

花生和玉米种植模式对科尔沁沙地土壤养分和生物特性的影响

吴宇伦¹, 赵雪淞^{1*}, 宋王芳^{1,2}, 杨晨曦¹, 高欣¹

(1. 辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 辽宁阜新 123000; 2. 山东省煤田地质规划勘察研究院, 山东济南 250104)

摘要 针对科尔沁沙地土壤沙化严重、土壤养分流失、肥力下降、农田环境恶化等问题,以提高该区土壤质量、改善农田土壤生态环境为目的,通过田间定位试验,对花生连作(CK)、玉米连作(LC)、玉米-花生轮作(RC)、花生-玉米轮作(RP)4种植模式下科尔沁沙地农田的土壤理化性质、土壤酶活性及微生物生物量的变化进行研究,结果表明,与CK相比,其他3种植植模式均能显著改善土壤理化性质、提高土壤酶活性和土壤微生物生物量碳、氮、磷含量,以玉米-花生的轮作模式(RC)效果最好。且不同处理下土壤MBC/MBN、MBC/SOC、MBN/TN、MBP/TP的比值分别在8.67%~11.18%、38.42%~46.07%、35.07%~57.56%、20.63%~55.94%,其比值在不同种植模式和不同土层深度的分布特征有明显差异。相关性分析表明,土壤pH和氮磷钾含量与土壤生物学指标呈显著或极显著正相关($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$),土壤有机质与土壤微生物生物量指标呈显著或极显著正相关($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$)。

关键词 种植模式;花生;玉米;土壤理化性质;土壤酶活性;土壤微生物生物量

中图分类号 X171.4 **文献标识码** A

文章编号 0517-6611(2022)05-0048-07

doi:10.3969/j.issn.0517-6611.2022.05.014



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

Effects of Peanut and Corn Planting Patterns on Soil Nutrient and Biological Characteristics in Horqin Sandy Land

WU Yu-lun¹, ZHAO Xue-song¹, SONG Wang-fang^{1,2} et al (1. College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin, Liaoning 123000; 2. Shandong Coal Geological Planning and Exploration Research Institute, Jinan, Shandong 250104)

Abstract In view of the serious soil desertification, soil nutrient loss, fertility decline, farmland environment deterioration and other problems in Horqin Sandy Land, the purpose was to improve soil quality and farmland soil ecological environment in this area, through field positioning experiments, the changes of soil physical and chemical properties, soil enzyme activities and microbial biomass under four cropping modes of peanut continuous cropping (CK), corn continuous cropping (LC), corn-peanut rotation (RC) and peanut-corn rotation (RP) in Horqin Sandy Land were studied. The results showed that compared with CK, the other three cropping patterns could significantly improve soil physical and chemical properties, soil enzyme activities and soil microbial biomass C, N and P contents, and the corn-peanut rotation pattern (RC) had the best effect. And the ratios of soil MBC/MBN, MBC/SOC, MBN/TN, MBP/TP under different treatments were 8.67%–11.18%, 38.42%–46.07%, 35.07%–57.56%, 20.63%–55.94%, respectively, the distribution characteristics of their ratios in different planting modes and different soil depths were significantly different. Correlation analysis showed that soil pH and N, P, K contents were significantly or extremely significantly positively correlated with soil biological indexes ($P < 0.05$ or $P < 0.01$), and soil organic matter was significantly or extremely significantly positively correlated with soil microbial biomass indexes ($P < 0.05$ or $P < 0.01$).

Key words Planting pattern; Peanut; Corn; Soil physical and chemical properties; Soil enzyme activity; Soil microbial biomass

近年来,土地荒漠化已成为严重威胁生态环境和经济发展的全球性问题,科尔沁沙地不仅是我国四大沙地之一,还是我国北方农牧交错带沙漠化最严重的地区之一^[1]。该区域拥有丰富的光热资源,农作物增产潜力大^[2]。但该地区由于过度放牧和开垦,不合理耕作种植等人为因素和季节性降水分配不均、强风频繁发生等自然因素,导致农牧交错带土壤沙化日益严重,土层变薄,土壤质量逐年下降,形成恶性循环,影响到该地区农作物的产量和区域农业的可持续发展^[3-5]。该地区农业生态系统属于农牧交错区,偏重农业。农业种植结构简单,作物主要有玉米、花生和杂粮。

连作与轮作是2种不同的种植模式。连作是一年内或连年在同一块土地上连续种植同一种作物的种植方式^[6];因为该种植方式长期汲取同样的营养元素,所以土壤健康状况受到一定程度的影响,导致土壤变劣,造成土壤微生物活性降低,养分分解作用下降,从而影响作物的生长发育,致使作物产量品质下降^[7-9]。殷继忠等^[10]研究表明大豆连作会造成土壤理化性质恶化;Cakmak^[11]研究表明连作会引起土壤

的pH、容重、速效磷和速效钾含量随着连作年限增加而降低。从阜新地区看,因连作而造成的减产现象也相当明显。轮作是在同一块土地上,有次序地在季节间或年间轮换种植不同的作物或复种组合的一种种植方式^[12]。赵思腾等^[13]研究表明玉米与大豆、苜蓿轮作可显著提高土壤过氧化氢酶、蔗糖酶、脲酶活性,玉米与豆科作物轮作对土壤肥力改良效果显著。黄玉茜^[14]研究表明土壤中氮素含量会随着花生连作年限的增加呈先增后降再增的趋势,而磷素含量则随连作年限的增加呈下降趋势。李戊清等^[15]研究表明与轮作相比,茄子连作土壤有效磷、钙、镁含量显著降低,轮作土壤pH、总磷、有效磷、交换性钙等含量显著增加,轮作较连作更有利于保持或提高土壤肥力和土地生产力。高忠奎等^[16]研究表明花生-水稻轮作土壤的有机质、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾含量显著高于水稻连作土壤,土壤肥力水平显著提高。高效的农业模式是农业发展的必然趋势,而轮作复种技术是高效农业不可缺少的重要组成部分^[17]。轮作是用地养地相结合的一种措施,不仅有利于均衡利用土壤养分和防治病、虫、草害,还能有效地改善土壤的理化性状,调节土壤肥力,最终达到增产增收的目的^[18]。

针对科尔沁沙地农牧交错区土壤沙化、作物产量降低等现阶段存在的突出问题,该研究通过田间定位试验对4种不

基金项目 辽宁省兴辽英才计划项目(2017108006)。

作者简介 吴宇伦(1997—),女,辽宁阜新新人,硕士研究生,研究方向:生态修复理论与技术。*通信作者,教授,博士,博士生导师,从事生态修复理论与技术方面的研究。

收稿日期 2021-05-05

同种植模式(花生连作、玉米连作、玉米-花生轮作、花生-玉米轮作)条件下土壤理化性质、土壤酶活性及微生物生物量的变化进行研究,确定适宜的种植模式,从而为该地区土壤质量的改善和区域农业的可持续发展提供理论支撑,研究结果对创建合理的农业种植制度、推进农田土壤生态修复治理、提高农作物产量和经济效益具有重要意义。

1 材料与与方法

1.1 试验地概况 研究区选自辽宁省沙地治理与利用研究所试验站,位于科尔沁沙地东南缘的章古台镇(42°43'~43°20'N,122°22'~123°22'E),属于温带大陆性季风气候,年平均温度 6.65 °C,平均相对湿度 61%,无霜期为 150 d 左右;年降水量在 360~500 mm,主要集中在 6—8 月,土壤蒸发量约是降水量的 4 倍,土壤类型以风沙土为主,土壤基础养分为土壤 pH 6.63、有机质 6.62 g/kg、全氮 0.49 g/kg、全磷 0.28 g/kg、全钾 26.17 g/kg、碱解氮 67.47 mg/kg、速效磷 10.26 mg/kg、速效钾 73.09 mg/kg。

1.2 试验设计 该试验为 2 年的田间定位试验,试验开始前(2018 年 3 月)选取一块地面平整、土壤性质分布均匀的土地,平均划分为 2 个小区,于 2018 年分别种植玉米和花生,待秋收后进行土地休闲,避免小区之间土壤混淆。2019 年再将 2 个小区平均划分成 4 个小区分别种植玉米、花生。4 个小区的处理分别是玉米-花生轮作(RC)、玉米连作(LC)、花生-玉米轮作(RP)、花生连作(CK),以花生连作为对照,其中玉米-花生轮作为 2018 年种植玉米,2019 年种植花生;花生-玉米轮作为 2018 年种植花生,2019 年种植玉米。试验选用花生品种“阜花 17 号”和玉米品种“辽单 975”,花生种植密度为 75 000 株/hm²,每穴 2 粒(行距 30 cm,穴距 20 cm)。玉米种植密度为 72 000 株/hm²(行距 50 cm,株距 25 cm)。耕作方式为垄耕,秋季作物收获后机械灭茬,春季起垄。播种前所有处理均施有机肥 550 kg/hm² 作为底肥。根据当年降水量至多灌溉一次,其他田间管理同大田。

1.3 土样采集 于 2019 年 10 月作物收获后、冻土前,按照 5 点取样法在每个试验区内随机选取 5 点,作为一个混合样。采样土壤深度为 40 cm,分 0~20、20~40 cm 2 个层次。样品分为两部分,一部分在 4 °C 冰箱内保存用于微生物指标的测定;另一部分剔除砾石和植物残根等杂物,放置阴凉处自然风干用于土壤酶活性和理化指标的测定。

1.4 测定方法

1.4.1 土壤理化性质的测定。土壤 pH 采用 pH 酸度计测定;土壤有机质采用外加热重铬酸钾氧化法测定;土壤全氮采用凯氏定氮法测定;土壤全磷采用硫酸-高氯酸消煮钼锑抗比色法测定;土壤全钾采用氢氧化钾熔融火焰光度法测定;土壤碱解氮采用碱解扩散法测定;土壤速效磷采用 0.5 mol/L 的碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定;土壤速效钾采用 1 mol/L 的乙酸铵提取-火焰光度法测定。

1.4.2 土壤酶活性的测定。土壤过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定;土壤磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定;土壤蔗糖酶活性采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定;土

壤蛋白酶活性采用茚三酮比色法测定。

1.4.3 土壤微生物量的测定。土壤微生物生物量碳(MBC)采用氯仿熏蒸提取-容量分析法测定;土壤微生物生物量氮(MBN)采用氯仿熏蒸提取-茚三酮比色法测定;土壤微生物生物量磷(MBP)采用氯仿熏蒸提取-无机磷比色法测定。

1.5 统计分析 用 Microsoft Excel 2007 软件进行数据整理和绘图,用 SPSS 21.0 软件中的单因素方差分析(one-way ANOVA)的最小显著差法(LSD)检验不同种植模式间、不同土层之间各项指标的差异显著性($P < 0.05$);用 Pearson 相关系数法分析土壤各化学指标与土壤生物学指标之间的相关性。

2 结果与分析

2.1 不同种植模式对土壤理化性质的影响

2.1.1 土壤 pH。土壤 pH 是土壤最基本的化学性质之一以及土壤肥力特征的综合反映,也是土壤肥力的重要指标之一^[19]。由表 1 可知,4 种植模式 0~20、20~40 cm 土层土壤的 pH 均表现为 RC>RP>LC>CK;0~20 cm 土层,CK 处理与 LC、RC、RP 处理差异显著($P < 0.05$),LC、RC、RP 处理间差异不显著($P > 0.05$);20~40 cm 土层,CK 处理与 LC、RC、RP 处理间差异不显著($P > 0.05$),LC、RC、RP 处理间差异不显著($P > 0.05$);LC、RC 和 RP 处理分别比 CK 处理提高了 0.31%~1.37%、1.82%~2.30% 和 1.52%~1.84%。该结果表明,种植模式对土壤酸碱度的影响不显著,相较于连作模式,轮作模式土壤酸碱度更接近中性,以玉米-花生轮作处理(RC)的土壤酸碱度最接近中性。

2.1.2 土壤有机质。有机质是土壤中有有机化合物和少量有机物的总和,不仅为植物提供生长所需的营养元素,更是土壤养分供应能力和肥力的重要指标之一^[20]。由表 1 可知,4 种植模式 0~20 cm 土层土壤有机质含量变化趋势表现为 RC>RP>LC>CK,CK 处理与 LC、RC、RP 处理差异显著($P < 0.05$),LC、RC 处理间差异显著($P < 0.05$),与 RP 处理差异不显著($P > 0.05$);20~40 cm 土层,土壤有机质含量变化趋势表现为 RC>LC>RP>CK,CK 处理与 LC、RC 处理差异显著($P < 0.05$),与 RP 处理差异不显著($P > 0.05$),LC 处理与 RC、RP 处理差异显著($P < 0.05$),RC、RP 处理间差异显著($P < 0.05$);LC、RC 和 RP 处理分别比 CK 处理提高了 3.76%~28.82%、6.82%~34.12% 和 3.06%~30.98%。该结果表明,种植模式对土壤有机质含量影响显著,连作模式明显降低了土壤有机质含量,而轮作模式则有效提高了土壤有机质含量,其中以玉米-花生轮作处理(RC)效果最佳。

2.1.3 土壤氮素含量。土壤氮素是土壤肥力的重要物质基础,是植物生长必需的三大营养元素之一^[21]。由表 1 可知,4 种植模式 0~20、20~40 cm 土层土壤全氮含量均表现为 RC>RP>LC>CK;0~20 cm 土层,CK 处理与 RC 处理差异显著($P < 0.05$),与 LC、RP 处理差异不显著($P > 0.05$),LC 处理与 RC、RP 处理差异不显著($P > 0.05$),RC 与 RP 处理差异不显著($P > 0.05$);20~40 cm 土层,CK 处理与 RC、RP 处理差异显著($P < 0.05$),与 LC 处理差异不显著($P > 0.05$),LC 处理与

RC 处理差异显著 ($P < 0.05$), 与 RP 处理差异不显著 ($P > 0.05$), RC、RP 处理间差异不显著 ($P > 0.05$); LC、RC 和 RP 处理分别比 CK 处理提高了 5.88%~7.14%、13.72%~19.05% 和 11.76%~14.29%。该结果表明, 种植模式对土壤全氮含量有显著影响, 连作模式明显降低了土壤全氮含量, 而轮作模式则有效地提高了土壤全氮含量, 其中以玉米-花生轮作处理 (RC) 土壤全氮含量最高。

由表 1 可知, 4 种植模式 0~20、20~40 cm 土层土壤碱解氮含量均表现为 RC>RP>LC>CK; 0~20 cm 土层, CK 处理与 RC、RP 处理差异显著 ($P < 0.05$), 与 LC 处理差异不显著 ($P > 0.05$), LC 处理与 RC 处理差异显著 ($P < 0.05$), 与 RP 处理差异不显著 ($P > 0.05$), RC、RP 处理间差异不显著 ($P > 0.05$); 20~40 cm 土层, CK 处理与 RC 处理差异显著 ($P < 0.05$), 与 LC、RP 处理差异不显著 ($P > 0.05$), LC 处理与 RC、RP 处理差异不显著 ($P > 0.05$), RC、RP 处理间差异不显著 ($P > 0.05$); LC、RC 和 RP 处理分别比 CK 处理提高了 2.84%~5.16%、6.89%~9.96% 和 5.61%~6.75%。该结果表明, 种植模式显著影响土壤碱解氮含量, 连作模式土壤碱解氮含量较低, 而轮作模式可以有效提高土壤碱解氮含量, 其中以玉米-花生轮作处理 (RC) 土壤碱解氮含量最高。

2.1.4 土壤磷素含量。土壤磷素也是植物生长必需的 3 种营养元素之一, 在植物营养中占有重要地位^[22]。由表 1 可知, 4 种植模式 0~20、20~40 cm 土层土壤全磷含量均表现为 RC>RP>LC>CK; 0~20 cm 土层, CK 处理与 RC、RP 处理差异显著 ($P < 0.05$), 与 LC 处理差异不显著 ($P > 0.05$), LC 处理与 RC 处理差异显著 ($P < 0.05$), 与 RP 处理差异不显著 ($P > 0.05$), RC、RP 处理差异不显著 ($P > 0.05$); 20~40 cm 土层, CK 处理与 LC、RC、RP 处理差异显著 ($P < 0.05$), LC、RC、RP 处理间差异不显著 ($P > 0.05$); LC、RC 和 RP 处理分别比 CK 处理提高了 3.57%~6.25%、17.86%~18.75% 和 12.50%~14.28%。该结果表明, 种植模式对土壤全磷含量影响显著, 连作模式处理下土壤全磷含量明显较低, 轮作模式处理下土壤全磷含量较高, 其中以玉米-花生轮作处理 (RC) 土壤全磷含量相对最高。

由表 1 可知, 4 种植模式 0~20、20~40 cm 土层土壤速

效磷含量均表现为 RC>RP>LC>CK; 0~20 cm 土层, CK 处理与 RC、RP 处理差异显著 ($P < 0.05$), 与 LC 处理差异不显著 ($P > 0.05$), LC 处理与 RC、RP 处理差异显著 ($P < 0.05$), RC、RP 处理间差异显著 ($P < 0.05$); 20~40 cm 土层, CK 处理与 RC、RP 处理差异显著 ($P < 0.05$), 与 LC 处理差异不显著 ($P > 0.05$), LC、RC 处理间差异显著 ($P < 0.05$), 与 RP 处理差异不显著 ($P > 0.05$), RC、RP 处理间差异不显著 ($P > 0.05$); LC、RC 和 RP 处理分别比 CK 处理提高了 6.87%~14.21%、26.68%~37.65% 和 18.10%~29.39%。该结果表明, 种植模式显著影响土壤速效磷含量, 连作模式土壤速效磷含量较低, 轮作模式则有效地提高了土壤速效磷含量, 其中以玉米-花生轮作处理 (RC) 对土壤速效磷提升效果最显著。

2.1.5 土壤钾素含量。土壤钾素也是植物生长必需的重要营养元素之一, 在土壤肥力中起着重要的作用^[23]。由表 1 可知, 4 种植模式 0~20、20~40 cm 土层土壤全钾含量均表现为 RC>RP>LC>CK; 0~20 cm 土层, CK 处理与 RC、RP 处理差异显著 ($P < 0.05$), 与 LC 处理差异不显著 ($P > 0.05$), LC 处理与 RC 处理差异显著 ($P < 0.05$), 与 RP 处理差异不显著 ($P > 0.05$), RC、RP 处理间差异不显著 ($P > 0.05$); 20~40 cm 土层, CK 处理与 RC 处理差异显著 ($P < 0.05$), 与 LC、RP 处理差异不显著 ($P > 0.05$), LC 处理与 RC、RP 处理差异不显著 ($P > 0.05$), RC、RP 处理间差异不显著 ($P > 0.05$); LC、RC 和 RP 处理分别比 CK 处理提高了 3.40%~4.04%、9.83%~12.00% 和 5.48%~8.29%。该结果表明, 种植模式显著影响土壤全钾含量, 连作模式处理下土壤全钾含量明显较低, 而轮作模式处理下土壤全钾含量较高, 其中以玉米-花生轮作处理 (RC) 效果最显著。

由表 1 可知, 4 种植模式 0~20、20~40 cm 土层土壤速效钾含量均表现为 RC>RP>LC>CK; 0~20 cm 土层, CK 处理与 RC、RP 处理差异显著 ($P < 0.05$), 与 LC 处理差异不显著 ($P > 0.05$), LC 处理与 RC、RP 处理差异不显著 ($P > 0.05$), RC、RP 处理间差异不显著 ($P > 0.05$); 20~40 cm 土层, CK 处理与 RC、RP 处理差异显著 ($P < 0.05$), 与 LC 处理差异不显著 ($P > 0.05$), LC 与 RC、RP 处理差异不显著 ($P > 0.05$), RC、RP 处理间差异不显著 ($P > 0.05$); LC、RC 和 RP 处理分别比

表 1 不同种植模式对土壤理化性质的影响

Table 1 Effects of different planting patterns on soil physicochemical properties

种植模式 Planting pattern	土层深度 Soil depth cm	pH	有机质 SOC g/kg	全氮 TN g/kg	全磷 TP g/kg	全钾 TK g/kg	碱解氮 AN mg/kg	速效磷 AP mg/kg	速效钾 AK mg/kg
花生连作 CK	0~20	6.58±0.01 b	5.10±0.08 c	0.51±0.02 b	0.28±0.01 c	24.74±0.47 c	65.86±1.16 c	11.50±0.17 c	71.53±0.96 b
	20~40	6.53±0.02 ab	4.25±0.05 c	0.42±0.02 c	0.16±0.00 b	16.78±0.42 b	55.61±0.84 b	7.46±0.19 c	62.48±0.98 b
玉米连作 LC	0~20	6.67±0.04 a	6.57±0.05 b	0.54±0.01 ab	0.29±0.01 bc	25.74±0.52 bc	67.73±0.80 bc	12.29±0.27 c	73.63±0.94 ab
	20~40	6.55±0.01 a	4.41±0.03 b	0.45±0.01 bc	0.17±0.00 a	17.35±0.41 ab	58.48±0.89 ab	8.52±0.25 bc	64.68±0.87 ab
玉米-花生轮作 RC	0~20	6.70±0.05 a	6.84±0.06 a	0.58±0.02 a	0.33±0.01 a	27.71±0.41 a	72.42±1.08 a	15.83±0.25 a	75.87±1.11 a
	20~40	6.68±0.01 a	4.54±0.05 a	0.50±0.01 a	0.19±0.01 a	18.43±0.28 a	59.44±0.92 a	9.45±0.27 a	67.51±0.91 a
花生-玉米轮作 RP	0~20	6.68±0.06 a	6.68±0.04 ab	0.57±0.02 ab	0.32±0.01 ab	26.79±0.42 ab	70.31±1.01 ab	14.88±0.33 b	75.44±0.54 a
	20~40	6.65±0.01 a	4.38±0.05 c	0.48±0.01 ab	0.18±0.00 a	17.70±0.39 ab	58.73±1.12 ab	8.81±0.16 ab	66.49±0.73 a

注: 同列不同小写字母代表同一土层不同种植模式间差异显著 ($P < 0.05$)

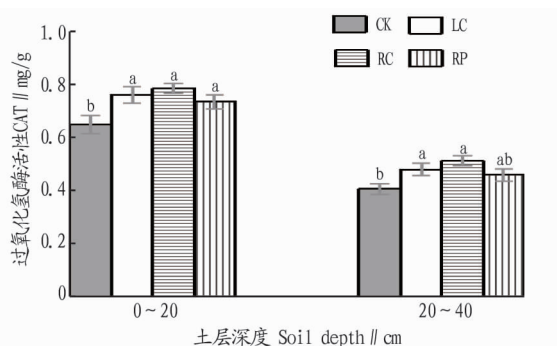
Note: Different lowercase letters in the same column represent significant differences between different planting patterns in the same soil layer ($P < 0.05$)

CK 处理提高了 2.94%~3.52%、6.07%~8.05% 和 5.47%~6.42%。该结果表明,种植模式对土壤速效钾含量影响显著,连作模式处理土壤速效钾含量明显较低,而轮作模式土壤速效钾含量更高,其中以玉米-花生轮作处理(RC)效果最好。

2.2 不同种植模式对土壤酶活性的影响

2.2.1 土壤过氧化氢酶活性

过氧化氢酶是土壤中物质与能量转化的一种重要的氧化还原酶类^[24],因此其活性在一定程度上可以表征土壤生物氧化过程的强弱。由图 1 可知,4 种植模式 0~20、20~40 cm 土层土壤过氧化氢酶活性均表现为 RC>LC>RP>CK;0~20 cm 土层,CK 处理与 LC、RP 和 RC 处理差异显著($P<0.05$),LC、RP、RC 处理间差异不显著($P>0.05$);20~40 cm 土层,CK 处理与 LC、RC 处理差异显著($P<0.05$),LC、RC、RP 处理间差异不显著($P>0.05$);LC、RC 和 RP 处理分别比 CK 处理提高了 16.92%~17.07%、21.54%~24.39% 和 12.20%~13.85%。该结果表明,花生连作明显降低了土壤过氧化氢酶活性,而轮作则有效地提高了土壤过氧化氢酶活性,其中以玉米-花生轮作处理(RC)土壤过氧化氢酶活性最高。



注:不同小写字母代表同一土层不同种植模式间差异显著($P<0.05$)
Note: Different lowercase letters represent significant differences between different planting patterns in the same soil layer ($P<0.05$)

图 1 不同种植模式对土壤过氧化氢酶活性的影响

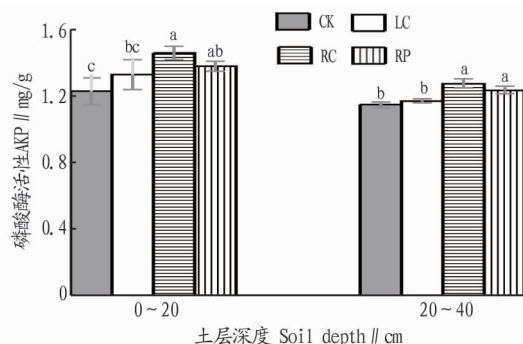
Fig. 1 Effect of different planting patterns on soil catalase activity

2.2.2 土壤磷酸酶活性

磷酸酶是土壤中最活跃的一种水解酶,能水解土壤中有有机磷化合物并生成被植物直接吸收利用的无机态磷^[25]。由图 2 可知,4 种植模式 0~20、20~40 cm 土层土壤磷酸酶活性均表现为 RC>RP>LC>CK;0~20 cm 土层,CK 处理与 RP、RC 处理差异显著($P<0.05$),LC 处理与 RC 处理差异显著($P<0.05$),与 RP 处理差异不显著($P>0.05$),RP、RC 处理间差异不显著($P>0.05$);20~40 cm 土层,CK、LC 处理与 RC、RP 处理差异显著($P<0.05$),CK 处理与 LC 处理差异不显著($P>0.05$),RC 处理与 RP 处理差异不显著($P>0.05$);LC、RC 和 RP 处理分别比 CK 处理提高了 1.74%~8.13%、11.30%~18.70% 和 7.83%~12.20%。该结果表明,连作模式土壤磷酸酶活性较低,而轮作则有效地提高了土壤磷酸酶活性,以玉米-花生轮作处理(RC)效果最佳。

2.2.3 土壤蔗糖酶活性

蔗糖酶又名转化酶,其活性在一定程度上可反映土壤的熟化程度和肥力水平^[26-27]。由图 3 可知,4 种植模式 0~20、20~40 cm 土层土壤蔗糖酶活性均



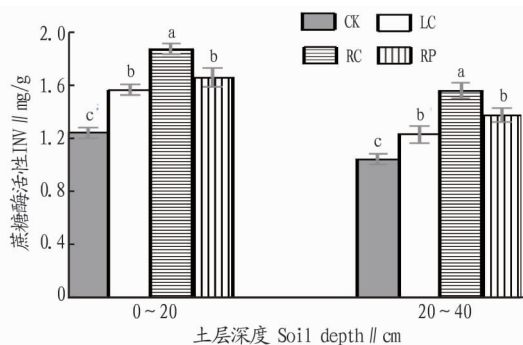
注:不同小写字母代表同一土层不同种植模式间差异显著($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters represent significant differences between different planting patterns in the same soil layer ($P<0.05$)

图 2 不同种植模式对土壤磷酸酶活性的影响

Fig. 2 Effect of different planting patterns on soil phosphatase activity

表现为 RC>RP>LC>CK;0~20 cm 土层,CK 处理与 LC、RP、RC 处理差异显著($P<0.05$),LC 处理与 RC 处理差异显著($P<0.05$),与 RP 处理差异不显著($P>0.05$),RP、RC 处理间差异显著($P<0.05$);20~40 cm 土层,CK 处理与 LC、RC、RP 处理差异显著($P<0.05$),LC 处理与 RP 处理差异不显著($P>0.05$),与 RC 处理差异显著($P<0.05$),RC 处理与 RP 处理差异显著($P<0.05$);LC、RC 和 RP 处理分别比 CK 处理提高了 18.27%~26.61%、50.00%~51.61% 和 32.69%~33.87%。该结果表明,连作模式会降低土壤蔗糖酶活性,轮作模式可以有效提高土壤蔗糖酶活性,其中以玉米-花生轮作处理(RC)土壤蔗糖酶活性最高。



注:不同小写字母代表同一土层不同种植模式间差异显著($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters represent significant differences between different planting patterns in the same soil layer ($P<0.05$)

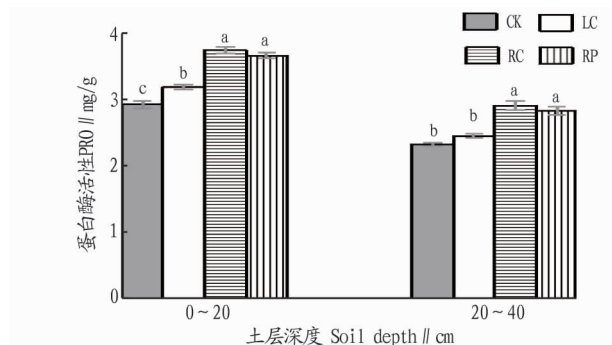
图 3 不同种植模式对土壤蔗糖酶活性的影响

Fig. 3 Effect of different planting patterns on soil sucrase activity

2.2.4 土壤蛋白酶活性

蛋白酶参与土壤中氨基酸、蛋白质以及其他蛋白质氮有机化合物的转化水解产物是高等植物的氮源之一,是评价土壤肥力的一个重要指标^[28]。由图 4 可知,4 种植模式 0~20、20~40 cm 土层土壤蛋白酶活性均表现为 RC>RP>LC>CK;0~20 cm 土层,CK 处理与 LC、RP 和 RC 处理差异显著($P<0.05$),LC 处理与 RC、RP 处理差异显著($P<0.05$),RP、RC 处理间差异不显著($P>0.05$);20~40 cm 土层,CK、LC 处理与 RC、RP 处理差异显著($P<0.05$),CK 处理与 LC 处理差异不显著($P>0.05$),RC 处理与 RP 处

理差异不显著($P>0.05$);LC、RC 和 RP 处理分别比 CK 处理提高了 5.58%~9.22%、25.32%~27.99% 和 21.46%~25.26%。该结果表明,连作模式处理下土壤蛋白酶活性明显降低,轮作模式处理下土壤蛋白酶活性上升,其中以玉米-花生轮作处理(RC)土壤蛋白酶活性最高,花生-玉米轮作处理(RP)次之。

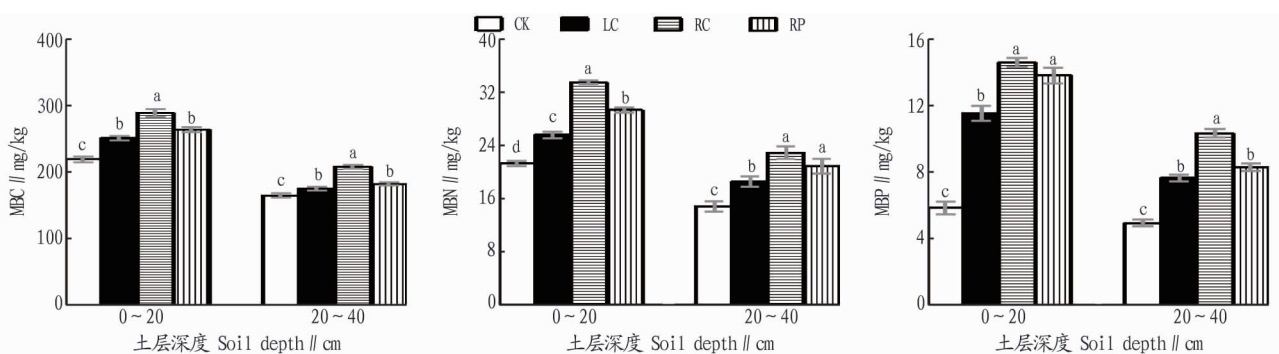


注:不同小写字母代表同一土层不同种植模式间差异显著($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters represent significant differences between different planting patterns in the same soil layer ($P<0.05$)

图 4 不同种植模式对土壤蛋白酶活性的影响

Fig. 4 Effect of different planting patterns on soil protease activity



注:不同小写字母代表同一土层不同种植模式间差异显著($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters represent significant differences between different planting patterns in the same soil layer ($P<0.05$)

图 5 不同种植模式对土壤微生物量碳、氮、磷含量的影响

Fig. 5 Effects of different planting patterns on soil microbial biomass C, N and P contents

2.4 不同种植模式土壤 MBC/MBN、MBC/SOC、MBN/TN、MBP/TP 的比值 土壤 MBC/MBN 的比值是反映土壤氮素供应能力的重要生物学指标。由表 2 可知,0~20 cm 土层 CK、LC 处理显著高于 RC、RP 处理($P<0.05$),但 CK、LC 处理间差异不显著($P>0.05$),RC、RP 处理间差异不显著($P>0.05$);20~40 cm 土层 CK 处理显著高于 LC、RC、RP 处理($P<0.05$),LC、RC、RP 处理间差异不显著($P>0.05$)。结果表明,种植模式对土壤 MBC/MBN 的比值有显著影响,作物连续种植的土壤供氮能力较好。

土壤 MBC/SOC 的比值可用来指示土壤中有机质的输入量和 MBC 的转化速率。由表 2 可知,不同种植模式下,各处理 0~20 cm 土层 MBC/SOC 大小顺序表现为 CK>RC>RP>LC,CK 与 LC、RP 处理差异显著($P<0.05$),与 RC 处理差异不显著($P>0.05$),RC 与 LC、RP 处理差异显著($P<0.05$),LC

2.3 不同种植模式对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响 土壤微生物生物量是土壤有机质的活性部分,常被用作反映土壤肥力和质量的一个重要指标^[29]。由图 5 可知,不同种植模式对土壤微生物量碳、氮、磷含量产生显著影响。土壤微生物生物量碳(MBC)含量在 0~20、20~40 cm 的土层中,CK 处理与 LC、RC、RP 处理差异显著($P<0.05$),RC 处理与 LC、RP 处理差异显著($P<0.05$),LC 处理与 RP 处理差异不显著($P>0.05$)。土壤微生物生物量氮(MBN)含量在 0~20 cm 土层各处理间差异显著($P<0.05$);在 20~40 cm 土层,CK 处理与 LC、RC、RP 处理差异显著($P<0.05$),LC 处理与 RC、RP 处理差异显著($P<0.05$),RC 处理与 RP 处理差异不显著($P>0.05$)。土壤微生物生物量磷(MBP)含量在 0~20 cm 土层中,CK 处理与 LC、RC、RP 处理差异显著($P<0.05$),LC 处理与 RC、RP 处理差异显著($P<0.05$),RC 处理与 RP 处理差异不显著($P>0.05$);在 20~40 cm 土层中,CK 处理与 LC、RC、RP 处理差异显著($P<0.05$),RC 处理与 LC、RP 处理差异显著($P<0.05$),LC 处理与 RP 处理差异不显著($P>0.05$)。因此,连作模式处理下土壤微生物生物量含量明显较低,轮作模式处理下土壤微生物生物量含量更高,其中玉米-花生轮作处理(RC)土壤微生物生物量含量相对充足。

与 RP 处理间差异不显著($P>0.05$);20~40 cm 土层 MBC/SOC 大小顺序表现为 RC>RP>LC>CK,CK 与 RC、RP 处理差异显著($P<0.05$),LC 与 RC 处理差异显著($P<0.05$),与 RP 处理差异不显著($P>0.05$)。结果表明,种植模式对土壤 MBC/SOC 的比值有显著影响,综合来看玉米-花生轮作处理(RC)效果最佳。

土壤 MBN/TN 的比值可充分反映土壤中氨态氮所占的比例以及土壤中全氮向 MBN 的转化效率。由表 2 可知,不同种植模式下,各处理 0~20 cm 土层 MBN/TN 均高于 20~40 cm 土层;各处理 0~20、20~40 cm 土层 MBN/TN 大小顺序均表现为 RC>RP>LC>CK;0~20 cm 土层 RC 与 CK、LC 处理差异显著($P<0.05$),与 RP 处理差异不显著($P>0.05$),RP 与 CK、RC 处理差异显著($P<0.05$),与 LC 差异不显著($P>0.05$),CK、LC 处理间差异不显著($P>0.05$);20~40 cm 土

层,CK 与 LC、RC、RP 处理差异显著 ($P<0.05$),LC、RC、RP 处理间差异不显著 ($P>0.05$)。结果表明,种植模式对土壤 MBN/TN 的比值有显著影响,连作模式处理下土壤中氨态氮所占的比例及全氮向 MBN 的转化效率明显降低,而轮作模式则能有效地提高,其中以玉米-花生轮作处理(RC)效果最好。

土壤 MBP/TP 的比值可充分反映土壤中活性有机磷所占的比例以及土壤中全磷向 MBP 的转化效率。由表 2 可知,不同种植模式下,各处理 0~20 cm 土层 MBP/TP 均低于 20~40 cm 土层;各处理 0~20、20~40 cm 土层 MBP/TP 大小顺序均表现为 RC>RP>LC>CK;0~20 cm 土层,CK 与 LC、RC、RP 处理差异显著 ($P<0.05$),LC 与 RC、RP 处理差异显著 ($P<0.05$),但 RC、RP 处理间差异不显著 ($P>0.05$);20~40 cm 土层,CK 与 LC、RC、RP 处理差异显著 ($P<0.05$),RC 与 LC、RP 处理差异显著 ($P<0.05$),LC 与 RP 处理间差异不显著 ($P>0.05$)。结果表明,种植模式对土壤 MBP/TP 的比

值有显著影响,连作模式处理下土壤中活性有机磷所占的比例以及土壤中全磷向 MBP 的转化效率明显较低,而轮作模式则较高,其中以玉米-花生轮作处理(RC)效果最好。

2.5 土壤理化性质与生物学指标相关性分析 由表 3 可知,pH 与土壤生物学指标呈显著或极显著正相关 ($P<0.05$ 或 $P<0.01$);土壤有机质与土壤酶活性指标相关性不显著 ($P>0.05$),与土壤微生物生物量指标呈极显著正相关 ($P<0.01$);土壤全氮与土壤生物学指标(除过氧化氢酶)呈显著或极显著正相关 ($P<0.05$ 或 $P<0.01$);土壤全磷与土壤生物学指标(除过氧化氢酶)呈显著或极显著正相关 ($P<0.05$ 或 $P<0.01$);土壤全钾与土壤生物学指标(除磷酸酶)呈极显著正相关 ($P<0.01$);土壤碱解氮与土壤生物学指标呈显著或极显著正相关 ($P<0.05$ 或 $P<0.01$);土壤速效磷与土壤生物学指标呈显著或极显著正相关 ($P<0.05$ 或 $P<0.01$);土壤速效钾与土壤生物学指标(除磷酸酶)呈显著或极显著正相关 ($P<0.05$ 或 $P<0.01$)。

表 2 不同种植模式对土壤 MBC/MBN、MBC/SOC、MBN/TN、MBP/TP 比值的影响

Table 2 Effects of different planting patterns on MBC/MBN, MBC/SOC, MBN/TN, MBP/TP ratio in soil

处理 Treatment	土层深度 Soil depth cm	MBC/MBN %	MBC/SOC %	MBN/TN %	MBP/TP %
花生连作 CK	0~20	10.33±0.23 a	43.25±1.53 a	42.06±2.68 c	20.63±1.09 c
	20~40	11.18±0.38 a	38.99±1.19 c	35.07±0.65 b	31.37±0.46 c
玉米连作 LC	0~20	9.87±0.31 a	38.42±0.23 b	47.22±1.61 bc	39.43±0.65 b
	20~40	9.50±0.29 b	39.91±0.88 bc	41.28±1.63 a	44.01±0.32 b
玉米-花生轮作 RC	0~20	8.67±0.24 b	42.47±0.42 a	57.56±1.29 a	44.55±0.97 a
	20~40	9.14±0.27 b	46.07±0.19 a	46.17±1.37 a	55.94±3.11 a
花生-玉米轮作 RP	0~20	9.05±0.26 b	39.75±0.38 b	51.77±2.77 ab	44.04±0.91 a
	20~40	8.80±0.60 b	41.77±0.11 b	43.99±2.69 a	46.01±2.40 b

注:同列不同小写字母代表同一土层不同种植模式间差异显著 ($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters in the same column represent significant differences between different planting patterns in the same soil layer ($P<0.05$)

表 3 土壤理化性质与生物学指标相关性分析

Table 3 Correlation analysis of soil physicochemical properties and biological index

指标 Index	pH	有机质 SOC	全氮 TN	全磷 TP	全钾 TK	碱解氮 AN	速效磷 AP	速效钾 AK
土壤过氧化氢酶 CAT	0.827**	0.535	0.439	0.530	0.760**	0.599*	0.647*	0.697*
土壤磷酸酶 AKP	0.700*	0.357	0.877**	0.856**	0.524	0.733*	0.741*	0.535
土壤蔗糖酶 INV	0.858**	0.473	0.701*	0.864**	0.756**	0.780**	0.888**	0.735**
土壤蛋白酶 PRO	0.812**	0.145	0.721**	0.830**	0.834**	0.862**	0.947**	0.758**
微生物生物量碳 MBC	0.840**	0.884**	0.691*	0.730**	0.889**	0.906**	0.884**	0.827**
微生物生物量氮 MBN	0.793**	0.837**	0.658*	0.835**	0.872**	0.832**	0.953**	0.800**
微生物生物量磷 MBP	0.922**	0.961**	0.720**	0.821**	0.722**	0.751**	0.861**	0.738**

注: * 表示显著相关 ($P<0.05$), ** 表示极显著相关 ($P<0.01$)

Note: * means significant correlation ($P<0.05$), ** means extremely significant correlation ($P<0.01$)

3 讨论

不同种植模式对土壤理化性质有显著影响。该研究结果表明,连作模式 pH、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾含量明显较低,玉米与花生轮作后,土壤上述指标含量则有效提高。Dou 等^[30-31]研究发现,长期棉花连作会造成土壤有机碳含量降低,合理的轮作可有效改良土壤理化性质,增加土壤有机质含量,提高土壤肥力,这与该研究结果相似。

这是由于作物连续种植后,对土壤养分的吸收性单一,使一部分养分含量持续下降或积累,造成土壤养分失衡,而轮作模式可以协调不同作物之间养分吸收的局限性,养分得到均衡利用,从而提高土壤养分的有效性。该研究发现不同种植模式下表层土(0~20 cm)的土壤理化指标含量均高于底层土(20~40 cm),说明土壤理化指标含量表现下降趋势,这与郑超等^[32-34]的研究结果一致。这可能是由于作物的枯枝落

叶掉落在表层,并在土壤上腐化分解,促使土壤有机质及其他养分含量得到一定补充。

不同种植模式对土壤酶活性有显著影响。该研究结果表明,与连作模式相比,轮作模式能够显著提高土壤过氧化氢酶、磷酸酶、蔗糖酶、蛋白酶活性,其中以玉米-花生轮作处理(RC)对土壤酶活性的改良效果最优,这与赵思腾等^[13,35-36]的研究结果一致。这是因为同一作物长期连续种植会造成土壤养分失衡或过度消耗,土壤中病原微生物迅速繁殖,导致土壤酶活性下降。而轮作模式在一定程度上可以通过根系分泌物调整根际微生物群落的组成,改善土壤微生态环境,进而促进土壤酶活性的提高。该研究发现不同种植模式下表层土(0~20 cm)的各项酶活性均高于底层土(20~40 cm),说明土壤酶活性随土层深度的增加呈下降趋势,这与黄懿梅等^[37]的研究结果一致。这是因为土壤表层聚集了更多动植物及其有机残体,土壤微生物的种类和数量增多,生物活性增强从而释放出更多的酶,导致土壤表层酶活性高于底层。

不同种植模式对土壤微生物生物量有显著影响。该研究结果表明,种植模式显著影响了土壤微生物生物量碳、氮、磷含量。与连作模式相比,轮作模式能够提高土壤微生物生物量碳、氮和磷含量,其中以玉米-花生轮作处理(RC)对土壤微生物生物量含量的提升效果最显著,这与孟令波等^[38-39]的研究结果一致。这是因为长期种植单一作物容易导致土壤中养分失衡,作物根际环境破坏,微生物群落结构改变,导致微生物生物量含量降低。而轮作模式能改善作物根际土壤生态环境,从而导致土壤微生物生物量含量增加。该研究中不同种植模式下表层土(0~20 cm)的土壤微生物生物量碳、氮、磷含量均高于底层土(20~40 cm),说明土壤微生物生物量含量随土层深度的增加而下降,这与 Allison 等^[40]的研究结果一致。这是因为土壤表层作物根系分泌物及有机残体等积累较多,有机质丰富有利于土壤微生物的生长繁殖,土壤养分高,因此土壤表层的微生物生物量高于底层。

该研究中连作及轮作模式对土壤 MBC/MBN、MBC/SOC、MBN/TN、MBP/TP 比值有显著影响,说明种植模式是影响上述比值的一个重要因素,可作为表征土壤肥力水平的生物学指标。花生连作(CK)土壤的氮素供应能力更好是因为花生具有固氮作用。此外,该研究结果还表明土壤理化性质与土壤酶活性和微生物生物量有显著或极显著的相关关系,李磊等^[41-42]的研究也有类似结果。这是土壤养分、土壤酶和土壤微生物生物量协同发展的结果,土壤中营养物质的循环在很大程度上依赖微生物的活动以及土壤酶对底物的转化作用,而高有机质含量的土壤可促进微生物的大量繁殖,进而土壤酶活性和微生物生物量的增加,从以上相关性分析结果来看,土壤理化性质、土壤酶活性和微生物生物量均能很好地反映土壤的肥力状况,可以作为有效评价土壤质量的生物学指标。

4 结论

花生和玉米的种植模式对科尔沁沙地土壤肥力和土壤

微生态环境有显著影响。从土壤理化性质、酶活性及微生物生物量方面分析,相较于花生连作,玉米连作、玉米-花生轮作和花生-玉米轮作均能在统计学意义上显著提高土壤碳、氮、磷和有机质含量、土壤酶活性以及土壤微生物生物量碳、氮和磷含量,其中以玉米-花生轮作模式效果最好。在 0~40 cm 土层,各化学指标含量均表现为表层(0~20 cm)高于底层(20~40 cm),说明表层土壤养分积累较多、肥力较好。与花生连作相比,玉米-花生轮作土壤中有有机质的输入量和 MBC 的转化速率、土壤中氨态氮所占的比例及全氮向 MBN 的转化效率、土壤中活性有机磷所占的比例以及土壤中全磷向 MBP 的转化效率能显著提高,但是花生连作土壤的氮素供应能力更好。相关性分析表明,土壤 pH 和有机质、全氮、全磷、全钾、碱解氮、速效磷、速效钾含量与土壤生物学指标呈显著或极显著正相关($P < 0.05$ 或 $P < 0.01$);土壤有机质与土壤酶活性指标相关性不显著($P > 0.05$),与土壤微生物生物量指标呈极显著正相关($P < 0.01$),说明土壤养分指标与土壤酶活性和土壤微生物生物量的关系密切。综上所述,轮作模式优于连作模式,其中玉米与花生轮作的种植模式可以有效改善科尔沁沙地农田土壤质量,有利于该地农业的可持续发展,适合在该地区推广应用。

参考文献

- [1] 陈娟丽,赵学勇,刘新平,等.降雨量对科尔沁沙地3种沙生植物生长和生理的影响[J].中国沙漠,2019,39(5):163-173.
- [2] 陈银萍,牛亚毅,李伟,等.科尔沁沙地自然恢复沙质草地生态系统碳通量特征[J].高原气象,2019,38(3):650-659.
- [3] 蔡楚雄.科尔沁沙地南缘不同植被对沙地改良及风蚀影响研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2017.
- [4] 杨震.浅谈我国沙地沙漠化的成因及防治措施[J].科学技术创新,2020(2):153-154.
- [5] 赵志荣,许端阳,张绪教,等.2000—2015年内蒙古地区土地沙漠化脆弱性评估[J].水土保持研究,2020,27(1):168-175.
- [6] 李林强,邱黛玉,贾雪.连作轮作模式下当归蒜间作对当归质量的影响[J].干旱地区农业研究,2017,35(3):53-58.
- [7] 刘鑫慧,王晋民.芹菜连作土壤养分及酶活性变化研究[J].青海农林科技,2019(2):1-4,64.
- [8] 孙小花,胡新元,陆立银,等.黄土高原马铃薯不同连作年限土壤理化性质及微生物特性[J].干旱地区农业研究,2019,37(4):184-192.
- [9] 崔勇.马铃薯连作造成的影响及连作障碍防控技术[J].作物杂志,2018(2):87-92.
- [10] 殷继忠,李亮,接伟光,等.连作对大豆根际土壤细菌菌群结构的影响[J].生物技术通报,2018,34(1):230-238.
- [11] CAKMAK I. Plant nutrition research: Priorities to meet human needs for food in sustainable ways[J]. Plant and soil,2002,247:3-24.
- [12] 王洪预.东北春玉米不同种植模式比较研究[D].长春:吉林大学,2019.
- [13] 赵思腾,师尚礼,陈建纲,等.陇中旱作区不同轮作方式对土壤碳、氮含量及酶活性的影响特征[J].草地学报,2019,27(4):817-824.
- [14] 黄玉茜.花生连作障碍的效应及其作用机理研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2011:31.
- [15] 李成清,张雅,田忠玲,等.茄子连作与轮作土壤养分、酶活性及微生物群落结构差异分析[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2017,43(5):561-569.
- [16] 高志奎,蒋菁,唐秀梅,等.水旱轮作条件下花生品种筛选及土壤特性变化分析[J].南方农业学报,2018,49(12):2403-2409.
- [17] 牛小霞,牛俊义.不同轮作制度对定西地区农田杂草群落的影响[J].干旱地区农业研究,2017,35(4):223-229.
- [18] 樊良新,佟艳.河南省探索实行耕地轮作休耕制度研究[J].经济研究导刊,2017(17):16-17,36.
- [19] 何振嘉,王启龙.风沙草滩区盐碱地整治对土壤理化性质的影响[J].西部大开发(土地开发工程研究),2020,5(2):73-78.

3 结论

(1) 研究区农田土壤中 Pb、Cr、As、Hg 的平均含量高于河南省土壤背景值, Cr 含量的平均值低于河南省土壤背景值。研究区内 Pb、Cd、As 含量达到轻度及以上污染等级的点位数占比分别为 6.10%、44.30% 和 1.33%。

(2) 研究区农田土壤中 Pb、Cd、Cr、As、Hg 的内梅罗综合污染指数分别为 3.14、14.19、0.38、2.31、0.42, 依据分级标准, Cd、Pb 的污染等级为重度污染, As 的污染等级为中度污染, Cr、Hg 的污染等级为安全级。

(3) 单项潜在生态风险指数 (E_i^r) 的结果表明, 研究区农田土壤中 Cd 为中等生态风险, Pb、Cr、As、Hg 的生态风险较低。综合潜在生态危害指数 (RI) 的结果表明, 研究区 93.10% 的调查点位的生态风险较低, 6.90% 的调查点位为中等及以上危害水平; 整个研究区农田土壤综合潜在生态危害等级为轻微生态危害水平。Cd 是影响研究区农田土壤综合潜在生态风险的主要元素。

(4) 相关分析和主成分分析结果表明, 研究区农田土壤中 5 种元素的来源可以分为 3 类: PC1 为工农业源因子, PC1 包括 Pb、Cd; PC2 为自然源因子, PC2 包括 Cr、As; PC3 为工业源因子, 仅包括 Hg; Cr 在 PC1 和 PC2 上均有相当的荷载, Cr 受成土因素及人为活动的共同控制。

参考文献

- [1] LI Y, GOU X, WANG G, et al. Heavy metal contamination air source in air agricultural soil in central Gansu Province, China[J]. Journal of environmental sciences, 2008, 20(5): 607-612.
- [2] 章明奎, 王浩, 张慧敏. 浙东海积平原农田土壤重金属来源辨识[J]. 环境科学学报, 2008, 28(10): 1946-1954.
- [3] 邱孟龙, 李芳柏, 王琦, 等. 工业发达城市区域耕地土壤重金属时空变异与来源变化[J]. 农业工程学报, 2015, 31(2): 298-305.
- [4] WEN H J, ZHANG Y X, CLOUET C, et al. Tracing sources of pollution in soils from the Jinding Pb-Zn mining district in China using cadmium and lead isotopes[J]. Applied geochemistry, 2015, 52: 147-154.
- [5] 赵振, 史焯弘, 毛小晶, 等. 某冶炼厂周边土壤重金属污染评价分析及

- 源解析研究[J]. 中国无机分析化学, 2020, 10(4): 22-27.
- [6] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [7] 吕悦风, 孙华. 浙江某县耕地土壤重金属空间分异特征、污染评价及来源分析[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(1): 95-102.
- [8] HAKANSON L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. Water research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [9] 徐争启, 傅师军, 虞先国, 等. 潜在生态危害指数法评价中重金属毒性系数计算[J]. 环境科学与技术, 2008, 31(2): 112-115.
- [10] 河南省土壤普查办公室. 河南土壤[M]. 北京: 中国农业出版社, 2004.
- [11] 穆利, 王跃华, 徐亚平, 等. 湖南省某县稻田土壤重金属污染特征及来源解析[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(3): 573-582.
- [12] 陈碧珊, 苏文华, 罗松英, 等. 湛江特呈岛红树林湿地土壤重金属含量特征及污染评价[J]. 生态环境学报, 2017, 26(1): 159-165.
- [13] 吕占禄, 张金良, 陆少游, 等. 某区生活垃圾焚烧发电厂周边及厂区内土壤中重金属元素的污染特征及评价[J]. 环境科学, 2019, 40(5): 2483-2492.
- [14] 邹曦, 郑志伟, 张志永, 等. 三峡水库小江流域消落区土壤重金属时空分布与来源分析[J]. 水生态学杂志, 2012, 33(4): 33-39.
- [15] 李晋昌, 张红, 石伟. 汾河水库周边土壤重金属含量与空间分布[J]. 环境科学, 2013, 34(1): 116-120.
- [16] 柴世伟, 温琰茂, 张云霓, 等. 广州市郊区农业土壤重金属含量特征[J]. 中国环境科学, 2003, 23(6): 592-596.
- [17] GUO G H, WU F C, XIE F Z, et al. Spatial distribution and pollution assessment of heavy metals in urban soils from southwest China[J]. Journal of environmental sciences, 2012, 24(3): 410-418.
- [18] LIU Y, MA Z W, LV J S, et al. Identifying sources and hazardous risks of heavy metals in topsoils of rapidly urbanizing East China[J]. Journal of geographical sciences, 2016, 26(6): 735-749.
- [19] 刘青桦, 邓时强, 赵元艺, 等. 西藏琼孜勒勤床区域性土壤重金属元素地球化学特征及来源解析[J]. 地球学报, 2018, 39(4): 481-490.
- [20] 周旭, 吕建树. 山东省广饶县土壤重金属来源、分布及生态风险[J]. 地理研究, 2019, 38(2): 414-426.
- [21] ŠAJN R, HALAMIĆ J, PEH Z, et al. Assessment of the natural and anthropogenic sources of chemical elements in alluvial soils from the Drava River using multivariate statistical methods[J]. Journal of geochemical exploration, 2011, 110(3): 278-289.
- [22] 邹建美, 孙江, 戴伟, 等. 北京近郊耕作土壤重金属状况评价分析[J]. 北京林业大学学报, 2013, 35(1): 132-138.
- [23] 王梅, 黄标, 孙维侠, 等. 强烈人为作用下城镇周围汞的空间变异及其积累迁移规律[J]. 土壤学报, 2011, 48(3): 506-515.
- [24] 于元赫, 吕建树, 王亚梦. 黄河下游典型区域土壤重金属来源解析及空间分布[J]. 环境科学, 2018, 39(6): 2865-2874.

(上接第 54 页)

- [20] 朱永青, 崔云霞, 李伟迪, 等. 太沭河流域不同用地方式下土壤 pH 值、有机质及氮磷含量特征分析[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(2): 171-178.
- [21] 魏伶. 白云鄂博矿区土壤养分与苔藓种类分布及其稀土富集能力的关系研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2019.
- [22] 牛雅琼, 吴兴洪, 冉斌, 等. 豆科绿肥翻压对猕猴桃产质量和土壤肥力的影响[J]. 北方园艺, 2020(5): 87-94.
- [23] 孙志祥, 韩上, 武际, 等. 秸秆还田对双季稻产量和土壤钾素平衡的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(9): 9-13.
- [24] 孙建, 刘苗, 李立军, 等. 免耕与留茬对土壤微生物量 C、N 及酶活性的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(10): 5508-5515.
- [25] 张艾明, 刘云超, 李晓兰, 等. 水肥耦合对紫花苜蓿土壤磷酸酶活性的影响[J]. 生态学杂志, 2016, 35(11): 2896-2902.
- [26] 费裕路, 路锦, 刘丽, 等. 铝胁迫对不同林分土壤中杉木幼苗根际土壤酶活性和微生物的影响[J]. 东北林业大学学报, 2020, 48(1): 74-79.
- [27] 赵月, 王春雨, 隋跃宇, 等. 基于玉米大豆轮作的黑土玉米农田酶活性对不同耕层厚度的响应[J]. 玉米科学, 2019, 27(6): 95-103.
- [28] 徐欣, 郑利远, 周珂, 等. 长期施肥对不同有机质水平黑土蛋白酶活性及氮素的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(1): 44-48.
- [29] 孙冰洁, 贾淑霞, 张晓平, 等. 耕作方式对黑土表层土壤微生物生物量碳的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(1): 101-107.
- [30] DOU F G, WRIGHT A L, MYLAVARAPU R S, et al. Soil enzyme activities and organic matter composition affected by 26 years of continuous cropping[J]. Pedosphere, 2016, 26(5): 618-625.

- [31] 陈光荣, 王立明, 杨如萍, 等. 西北灌区薯/豆连续套作对系统产量及土壤肥力的影响[J]. 草业学报, 2017, 26(10): 46-55.
- [32] 郑超, 郭治兴, 袁宇志, 等. 广东省不同区域农田土壤酸化时空变化及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2019, 30(2): 593-601.
- [33] 莫晶, 闫文德, 刘曙光, 等. 油茶-花生间作土壤酶活性与养分的关系[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(6): 89-95.
- [34] 陈浩, 魏立本, 王亚麒, 等. 烤烟不同种植施肥模式对土壤养分、酶活性及细菌多样性的影响[J]. 南方农业学报, 2019, 50(5): 982-989.
- [35] 刘文清, 崔广娟, 王芳, 等. 香蕉-甘蔗轮作对土壤养分含量及酶活性的影响[J]. 广东农业科学, 2019, 46(8): 86-96.
- [36] 李晓婷, 李立军, 李杨, 等. 轮作方式对土壤微生物量及酶活性的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(9): 68-73.
- [37] 黄懿梅, 安韶山, 曲东, 等. 黄土丘陵区植被恢复过程中土壤酶活性的响应与演变[J]. 水土保持学报, 2007, 21(1): 152-155.
- [38] 孟令波, 刘彤彤, 张春怡, 等. 棚室茄子不同栽培方式对土壤微生物多样性的影响[J]. 东北农业大学学报, 2017, 48(11): 18-25.
- [39] 杨淑莉, 朱安宁, 张佳宝, 等. 免耕对小麦-玉米轮作下玉米季土壤微生物生物量碳、氮的影响[J]. 土壤通报, 2010, 41(4): 802-806.
- [40] ALLISON V J, YERMAKOV Z, MILLER R M, et al. Using landscape and depth gradients to decouple the impact of correlated environmental variables on soil microbial community composition[J]. Soil biology and biochemistry, 2007, 39(2): 505-516.
- [41] 李磊. 轮作条件下化肥减量对土壤养分及微生物活性的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2018.
- [42] 黄容, 高明, 万毅林, 等. 秸秆还田与化肥减量配施对稻-菜轮作下土壤养分及酶活性的影响[J]. 环境科学, 2016, 37(11): 4446-4456.