比 CK 高 18.94%、15.32%,FL30 和 FL50 差异不显著;抽雄期、灌浆期和成熟期则是 FL40 含量略高于其他粉垄处理。3) 40~60 cm 处,各粉垄处理在苗期、成熟期差异不显著,CK 在所有生育时期最低,与 20~40 cm 相反,在苗期、喇叭口期和抽雄期 FL60 含量最高,分别比 CK 高 24.66%、20.64% 和 21.87%,其次是 FL50 稍低于 FL60,分别低 1.41%、1.59% 和 0.24%,整个生育期内 FL50 和 FL60 差异均不显著;FL40 则在灌浆期和成熟期含量较高,较 CK 分别高 24.31%、12.10%,其他粉垄处理均与 FL40 差异不显著。

综上所述,土壤速效钾含量的变化呈现出随着深度的增加而减小的趋势,并且对照组下的速效钾含量远低于粉垄处理下的,0~20 cm 粉垄处理速效钾含量比对照高 5.7 mg/kg,FL30 处理效果较好;20~40 cm 高 10.04 mg/kg,FL40 处理效果较好;40~60 高了 19.55 mg/kg,FL60 处理效果较好。

2.1.4 土壤有机质

粉垄耕作对土壤有机质的影响如图 5 所示,可见整体上土壤有机质含量随生育期逐渐降低,且土壤深层有机质含量低于浅层。其中:1) 0~20 cm 土壤有机质含量在苗期以 FL50 最高,CK 最低,比 FL50 低 54.20%；至喇叭口期,FL30 最高,较 CK 高 5.58%,CK 与 FL50 差异不显著,FL40 与 FL60 较低且差异不显著;至抽雄期,表层土壤以 CK 最高,FL60 最低,较 CK 下降 33.79%,灌浆期 CK 仍然最高,与 FL30 相比增加 15.49%,且与其他处理之间差异显著。成熟期 CK、FL50 和 FL60 相对较高且

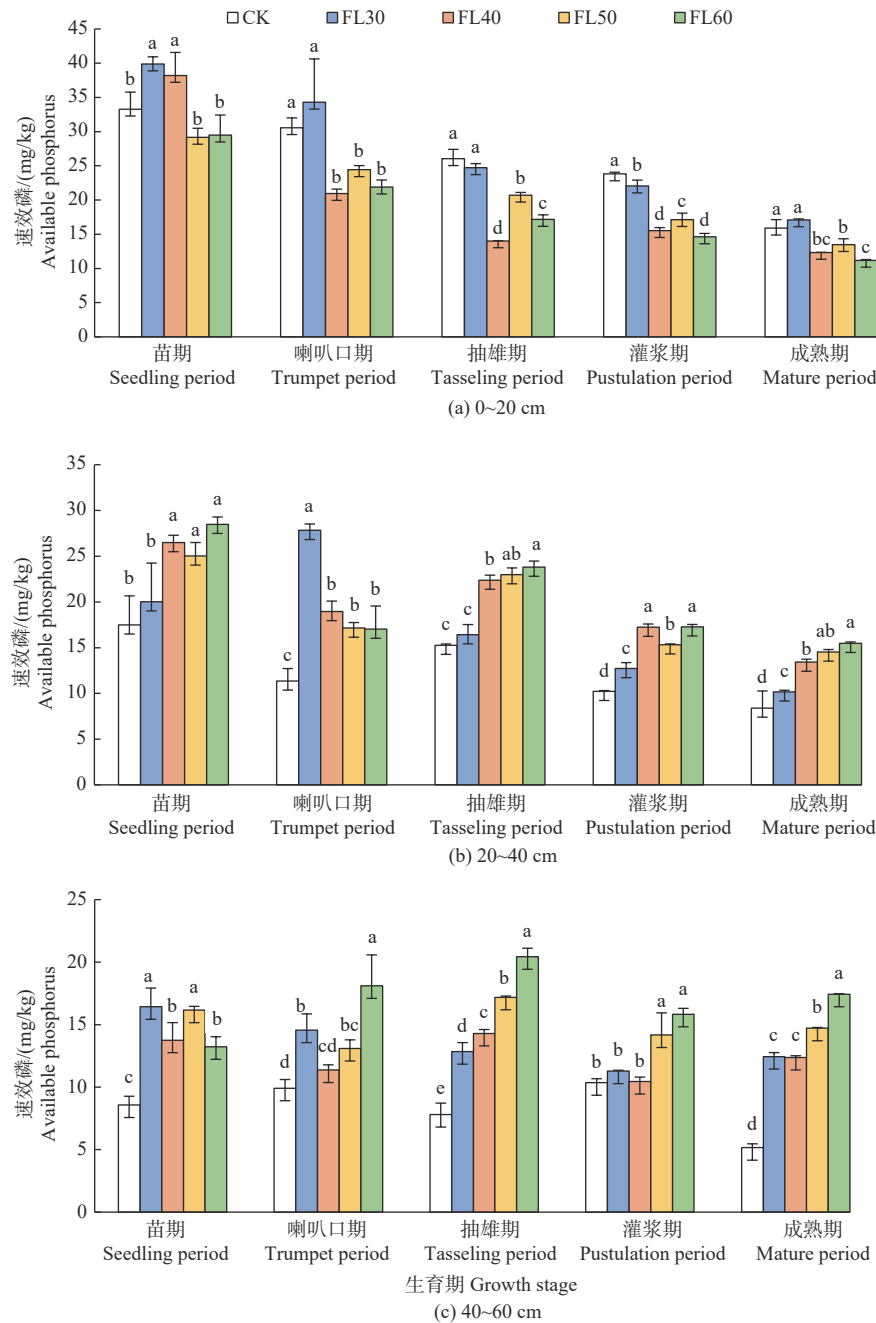


图3 不同粉垄耕作深度对不同生育期土壤速效磷的影响

Fig. 3 Effects of different Fenlong cultivation depths on available-phosphorus of soil at different growth stages

差异不显著。2)20~40 cm土壤耕层,苗期、灌浆期和成熟期有机质含量FL40最高,与CK相比差异显著,分别高66.07%、31.56%、58.78%;至喇叭口期各处理有机质含量有一定上升,FL30最高,与CK相比提高16.39%,抽雄期各处理有机质含量开始下降,CK下降较为明显,FL30处理最高,较CK高36.69%。3)40~60 cm处,总体随生育时期逐渐降低,苗期FL30最高,与FL50和FL60相比差异显

著,CK最低,对比FL30低25.51%;喇叭口期各处理间没有显著差异;抽雄期各处理有机质含量达到最高,粉垄处理显著高于CK,最高达116.40%;至灌浆期和成熟期粉垄处理与CK相比也保持更高水平,其他粉垄处理在逐渐下降的同时与CK差异显著。

总体来看,有机质含量在玉米试验地具有一定的表聚性,导致CK中0~20 cm的土壤有机质含量

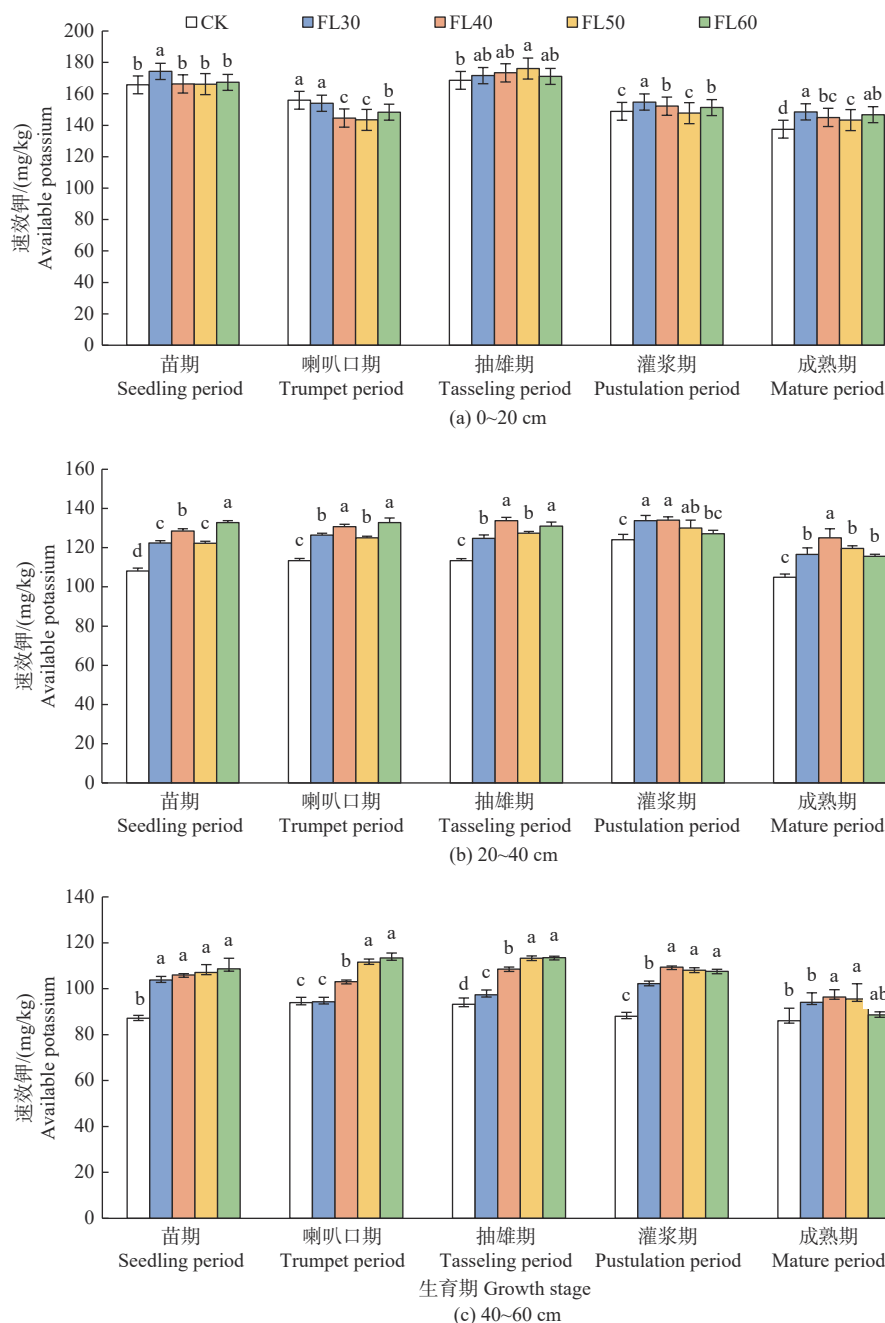


图 4 不同粉垄耕作深度对不同生育期土壤速效钾的影响

Fig. 4 Effects of different Fenlong cultivation depths on available-potassium of soil at different growth stages

在除苗期外的其他时期高于粉垄处理,平均高6%、7%、2%和14%;20~40 cm与40~60 cm的有机质含量在生育时期内低于粉垄耕作处理,最低可达1.16倍,这说明粉垄耕作可以提高较深层次土壤有机质的含量,且20~40 cm是最优影响深度。

2.2 不同粉垄耕作对土壤酶活性的影响

2.2.1 土壤脲酶

粉垄对不同生育期土壤脲酶活性的影响如图6

所示,可见粉垄耕作对土壤脲酶活性有促进作用。其中:1)0~20 cm脲酶活性在喇叭口期各处理间没有显著差异,至抽雄期以FL30与FL50最高,比CK分别高46%和41%,与其他处理差异显著;至灌浆期时各处理脲酶活性均降低,FL50与FL40最高,其他处理差异不显著;至成熟期时FL40下降明显,下降了40%,与上一时期相比CK与FL30、FL50、FL60无明显变化。2)20~40 cm土层,各生育期脲酶含量

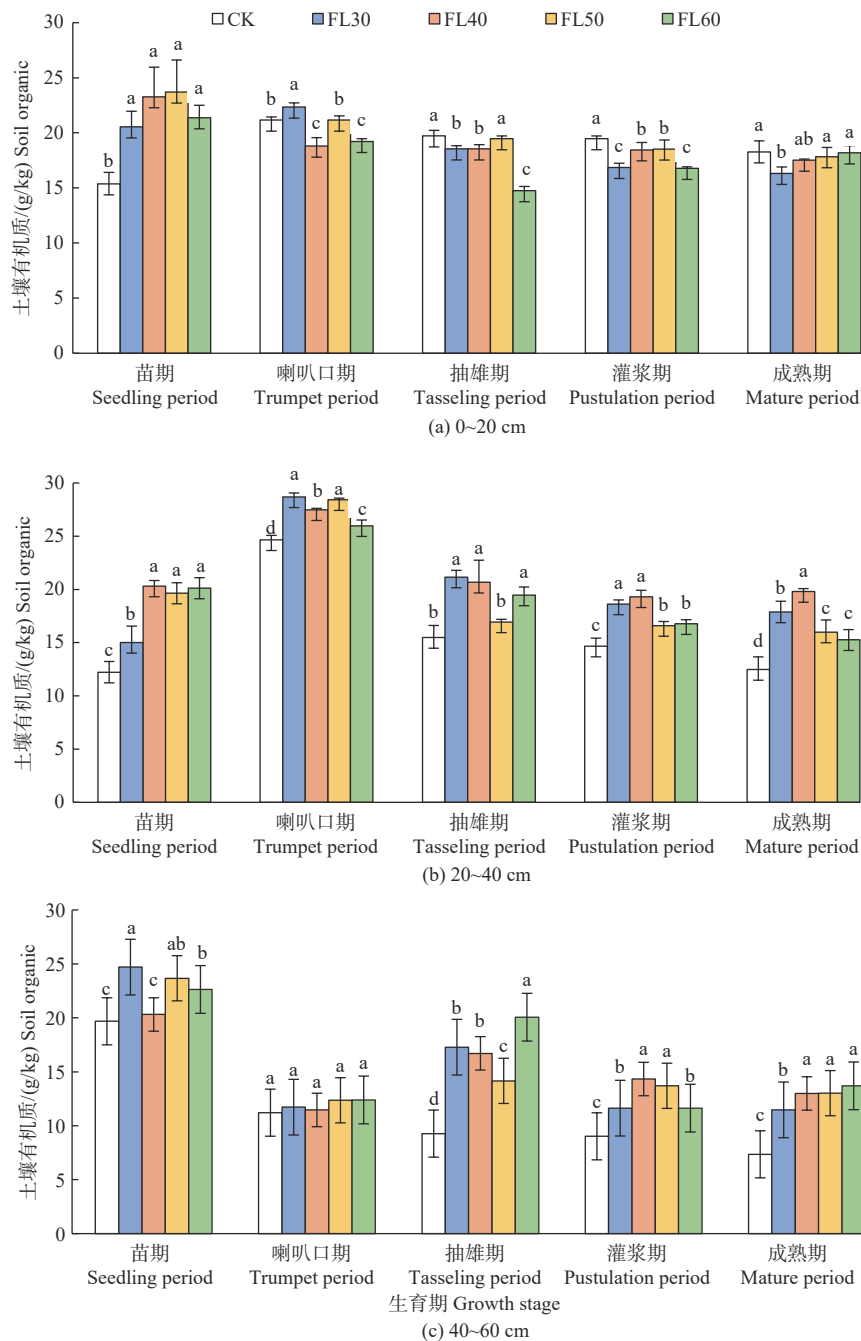


图5 不同粉垄耕作深度对不同生育期土壤有机质的影响

Fig. 5 Effects of different Fenlong cultivation depths on organic-matter of soil at different growth stages

与上一深度相比有所下降,喇叭口期CK最低,此后在各处理中始终处于最低含量;到抽雄期时除了FL60各处理含量都有所上升,但差异不显著;灌浆期和成熟期的脲酶含量变化不太稳定,各处理有升有降,其中FL40变化最明显,提高了1.48 mg/(g·d)。

3)40~60 cm 土层,整体规律呈现为随着生育时期的推进脲酶活性先增大后减弱,CK在整个生育时

期保持较低水平,喇叭口期FL30最高,与CK相比平均提高0.64 mg/(g·d),抽雄期FL40与FL50、FL60最高,至灌浆期FL50达到最高,其他处理有所降低,至成熟期FL40提升至最高。

总体分析可知,与传统旋耕相比,粉垄耕作可以在一定程度上提高20~40和40~60 cm土层的脲酶活性。

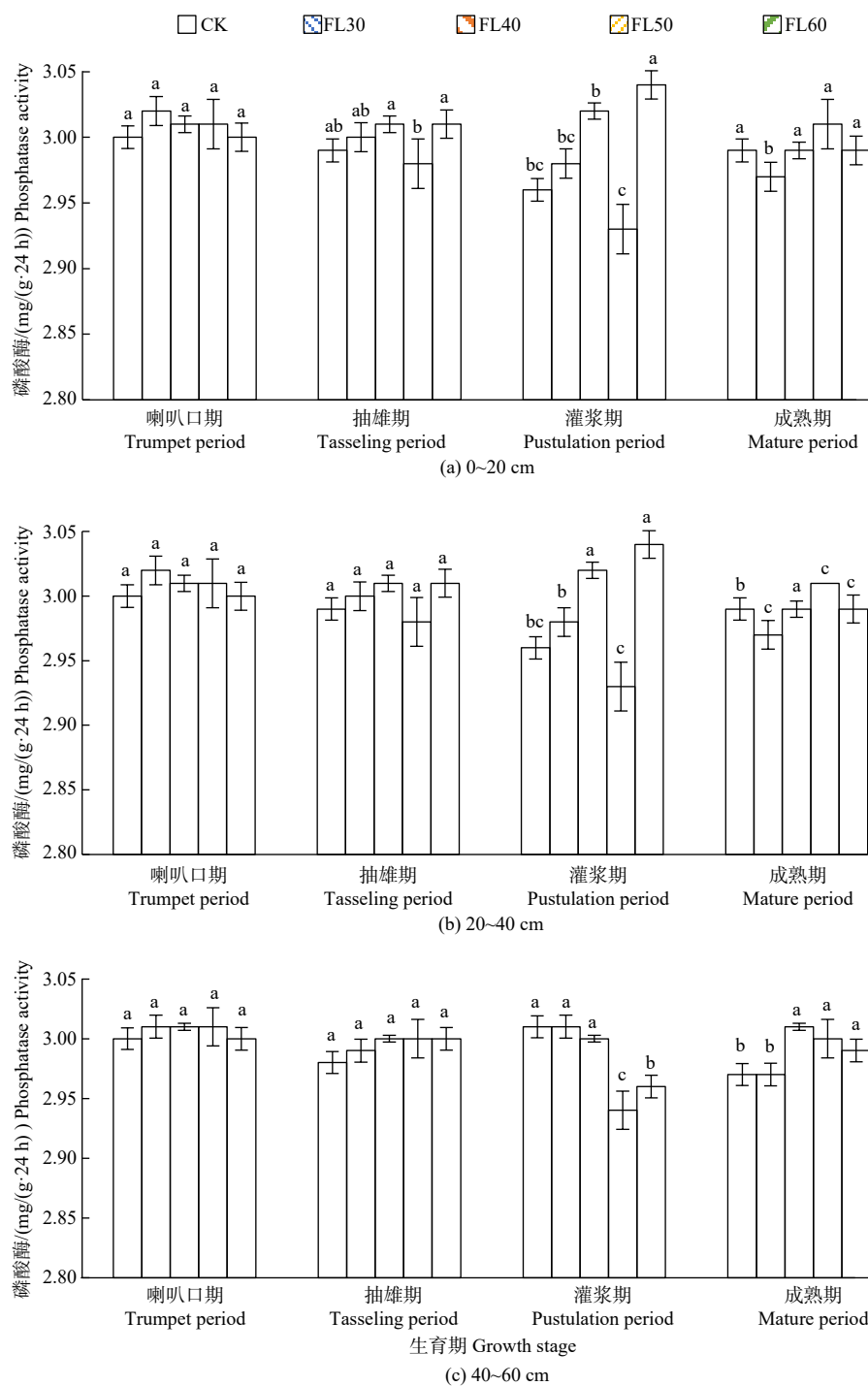


图 6 不同粉垄耕作深度对不同生育期土壤脲酶的影响

Fig. 6 Effects of different Fenlong cultivation depths on urease of soil in different growth stages

2.2.2 土壤过氧化氢酶

粉垄对不同生育期土壤过氧化氢酶的影响如图 7 所示, 总体呈现的规律为: 随着生育时期的推进所有处理酶活性含量先增高后降低, 至收获后降至最低, 且深层次土壤活性逐渐降低。其中: 1) 0~20 cm

过氧化氢酶在喇叭口期以 FL30 最高, CK 最低; 至抽雄期开始上升, FL40 最高, 与 CK 相比提升 69.52%; 至灌浆期各处理酶活性开始下降, 此时 FL40 最高, FL50 和 FL60 降低, 与 FL40 相比分别下降 36.25% 和 33.24%; 至成熟期则是 CK 降至最低,

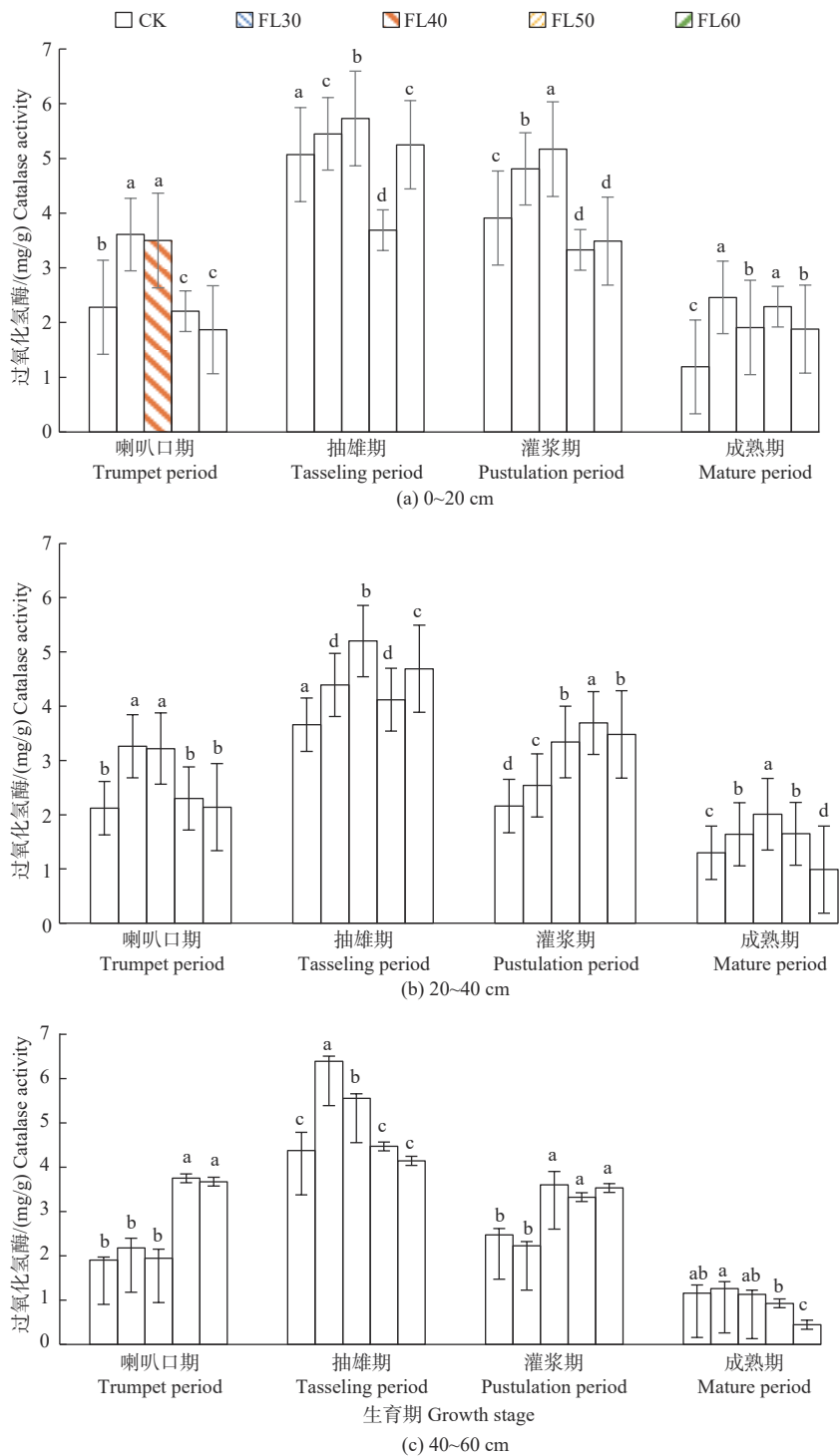


图7 不同粉垄耕作深度对不同生育期土壤过氧化氢酶的影响

Fig. 7 Effects of different Fenlong cultivation depths on catalase-activity of soil at different growth stages

FL30最高,与CK相比增加63.24%。2)20~40 cm土壤层在喇叭口期以FL30和FL40最高,CK最低,与FL30相比降低42.36%;至抽雄期各处理快速上升,其中FL50上升幅度最低,FL40上升幅度最高,与喇叭口期相比上升82.34%,且与其他处理差异

显著;灌浆期以FL50最高,CK最低,与其他处理相比差异显著,与FL50相比下降42.36%;成熟期各处理下降至最低,CK与其他处理差异显著,粉垄处理表现为FL40>FL50>FL30>FL60>CK。3)40~60 cm在喇叭口期表现为FL50和FL60最高,

分别为 3.75 ml/g 和 3.67 ml/g;抽雄期各处理活性开始上升,FL30 最高,比 CK 高 2.01 ml/g,FL60 最低,比 FL30 低 45.39%,与 CK 无显著差异;灌浆期 FL40、FL50 和 FL60 酶含量无显著差异。

综合分析,粉垄处理在生育时期内过氧化氢酶的活性高于 CK,粉垄耕作可以促进土壤中过氧化氢酶活性的提高,且 20~60 cm 深度成熟期各粉垄处理与 CK 相比无显著差异,说明该深度下粉垄处

理可以促进植物对过氧化氢酶的吸收。

2.2.3 土壤蔗糖酶

粉垄对不同生育期土壤蔗糖酶的影响如图 8 所示,可见土壤蔗糖酶活性整体表现为随着生育时期的推进先上升后下降的趋势。其中:1)0~20 cm 出苗喇叭口期以 FL30 最高,CK 最低,与 FL30 相比下降 35.12%,其他粉垄处理差异不显著;至抽雄期各处理酶活性各不相同且差异显著,FL40 最高,与最

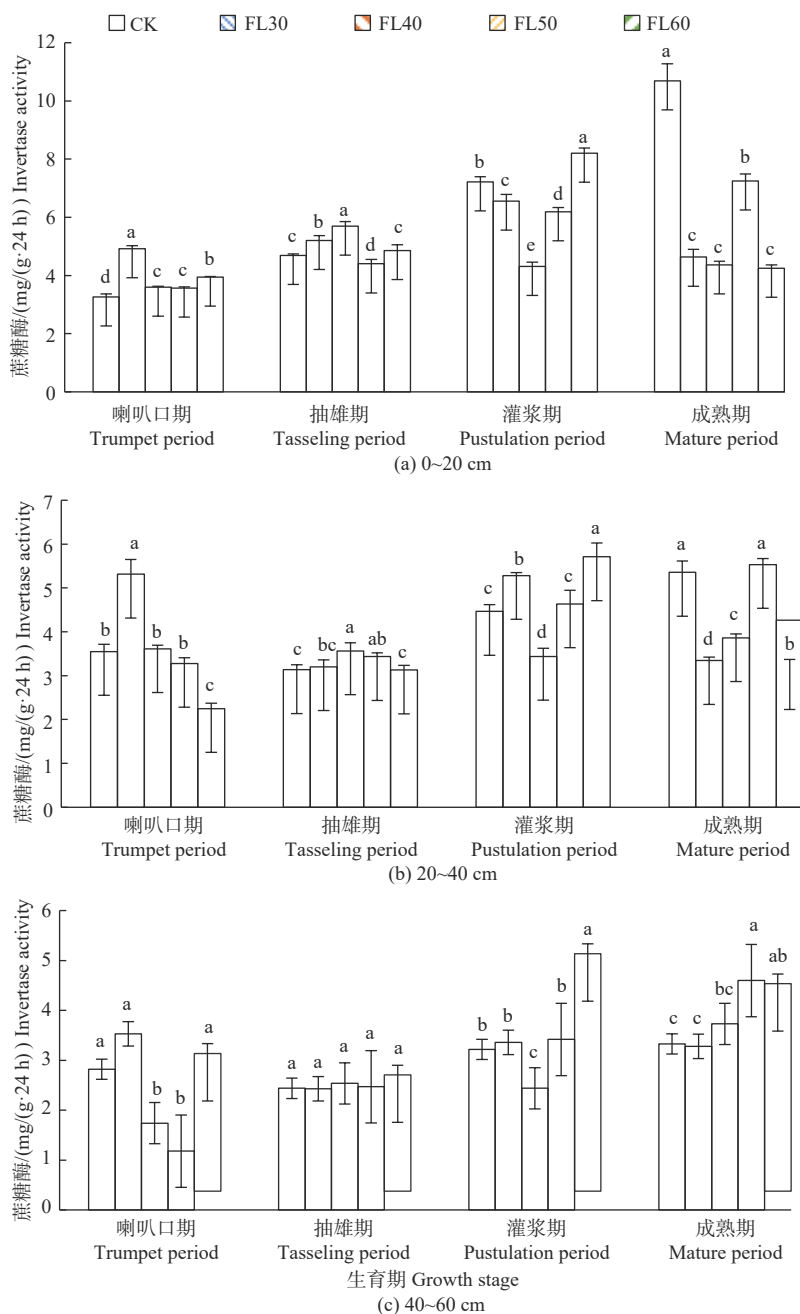


图 8 不同粉垄耕作深度对不同生育期土壤蔗糖酶的影响

Fig. 8 Effects of different Fenglong cultivation depths on sucrase-activity of soil at different growth stages

低的FL50相比提升21.2%,到灌浆期则又下降至最低且与其他处理相比差异显著,与FL60相比下降53.69%,成熟期CK最高,分析原因可能是积蓄在表层土壤的有机质及土壤温度对酶活性产生了影响,粉垄处理中除了FL50,其他处理差异不显著。2)20~40 cm处理在喇叭口期表现为FL30最高,FL60最低,至抽雄期各处理分布趋于统一,FL40最高,而后依次是FL50、FL30、CK和FL60,灌浆期FL60最高,FL40最低,同比下降40.13%,成熟期FL50和CK最高,与其他处理差异显著。3)40~60 cm土壤耕层在喇叭口期为FL30最高而FL50最低,CK和其他粉垄处理差异不显著。抽雄期各处理差异不显著,灌浆期FL60最高,CK、FL30和FL50之间差异不显著,FL40最低,与FL60相比下降48.32%。成熟期表现为FL50最高,FL60次之,CK、FL30和FL40差异不显著。

总体来看,0~20 cm深度CK蔗糖酶含量表现为逐渐增加,至成熟期增长了7.43 mg/(g·d);20~40 cm深度FL50蔗糖酶含量表现为稳定增长趋势,至成熟期增加了2.25 mg/(g·d);40~60 cm深度FL40和FL50蔗糖酶含量表现为稳定增长趋势,至成熟期分别增加了2.00、4.42 mg/(g·d)。粉垄耕作对土壤蔗糖酶的活性影响不稳定,CK与粉垄处理相比差异不是在全生育时期都显著的。这可能与土壤温度、微生物活动以及作物对养分的吸收有关。

2.2.4 土壤碱性磷酸酶

粉垄耕作对土壤碱性磷酸酶活性的影响如图9所示。可见土壤中有有机磷虽占土壤全磷的40%~90%,但有效性低,需通过碱性磷酸酶和植酸酶的矿化及微生物作用转化为无机磷后才能成为有效磷^[16]。其中:1)在0~20 cm土壤耕层,喇叭口期各处理间差异不显著,FL30以微弱差别高于其他粉垄处理;抽雄期以FL40最高,FL50最低,与其他处理相比差异显著,CK和FL30差异不显著;灌浆期FL60最高,与其他处理差异显著,FL50降至最低,与FL60相比降低3.75%,成熟期以FL50最高,与其他处理差异不显著。总体而言,除FL50在灌浆期活性降低,出现一定的不规律变化,其他生育时期各处理土壤碱性磷酸酶活性总体差异不显著。2)在20~40 cm土壤耕层,各生育期的处理之间差异均不显著,喇叭口期FL60活性最高;抽雄期、灌浆期和成熟期有微小波动,总体维持在2.95~3.02 mg/(g·d)的

水平。各处理在20~40 cm土壤耕层碱性磷酸酶的活性表现为稳定且变化不明显,各处理间的差异几乎为系统误差,粉垄耕作与传统旋耕对玉米试验地土壤的碱性磷酸酶活性影响不显著。3)在40~60 cm土壤耕层,喇叭口期至成熟期各处理差异不显著,FL50在灌浆期下降至2.94 mg/(g·d),与其他处理差异不显著,在成熟期,各处理间差异不显著。总体而言,活性分布规律呈现为随生育时期推进先增大后略微减小的趋势,在整个生育时期内土壤的碱性磷酸酶活性较低,变化幅度2.93~3.04 mg/(g·d)。粉垄耕作对20~40 cm以及40~60 cm耕层土壤的碱性磷酸酶活性在整个生育时期内没有显著影响。

3 讨论

氮(N)、磷(P)、钾(K)作为基础的营养物质,是作物生长发育所必需的^[17]。土壤中的养分与有机质不能完全依赖于肥料的堆积,而是要通过改善土壤的物理属性与孔隙结构,调节水分与养分间的转化,释放被固定和难以分解的营养物质^[18-19],使土壤能够在水分充足的条件下持续产生能够供给作物生长发育的各类养分。土壤养分是土壤肥力最重要的物质基础,是保证作物生长与产量的关键因素,不同的耕作方式和耕作制度对土壤养分的影响具有一定的差异,合理的耕作方式可以有效改善土壤的物理结构,从而影响土壤对水分和营养物质的吸收与释放^[20-22]。本试验地属近年新开地,年际肥料施用量较少,多年肥料堆积量较小,作物生长期间依赖的肥料来源主要为土壤本身释放的营养物质,这就需要一个合理的耕作措施对土壤物理结构进行改良,保证原本固定在土壤中的养分可以充分溶解,在水分渗透和移动的过程中释放于有效土壤耕作层和根系附近^[23]。

试验地前茬作物残茬和野草较多,粉垄耕作通过旋磨细碎的耕作方式将这些植物残体与土壤充分混合,在一定程度上增加了有机物质和土壤接触的程度,打破片状与块状土壤后土壤的细碎程度进一步提高了,增加了土壤孔隙度和通透性后有利于相关微生物的生长与繁殖,进而促进了土壤中有机质的分解。韦本辉等^[24]通过在旱地进行粉垄整地后与其对应的基础土样进行比对,对30、40、50和60 cm层次土样的速效养分和有机质进行重点测定和分析,发现粉垄后土壤的速效养分均高于原土,

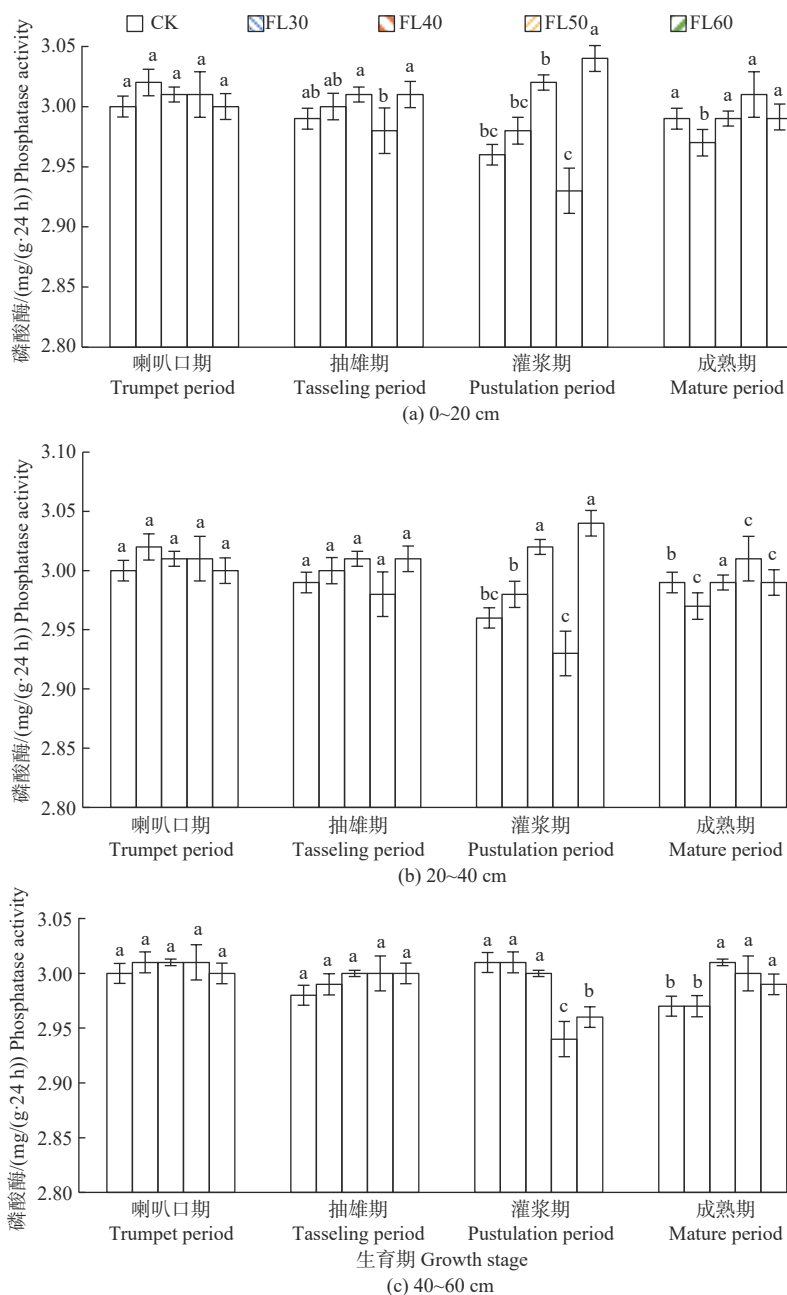


图9 不同粉垄耕作深度对不同生育期土壤碱性磷酸酶的影响

Fig. 9 Effects of different Fenglong cultivation depths on alkaline-phosphatase of soil at different growth stages

增幅最低在 3.02%，最高为 53.71%。张敏等^[25]通过对粉垄耕作后山地、闲地土壤营养物质的观测后也获得了类似的结果。本试验经过对粉垄后土壤速效养分和有机质的测定发现，结果与以上研究规律和结论相似。本研究团队在前期研究基础上得出由于粉垄耕作的过程中有效改善了土壤的内部环境，尤其是关键物理属性，如，土壤团粒结构增加，孔隙度增加，使土壤通透性增强，有充足的氧气

进入土壤孔隙，使土壤内部氧气充足，为提高土壤养分状况提供了较优的环境条件；同时下层水分通过刀具的旋转带至上层土壤，使土壤水分上下联通，相互渗透；高速旋转的刀片通过摩擦产生热量，而钾素养分易溶于水，进入土壤后容易与其他离子发生置换，从而被吸附^[26]，粉垄通过改变土壤的温度可以达到这一效果，除此之外，土壤温度的升高在一定程度上也可增加磷的释放。

土壤酶活性是反映土壤养分利用和产出状况的重要指标,其中,脲酶、过氧化氢酶、蔗糖转化酶和碱性磷酸酶是帮助作物分解、吸收和利用土壤养分的关键酶活性^[27-29]。脲酶又名尿素水解酶,有促进尿素分解为氨(NH_3)与碳酸被作物根系吸收利用从而影响土壤氮素代谢的作用。脲酶活性与土壤氮素养分息息相关,与氮素养分呈现的规律相似^[30],分析其原因,可能是由于粉垄耕作可以通过改善土壤孔隙结构从而达到改变土壤孔隙通道,促进氮素养分在土壤中的分解,同时通过水分的运移将碱解氮等养分运输下渗到深层次的土壤,因此,FL60在40~60 cm土壤耕层中仍然能够保持不低于CK的含量水平,这与深层次土壤脲酶活性的大小相关。深层次土壤在粉垄耕作下被粉碎和细化,坚实的片状和块状土壤被打碎后,整体土壤的孔隙结构增大并得到改善,因此改善了该区域土壤的活化程度和空气在里面的流通,促进了参与脲酶分解的微生物的数量,促进了脲酶的产生,进一步促进了碱解氮含量的增加。过氧化氢酶含量呈现的规律为先增高后降低,这与作物根系对酶活性的需求相关,在抽雄期开始后,玉米植株对各类速效养分和有机质的需求开始上升,促使根际和附近土壤开始大量分解产生过氧化氢酶,从而促进对养分的吸收和利用,蔗糖酶也呈现出相似的规律。这与夏皖豫^[31]的研究结果相似。

耕作措施在改变土壤结构的过程中是否也会改变酶活性,是耕作试验中涉及相对较少的问题,冯彪等^[32]学者通过设置大田耕作试验,发现深翻和深松对土壤微生物数量、微生物量碳、微生物量氮和土壤酶活性的提高有显著影响,且年际间差异显著,说明在一定程度上深翻和深松可以提高土壤微生物数量,有利于微生物的生长,分析其原因,可能是耕作措施改变了土壤的孔隙结构,促进了空气流通,改善了水分条件后促进了微生物的生长,由于一些酶活性是土壤微生物参与分解而产生的,所以微生物生长的状况直接决定了酶活性的大小。

过氧化氢酶通过催化过氧化氢(H_2O_2)分解为水和氧来提供植物对水和氧气的需求以及避免过氧化氢对自身的伤害。在玉米植株生长初期土壤中的过氧化氢酶活性处于一个相对较低的过程,并且每个土层深度的过氧化氢酶活性在成熟期时都很低,与是否经过粉垄耕作处理并无太大关系。分

析原因在玉米生长初期由于耕地土壤连续耕作多次,进行休眠的次数较少,耕地中的土壤过量的积累过氧化氢,自身的代换能力降低,对于毒性的抵抗能力降低,过氧化氢的生成量较低^[33],所以导致过氧化氢酶活性较低,并且处于同一生长时期时土壤中的脲酶活性相对也较低,使得植物对于土壤中的某些有氧养分转化较低,张昌顺等^[34]研究表明土壤中的过氧化氢酶活性与土壤有机质、碱解氮、速效钾和pH值含量的高低有关。其中,土壤过氧化氢酶活性与碱解氮、速效钾和有机质之间呈极显著正相关。当植株成长至成熟期时土壤中的有氧养分例如有机质等消耗量过多、含量较低,所以与之呈现正相关关系的过氧化氢酶活性比较低。在上述分析的条件下,经过粉垄耕作处理的土壤由于土壤中的有机质、碱解氮、速效钾等含量都相对传统耕作有所提高,所以同时期粉垄处理组的过氧化氢酶活性相对较高。根据图表中得到的数据可以看出在土壤深度为0~20 cm时FL30和FL40处理组的酶活性相对其他处理较为稳定。但观察其他2个土层深度可以发现FL50的过氧化氢酶活性一直处于相对较高且稳定的状况。

除了土壤本身可以通过耕作在外部物理因素的作用下改变土壤的物理性质和透水透气性能,从而改善土壤微生物环境后提升土壤酶活性这一途径,作物本身根系的发育与根系活力的改善也可以促进根系分泌相应的分泌物促进养分的吸收^[35],已有研究表明,作物和根系的发育可以促进酶活性与碳源的释放^[36],粉垄耕作通过改善土壤环境促进作物根系活力的提升^[37],在深层次土壤被细碎后减少了根系下扎的阻力,进一步促进了作物根系下扎、分泌相关酶而促进作物对养分的吸收,因此粉垄处理在深层次土壤的酶活性强于同时期传统耕作处理下土壤的酶活性。

4 结 论

本研究针对粉垄耕作条件下土壤养分及酶活性的变化情况,探究了粉垄耕作对土壤养分及酶活性的影响规律,主要结论如下:

1)与传统旋耕相比,在玉米试验地,粉垄耕作可以显著增加土壤的速效养分和有机质含量,促进养分向深层次土壤流动,促进作物对表层土壤养分的吸收和利用;

2)粉垄耕作可以通过改变土壤物理性质,改善土壤环境,促进作物根系的发育和酶的分泌增加土壤中酶活性的来源显著提高土壤脲酶、过氧化氢酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶的含量,有利于促进土壤养分的合成。

参考文献 References

- [1] 范继征, 闫飞燕, 石达金, 吕巨智, 张玉, 钟昌松, 程伟东, 刘永红. 不同耕作方式对玉米田土壤物理性质及产量的影响[J]. 玉米科学, 2016, 24(1): 96-101
Fan J Z, Yan F Y, Shi D J, Lv J Z, Zhang Y, Zhong C S, Cheng W D, Liu Y H. Effect of different tillage management on soil physical properties and maize yield[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2016, 24(1): 96-101 (in Chinese)
- [2] Singh D, Lenka S, Lenka N K, Trivedi S K, Bhattacharjya S, Sahoo S, Saha J K, Patra A K. Effect of reversal of conservation tillage on soil nutrient availability and crop nutrient uptake in soybean in the vertisols of central India[J]. *Sustainability*, 2020, 12(16): 6608
- [3] Lv L G, Gao Z B, Liao K H, Zhu Q, Zhu J J. Impact of conservation tillage on the distribution of soil nutrients with depth[J]. *Soil and Tillage Research*, 2023, 225: 105527
- [4] 张邦彦, 李惠霞, 何进宇, 何文寿. 粉垄耕作对宁南黑垆土氮素运移及马铃薯产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022, (9): 155-165
Zhang B Y, Li H X, He J Y, He W S. Effects of Fenlong cultivation on nitrogen transport and potato yield in dark loessial soil of southern Ningxia [J]. *Soil and Fertilizer in China*, 2022, (9): 155-165 (in Chinese)
- [5] Wei B H. Chinese invention of the fourth agricultural method "Powder Ridge"[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2017, 18(11): 2045-2048, 2052
- [6] 何进宇, 石伟业, 刘飞杨, 马巧梅, 杨艳, 杨佳鹤, 崔炬玮, 陈彦云. 粉垄耕作深度对旱区土壤关键物理性质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(3): 195-201, 228
He J Y, Shi W Y, Liu F Y, Ma Q M, Yang Y, Yang J H, Cui X W, Chen Y Y. Effects of Fenlong cultivation on soil key physical properties in arid areas[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2023, 41(3): 195-201, 228 (in Chinese)
- [7] 石伟业, 何文寿, 李惠霞, 何进宇, 陈彦云. 粉垄耕作对土壤理化性质和水稻生长及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(1): 232-238
Shi W Y, He W S, Li H X, He J Y, Chen Y Y. Effects of Fenlong cultivation on soil physicochemical properties and rice growth and yield [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2023, 51(1): 232-238 (in Chinese)
- [8] 聂胜委, 张玉亭, 汤丰收, 黄绍敏, 张巧萍, 韦本辉, 张水清, 何宁. 粉垄耕作对潮土冬小麦生长及产量的影响初探[J]. 河南农业科学, 2015, 44(2): 19-21, 43
Nie S W, Zhang Y T, Tang F S, Huang S M, Zhang Q P, Wei B H, Zhang S Q, He N. Effects of Fenlong cultivation on growth and yield of winter wheat in fluvo-aquic soil region [J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2015, 44(2): 19-21, 43 (in Chinese)
- [9] 韦本辉, 刘斌, 甘秀芹, 申章佑, 胡泊, 李艳英, 吴延勇, 陆柳英. 粉垄栽培对水稻产量和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(19): 3946-3954
Wei B H, Liu B, Gan X Q, Shen Z Y, Hu P, Li Y Y, Wu Y Y, Lu L Y. Effects of Fenlong cultivation on yield and quality of rice [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(19): 3946-3954 (in Chinese)
- [10] 王斌, 何文寿, 耿世杰. 粉垄耕作对土壤水分利用效率和马铃薯产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(21): 93-96
Wang B, He W S, Geng S J. The effect of Fenlong cultivation on soil water use efficiency and potato yield [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, 48(21): 93-96 (in Chinese)
- [11] 李浩, 黄金玲, 李志刚, 韦本辉, 陈晓茹, 韩世健, 梁晓莹, 李素丽. 粉垄耕作提高土壤养分有效性并促进甘蔗维管组织发育和养分吸收[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(2): 204-214
Li H, Huang J L, Li Z G, Wei B H, Chen X R, Han S J, Liang X Y, Li S L. Fenlong tillage increase soil nutrient availability, and benefit vascular tissue structure and nutrient absorption of sugarcane [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, 27(2): 204-214 (in Chinese)
- [12] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
Lu R K. *Methods of Soil Agrochemical Analysis* [M]. Beijing: China Agriculture Sciencetech Press, 2000 (in Chinese)
- [13] 李孝兰. 用重铬酸钾氧化容量法测定土壤有机质关键技术[J]. 现代农村科技, 2013, (23): 36
Li X L. Key technology of determine soil organic matter by potassium dichromate oxidation capacity method [J]. *Modern Rural Science and Technology*, 2013, (23): 36 (in Chinese)
- [14] 陈珏. 水土保持林地根系分泌物及土壤酶活性研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2011
Chen J. Soil and water conservation forest root exudates and soil enzyme activities[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2011 (in Chinese)
- [15] 牛世全, 杨建文, 胡磊, 景彩虹, 达文燕, 杨婷婷, 李君锋, 姚健. 河西走廊春季不同盐碱土壤中微生物数量、酶活性与理化因子的关系[J]. 微生物学通报, 2012, 39(3): 416-427
Niu S Q, Yang J W, Hu L, Jing C H, Da W Y, Yang T T, Li J F, Yao J. Relationship with soil microbial quantity, soil enzyme activity and physicochemical factor between different saline-alkali soil in Hexi Corridor in spring [J]. *Microbiology China*, 2012, 39(3): 416-427 (in Chinese)
- [16] 廖远行, 舒英格, 王昌敏, 蔡华, 李雪梅, 罗秀龙, 龙慧. 喀斯特地区不同植被类型土壤微生物量磷、碱性磷酸酶及植酸酶的变化特征[J]. 南方农业学报, 2023, 54(6): 1762-1770
Liao Y X, Shu Y G, Wang C M, Cai H, Li X M, Luo X L, Long H. Change characteristics of soil microbial phosphorus, alkaline phosphatase and phytase under different vegetation types in Karst area [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2023, 54(6): 1762-1770 (in Chinese)
- [17] Men X X, Bao Y, Wu M H, Liao C, Cheng X L. Soil enzyme activities responded differently to short-term litter input manipulation under coniferous and broad-leaved forests in the subalpine area of Southwest China [J]. *Forest Ecology and Management*, 2023, 546: 121360
- [18] 薛婷婷, 程春颖, 杨帆, 张亮, 徐国前, 李茹一, 王江林, 张立霞, 梁泽炫, 周建华. 葡萄园有机覆盖措施对土壤特性的影响研究进展[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(6): 206-218
Xue T T, Cheng C Y, Yang F, Zhang L, Xu G Q, Li R Y, Wang J L, Zhang L X, Liang Z X, Zhou J H. Effect of organic mulching practices on soil properties in vineyards: A review [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(6): 206-218 (in Chinese)
- [19] 甫文疆, 赵芸晨, 王文丽, 闫治斌, 王治江, 陈叶, 陈广泉. 制种玉米连作对土壤氮组分含量及根腐病发病的影响[J]. 中国农业大学学报, 2024, 29(2): 23-35
Fu W J, Zhao Y C, Wang W L, Yan Z B, Wang Z J, Chen Y, Chen G

- Q. Effects of continuous corn seed production on the soil nitrogen distribution and incidence of root rot[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2024, 29(2): 23-35 (in Chinese)
- [20] 张向前, 杨文飞, 徐云姬. 中国主要耕作方式对旱地土壤结构及养分和微生态环境影响的研究综述[J]. *生态环境学报*, 2019, 28(12): 2464-2472
Zhang X Q, Yang W F, Xu Y J. Effects of main tillage methods on soil structure, nutrients and micro-ecological environment of upland in China: A review [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(12): 2464-2472 (in Chinese)
- [21] 张冬梅, 张伟, 姜春霞, 王晓娟, 刘化涛, 杨柯, 闫六英, 刘恩科, 翟广谦. 旱地玉米不同耕作覆盖措施的土壤环境及产量效应[J]. *中国农业大学学报*, 2019, 24(6): 26-37
Zhang D M, Zhang W, Jiang C X, Wang X J, Liu H T, Yang K, Yan L Y, Liu E K, Zhai G Q. Effects of different tillage and mulch treatments on the soil environment and yield of dryland maize[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(6): 26-37 (in Chinese)
- [22] 杨雪, 连焕成, 李轶冰, 任天志, 董国豪, 郭智慧, 王湘峻. 不同耕作方法对土壤水温动态和春玉米产量的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2013, 18(2): 29-37
Yang X, Pang H C, Li Y B, Ren T Z, Dong G H, Guo Z H, Wang X J. Effect of different tillage treatments on soil water, temperature changes and spring corn yield in high yield region in North China Plain [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2013, 18(2): 29-37 (in Chinese)
- [23] 刘斌, 甘秀芹, 韦本辉, 周佳, 申章佑, 李艳英, 劳承英, 胡泊, 周灵芝, 吴延勇. 粉垄耕作对南方旱坡木薯种植地水土流失及产量的影响[J]. *西南农业学报*, 2016, 29(12): 2806-2811
Liu B, Gan X Q, Wei B H, Zhou J, Shen Z Y, Li Y Y, Lao C Y, Hu B, Zhou L Z, Wu Y Y. Effects of Fenlong cultivation on water and soil erosion and cassava yield in south dry slope cropland [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 29(12): 2806-2811 (in Chinese)
- [24] 韦本辉, 甘秀芹, 陈保善, 韦广波, 申章佑, 宁秀呈, 陆柳英, 何彰杰, 胡泊, 李艳英, 莫润秀, 吴延勇. 农耕新方法粉垄整地土壤速效养分研究[J]. *广东农业科学*, 2011, 38(17): 42-45
Wei B H, Gan X Q, Chen B S, Wei G P, Shen Z Y, Ning X C, Lu L Y, He Z J, Hu B, Li Y Y, Mo R X, Wu Y Y. Study on available nutrients of soil by a new method of farming which land preparation by Fenlong cultivation [J]. *Guangdong Agricultural Sciences*, 2011, 38(17): 42-45 (in Chinese)
- [25] 张敏, 粟戈璇, 彭曙光, 刘勇军, 周米良, 田峰, 张明发, 邓小华, 陈金. 粉垄深度对山地黄壤理化特性和烤烟养分利用效率的影响[J]. *作物研究*, 2021, 35(1): 55-60
Zhang M, Su G X, Peng S G, Liu Y J, Zhou M L, Tian F, Zhang M F, Deng X H, Chen J. Effects of Fenlong on physicochemical property of mountain yellow soil and nutrient utilization efficiency of flue-cured tobacco [J]. *Crop Research*, 2021, 35(1): 55-60 (in Chinese)
- [26] 丛日环, 李小坤, 鲁剑巍. 土壤钾素转化的影响因素及其研究进展[J]. *华中农业大学学报*, 2007, 26(6): 907-913
Cong R H, Li X K, Lu J W. Advances in research on influence factors of soil potassium transformation [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2007, 26(6): 907-913 (in Chinese)
- [27] 陈恩凤. 土壤酶与土壤肥力[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 54-61
Chen E F. *Soil Enzymes and Soil Fertility* [M]. Beijing: Science Press, 1979: 54-61 (in Chinese)
- [28] Xu C, Qian Z Z, Wang B, Yang T, Lin Z Y, Tian D, Ding C J, Tang L Z. Effects of poplar agroforestry systems on soil nutrient and enzyme activity in the coastal region of Eastern China [J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2023, 23(8): 3108-3123
- [29] 万忠梅, 宋长春. 小叶草湿地土壤酶活性分布特征及其与活性有机碳表征指标的关系[J]. *湿地科学*, 2008, 6(2): 249-257.
Wan Z M, Song C C. Vertical dynamics of soil enzyme activities and its relationship with active organic carbon indicators in *Calamagrostis angustifolia* wetland [J]. *Wetland Science*, 2008, 6(2): 249-257 (in Chinese)
- [30] 沈宏, 曹志洪, 徐本生. 玉米生长期间土壤微生物量与土壤酶变化及其相关性研究[J]. *应用生态学报*, 1999, 10(4): 471-474
Shen H, Cao Z H, Xu B S. Changes of soil microbial biomass and soil enzymes during maize growth and their correlation [J]. *Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(4): 471-474 (in Chinese)
- [31] 夏皖豫. 粉垄耕作下玉米地土壤微生物多样性和酶活性的研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2021
Xia W Y. Study on soil microbial diversity and enzyme activity in maize field under Fenlong cultivation [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2021 (in Chinese)
- [32] 冯彪, 青格尔, 高聚林, 于晓芳, 胡树平, 张鑫, 薛红飞, 刘瑞枝, 刘爱业. 不同耕作方式对土壤酶活性及微生物量和群落组成关系的影响[J]. *北方农业学报*, 2021, 49(3): 64-73
Feng B, Qing G E, Gao J L, Yu X F, Hu S P, Zhang X, Xue H F, Liu R Z, Liu A Y. Effects of different tillage methods on soil enzyme activity, microbial biomass and community composition [J]. *Journal of Northern Agriculture*, 2021, 49(3): 64-73 (in Chinese)
- [33] Wen L S, Peng Y, Zhou Y R, Cai G, Lin Y Y, Li B Y. Effects of conservation tillage on soil enzyme activities of global cultivated land: A meta-analysis [J]. *Journal of Environmental Management*, 2023, 345: 118904
- [34] 张昌顺, 范少辉, 谢高地. 闽北典型毛竹(*Phyllostachys edulis*)林土壤酶活性及其与土壤肥力的关系[J]. *自然资源学报*, 2010, 25(2): 236-248
Zhang C S, Fan S H, Xie G D. Research on soil enzyme activities and its relations with soil fertility under typical bamboo (*Phyllostachys edulis*) plantations in northern Fujian Province [J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(2): 236-248 (in Chinese)
- [35] 唐茂艳, 王强, 陈雷, 张晓丽, 张宗琼, 吕荣, 梁天锋. 水稻粉垄耕作生长及生理特性研究(英文)[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2016, 17(2): 334-337
Tang M Y, Wang Q, Chen L, Zhang X L, Zhang Z Q, Lv R, Liang T F. Research on the growth and physiological characteristics of rice Fenlong cultivation [J]. *Agricultural Science & Technology*, 2016, 17(2): 334-337 (in Chinese)
- [36] 李骁, 王迎春. 土壤微生物多样性与植物多样性[J]. *内蒙古大学学报: 自然科学版*, 2006, 37(6): 708-713
Li X, Wang Y C. The biodiversity of soil microbes and plants [J]. *Journal of Inner Mongolia University: Natural Science Edition*, 2006, 37(6): 708-713 (in Chinese)
- [37] 赵钧洋, 覃树涛, 常媛, 李帆, 卢干培, 蒋代华, 何冰. 粉垄耕作促进甘蔗根系生长、养分吸收及增产[J]. *热带作物学报*, 2022, 43(3): 529-538
Zhao J Y, Qin S T, Chang Y, Li F, Lu G P, Jiang D H, He B. Fenlong cultivation promotes sugarcane root growth, nutrient absorption and yield increase [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2022, 43(3): 529-538 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东



第一作者简介：杨佳鹤，硕士研究生，现就读于宁夏大学土木与水利工程学院水利工程专业。本科期间在宁夏大学多次获得学业三等奖学金，硕士期间获得二等学业奖学金。先后参加国家重点研发项目(2021YFD1900601-02-04)和国家自然科学基金项目(U2243601-02-04)。硕士期间作为第一作者在《节水灌溉》上发表参与“不同土壤水分对植物光合作用的影响研究进展”，参与发表高水平学术论文4篇。



通讯作者简介：何进宇，工学博士，宁夏大学土木与水利工程学院副教授，硕士生导师。美国加州州立大学访问学者，中国水利水电科学研究院/宁夏水利科学研究院联合博士后，入选“宁夏青年科技人才托举工程”。主要从事水利工程专业教学工作与农业水土资源高效利用方向科研工作；主持完成多项国家级、自治区级科学基金项目，在《农业工程学报》《干旱地区农业研究》《西北农业学报》等期刊发表学术论文20余篇，指导学生多次获得国家级、区级奖励。