

王峥宇, 廉宏利, 孙悦, 等. 秸秆还田深度对春玉米农田土壤有机碳、氮含量和土壤酶活性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2021, 38(4): 636–646.

WANG Zheng-yu, LIAN Hong-li, SUN Yue, et al. Effects of straw return depth on soil organic carbon, nitrogen content, and soil enzyme activity of spring maize field[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2021, 38(4): 636–646.



开放科学 OSID

秸秆还田深度对春玉米农田土壤有机碳、氮含量和土壤酶活性的影响

王峥宇, 廉宏利, 孙悦, 马梓淇, 田平, 齐华, 姜英*

(沈阳农业大学农学院, 沈阳 110866)

摘要:为研究秸秆还田旋耕深度对土壤理化性质和酶活性的影响,明确不同秸秆还田深度条件下土壤理化性质与酶活性的关系,在3年(2016—2018年)田间微区定位试验条件下,研究秸秆旋耕还田10 cm(S_1D_1)、20 cm(S_1D_2)、30 cm(S_1D_3)和秸秆移除旋耕10 cm(S_2D_1)、20 cm(S_2D_2)、30 cm(S_2D_3)6个处理对东北春玉米农田土壤理化性质和酶活性的影响。结果表明:旋耕深度(D)及其与秸秆处理(S)交互作用(S×D)显著影响土壤有机碳(SOC)含量,0~20 cm土层 S_1D_1 、 S_1D_2 处理SOC含量较 S_1D_3 处理高1.2%~16.0%,而20~40 cm土层 S_2D_3 处理SOC含量最高。旋耕深度、秸秆处理及两者交互作用对土壤硝态氮(NO_3^- -N)和铵态氮(NH_4^+ -N)含量、蔗糖酶和过氧化氢酶活性影响显著。在0~40 cm土层, D_1 、 D_2 旋耕深度下秸秆还田处理 NO_3^- -N含量比秸秆移除处理平均提高46.9%和34.9%, NH_4^+ -N含量平均降低31.6%和4.4%。在各旋耕深度下, S_1 处理0~20 cm土层蔗糖酶和脲酶活性高于 S_2 处理,20~30 cm土层过氧化氢酶活性低于 S_2 处理。相关性分析表明,SOC、土壤全氮(TN)与 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N含量和蔗糖酶活性呈显著正相关,与pH、土壤含水量(SWC)呈显著负相关。主成分分析表明,与 S_1D_1 相比, S_1D_2 对0~20 cm土层蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶活性和0~40 cm土层SOC、TN含量影响更明显。综上所述,秸秆旋耕还田20 cm可改善0~40 cm土层养分水平,提高土壤酶活性,推荐为东北春玉米产区农田土壤培肥的合理秸秆还田方式。

关键词:秸秆还田;旋耕;还田深度;土壤有机碳;土壤酶

中图分类号:S513;S141.4 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2021)04-0636-11 doi: 10.13254/j.jare.2020.0378

Effects of straw return depth on soil organic carbon, nitrogen content, and soil enzyme activity of spring maize field

WANG Zheng-yu, LIAN Hong-li, SUN Yue, MA Zi-qi, TIAN Ping, QI Hua, JIANG Ying*

(College of Agronomy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: This study aimed to determine the effect of straw return depth on soil physicochemical properties, enzyme activity, and the relationship between them under different straw return depths. A field micro-plots experiment was conducted for 3-year(2016—2018) in northeast China, and totally six treatments were set as following: straw incorporation with rotary tillage for 10 cm(S_1D_1), 20 cm(S_1D_2) and 30 cm(S_1D_3) of soil depth, and straw removal with rotary tillage in the same soil depth(S_2D_1 , S_2D_2 and S_2D_3), respectively. Individual and interaction effects on physical and chemical properties of soil and enzyme activity of spring maize field were determined in this study. Results indicated that the soil organic carbon(SOC) was significantly affected by rotary tillage depth(D) and its interaction with straw(S)

收稿日期:2020-07-16 录用日期:2020-08-31

作者简介:王峥宇(1997—),男,辽宁沈阳人,硕士研究生,主要从事耕作制度与农田生态研究。E-mail: wangzhengyu27@stu.syau.edu.cn

*通信作者:姜英 E-mail: jiangying@syau.edu.cn

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFD0300302, 2017YFD0300703);中国博士后科学基金(2019M661130);辽宁省科学技术计划项目(2019JH2/10200004)

Project supported: National Key R&D Program of China(2018YFD0300302, 2017YFD0300703); The China Postdoctoral Science Foundation(2019M661130); The Science and Technology Program in Liaoning Province of China(2019JH2/10200004)

treatment ($P < 0.05$). SOC contents under S_1D_1 and S_1D_2 were 1.2%~16.0%, respectively, higher than those under S_1D_3 treatment at 0~20 cm soil layer, and the highest SOC content at 20~40 cm soil layer was observed in S_2D_3 treatment. Soil nitrate (NO_3^- -N) and ammonium (NH_4^+ -N) contents and invertase and catalase activities were significantly influenced by straw and rotary tillage depth treatments and their interactions ($P < 0.05$). Across 0~40 cm soil layer, S_1 treatment increased soil NO_3^- -N contents under D_1 and D_2 conditions by an average of 46.9% and 34.9%, respectively, but lowered soil NH_4^+ -N contents by an average of 31.6% and 4.4%, respectively, compared with S_2 treatment. Among treatments of rotary tillage depth, S_1 treatment enhanced soil invertase and urease activities at 0~20 cm layer and decreased catalase activity at 20~30 cm layer, compared with S_2 treatment. Correlation analysis revealed that SOC, soil TN, NO_3^- -N and NH_4^+ -N content, and invertase activity were significantly positive correlated. Both SOC and TN were highly negatively correlated with soil pH and soil water content (SWC). Principal component analysis (PCA) suggested that SOC, TN content and enzymes activity were more obviously affected by S_1D_2 treatment in 0~40 cm and 0~20 cm soil layer, respectively, compared with S_1D_1 treatment. Overall, soil nutrients level and enzymes activity at 0~40 cm layer were improved by S_1D_2 treatment, and might be considered as a suitable straw incorporation method for improving soil fertility in maize field within the study area.

Keywords: straw incorporation; rotary tillage; straw return depth; soil organic carbon; soil enzyme

中国作为农业生产大国,每年约产生10.4亿t农作物秸秆,具有丰富的秸秆资源^[1]。受传统耕作形式及农民生产习惯影响,大量的作物秸秆被露天堆弃或焚烧,造成严重的资源浪费及土壤肥力降低、空气污染等一系列环境问题,使农田生态系统遭受破坏,对农业生态环境造成严重影响^[2]。作物秸秆含有大量的有机碳及氮、磷、钾等大量和微量营养元素,是可被直接利用的可再生纤维素资源^[3]。因此,秸秆还田作为一种直接有效的利用方式成为国内外倡导的保护性耕作措施之一^[4]。

秸秆还田可以改良土壤物理结构,丰富土壤微生物种类,对土壤理化性质具有重要影响^[5]。大量研究表明,农田土壤碳氮水平是表征土壤养分状况的重要指标,受到秸秆还田等多种农艺措施的影响。土壤微生物代谢及动植物活动是土壤酶的主要来源,土壤酶活性受不同农田管理措施影响,其高低程度与土壤养分水平之间存在密切联系,可作为生物学指标来反映土壤质量水平^[6-7]。伏星舟等^[8]认为,土壤酶活性与土壤有机碳、全氮、矿质氮等理化指标显著相关,且土壤酶较土壤化学指标对土壤质量变化的响应更敏感^[9]。秸秆还田对土壤质量的影响可以通过土壤酶活性的变化来反映,但以往关于土壤有机碳、土壤全氮含量及土壤酶活性对秸秆还田响应的研究结果存在差异。张莉等^[10]的研究表明,秸秆还田可有效提高土壤有机碳含量,且在还田当年,秸秆颗粒还田较常规粉碎还田可分别提高0~20 cm和20~40 cm土层土壤有机碳含量6.59%和17.36%。胡乃娟等^[11]的研究表明,短期条件下旋耕秸秆浅层还田使土壤有机碳含量增加2.1%~6.9%,且提高了土壤蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶

活性。于寒等^[12]在东北长期玉米连作区的研究表明,秸秆深埋还田(15 cm)可有效改善土壤微生物结构,提高土壤脲酶活性。汪军等^[13]的研究发现,旋耕秸秆浅层还田条件下,由于秸秆含氮量较少,主要以有机态存在,对土壤全氮没有产生明显影响。秸秆还田下土壤理化性质及酶活性的变化受还田深度的影响,孙凯等^[14]和矫丽娜等^[15]的研究指出,玉米秸秆深层还田显著增加了成熟期土壤有机碳、全氮含量,提高了土壤蔗糖酶、脲酶活性。大量研究表明,旋耕、翻埋等传统秸秆还田方式通过影响土壤理化性质及酶活性来发挥其改良土壤的作用。然而当前研究过多关注秸秆还田对耕层土壤质量的影响,对于秸秆还田深度与20 cm以下土层土壤理化性质及酶活性间的相关关系仍不明晰,因此亟需深入研究。

本研究以秸秆不还田处理为对照,通过在东北春玉米产区设置连续3年(2016—2018年)的田间微区定位试验来研究秸秆还田旋耕深度对土壤理化性质和酶活性的影响,进一步明确不同秸秆还田深度条件下土壤理化性质与酶活性的关系,旨在为东北春玉米产区秸秆资源利用和农田土壤肥力提升提供理论基础和技术实践。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验在沈阳农业大学田间试验基地(41°82'N, 123°56'E)进行,该地区属温带半湿润大陆性气候,全年无霜期155~180 d,降雨主要集中在7月和8月,年均降雨量522.2 mm。供试土壤为棕壤土,试验始于2016年,耕层土壤(0~20 cm)基础理化性质为:pH

5.77, 有机碳 $9.79 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮 $1.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 碱解氮 $66 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 有效磷 $50.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $130 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验在田间微区内采用二因素随机区组设计, 设置秸秆处理(S)为主因素, 分为秸秆还田(S_1)和秸秆移除(S_2)2个水平; 旋耕深度(D)为副因素, 分为10 cm(D_1)、20 cm(D_2)和30 cm(D_3)3个水平, 共计6个处理, 重复3次。种植密度以 $67\ 500 \text{ 株} \cdot \text{hm}^{-2}$ 为基准, 按60 cm行距、25 cm株距在每个微区(1.8 m^2 , 长1.5 m×宽1.2 m)种植12株玉米(郑单958)。2016—2018年玉米收获后, 将秸秆切割成2~5 cm小段, 采用模拟旋耕方式还田, 即分别人工挖取10 cm(S_1D_1)、20 cm(S_1D_2)、30 cm(S_1D_3)土层的土壤, 与秸秆搅拌均匀后回填压实; 秸秆移除处理, 即分别人工挖取相应土层土壤10 cm(S_2D_1)、20 cm(S_2D_2)、30 cm(S_2D_3), 搅拌均匀后回填压实。基肥为 $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \text{ N}$, $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \text{ P}_2\text{O}_5$ 和 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \text{ K}_2\text{O}$, 在播种时一次性施入, 追肥为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \text{ N}$, 在拔节期施入。基肥与追肥均采用铁制播种器人工施入, 将称量好的肥料施于两株之间, 深度为5 cm。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 样品采集

于2018年10月玉米成熟期采用三点取样法, 在每个微区内随机选取3个样点, 用内直径为5 cm的土钻, 以10 cm为增量分别钻取0~40 cm各土层土样。除去肉眼可见的根系残茬和石砾后, 将各微区内3个样点同一土层土样混合均匀。一部分用于测定土壤水分含量; 一部分过2 mm筛后在4℃条件下贮存, 用于土壤酶活性测定; 剩余部分自然风干后过0.15 mm筛, 用于土壤全量养分含量测定。

1.3.2 土壤理化性质测定方法

土壤pH值测定采用电位法, 在按土:水=1:2.5(m/V)的浸提液中用PHSJ-3F数字pH计测定; 土壤含水量(SWC)采用烘干法测定, 土壤含水量=(湿土质量-烘干土质量)/干土质量×100%^[16]。土壤有机碳(SOC)和全氮(TN)使用元素分析仪(EA3000, 意大利)测定, 在pH呈弱酸性条件下, SOC含量与土壤中全碳含量近似相等^[17]。鲜土样经 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ KCl}$ 浸提1 h后使用全自动间断化学分析仪(Smartchem200, 法国)测定土壤硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)和铵态氮($\text{NH}_4\text{-N}$)含量。

1.3.3 土壤酶活性测定方法

采用3,5-二硝基水杨酸比色法测定蔗糖酶活

性, 并以24 h后1 g土壤中生成葡萄糖的毫克数表示酶活性^[18]; 脲酶和过氧化氢酶采用上海邦奕生物科技有限公司的ELISA试剂盒测定^[19]。脲酶以24 h后1 g土壤中消耗铵态氮的毫克数表示酶活性; 过氧化氢酶以24 h后1 g土壤中被催化降解的过氧化氢的微摩尔数表示酶活性, 单位均为 $\text{U} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

1.4 数据分析

试验数据经Excel 2010进行录入整理, 并通过SPSS 24软件进行统计分析。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)对秸秆处理、旋耕深度及二者间交互作用对土壤理化性质和酶活性的影响进行探讨, 并用最小显著性差异法(LSD)对各处理间差异进行多重比较($\alpha=0.05$)。用Pearson法获得土壤理化性质与酶活性间相关系数, 并针对处理因素对理化性质及酶活性的影响进行主成分分析(PCA)。PCA图利用Canoco 4.5软件进行绘制。使用Origin 2017软件作图。表格中数据为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 秸秆处理与旋耕深度对土壤有机碳和全氮含量的影响

方差分析结果(表1)表明, 旋耕深度(D)及其与秸秆处理(S)的交互作用(S×D)显著影响SOC含量。从表2可知, 与秸秆移除(S_2)相比, S_1D_1 和 S_1D_2 处理显著增加了0~10 cm和10~20 cm土层SOC含量, 分别增加14.3%~17.3%和26.5%~27.4%; 在20~30 cm土层, S_1D_1 处理SOC含量较 S_2D_1 处理显著提高; 在30~40 cm土层, S_1D_2 处理SOC含量较 S_2D_2 处理增加了20.7%, 而 S_1D_1 、 S_1D_3 处理土壤SOC含量分别较秸秆不还田的 S_2D_1 、 S_2D_3 处理减少了15.7%、24.8%。秸秆还田处理间比较后发现, 在0~10 cm土层, S_1D_1 和 S_1D_2 处理SOC含量较 S_1D_3 处理分别显著提高了19.5%和14.3%; 在10~20 cm和20~30 cm土层差异不显著; 在30~40 cm土层, S_1D_2 处理SOC含量最高。

两因素的交互作用显著影响土壤TN含量(表1)。由表2可知, 在0~10 cm土层, 秸秆还田处理土壤TN含量较 S_2D_3 处理显著提高; 在20~30 cm土层 S_1D_1 和 S_2D_1 处理土壤TN含量较其他处理显著降低; 在30~40 cm土层, S_1D_2 显著提高土壤TN含量。秸秆还田处理间比较后发现, 在0~10 cm和10~20 cm土层TN含量差异不显著; 在20~30 cm土层, S_1D_2 和 S_1D_3 处理土壤TN含量较 S_1D_1 处理分别显著提高了11.6%和14.7%; 在30~40 cm土层, S_1D_2 处理土壤TN含量较其他还田处理显

表1 秸秆处理和旋耕深度对土壤理化性质和酶活性影响的方差分析(F)Table 1 Variance analysis of straw treatment and rotary-till depth on soil physicochemical properties and enzymes activity (F)

处理 Treatments	有机碳 SOC	全氮 TN	硝态氮 NO_3^--N	铵态氮 NH_4^+-N	含水量 SWC	pH	蔗糖酶 Invertase	脲酶 Urease	过氧化氢酶 Catalase
S	1.36ns	1.25ns	40.77***	38.23***	0.09ns	408.09***	3 441.23***	7.33*	50.63***
D	35.65***	2.27ns	201.52***	45.70***	4.31*	44.01***	386.39***	0.73ns	45.33***
S×D	27.69***	8.76**	272.31***	52.58***	4.09*	3.80ns	1 430.23***	9.03**	7.28**

注:S:秸秆处理;D:旋耕深度;* $P<0.05$; ** $P<0.01$; *** $P<0.001$; ns:不显著。下同。

Note:S:Straw treatment;D:Rotary-till depth;* $P<0.05$; ** $P<0.01$; *** $P<0.001$; ns:No significant effects. The same below.

表2 秸秆处理和旋耕深度对土壤有机碳和全氮含量的影响($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 2 Effects of straw treatment and rotary-till depth on soil organic carbon and total nitrogen content ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)

指标 Index	处理 Treatments	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	30~40 cm
有机碳 Organic carbon	S ₁ D ₁	14.96±0.88a	12.78±0.41a	11.66±0.98b	8.92±0.37c
	S ₁ D ₂	14.31±0.77ab	12.89±0.53a	12.27±0.75ab	10.34±0.62b
	S ₁ D ₃	12.52±0.05c	12.82±0.52a	12.61±0.29ab	9.26±0.94bc
	S ₂ D ₁	13.09±0.47bc	10.03±0.63b	10.07±0.40c	10.58±0.96b
	S ₂ D ₂	12.20±0.82c	10.19±1.00b	12.30±0.43ab	8.57±0.49c
	S ₂ D ₃	11.75±0.99c	12.37±0.68a	13.39±0.65a	12.31±0.85a
全氮 Total nitrogen	S ₁ D ₁	1.39±0.04ab	1.07±0.02a	0.95±0.06b	0.90±0.06bc
	S ₁ D ₂	1.35±0.05b	1.15±0.06a	1.06±0.06a	1.08±0.08a
	S ₁ D ₃	1.39±0.05ab	1.15±0.05a	1.09±0.02a	0.87±0.06c
	S ₂ D ₁	1.46±0.03a	1.07±0.03a	0.91±0.03b	1.01±0.06ab
	S ₂ D ₂	1.35±0.09b	1.18±0.09a	1.05±0.07a	0.91±0.07bc
	S ₂ D ₃	1.19±0.11c	1.13±0.04a	1.07±0.06a	0.89±0.05bc

注:S₁:秸秆还田;S₂:秸秆移除;D₁、D₂、D₃:旋耕深度10、20、30 cm;同列不同字母表示同一土层处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note:S₁:Straw incorporation;S₂:Straw removal;D₁、D₂、D₃:Rotary-till depth at 10, 20 and 30 cm soil depth respectively; Different letters in the same row indicate significant differences among treatments at the same soil depth ($P<0.05$). The same below.

著提高。

2.2 秸秆处理与旋耕深度对土壤硝态氮和铵态氮含量的影响

土壤 NO_3^--N 含量和 NH_4^+-N 含量受秸秆处理、旋耕深度及二者之间的交互作用影响达极显著水平($P<0.001$,表1)。由表3可以看出,秸秆还田处理0~40 cm 土层土壤 NO_3^--N 含量较 S₂D₁ 和 S₂D₂ 处理显著提高,增幅分别为 19.8%~104.1% 和 23.7%~48.0%,与 S₂D₃ 处理相比,S₁D₃ 在 20~30 cm 土层显著增加,而在其他土层显著降低。秸秆还田处理间比较结果显示,S₁D₂ 处理 NO_3^--N 含量在 0~10 cm 土层最低,在 10~20 cm 和 30~40 cm 土层高于其他还田处理,在 20~30 cm 土层显著高于 S₁D₁ 处理。

此外,与 S₂ 处理相比,在 0~10 cm 土层,S₁D₁ 处理土壤 NH_4^+-N 含量显著降低,且 S₂D₁ 土壤 NH_4^+-N 含量最高;在 10~20 cm 土层处理间趋势与 0~10 cm 土层相似;在 20~30 cm 土层,秸秆还田显著降低了土壤

NH_4^+-N 含量;而在 30~40 cm 土层,S₁D₁ 处理土壤 NH_4^+-N 含量最高。秸秆还田处理间比较结果显示,在 0~20 cm 土层,S₁D₁ 处理显著降低了土壤 NH_4^+-N 含量;在 20~30 cm 土层差异不显著;而 30~40 cm 土层,S₁D₂ 与 S₁D₃ 处理显著低于 S₁D₁ 处理。

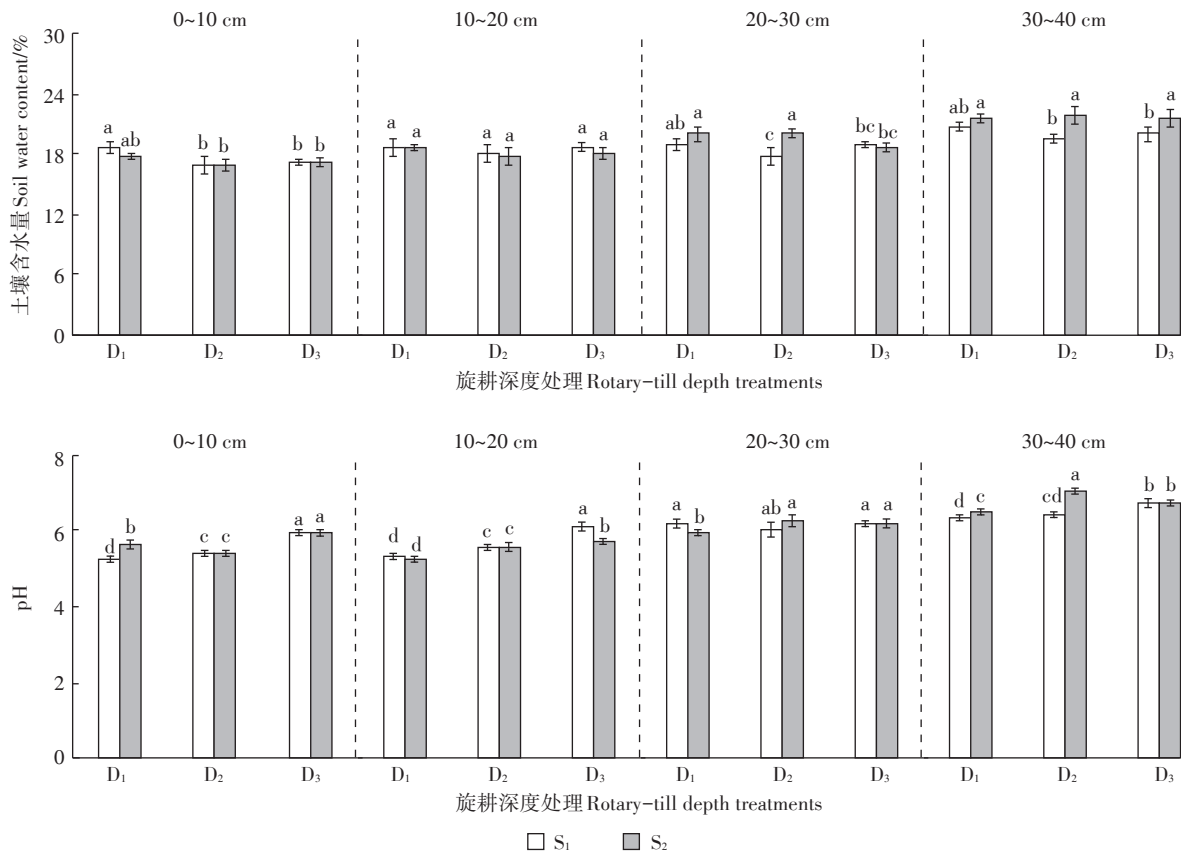
2.3 秸秆处理与旋耕深度对土壤含水量和 pH 的影响

旋耕深度及其与秸秆处理的交互作用显著影响 SWC($P<0.05$),秸秆处理与旋耕深度均对土壤 pH 影响极显著($P<0.001$,表1)。由图1可知,与 S₂ 处理相比,0~10 cm 土层 S₁D₁ 处理 SWC 显著高于其他旋耕深度的处理;20~30 cm 土层 S₁D₂ 处理 SWC 显著降低;在 30~40 cm 土层,S₁D₂ 和 S₂D₃ 处理的 SWC 显著降低。秸秆还田处理间比较后发现,0~10 cm 土层 S₁D₁ 处理 SWC 最高,20~30 cm 土层 S₁D₂ 处理最低,其他两个土层处理间差异不显著。

此外,两处理因素对不同土层 pH 影响显著。在 0~10 cm 土层,S₁D₁ 处理土壤 pH 最低,D₃ 处理下土壤

表3 秸秆处理和旋耕深度对土壤硝态氮和铵态氮含量的影响($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 3 Effects of straw treatment and rotary-till depth on soil nitrate and ammonium contents($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

指标 Index	处理 Treatments	0~10 cm	10~20 cm	20~30 cm	30~40 cm
硝态氮 Nitrate nitrogen	S ₁ D ₁	17.51±0.78a	11.34±0.43bc	8.57±0.41b	8.65±0.08c
	S ₁ D ₂	12.02±0.14c	11.72±0.67b	10.66±0.43a	10.75±0.42b
	S ₁ D ₃	14.98±0.86b	10.66±0.53c	10.85±0.59a	8.58±0.27c
	S ₂ D ₁	8.58±0.19d	8.77±0.25d	6.79±0.38c	7.22±0.40d
	S ₂ D ₂	8.12±0.05d	9.22±0.20d	8.62±0.80b	7.50±0.05d
	S ₂ D ₃	17.31±0.84a	16.02±0.65a	8.16±0.13b	11.87±0.47a
铵态氮 Ammonium nitrogen	S ₁ D ₁	5.67±0.30c	2.54±0.10d	2.98±0.39b	4.90±0.23a
	S ₁ D ₂	9.70±0.15ab	4.46±0.51bc	2.43±0.12b	3.29±0.34c
	S ₁ D ₃	9.09±0.34b	4.71±0.37bc	2.80±0.29b	3.21±0.25c
	S ₂ D ₁	9.94±0.40a	5.76±0.80a	3.95±0.40a	3.88±0.29b
	S ₂ D ₂	9.66±0.39ab	4.18±0.21c	3.74±0.44a	3.22±0.27c
	S ₂ D ₃	9.09±0.47b	4.92±0.53ab	3.82±0.17a	3.76±0.10b



同一土层不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同

Different letters in the same soil layer indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below

图1 秸秆处理和旋耕深度对土壤含水量和pH值的影响

Figure 1 Effects of straw treatment and rotary-till depth on soil water content and pH

pH最高;在10~20 cm土层,S₁D₃处理土壤pH最高,并表现出随旋耕深度增加而增大趋势;在20~30 cm土层,S₂D₁处理土壤pH最低;在30~40 cm土层,S₂D₂处

理土壤pH显著高于其他处理,S₁D₁处理土壤pH最低。秸秆还田处理间比较,S₁D₃较其他处理显著提高了0~10、10~20和30~40 cm土层的土壤pH,且土壤

pH随还田深度增加呈现增大趋势。

2.4 秸秆处理与旋耕深度对土壤酶活性的影响

土壤蔗糖酶和过氧化氢酶活性受秸秆处理、旋耕深度及二者交互作用影响显著,而土壤脲酶活性受秸秆处理及其与旋耕深度的交互作用影响显著(表1)。从图2可知,与 S_2 处理相比, S_1 处理0~10 cm和10~20 cm土层蔗糖酶活性显著提高,增幅分别为6.7%~123.0%和18.1%~29.4%;在20~30 cm和30~40 cm土层, D_3 处理下 S_1 显著提高蔗糖酶活性,增幅分别为8.6%、53.4%。秸秆还田处理间比较结果显示,在0~10 cm土层 S_1D_2 处理蔗糖酶活性最低,而在10~20、

20~30 cm和30~40 cm土层,土壤蔗糖酶活性均随旋耕深度的增加而显著提高。

秸秆处理和旋耕深度显著影响0~40 cm各土层土壤脲酶活性。与 S_2 处理相比, S_1 处理在各旋耕深度下均显著提高了0~10 cm土层脲酶活性,增幅为31.4%~31.6%;在10~20 cm土层, S_1 处理在 D_1 和 D_3 旋耕深度下显著提高脲酶活性;而在20~30 cm和30~40 cm土层分别在 D_3 和 D_2 、 D_3 旋耕深度下显著提高土壤脲酶活性。秸秆还田处理间比较后发现, S_1D_1 和 S_1D_3 处理10~20 cm土层土壤脲酶活性较 S_1D_2 处理显著增加,增幅分别为14.1%和19.2%(图2)。

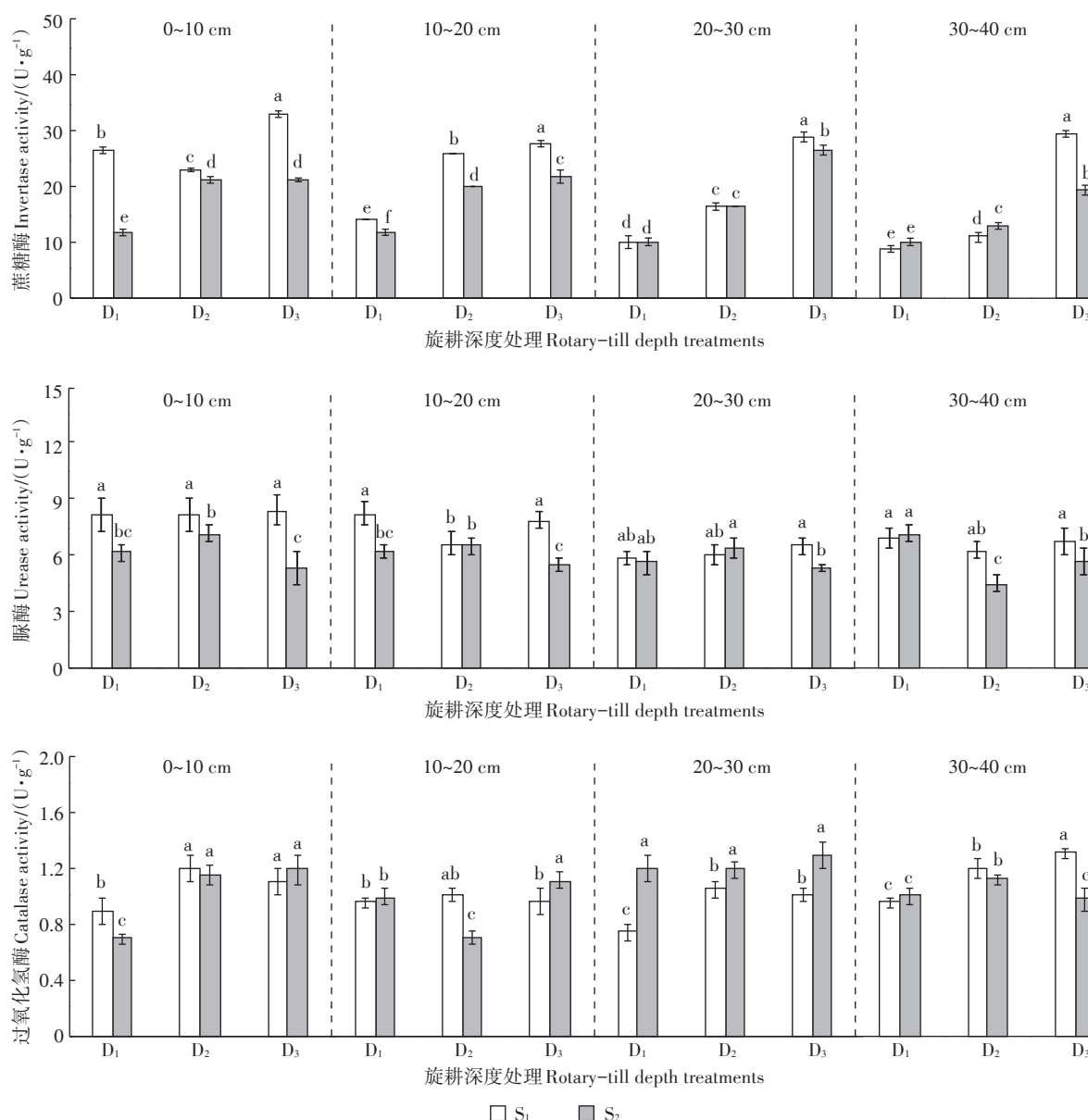


图2 秸秆处理和旋耕深度对土壤酶活性的影响

Figure 2 Effects of straw treatment and rotary-till depth on soil enzymes activity

此外,秸秆处理与旋耕深度对各土层过氧化氢酶活性影响显著。由图2可知,与 S_2 处理相比,0~10 cm 土层 S_1D_1 处理土壤过氧化氢酶活性显著提高;在10~20 cm 土层, S_1D_2 与 S_1D_3 处理表现出相反的趋势;在20~30 cm 土层, S_1 处理显著降低了土壤过氧化氢酶活性;而在30~40 cm 土层,仅 S_1D_3 处理显著提高过氧化氢酶活性。秸秆还田处理间比较结果表明, S_1D_2 和 S_1D_3 处理除10~20 cm 土层外其他土层过氧化氢酶活性均较 S_1D_1 处理显著提高,且在30~40 cm 土层,随旋耕深度增加而显著提高。

2.5 土壤理化性质与酶活性的相关性分析

由表4可知,SOC、TN、 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 含量之间呈极显著正相关($P<0.01$),而其与SWC呈极显著负相关($P<0.01$)。SOC、TN 含量与土壤pH呈极显著负

相关($P<0.01$),而SWC与pH呈极显著正相关($P<0.01$)。土壤蔗糖酶活性与SOC、TN和 NO_3^- -N 含量呈极显著正相关($P<0.01$),与土壤 NH_4^+ -N 含量呈显著正相关($P<0.05$),但与SWC呈极显著负相关($P<0.01$);土壤脲酶活性与SOC 含量呈显著负相关($P<0.05$);土壤过氧化氢酶活性与土壤pH和蔗糖酶活性呈显著正相关($P<0.05$)。

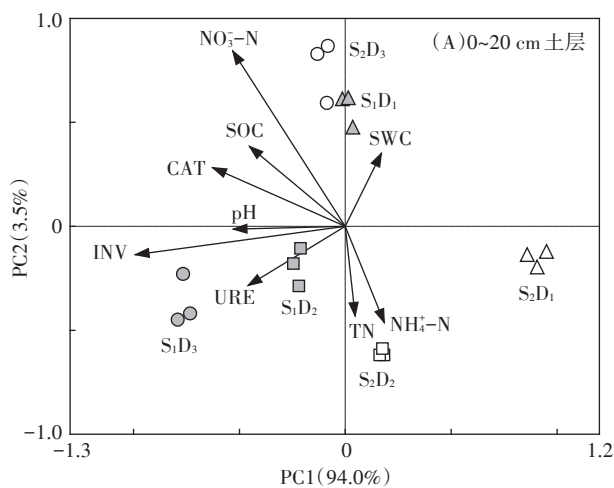
2.6 土壤理化性质和酶活性的主成分分析

图3为秸秆处理和旋耕深度对土壤理化性质和酶活性的主成分分析。在0~20 cm 土层(图A),PC1和PC2 分别解释了变量的94.0%和3.5%。 S_1D_2 和 S_1D_3 分布在第3象限,与 S_2D_2 和 S_2D_3 明显分开,表明该两组处理对土壤理化指标和酶活性影响差异明显;而 S_1D_1 和 S_2D_3 分布较为接近,说明它们的影响差异相似。

表4 土壤酶活性与土壤理化性质间相关系数

Table 4 Correlation coefficients between soil enzymes activity and soil physicochemical properties

项目 Items	全氮 TN	硝态氮 NO_3^- -N	铵态氮 NH_4^+ -N	含水量 SWC	pH	蔗糖酶 Invertase	脲酶 Urease	过氧化氢酶 Catalase
有机碳SOC	0.665**	0.505**	0.336**	-0.473**	-0.381**	0.479**	-0.265*	-0.109
全氮TN		0.462**	0.718**	-0.657**	-0.363**	0.405**	-0.100	-0.155
硝态氮 NO_3^- -N			0.439**	-0.396**	-0.143	0.514**	0.128	0.025
铵态氮 NH_4^+ -N				-0.559**	-0.157	0.262*	-0.091	0.033
含水量SWC					0.479**	-0.441**	0.173	0.033
pH						-0.020	0.026	0.285*
蔗糖酶Invertase							-0.093	0.261*
脲酶Urease								0.006



INV:蔗糖酶;URE:脲酶;CAT:过氧化氢酶
INV: Invertase; URE: Urease; CAT: Catalase

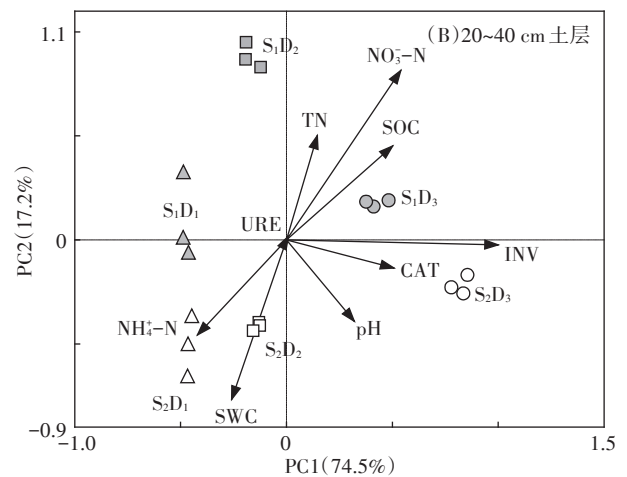


图3 秸秆处理和旋耕深度对土壤理化性质和酶活性变化的主成分分析

Figure 3 Principal component analysis of variations in soil physicochemical properties and enzymes activity under straw treatments and rotary-till depth

在20~40 cm土层(图B),PC1和PC2解释了91.7%的秸秆处理和旋耕深度对土壤理化性质和酶活性的变化,并分别解释了变量的74.5%和17.2%。秸秆还田处理S₁D₁、S₁D₂和S₁D₃均分布在第1、2象限,而秸秆移除处理S₂D₁、S₂D₂和S₂D₃均分布在第3、4象限,说明在该土层土壤理化指标和酶活性对秸秆处理的响应明显,并且SOC、TN、NO₃-N、蔗糖酶、过氧化氢酶和pH等指标分布与S₂D₃和S₁D₃处理一致,说明秸秆处理和旋耕深度对上述指标的影响明显。

3 讨论

土壤有机质是表征土壤质量和肥力的重要指标,作物秸秆中含有木质素、糖、蛋白质和丰富的纤维素、半纤维素,是土壤有机质的重要来源。秸秆作为有机底物归还土壤能引起“激发效应”,刺激微生物分泌参与秸秆腐解的胞外酶,进而将部分秸秆分解为可利用的有机碳,随着微生物的凋亡,微生物碳和难分解的秸秆碳形成了碳库的“新碳”部分^[20]。因此,秸秆还田有利于提高土壤有机质,改善土壤质量和培肥地力^[21~23]。土壤有机碳、氮在土壤中的垂直分布情况受秸秆还田深度影响显著,隋鹏祥等^[24]的研究发现秸秆还田配合保护性耕作会使土壤有机质出现“表聚”现象,孙凯等^[14]的研究发现在秸秆还田条件下深层土壤有机质呈现下降趋势。本研究结果表明,与秸秆不还田处理相比,秸秆旋耕还田10 cm和20 cm处理均显著提高了0~20 cm土层土壤有机碳含量,而秸秆旋耕还田30 cm处理显著降低了深层(20~40 cm)土壤有机碳含量。可能原因是秸秆浅层旋耕还田将秸秆与0~20 cm土层土壤充分混合,促进了以作物残茬为核心的土壤大团聚体的形成,从而使土壤对有机碳的固持作用增强。而秸秆深层(30 cm)还田使秸秆分布在0~30 cm土层,表层土壤秸秆量相对较少,使土壤有机碳的增幅没有达到显著水平^[25]。秸秆深层还田还会增加底层土壤微生物活性,加速土壤有机碳矿化,降低深层土壤有机碳含量^[24,26]。值得关注的是,本研究中S₂D₃处理下20~40 cm土层SOC含量最高,这极有可能是因为土壤经过剧烈的旋耕扰动后,破坏了相应土层的团聚体结构,使土壤碳失去了物理保护,从而使黏粒碳沉降到相应的耕作深度^[27]。

土壤硝态氮和铵态氮是可被作物吸收利用的主要氮素形式,除去各种形式的氮肥投入,还田秸秆所释放的氮素成为评价土壤供氮能力的影响因素之一^[21]。有研究显示,耕层土壤矿质氮含量受秸秆还田

年限和秸秆还田量影响显著,且二者间呈现出显著的正相关关系^[28~29];然而也有部分研究表明,土壤矿质氮含量受秸秆还田效应影响而显著降低^[13],且土壤硝态氮含量的降幅随秸秆还田深度的增加而增大^[30]。本研究结果表明,秸秆旋耕还田10 cm和20 cm处理显著提高了0~40 cm土层土壤硝态氮含量,却降低了相应土层土壤铵态氮含量。这很有可能是因为在浅层秸秆还田条件下,表层土壤通气性得到改善,增强了硝化作用相关微生物活性,提高了铵态氮转化速率,从而增加了硝态氮积累量,因此使土壤硝态氮和铵态氮含量呈现出相反的趋势^[30~32]。秸秆还田30 cm处理显著降低了除20~30 cm外其他土层土壤的硝态氮含量,说明随着扰动土层深度的增加,一方面,可能加剧了深层土壤硝态氮的淋溶风险;另一方面,改善了深层土壤通气性,促进作物根系对深层土壤硝态氮的利用^[31~33]。同时,秸秆移除条件下,深层土壤铵态氮含量反而高于秸秆还田处理。一方面,在氮素转化上,本研究施入的是铵态类氮肥,秸秆还田后增加了氨氧化过程微生物活性,进而促进铵态氮转化为硝态氮;另一方面,在氮素吸收上,秸秆还田处理下的植株普遍优于秸秆移除处理,其根系活力更强,根系分布较深,能充分利用深层氮素资源^[26,31~32],这两方面原因造成了秸秆移除处理深层土壤铵态氮含量高于秸秆还田处理的结果。

土壤酶活性可用于指示土壤质量的变化,能迅速响应耕作、秸秆还田等管理措施对土壤质量的影响^[3,34]。土壤蔗糖酶可促进蔗糖分子水解为供植物和微生物吸收利用的低分子量的葡萄糖和果糖,是表征土壤有机碳积累与转化的重要指标^[35]。土壤脲酶能够水解尿素,释放被植物吸收利用的氮源氨,是参与土壤氮循环的重要酶^[35]。过氧化氢酶可以将植物新陈代谢过程中产生的过氧化氢分解为水和氧气,降低其对生物体的毒害^[35]。以往的研究表明,秸秆还田后可使土壤蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶活性得到有效提高,但不同秸秆还田方式和土壤深度间土壤酶活性差异较大^[3,34]。本研究发现,秸秆还田处理显著增强了0~20 cm土层土壤蔗糖酶和脲酶活性,而且秸秆深层(30 cm)还田促进了底层土壤蔗糖酶和脲酶活性的提高。土壤表层酶活性增强主要是由于投入的有机物料(作物秸秆)在良好的土壤通气条件下分解,释放供土壤微生物活动所需的碳源及氮源,促进与土壤碳氮循环相关的土壤酶的分泌,从而加快土壤中碳氮周转^[11,36]。同时增加旋耕深度可使玉米秸秆与深层土

壤混合,秸秆所释放的可利用氮素作为氮源供给底层土壤微生物进行生命活动,刺激其分泌相关土壤酶,从而促进土壤有机质的矿化^[24,26]。本研究还发现,秸秆浅层旋耕(10 cm和20 cm)还田促进了表层土壤过氧化氢酶活性的增加,而深层还田则促进了底层土壤过氧化氢酶活性的提高。秸秆浅层还田下,0~20 cm土层秸秆、作物根系和土壤微生物间竞争激烈,根系产生的毒害物质促进了土壤过氧化氢酶活性的提高,而秸秆深层还田促进了根系下扎,根系对土壤环境的影响范围增大,秸秆、根系和土壤微生物在土壤中相互作用的垂向尺度加深,导致根系产生的毒害物质空间分布扩大,从而促进了底层土壤过氧化氢酶活性的提高^[33]。

此外,土壤酶活性与土壤养分密切相关。本研究发现,土壤蔗糖酶活性与土壤有机碳、全氮、硝态氮和铵态氮含量呈显著正相关,与土壤含水量呈显著负相关,该结果与伏星舟等^[8]的研究结果一致。说明适宜的土壤养分含量促进土壤微生物活性,进而提高了相应的蔗糖酶活性。而土壤含水量增加可能引起土壤温度和含氧水平的降低,从而抑制微生物活性,导致蔗糖酶活性降低^[37-38]。土壤脲酶活性与土壤有机碳含量呈显著负相关,说明土壤有机碳水平与土壤氮素转化关系密切。土壤脲酶活性提高表明微生物活动加剧,而微生物活动加剧往往需要更多的易利用碳源,当土壤与秸秆中原有易利用碳源不足以满足其生长发育时,微生物将挖掘土壤有机碳库,从而加速土壤有机碳的利用,发生土壤有机质矿化作用^[20]。

4 结论

(1)在0~20 cm土层,秸秆旋耕还田10 cm和20 cm处理增加了土壤有机碳、硝态氮含量和土壤酶活性。

(2)在20~40 cm土层,秸秆旋耕还田20 cm和30 cm处理提高了土壤有机碳、全氮、硝态氮含量和土壤酶活性。

(3)综合考虑土壤养分和酶活性对秸秆还田处理的响应,秸秆旋耕还田20 cm能有效提高各土层土壤有机碳、全氮、硝态氮含量和酶活性,是东北春玉米主产区较适宜的还田方式。

参考文献:

[1] 石祖梁,贾涛,王亚静,等.我国农作物秸秆综合利用现状及焚烧碳排放估算[J].中国农业资源与区划,2017,38(9):32-37. SHI Zu-

liang, JIA Tao, WANG Ya-jing, et al. Comprehensive utilization status of crop straw and estimation of carbon from burning in China[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2017, 38(9):32-37.

[2] 高青海,贾双双,郭远远.秸秆集中深还田对设施连作土壤微生物区系和甜瓜根系生长的影响[J].生态学杂志,2016,35(6):1447-1452. GAO Qing-hai, JIA Shuang-shuang, GUO Yuan-yuan. Effect of deeply and concentrated straw returning on soil microbial community and melon root growth in continuously cropped greenhouse soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(6):1447-1452.

[3] 杨滨娟,黄国勤,钱海燕.秸秆还田配施化肥对土壤温度、根际微生物及酶活性的影响[J].土壤学报,2014,51(1):150-157. YANG Bin-juan, HUANG Guo-qin, QIAN Hai-yan. Effects of straw incorporation plus chemical fertilizer on soil temperature, root micro-organisms and enzyme activities[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(1):150-157.

[4] 赵亚丽,郭海斌,薛志伟,等.耕作方式与秸秆还田对土壤微生物数量、酶活性及作物产量的影响[J].应用生态学报,2015,26(6):1785-1792. ZHAO Ya-li, GUO Hai-bin, XUE Zhi-wei, et al. Effects of tillage and straw returning on microorganism quantity, enzyme activities in soils and grain yield[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(6):1785-1792.

[5] 裴雪霞,党建友,张定一,等.不同耕作方式对石灰性褐土磷脂脂肪酸及酶活性的影响[J].应用生态学报,2014,25(8):2275-2280. PEI Xue-xia, DANG Jian-you, ZHANG Ding-yi, et al. Effects of different tillage methods on phospholipid fatty acids and enzyme activities in calcareous cinnamon soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(8):2275-2280.

[6] 张鹏鹏,濮晓珍,张旺锋.干旱区绿洲农田不同种植模式和秸秆管理下土壤质量评价[J].应用生态学报,2018,29(3):839-849. ZHANG Peng-peng, PU Xiao-zhen, ZHANG Wang-feng. Soil quality assessment under different cropping system and straw management in farmland of arid oasis region[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(3):839-849.

[7] 王静,呼丽萍,李昶,等.种植年限对樱桃园土壤养分和酶活性的影响[J].水土保持通报,2013,33(4):155-158. WANG Jing, HU Li-ping, LI Chang, et al. Effects of planting period on soil nutrient and soil enzyme activities in cherry orchards[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(4):155-158.

[8] 伏星舟,王立,杨彩红,等.不同耕作方式对绿洲区夏玉米农田土壤呼吸及酶活性的影响[J].水土保持通报,2018,38(5):103-108. FU Xing-zhou, WANG Li, YANG Cai-hong, et al. Effects of different cultivation on soil respiration and enzyme activity of summer maize in oasis region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(5):103-108.

[9] Zhang P, Chen X L, Wei T, et al. Effects of straw incorporation on the soil nutrient contents, enzyme activities, and crop yield in a semiarid region of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 160:65-72.

[10] 张莉,李玉义,逢焕成,等.玉米秸秆颗粒还田对土壤有机碳含量和作物产量的影响[J].农业资源与环境学报,2019,36(2):160-168. ZHANG Li, LI Yu-yi, PANG Huan-cheng, et al. Effects of

- granulated maize straw incorporation on soil organic carbon contents and grain yield[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(2):160-168.
- [11] 胡乃娟, 韩新忠, 杨敏芳, 等. 秸秆还田对稻麦轮作农田活性有机碳组分含量、酶活性及产量的短期效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2):371-377. HU Nai-juan, HAN Xin-zhong, YANG Min-fang, et al. Short-term influence of straw return on the contents of soil organic carbon fractions, enzyme activities and crop yields in rice-wheat rotation farmland[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(2):371-377.
- [12] 于寒, 梁烜赫, 张玉秋, 等. 不同秸秆还田方式对玉米根际土壤微生物及酶活性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2015, 32(3):305-311. YU Han, LIANG Xuan-he, ZHANG Yu-qiu, et al. Effects of different straw returning modes on the soil microorganism and enzyme activity in corn field[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2015, 32(3):305-311.
- [13] 汪军, 王德建, 张刚, 等. 连续全量秸秆还田与氮肥用量对农田土壤养分的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(5):40-44. WANG Jun, WANG De-jian, ZHANG Gang, et al. Effects of different nitrogen fertilizer rate with continuous full amount of straw incorporated on paddy soil nutrients[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(5):40-44.
- [14] 孙凯, 刘振, 胡恒宇, 等. 有机培肥与轮耕方式对夏玉米田土壤碳氮和产量的影响[J]. 作物学报, 2019, 45(3):401-410. SUN Kai, LIU Zhen, HU Heng-yu, et al. Effect of organic fertilizer and rotational tillage practices on soil carbon and nitrogen and maize yield in wheat-maize cropping system[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2019, 45(3):401-410.
- [15] 矫丽娜, 李志洪, 殷程程, 等. 高量秸秆不同深度还田对黑土有机质组成和酶活性的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(3):665-672. JIAO Li-na, LI Zhi-hong, YIN Cheng-cheng, et al. Effect of incorporation of crop straw on composition of soil organic matter and enzyme activity in black soil relative to depth and rate of the incorporation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(3):665-672.
- [16] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000:30-34. BAO Shi-dan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000:30-34.
- [17] Zhang B, Liang C, He H B, et al. Variations in soil microbial communities and residues along an altitude gradient on the northern slope of Changbai Mountain, China[J]. *PLoS ONE*, 2013, 8:e66184.
- [18] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1986:274-276. GUAN Song-yin. Soil enzymes and the research methods[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1986:274-276.
- [19] 陈金, 庞党伟, 韩明明, 等. 耕作模式对土壤生物活性与养分有效性及冬小麦产量的影响[J]. 作物学报, 2017, 43(8):1245-1253. CHEN Jin, PANG Dang-wei, HAN Ming-ming, et al. Effects of tillage patterns on soil biological activity, availability of soil nutrients and grain yield of winter wheat[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(8):1245-1253.
- [20] Chen R, Senbayram M, Blagodatsky S, et al. Soil C and N availability determine the priming effect: Microbial N mining and stoichiometric decomposition theories[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(7):2356-2367.
- [21] 王晓波, 车威, 纪荣婷, 等. 秸秆还田和保护性耕作对砂姜黑土有机质和氮素养分的影响[J]. 土壤, 2015, 47(3):483-489. WANG Xiao-bo, CHE Wei, JI Rong-ting, et al. Effects of straw returning and conservation tillage patterns on the contents of organic matter and nitrogen nutrient in the lime concretion black soil[J]. *Soils*, 2015, 47(3):483-489.
- [22] 邵云, 马守田, 李学梅, 等. 秸秆还田方式对麦田土壤碳、氮、水动态及小麦产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2014, 34(11):1545-1551. SHAO Yun, MA Shou-tian, LI Xue-mei, et al. Effects of different straw returning methods on soil carbon, nitrogen, water dynamics and yield of wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34(11):1545-1551.
- [23] 李秀, 韩佳乐, 吴文雪, 等. 秸秆还田方式对关中盆地土壤微生物量碳氮和冬小麦产量的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4):170-176. LI Xiu, HAN Jia-le, WU Wen-xue, et al. Effects of different straw returning methods on soil microbial biomass carbon, nitrogen and winter wheat yield in Guanzhong Plain[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(4):170-176.
- [24] 隋鹏祥, 张心昱, 温学发, 等. 耕作方式和秸秆还田对棕壤土壤养分和酶活性的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(8):2038-2045. SUI Peng-xiang, ZHANG Xin-yu, WEN Xue-fa, et al. Effects of tillage and straw management on nutrient contents and enzyme activities of brown soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2016, 35(8):2038-2045.
- [25] 薄国栋, 申国明, 张继光, 等. 秸秆还田对植烟土壤养分及真菌群落多样性的影响[J]. 土壤通报, 2016, 47(1):137-142. BO Guo-dong, SHEN Guo-ming, ZHANG Ji-guang, et al. Effects of straw returning on soil nutrients and fungal diversity in tobacco planting field[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(1):137-142.
- [26] Niu L A, Hao J M, Zhang B Z, et al. Influences of long-term fertilizer and tillage management on soil fertility of the North China Plain[J]. *Pedosphere*, 2011, 21:813-820.
- [27] 魏燕华, 赵鑫, 翟云龙, 等. 耕作方式对华北农田土壤固碳效应的影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(17):87-95. WEI Yan-hua, ZHAO Xin, ZHAI Yun-long, et al. Effects of tillages on soil organic carbon sequestration in North China Plain[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(17):87-95.
- [28] 董林林, 王海侯, 陆长婴, 等. 秸秆还田量和类型对土壤氮及氮组分构成的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4):1143-1150. DONG Lin-lin, WANG Hai-hou, LU Chang-ying, et al. Effects of straw returning amount and type on soil nitrogen and its composition[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4):1143-1150.
- [29] 武际, 郭熙盛, 鲁剑巍, 等. 连续秸秆覆盖对土壤无机氮供应特征和作物产量的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(9):1741-1749. WU Ji, GUO Xi-sheng, LU Jian-wei, et al. Effects of continuous straw mulching on supply characteristics of soil inorganic nitrogen and crop yields[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(9):1741-1749.
- [30] 任晓明, 陈桀, 陈效民, 等. 秸秆还田深度对黄棕壤养分及物理性

- 质的影响[J]. 水土保持通报, 2018, 38(2): 58-64. REN Xiao-ming, CHEN Can, CHEN Xiao-min, et al. Effects of straw returning depth on nutrients and physical properties of yellow brown soil[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(2): 58-64.
- [31] 张奇, 陈桢, 陈效民, 等. 不同深度秸秆还田对黄棕壤氮素和微生物生物量碳氮的影响[J]. 水土保持通报, 2019, 39(2): 56-61. ZHANG Qi, CHEN Can, CHEN Xiao-min, et al. Effects of straw returning to different soil depths on soil nitrogen and microbial biomass carbon and nitrogen in yellow brown soil[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(2): 56-61.
- [32] Zhu L Q, Hu N J, Yang M F, et al. Effects of different tillage and straw return on soil organic carbon in a rice-wheat rotation system[J]. *PLoS ONE*, 2014, 9: e88900.
- [33] Mi W H, Wu L H, Brookes P C, et al. Changes in soil organic carbon fractions under integrated management systems in a low-productivity paddy soil given different organic amendments and chemical fertilizers [J]. *Soil and Tillage Research*, 2016, 163: 67-70.
- [34] Akhtar K, Wang W Y, Ren G X, et al. Changes in soil enzymes, soil properties, and maize crop productivity under wheat straw mulching in Guanzhong, China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 182: 94-102.
- [35] 罗珠珠, 黄高宝, 蔡立群, 等. 不同耕作方式下春小麦生育期土壤酶时空变化研究[J]. 草业学报, 2012, 21(6): 94-101. LUO Zhu-zhu, HUANG Gao-bao, CAI Li-qun, et al. Temporal and spatial disparities of soil enzyme activities during the spring wheat growing season under different tillage systems[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2012, 21(6): 94-101.
- [36] 刘义国, 刘永红, 刘洪军, 等. 秸秆还田量对土壤理化性状及小麦产量的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(3): 131-135. LIU Yi-guo, LIU Yong-hong, LIU Hong-jun, et al. Effects of straw returning amount on soil physical and chemical properties and yield of wheat[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(3): 131-135.
- [37] 万忠梅, 宋长春, 郭跃东, 等. 毛苔草湿地土壤酶活性及活性有机碳组分对水分梯度的响应[J]. 生态学报, 2008, 28(12): 5980-5986. WAN Zhong-mei, SONG Chang-chun, GUO Yue-dong, et al. Effects of water gradient on soil enzyme activity and active organic carbon composition under *Carex lasiocarpa* marsh[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(12): 5980-5986.
- [38] Moyano F E, Manzoni S, Chenu C. Responses of soil heterotrophic respiration to moisture availability: An exploration of processes and models[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 59: 72-85.