

DOI: 10.11766/trxb202002210685

马胜兰, 况福虹, 唐家良, 王艳强, 吴鹏飞, 朱波. 种植模式对川中丘陵石灰性紫色土结构和地力的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(4): 935-947.

MA Shenglan, KUANG Fuhong, TANG Jialiang, WANG Yanqiang, WU Pengfei, ZHU Bo. Effects of Planting Patterns on Soil Structure and Fertility of Calcareous Purple Soil in Hilly Areas of Central Sichuan Basin[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(4): 935-947.

## 种植模式对川中丘陵石灰性紫色土结构和地力的影响\*

马胜兰<sup>1, 2, 3</sup>, 况福虹<sup>1†</sup>, 唐家良<sup>1</sup>, 王艳强<sup>1</sup>, 吴鹏飞<sup>2</sup>, 朱波<sup>1</sup>

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 西南民族大学青藏高原研究院, 成都 610041; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 基于田间长期定位试验, 通过原位监测和计算机断层扫描技术相结合的方法, 分析种植模式对川中丘陵石灰性紫色土结构和地力的影响。结果表明, 玉米-小麦 (MW) 模式耕层土壤孔隙配比合理且连通性好, 有利于耕层保水保肥和土壤可持续利用, 但该模式土壤动物丰富度和经济效益偏低。玉米-油菜 (MR) 模式土壤孔隙结构较玉米-小麦模式差, 但腐食性土壤动物丰富, 有利于改善土壤结构, 且经济效益优于玉米-小麦模式。玉米-红薯-小麦 (MWP) 模式经济效益最高, 作物类型和孔隙结构有利于土壤动物生存繁殖, 但该体系耕层土壤孔隙结构不利于保水保肥, 且养分消耗量高, 不利于土壤养分积累和长期地力维护。该区传统粮油种植模式利弊共存, 选择时需因地制宜、趋利避害进行综合评估。

**关键词:** 种植模式; 石灰性紫色土; 土壤孔隙; 土壤养分; 土壤动物; 土壤质量

中图分类号: S-3 文献标志码: A

## Effects of Planting Patterns on Soil Structure and Fertility of Calcareous Purple Soil in Hilly Areas of Central Sichuan Basin

MA Shenglan<sup>1, 2, 3</sup>, KUANG Fuhong<sup>1†</sup>, TANG Jialiang<sup>1</sup>, WANG Yanqiang<sup>1</sup>, WU Pengfei<sup>2</sup>, ZHU Bo<sup>1</sup>

(1. Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 2. Institute of Qinghai-Tibetan Plateau, Southwest Minzu University, Chengdu 610041, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** [Objective] Planting pattern is an important factor affecting soil physico-chemical properties, dietary preference of soil fauna, and hence soil water and nutrient movement in a soil profile. This study aims to evaluate characteristics of the planting patterns common in the basin and screen out ones suitable to the calcareous purple soil in the central Sichuan basin. [Method] Based on a long-term in situ field experiment, three planting patterns, i.e. maize-wheat (MW), maize-oil rape (MR) and maize-sweet potato-wheat (MWP), were selected for comparison in this study. Using laboratory analysis in combination with the computer tomography micro-scanning technology, analysis was performed of effects of the planting patterns on soil physical properties, nutrient status and soil fauna and on calcareous purple soil quality and productivity as well. Moreover, pros and cons

\* 国家重点研发计划项目 (2018YFD0200700, 2016YFD0200309-7) 资助 Supported by the National Key R&D Program of China (Nos.2018YFD0200700, 2016YFD0200309-7)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: kuangfuh@imde.ac.cn

作者简介: 马胜兰 (1992—), 女, 河北沧州人, 硕士研究生, 从事农业生态研究。E-mail: 1432167911@qq.com.

收稿日期: 2020-02-21; 收到修改稿日期: 2020-07-02; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2020-09-02

of the planting patterns were distinguished to select suitable planting patterns 【 Result 】 Number of the pores 25~500  $\mu\text{m}$  in equivalent aperture in the cultivated layer, was ultra-significantly and positively related to content of soil organic matter, total nitrogen (N) and available N, separately, which implies that the pores contribute greatly to storage of soil organic matter, total N and available N in the cultivated layer. However, number of the pores > 500  $\mu\text{m}$  in equivalent aperture was ultra-significantly and positively related to content of available phosphorus (P), which indicates that large-size pores are conducive to retention of available P. In terms of organic matter, total N, available N and available potassium (K) in the cultivated soil layer, the three planting patterns all exhibited an order of MW > MR > MWP. Treatment MW was higher than the other two in compactness of the 0~20 cm soil layer and in looseness of the >35cm soil layer; with pores 25~1 000  $\mu\text{m}$  and > 1 000  $\mu\text{m}$  in equivalent aperture accounting for 50.2% and 49.8%, respectively, of the total pore volume, forming a proper proportion of pores, evenly distributed and well connected, which contributes greatly to soil structure and soil quality. However, in Treatment MW, soil fauna was lower in total population than in the other two. Consequently the treatment was the lowest in annual total yield and economic output. Treatment MR was quite similar to Treatment MW in soil physical properties with pores 25~1 000  $\mu\text{m}$  and > 1 000  $\mu\text{m}$  in equivalent aperture accounting for 31.6%, and 68.4%, respectively of the total and being poorly connected; however, the treatment was significantly higher than the other two in total population and species of scavenger soil animals and more significant in soil available P accumulation. Treatment MWP had a plough layer loose in texture, and was significantly higher than that in the other two Treatments in saturated water content, saturated conductivity, mean porosity soil fauna abundance and annual crop yield and economic output; in the Treatment pores 25 ~ 1000 $\mu\text{m}$  and > 1000 $\mu\text{m}$  in equivalent aperture accounted for 20.5% and 79.5%, respectively, and higher proportion of the latter facilitated downward movement of water and nutrients, thus leading to lower contents of soil available P and readily available K and exposure to higher risks of nutrient consumption and loss; moreover, the treatment was much higher in abundant and species variety of soil animals. 【 Conclusion 】 The three planting patterns are the traditional ones in the area and all have their own advantages and disadvantages. It is advisable to choose site-specific ones and to make full use of the pros and avoid the cons. The MW pattern leads to formation of a plough layer with soil pores reasonable in proportion and good in connectivity, which is conducive to water and nutrient conservation and soil sustainable utilization, however, the pattern tends to be lower in soil fauna abundance and economic benefits than MR and MWP. Though MR is worse in soil pore structure than MW, it is conducive to abundance of saprophytic soil fauna, which helps improve the soil structure and hence higher in economic benefit than MW. MWP is the highest in economic benefit and its crop types and pore structure are good to the survival and reproduction of soil fauna, however, the pattern causes soil pore structure unfavorable to water and nutrient retention. So it may need higher nutrient input to keep high stable yields, which is negative to soil nutrient accumulation and long-term fertility.

**Key words:** Planting pattern; Calcareous purple soil; Soil pore; Soil nutrient; Soil fauna; Soil quality

种植模式影响作物对养分的吸收和分配<sup>[1]</sup>, 影响土壤质量及农业可持续性<sup>[2]</sup>。适宜的种植模式能提高复种指数、减少化肥投入、改善土壤结构和养分利用, 能一定程度实现土地种养结合, 利于农业高产增产, 并减少病虫害发生等<sup>[3-4]</sup>。不同种植模式对土壤孔隙数量及构成有明显影响, 而土壤孔隙是水分、空气、根系、土壤动物和微生物在土体内分布和活动的主要场所, 其特征(形状、大小、数量搭配及空间分布)在很大程度上可描述土壤质量的好坏<sup>[5]</sup>, 同时孔隙结构空间分布又影响水分、养分和土壤动物在土壤中分布和运动<sup>[6]</sup>, 综合研究种植

模式对土壤物理、化学和生物学特性的影响, 有助于全面了解和评价其对土壤质量的影响。

四川盆地农业生产除了成都平原外, 主要集中在紫色丘陵区, 该区总面积为  $15.8 \times 10^4 \text{ km}^2$ , 耕地面积占 29.5%, 其中旱地约占 40%, 以丘陵坡地为主, 耕地资源少, 垦殖度高<sup>[7]</sup>。四川盆地种植业以粮食种植为主, 川中丘陵区粮食播种面积平均为  $5.54 \times 10^6 \text{ hm}^2$ , 约占农作物总播种面积的 80%, 其中小麦、玉米和红薯各占粮食总产量的 17.0%, 14.0% 和 13.0%, 长期以来形成了玉米-小麦、玉米-油菜、玉米-红薯-小麦等区内传统的粮油作物种植模式<sup>[8]</sup>。

川中丘陵地区既是长江上游农业最发达的区域，也是区内农业生产最有潜力的地区之一<sup>[9]</sup>，近年来对该地区的农业投入和关注持续增加。本研究针对川中丘陵区：(1) 坡耕地多由紫色砂页岩发育而成，土壤矿质养分供应较充足，但紫色土易受侵蚀，区内水土流失严重；(2) 旱坡地土层浅薄，保水保肥能力差，农业生产力不稳定等问题，研究并评估区域内粮油旱作模式对土壤特征的影响，对了解和维持健康且高质量的农田土壤具有重要意义，同时对响应农业绿色可持续发展和保护土壤健康的国家政策息息相关。本研究基于川中丘陵地区粮油种植模式长期定位试验(2006—至今)，测定并分析不同种植模式下，耕层土壤物理性质、养分特征和土壤动物食性特征，旨在探明和评估川中丘陵地区传统粮油种植模式对区内土壤结构和养分的影响，为优化区域传统粮油种植模式提供科学依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

试验设置在中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站(105°27'E, 31°16'N)土壤要素辅助观测长期样地内进行。试验站位于四川盆地中北部盐亭县林山乡，地处嘉陵江和涪江分水岭，海拔365~577 m。区内属中亚热带湿润季风气候，多年平均气温17.3℃，极端最高气温和最低气温分别为40℃和-5.1℃，多年平均降雨量826 mm(1981—2006年)，近年来年平均降雨量有上升趋势，达到995 mm(2008—2014年)，降雨季节分布不均，集中在夏季，春夏秋冬四季分别约占全年降雨量的6%、65%、20%和9%。汛期暴涨暴落，无霜期294 d。区内地形为中深丘，由水平砂页岩风化而形成多级台地，土壤以石灰性紫色土为主，该土壤自然肥力较高，通透性良好，适于农业耕作，但土层浅薄，平均土层厚度为30~80 cm<sup>[10]</sup>，保水保肥差，有机质和氮含量低。旱地典型粮食作物种植模式为玉米-小麦、玉米-油菜、玉米-红薯-小麦，冬季种植小麦和油菜，夏季种植玉米。

### 1.2 供试土壤

供试土壤为发育于侏罗系蓬莱镇组紫色砂页岩上的石灰性紫色土，长期定位试验设置初期0~15 cm耕层土壤基本理化性质：容重为1.54 g·cm<sup>-3</sup>，

砂粒、粉粒、黏粒和洗矢量平均含量分别为25.1%、44.7%、21.5%和8.7%，pH 8.36，有机质、全氮、全磷和全钾含量分别为11.33、0.75、0.73和23.32 g·kg<sup>-1</sup>，碱解氮、有效磷和速效钾含量分别为58.55、5.28和86.42 mg·kg<sup>-1</sup>。

### 1.3 实验设计

根据川中丘陵地区传统粮油作物种植模式，在土壤要素辅助观测长期样地设置玉米-小麦轮作(MW)、玉米-油菜轮作(MR)和玉米-红薯-小麦轮套作(MWP)3个处理，每个处理随机设置3个平行，每个试验小区面积为50 m<sup>2</sup>(5 m×10 m)。小麦、玉米和油菜种植前，先使用前茬作物秸秆50%粉碎(长度10~15 cm)还田(按小麦、玉米和油菜常规施肥处理的大田秸秆平均产量计算并田量)，然后采用旋耕机耕地，耕作深度为15~20 cm，小麦和油菜种植前均在翻耕后一次性施肥(基肥)，耕地、施肥和播种(油菜移栽)同时进行，生长期不追肥，玉米在播种期穴施基肥，拔节期撒施追肥(基肥和追肥比例3:2)，红薯在玉米播种后套作于行间。肥料类型为：碳酸氢铵(基肥，纯N 17%)，尿素(追肥，纯N 46.7%)，过磷酸钙(含P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%)和氯化钾(含K<sub>2</sub>O 60%)，玉米(含红薯套作)、小麦和油菜季氮肥施用量分别为N 150、130和130 kg·hm<sup>-2</sup>，磷钾肥施用量分别为P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 72 kg·hm<sup>-2</sup>和K<sub>2</sub>O 36 kg·hm<sup>-2</sup>。冬小麦、油菜、夏玉米和红薯生长周期分别约为200、205、110和120 d。

### 1.4 样品采集与分析

2018年夏玉米/红薯收获前，利用SC-900土壤紧实度仪原位测定土壤剖面紧实度，收获后采集0~15 cm表层土壤环刀样品，采用直径4 cm，高5 cm的PVC管采集耕层原状土柱，并采用土钻按照反S型采集8~10钻土，混合为1个土样，同时使用根钻采集0~15 cm和15~30 cm土壤样品，每个土层采集约300 g。环刀土壤样品用于测定土壤容重、饱和含水率和饱和导水率<sup>[11]</sup>；利用计算机断层扫描技术对PVC管内原状土柱进行扫描(扫描仪：Phoenix Nanotom S micro-CT scanner，设置扫描电压为100 kV，电流100 μA，时间间隔1250 ms，分辨率25 μm，即每个土柱获得2000张截面图)，获取耕层原状土的孔隙数量、体积、分布、形状、连通性等特征参数；土钻所采集的耕层混合土样按照《陆地生态系统土壤长期观测质量保证与质量控制》的要求风干

制样<sup>[12]</sup>, 测定颗粒组成和养分含量。土壤颗粒组成使用吸管法测定; 有机质和全氮使用碳氮分析仪 (Vario EL cube, 德国 Elementar) 测定; 有碱解氮、有效磷和速效钾分别采用碱解扩散法、钼锑抗比色法和火焰光度计法进行测定<sup>[13]</sup>, 根钻中的土样使用干漏斗装置对干性中小型土壤动物进行分离 (60 W 白炽灯分离 48 h), 分离后的标本保存在 75% 酒精中用于土壤动物食性鉴定。所有分离样品在显微镜和解剖镜下鉴定、计数, 土壤动物种类鉴定参考《中国亚热带土壤动物》和《中国土壤动物检索图鉴》<sup>[14]</sup>, 再根据不同土壤动物的类型确定其食性并分类。

### 1.5 数据来源与处理

本研究所有数据来源于中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站土壤要素辅助观测长期样地。该样地于 2006 年夏玉米季开始进行常规原位监测工作, 监测内容包括作物产量及常规土壤养分。本研究于 2018 年夏玉米季采集土壤样品, 测定土壤物理、养分及土壤动物食性等相关参数。种植模式对土壤养分的影响属于中长期过程, 因此土壤养分除 2018 年实测数据外, 选择了该样地 2012 年历史监测数据进行比较。由于作物产量受当年气候和气象条件影响较大, 同时新建样地后由于土壤环境尚不够稳定也容易引起产量波动, 本研究使用该样地 2009—2018 年作物平均产量进行比较。

CT 扫描截面图像利用三维图像重建及分析系统软件 V1.0 进行处理, 获取每张扫描图像的目标二值图 (目标物质灰度值 255 标记, 其余物质灰度值 0 标记), 并将获得的二值图导入三维模型形态学分析软件, 重建扫描样本三维形态并计算相关参数。文中使用 Office 2016、SPSS 20.0 和 Origin 8.5 软件对实验数据进行计算、统计分析及作图。

## 2 结果

### 2.1 种植模式对土壤物理特征的影响

MWP 处理耕层土壤容重显著低于 MW 和 MR 处理, 饱和含水率和饱和导水率则显著高于其他处理, 可见该处理耕层土壤密度小, 孔隙多, 水分向深层土壤移动较快 (表 1)。土壤颗粒分为砾石 (>2mm)、砂粒 (0.05~2.0mm)、粉粒 (0.002~0.05 mm) 和黏粒 (<0.002 mm) 4 个等级。本研究各处理耕层土壤无砾石且粉粒含量比例高, 处理间黏粒含量无显著差异。MW 处理砂粒含量显著低于 MR 和 MWP 处理, 但粉粒含量显著高于这两个处理。粗砂不利于水分和养分吸附和保持, 粉粒间表面吸附和毛管力较砂粒强, MW 处理的颗粒组成更有利于保水保肥, 而 MWP 处理砂粒含量高, 通透性好, 更利于水分和养分向下移动 (表 1)。

表 1 不同处理耕层土壤物理性质比较

Table 1 Soil physical properties in different treatments

处理 Treatment	容重 Bulk density / (g·cm <sup>-3</sup> )	饱和含水率 Saturated water content / %	饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity / (mm·min <sup>-1</sup> )	砂粒 (0.05~2.0 mm) Sand content / %	粉粒 (0.002~0.05 mm) Silt content / %	黏粒 (< 0.002 mm) Clay content / %
玉米-小麦 MW	1.28±0.07a	26.31±0.01b	0.35±0.13b	19.48±5.82b	39.22±2.03a	21.56±1.49a
玉米-油菜 MR	1.29±0.06a	26.64±0.01b	0.07±0.01b	25.59±0.50a	36.42±2.67b	21.42±0.23a
玉米-红薯-小麦 MWP	1.16±0.06b	34.12±0.03a	3.62±0.85a	27.13±4.00a	37.45±1.57b	20.71±0.63a

注: 小写字母表示处理间差异显著性 ( $P<0.05$ ) Note: Lowercase letters indicate significant difference between treatments ( $P<0.05$ )

不同种植模式对土壤含水率的影响如图 1a 所示, 3 个处理土壤实际含水率变化趋势一致, 表层土壤含水率最高, 随土层加深土壤含水率先降低后略有上升。0~15 cm 土层 MR 处理实际含水率较 MW 和 MWP 处理显著低 2.6% 和 2.9%; 15~30 cm 土层各处理无显著差异; 30~50 cm 土层与 0~15 cm 土层趋势相同。各处理土壤紧实度均随土层

深度增加而增大 (图 1b), 在 20 cm 土层附近出现明显拐点, 该拐点和旋耕机旋耕深度有密切关系, 且 0~20 cm 土层中, MW 较 MR 和 MWP 两个处理的土壤紧实度高。3 个处理 22.5~32.5 cm 土层的土壤紧实度较均匀, 处理间无差异。各处理土壤紧实度在 35 cm 以下随土层深度增加而明显增加, MR 和 MWP 两个处理较 MW 高。

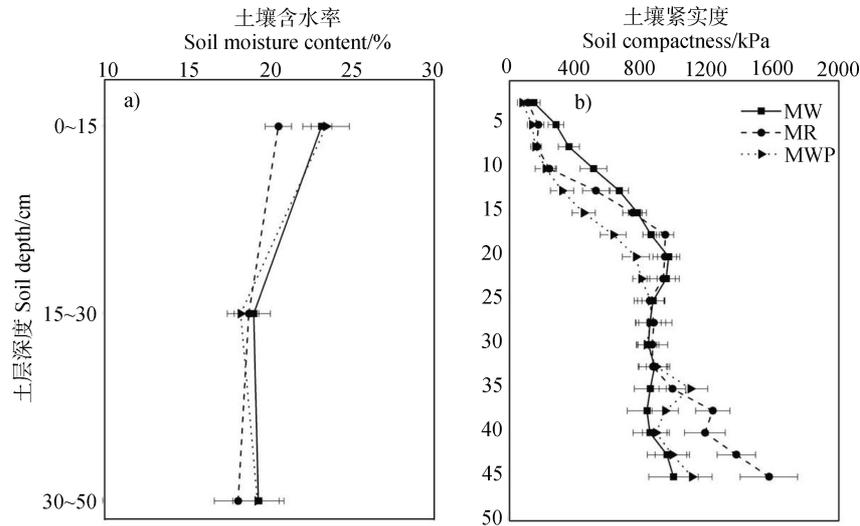


图 1 夏玉米收获期土壤剖面紧实度与含水率

Fig. 1 Compactness and soil moisture content of the soil profile at the harvest stage of summer maize

本研究中 CT 扫描范围属土壤通气孔隙(当量孔径 $>25\ \mu\text{m}$ ),将土壤大孔隙划分为 $25\sim 100$ 、 $100\sim 500$ 、 $500\sim 1\ 000$ 和 $>1\ 000\ \mu\text{m}$ 四个范围。3个处理的孔隙数量以 $100\sim 500\ \mu\text{m}$ 当量孔径的孔隙为主,占孔隙总数量40%以上,但该范围孔隙体积仅约占总孔隙体积的12%(表2),MWP处理最高,处理

间差异小。当量孔径 $>1\ 000\ \mu\text{m}$ 的孔隙数量最少,但体积达到总孔隙体积的50%及以上,MWP处理 $>1\ 000\ \mu\text{m}$ 的孔隙体积占总孔隙体积的80%,平均孔隙直径趋大。MW处理 $>1\ 000\ \mu\text{m}$ 的大孔隙数量明显高于MR和MWP处理,但总体积较这两个处理分别低18.6%和29.7%,孔隙平均直径趋小。

表 2 不同处理土壤孔隙特征

Table 2 Characteristics of soil pore in different treatments

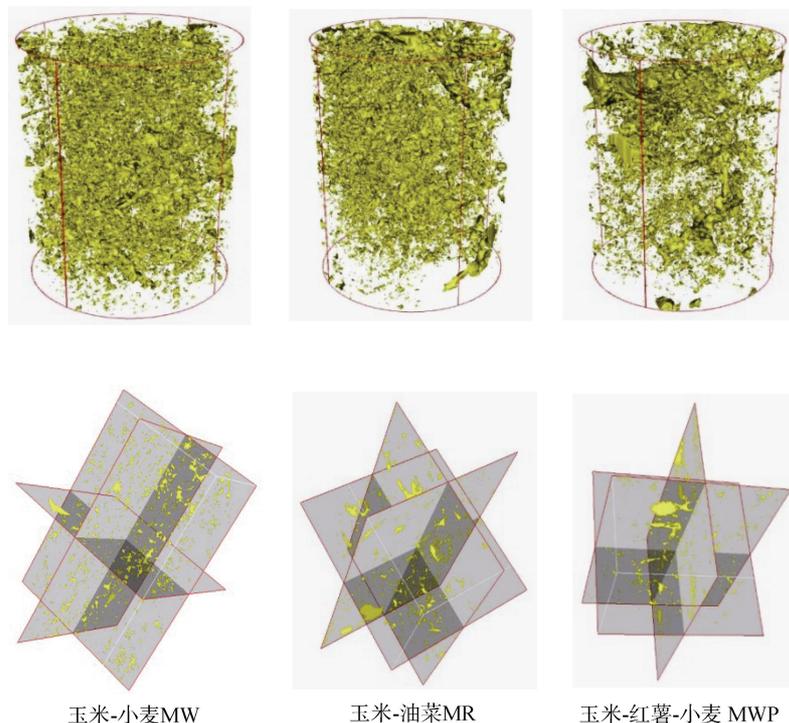
处理 Treatment	平均孔隙度 Average porosity /%	孔隙数量比/体积比 Porosity quantity /volume ratio /%				平均孔喉比 Average ratio of channel to throat	平均喉道截面积 Average sectional area of throat / $\mu\text{m}^2$	孔隙形状因子 Average shape factor	平均配位数 Average coordination number of pores
		25 ~ 100	100 ~ 500	500 ~ 1 000	>1 000				
		$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$	$\mu\text{m}$				
玉米-小麦 MW	46.4	33.3/0	43.3/12.7	12.7/37.5	10.7/49.8	0.34	0.13	0.70	0.53
玉米-油菜 MR	51.3	45.3/0	45.9/12.4	5.2/19.2	3.6/68.4	0.13	0.17	0.80	0.33
玉米-红薯-小麦 MWP	56.22	44.3/0	48.3/11.0	5.0/9.5	2.4/79.5	0.03	0.46	0.81	0.30

平均孔喉比是孔隙直径与喉道直径平均值的比值,范围在 $0\sim 1$ 之间,比值越接近1,则反映孔隙越均匀,平均配位数则反应孔隙间连通性。MW处理平均孔喉比较MR和MWP处理更接近1,平均配位数是这两个处理的1.6倍和1.8倍(表2),可见MW种植模式耕层土壤孔隙更均匀且孔隙间连通性较好,MR处理耕层土壤孔隙均匀性和连通性较MW

处理差。MWP处理平均孔喉比和平均配位数最低,说明其孔隙均匀性和连通性均最差。喉道截面积反映水分和养分运移路径宽度,MWP处理喉道截面积为MW和MR处理的3.5倍和2.7倍,更利于水分和养分通过并向下层土壤运移。平均孔隙形状因子表征孔隙近圆度,研究表明规则的圆形孔隙有利于水分在土壤中传输,同时有利于作物吸收利用<sup>[15]</sup>。

MW 处理较其他处理近圆度偏低, 但处理间差异较小。从不同处理原状土柱三维截面图(图 2)可直观看出, MW 处理耕层土壤孔隙较其他处理多且分布较

均匀, 连通性好, MR 处理孔隙大小不匀称分布, 均匀性较 MW 处理差, 土柱下部孔隙较少, MWP 处理孔隙数量最少, 分布不均匀, 粗大孔隙明显。



注: 黄色为土壤孔隙, 土柱中白色为土壤, 截面图中灰色为土壤。Note: Yellow stands for soil porosity, white in the column for soil and grey in the sectional diagram for soil.

图 2 不同处理原状土柱三维复原及三维截面图

Fig. 2 3D restoration and 3D cross-sectional diagram of the undisturbed soil column relative to treatment

## 2.2 种植模式对土壤养分特征的影响

种植模式影响耕层土壤 pH、养分含量及有效性, 进而影响作物生长发育。本研究耕层土壤 pH 在 8.29~8.53 之间(图 3a), 各处理 2018 年 pH 较 2012 年均有所上升, MWP 处理显著升高, 处理间在相同年份无显著差异。图 3b 所示各处理 2012 和 2018 年耕层有机质含量均无显著变化, 但 2012 年 MWP 处理有机质含量显著高于 MW 处理, 到 2018 年已无显著差异。2012 年三个处理土壤全氮含量无显著差异(图 3c), 2018 年, MW 和 MR 处理无显著变化, MWP 处理全氮含量降低并显著低于 MW 处理, 可见 MWP 处理有机质和全氮含量降低趋势明显。

碱解氮反映土壤有效氮情况, 图 3d 显示, MW 处理 2012 年碱解氮含量显著低于 MR 处理, 2018 年与其他处理无显著差异。2018 年 MW、MR 和

MWP 有效磷含量较 2012 年分别上升 45.9%、49.3% 和 40.3%(图 3e), MW 和 MR 处理升高显著。2012 年 MR 处理显著高于 MW 处理, 2018 年 MR 处理显著高于 MWP 处理, 三个处理耕层土壤有效磷累积明显。图 3f 显示, 各处理 2018 年速效钾含量较 2012 年均显著下降, MWP 处理下降幅度达 41.5%。两个年份 MR 和 MW 处理耕层土壤速效钾含量均显著高于 MWP 处理, MR 和 MW 处理无显著差异。

## 2.3 种植模式对土壤动物的影响

本研究将土壤动物按照不同食性分为腐食性、植食性、杂食性和捕食性 4 类进行比较。0~15 cm 土层结果显示(图 4a), 3 个处理杂食性土壤动物总数量显著高于其他食性土壤动物, 是该区土壤动物的优势类群, 且处理间无显著差异。MW 处理杂食性土壤动物可鉴定种类达 6 种, 显著高于其他处理。MR 处理腐食性土壤动物数量达 5 000 只·m<sup>-2</sup>, 可鉴

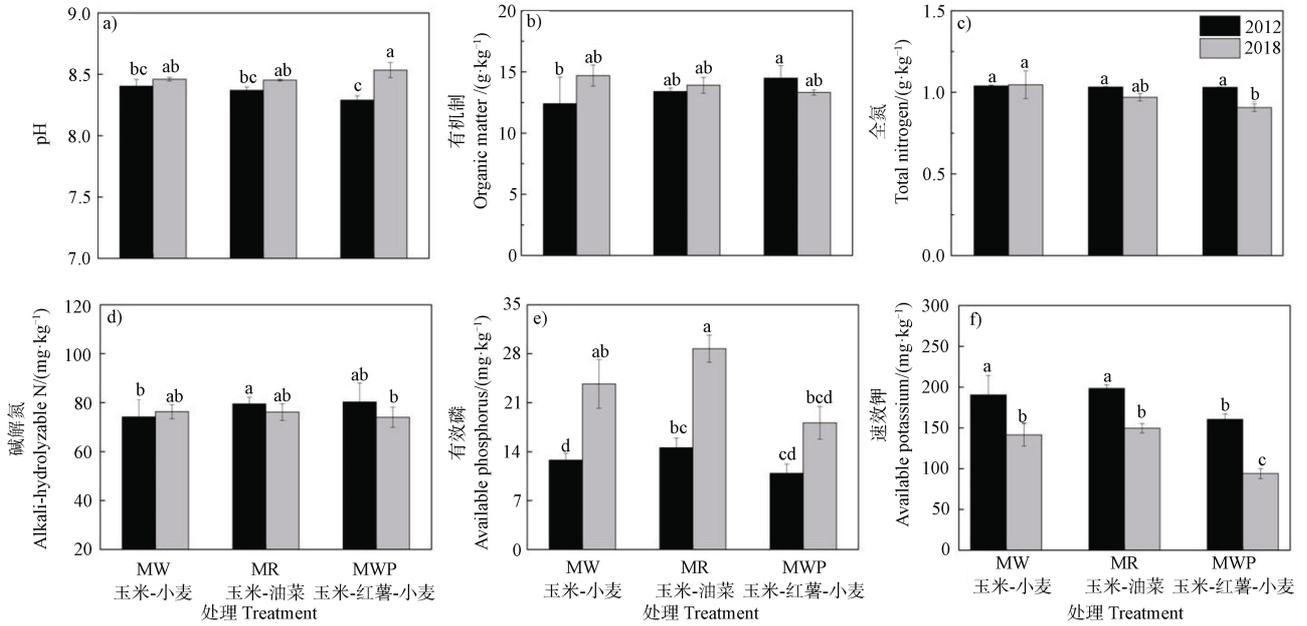
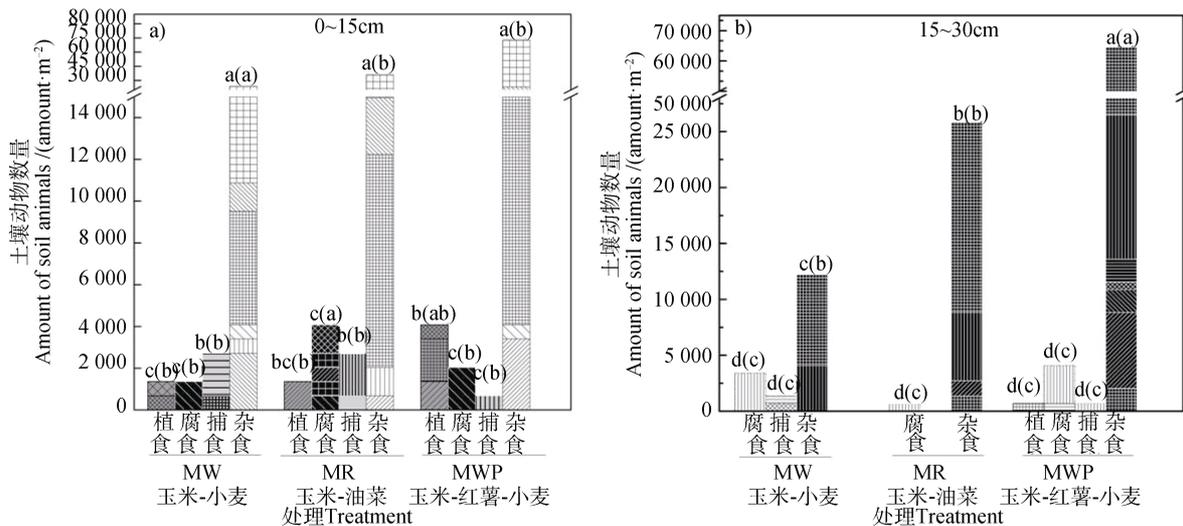


图 3 不同处理 2012 年和 2018 年耕层土壤养分

Fig. 3 Soil nutrients in the plough layer in 2012 and 2018 relative to treatment



注：括号外小写字母表示数量差异，括号内小写字母表示可鉴定种类数差异，柱状图中不同花纹表示种类不同但食性相同的土壤动物。Note: Lowercase letters outside parentheses showed quantity differences of soil fauna, which inside parentheses showed those species difference which can be identified. Different patterns in the histogram indicated soil fauna with different species but the same dietary.

图 4 不同处理土壤动物食性分布

Fig. 4 Distribution of soil faunas by feeding habit relative to treatment

定种类为 5 种，显著高于其他处理该食性的种类，植食和捕食性种类单一，且数量较少；MWP 处理土壤动物总数量最多，其中植食性土壤动物种类和数量显著高于 MW 处理，可见种植块茎类作物后，土壤环境更适合植食性土壤动物生存；耕层土壤各处理的捕食性土壤动物种类无显著差异。

15~30 cm 土层的结果显示 (图 4b)，随土层深度增加，各处理土壤动物种类和数量均减少，MW 处理无植食性土壤动物，杂食性土壤动物数量显著低于其他处理，MR 处理只有腐食性和杂食性土壤动物，其中杂食性土壤动物数量显著高于 MW 处理，但数量和种类显著低于 MWP 处理。3 种植植模式

下,不同食性土壤动物的类群数量和个体数量呈现明显表聚性,个别食性土壤动物有向下层积聚的趋势,MW和MWP处理的腐食性土壤动物数量在15~30 cm土层较多,出现一定逆层,这与较深土层有机物腐化程度更高存在一定关系。

#### 2.4 种植模式对作物产量和产值的影响

种植模式对作物产量的影响见表3,MW处理小麦多年平均产量显著高于MWP处理,小春作物季油菜产量显著低于小麦,MW处理玉米多年平均产量显著低于其他处理。MWP处理周年作物总产量和产值均显著高于MW和MR处理。该试验区内,MW体系小麦产量较高但玉米产量低,周年总产量和产值均较低。MR处理油菜籽产量低,周年总产量最低,但菜籽经济价值高于小麦,因此周年产值

高于MW处理。MWP模式下,尽管作物单产和产值均较低,但由于作物种类较多,其周年总产量和产值均显著高于其他处理。

#### 2.5 土壤结构与土壤养分的关联性

土壤肥力形成是自然和人类活动相结合的过程,其物理化学特性关联度能综合反映土壤肥力状况。表4结果显示,该区域碱解氮含量与<0.002 mm土壤黏粒含量存在显著正相关关系,这与土壤黏粒的高吸附性密切相关。土壤养分含量和不同孔径孔隙数量均存在极显著相关关系,但和速效钾无显著相关。有机质、全氮和碱解氮与100~500 μm孔隙数量呈极显著正相关关系,说明该当量孔径的孔隙有助于上述养分固持,而该当量孔径孔隙数量与有效磷含量呈极显著负相关,说明该当量孔径的孔隙

表3 不同种植模式作物多年平均产量和产值(2009—2018)

Table 3 Average crop yield and output of the period of 2009~2018 relative to treatment

处理 Treatment	小麦产量 Yield of wheat / (kg·hm <sup>-2</sup> )	油菜产量 Yield of oilseed rape / (kg·hm <sup>-2</sup> )	玉米产量 Yield of maize / (kg·hm <sup>-2</sup> )	红薯产量 Yield of sweet potato / (kg·hm <sup>-2</sup> )	周年作物产量 Annual crop yield / (kg·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )	周年产值 Annual output value / (Yuan·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> )
玉米-小麦 MW	3 850±388a		6 935±587b		10 786±883b	19 122b
玉米-油菜 MR		1 736±490	7 423±1 027a		9 159±1 034c	20 175b
玉米-红薯-小麦 MWP	3 515±509b		7 611±1 411a	2 653 ± 394	13 762±1 752a	22 276a

注:不同小写字母代表不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。Note: Different lowercase letters in the same column represent significant differences between treatments ( $P<0.05$ )。)

表4 土壤理化特征相关性

Table 4 Correlation analysis of soil physical and chemical properties

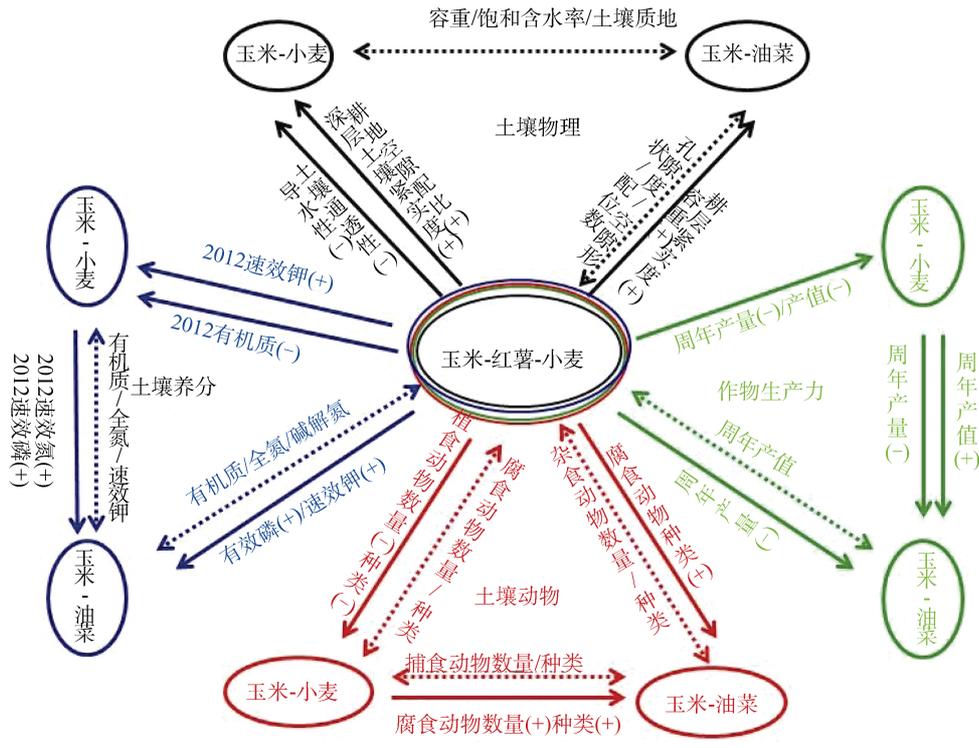
直径 Diameter	有机质 Organic matter	全氮 Total nitrogen	碱解氮 Alkalytic nitrogen	有效磷 Available phosphorous	速效钾 Available potassium	
	/ (g·kg <sup>-1</sup> )		/ (mg·kg <sup>-1</sup> )			
颗粒组成 Soil particle size	0.05~2.0 mm	0.233	0.149	0.450	-0.350	-0.267
	0.002~0.05 mm	0.433	-0.318	0.650	-0.383	-0.400
	<0.002 mm	0.433	0.092	0.717*	0.467	0.500
孔隙数量比 Proportion of pores by size	25~100 μm	0.500	0.500	0.500	-0.500	0.500
	100~500 μm	1.000**	1.000**	1.000**	-1.000**	-0.500
	500~1 000 μm	-1.000**	-1.000**	-1.000**	1.000**	0.500
	>1 000 μm	-1.000**	-1.000**	-1.000**	1.000**	0.500

注:表中\*表示指标之间具有显著相关( $P<0.05$ ),\*\*代表极显著相关( $P<0.01$ )。Note: \* in the table indicates significant correlation ( $P<0.05$ ) between indices, and \*\* significant correlation ( $P<0.01$ )。)

不利于有效磷保存。500~1 000 μm 和>1 000 μm 的相关性结果与 100~500 μm 的结果相反，有机质、全氮和碱解氮在>500 μm 孔隙条件下，容易向下迁移，与大孔隙容易造成漏水漏肥的观点一致，而 500~1 000 μm 和>1 000 μm 孔隙却更有利于有效磷保存，这与有效磷多以颗粒态存在有一定关系。

图 5 可见，玉米-小麦种植模式下，耕层土壤孔隙配比、孔隙均一性及连通性更好，土壤颗粒组成较其他处理更利于水分和养分的保持，有机质和全氮含量高于其他处理，利于土壤的可持续利用，但该种植模式下，紫色土耕层土壤较紧实，导水能力较弱，土壤动物总的丰富度和多样性较低，但植食性土壤动物数量较少有利于保护作物根系，该体系周年产量和产值较低。玉米-油菜模式土壤结构

和养分特征与玉米-小麦模式无显著差异，土壤紧实度较玉米-小麦模式低，但其耕层土壤孔隙配比较玉米-小麦模式差，土壤动物数量虽较少但种类丰富，且腐食性土壤动物数量较多，有利于土壤团粒化，周年产量最小但产值较玉米-小麦模式偏高。玉米-红薯-小麦模式耕层土壤疏松、通气透水性高，导水性能强，有利于水分养分移动，同时，这些大孔隙又为土壤动物的生存和繁殖提供了空间和条件，土壤动物总数量和种类最多，且该模式下周年产量与产值最高。但由于玉米-红薯-小麦模式不同孔径大孔隙配比较差，该处理存在漏水漏肥风险，与其他处理相比速效养分出现不同程度下降，也预示着要维持该体系的高产，可能需要增加更多养分投入。



注：双向箭头虚线代表处理间无显著差异，单向箭头实线代表箭头所指方向的处理与无箭头方向的处理存在显著差异，各指标标注的 (+) / (-) 号表示箭头所指方向的处理显著高于 (+) / 低于 (-) 无箭头方向的处理，不同颜色分别代表土壤物理 (黑)、土壤动物 (红)、土壤养分 (蓝) 和作物生产力 (绿) 各部分代表性指标。Note: The dashed line with arrows at both ends of the line indicates no significant difference between the treatments, and the solid line with an arrow at one end indicates significant difference between the treatments. The (+) / (-) marked on each parameter indicates that the treatment in the direction of the arrow is significantly higher (+) or lower (-) than the treatment in the direction without the arrow. The color, black, red, blue and green, represents the index typical of soil physic properties, soil faunas, soil nutrients and crop productivity, respectively.

图 5 种植模式对土壤特征和地力的综合影响

Fig. 5 Comprehensive effects of planting patterns on soil properties and fertility

### 3 讨 论

#### 3.1 种植模式对土壤结构和土壤动物的影响

种植模式对耕层及深层土壤影响广泛,合理的种植模式可改善土壤结构,增加土壤水分入渗<sup>[16]</sup>,提高持水性能防止土壤退化<sup>[15]</sup>。本研究玉米-红薯-小麦模式耕层土壤容重和紧实度较玉米-小麦模式低,这与薯类根系较粗对土壤穿透力强,而小麦根细瘦穿透力较差有关。玉米-红薯-小麦体系耕层土壤孔隙度和饱和导水率最高,耕层导水性能优于其他处理,土壤动物数量丰富,与容重降低有利于水分运移和气体交换,增加土壤通气性和透水性,为生物活动和根系生长创造有利环境的研究结果一致<sup>[17]</sup>。玉米-小麦和玉米-油菜体系耕层土壤孔隙度较玉米-红薯-小麦轮作体系小,与薯类根系生长延伸过程对土壤孔隙有增大作用,丰富的土壤动物对土壤施加影响也使得该体系孔隙度高。本研究表明玉米-小麦体系耕层土壤的颗粒组成有利于提高其持水性能,而玉米-红薯-小麦体系砂粒含量高通透性好,利于水分向下移动。已有研究也表明砂粒虽利于水分入渗,但其表面吸附能力较弱可能更易造成土壤水分流失<sup>[18]</sup>。

目前对大孔隙直径划分无统一标准,通常认为当量孔径 100~500  $\mu\text{m}$  的孔隙是通气大孔隙, >500  $\mu\text{m}$  是生物孔隙<sup>[19]</sup>, Asare 等<sup>[20]</sup>应用 CT 扫描技术发现大孔隙的形成机理与地上残留物、植物根系类型及土壤动物等因素有关。大孔隙仅占总孔隙的一小部分,但利于水分传导和运输,传导率高达 70%,又是土壤空气与大气交换的直接通道,中等孔隙适合根的生长,小孔隙有保持土壤水分和养分的功能。本研究结果显示,玉米-小麦、玉米-红薯-小麦和玉米-油菜体系 >1 000  $\mu\text{m}$  的孔隙分别占总孔隙体积的 49.8%、68.4%和 79.5%,玉米-小麦体系平均孔隙直径趋小,而玉米-红薯-小麦体系平均孔隙直径趋大,玉米-红薯-小麦模式耕层土壤孔隙结构有利于水分传导和运输,但水分和养分也更容易向深层土壤迁移,与 >1 000  $\mu\text{m}$  的孔隙易出现不同程度水肥遗漏现象的研究结果一致<sup>[21]</sup>。玉米-小麦模式的孔隙比例、平均配位数和孔隙近圆度最佳,有利于保水保肥且连通性较好,与于同艳和张兴义<sup>[22]</sup>的研究结果一致。

土壤是土壤动物和微生物的栖息场所,土壤动物又是土体内物质转化的主要驱动者,深刻影响土壤

功能和质量<sup>[23]</sup>。本研究耕层土壤各处理杂食性动物为优势类群,这与其泛食习性有关。玉米-小麦体系较其他处理土壤动物数量和种类少,植食性土壤动物也较少,有利于保护作物根系。腐食性动物有利于有机物分解和团粒化,转化有机质的能力较强<sup>[24]</sup>,本研究中玉米-油菜模式下腐食性土壤动物种类和数量较多,植食和捕食性种类单一且数量少,该种植模式可能更适用于团粒结构较差的土壤。本研究中玉米-红薯-小麦体系土壤动物总数量最多,植食性土壤动物丰富,可见加入块根类作物种植后,块根作物根系生长和延伸有利于大孔隙形成,氧气和养分供应更充分,土壤环境会更适合土壤动物生存,与华萃等<sup>[25]</sup>的研究结果一致。三种模式不同食性土壤动物的类群数量和个体数量均呈现明显表聚性,可能受人类季节性翻耕的影响,腐食性土壤动物有向下层积聚的趋势,可能与下层土壤有机物腐化程度更高有关。

#### 3.2 种植模式对土壤养分和生产力的影响

土壤养分全量反映土壤供给养分的能力,速效养分则反映土壤养分供给强度,对植物在短周期的生长具有较大影响。本研究显示玉米-小麦体系 2018 年的有机质、全氮、碱解氮和有效磷含量较 2012 年无显著变化或略有增加,而玉米-红薯-小麦体系除有效磷外,其他养分均出现不同程度下降,一方面与作物种类多对养分需求量高有关,另一方面与该处理土壤条件易使水分和养分向下较快迁移,存在漏水漏肥风险,不利于土壤养分积累和固持有关。同时,不同作物根系布局和对营养的吸收能力有差异,也可能造成耕层土壤养分分布差异<sup>[26]</sup>。李承力等<sup>[27]</sup>对不同轮作模式土壤养分差异的研究显示,玉米-油菜轮作体系土壤氮含量最高,玉米-小麦轮作体系土壤磷钾含量最高,本研究中玉米-油菜轮作土壤磷钾含量最高,玉米-小麦轮作土壤氮含量相对较高,研究结果差异可能与不同研究区域土壤类型、管理措施及施肥条件等不同有关。本研究中,各处理 2018 年土壤速效钾含量较 2012 年均显著降低,玉米-红薯-小麦模式降低幅度最大,与红薯喜钾密切相关<sup>[28]</sup>。相关研究也表明,玉米与红薯套作体系中的作物结构不合理,均属耗地作物,氮、钾养分呈现高消耗趋势,难以发挥套作优势,可能危害农业可持续发展<sup>[29]</sup>。

不同作物种植对土壤肥力影响不同，加上作物自身生理和养分需求不同，因此产量构成有差异<sup>[30]</sup>。合理的种植模式能有效提高作物产量和品质，可增产 10%~15%，不合理种植模式致使农田土壤肥力下降、土壤环境恶化<sup>[31]</sup>。本研究中玉米-油菜模式周年产量低于玉米-小麦体系，但经济效益却高于玉米-小麦体系，与李承力等<sup>[27]</sup>在丹江口库区坡耕地生产力水平的研究结果一致。本研究中玉米-红薯-小麦体系周年作物生产力与产值最高。一方面由于作物类型多，另一方面玉米生长要求土壤水分含量需在 50%左右<sup>[32]</sup>，玉米红薯间作期间，红薯叶低矮，能有效覆盖部分地面并保持水分存在一定关系。

### 3.3 各土壤指标耦合对土壤质量的影响

土壤质量评价应综合考虑多方面因素，尤其是在地形、土壤类型、管理措施、管理目标多样性程度较高时<sup>[29]</sup>。研究表明，土壤颗粒组成与土壤的保肥及供肥能力有关，是评价土壤肥力的重要因子之一。李露等<sup>[33]</sup>研究认为黄土高原土壤有机碳与黏粒含量有显著相关关系，当黏粒含量为 20%~25%时，有机碳与黏粒的相关性较高，当黏粒含量大于 30%时，有机碳与黏粒呈负相关关系。本研究黏粒含量均为 20%~25%，与有机质含量相关系数为 0.433，并无显著相关关系，这可能与本研究样本量较小及紫色土本身的土壤性质有关。本研究有效磷、有效钾含量与粒径 0.002~0.05 mm 的颗粒含量呈负相关，与苟曦<sup>[34]</sup>的研究有效磷、有效钾含量随粉粒含量增加而减少的结果部分一致。颗粒组成中粒级越小，粒间孔隙小，可塑性、黏着性、黏结性和保水保肥性越强<sup>[35]</sup>，MW 处理<0.002 mm 的颗粒含量较高，同时总孔隙度小在一定程度上有助于土壤保墒和养分积累。

MW 处理的土壤动物数量较其他处理少，可见孔隙度较小不仅影响土壤中空气的含量，阻碍根系伸展，还会影响土壤动物的活动与生存。本研究中养分含量与当量孔径>100 μm 的各级孔隙数量均存在极显著相关关系。有机质、全氮、速效氮与当量孔径 100~500 μm 的孔隙呈极显著正相关，该范围孔隙直径适中，水气总容量较大，有利于水气储存和增强土壤生物的有效活动，活化土壤养分<sup>[36]</sup>。但有机质、全氮、速效氮与>500 μm 的孔隙呈极显著的负相关，主要原因是土壤大孔隙产生优势流极易造成土壤水分和养分流失<sup>[37]</sup>。本研究中有效磷的结

果与其相反，与有效磷多以颗粒态存在，可在大孔隙中有效保存存在一定关系。

## 4 结论

川中丘陵地区传统的三种粮油种植模式利弊共存，选择时需因地制宜、趋利避害进行综合评估。玉米-小麦轮作模式耕层土壤孔隙配比合理，土壤孔隙均一性及孔隙间连通性更好，利于耕层保水保肥，有利于土壤资源的可持续利用，但该模式下土壤动物丰富度和多样性较低，经济效益偏低。玉-油模式下土壤理化特征与玉米-小麦模式无显著差异，但该种植模式的土壤孔隙结构较玉米-小麦模式差，优势在于腐食性土壤动物数量和种类丰富，对土壤团粒化有利，整体经济效益高于玉米-小麦模式。玉米-红薯-小麦模式周年作物总产量和经济效益最高，耕层土壤疏松，作物类型和孔隙结构有利于土壤动物的生存和繁殖，但该体系耕层土壤孔隙结构不利于保水保肥，长期维持该系统高产需要增加更多养分投入，结合石灰性紫色土易被侵蚀、壤中流发育程度较高、养分极易随径流损失等特征，该体系对地力消耗大，难以实现保护耕地质量和农业可持续发展的目标。

**致谢** 感谢中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站为本研究提供的实验设施设备，感谢朱新玉、章熙锋和张蓉在采样及样品分析过程中给予的建议和帮助。

### 参考文献 (References)

- [1] Raza M A, Bin Khalid M H, Zhang X, et al. Effect of planting patterns on yield, nutrient accumulation and distribution in maize and soybean under relay intercropping systems[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): 4947.
- [2] Li Y J, Wang H, Zhao J N, et al. Effects of tillage methods on soil physicochemical properties and biological characteristics in farmland: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(3): 939-948. [李玉洁, 王慧, 赵建宁, 等. 耕作方式对农田土壤理化因子和生物学特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(3): 939-948.]
- [3] Yong T W, Yang W Y, Ren W J, et al. Analysis of the nitrogen transfer, nitrogen uptake and utilization in the two relay-planting systems[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(9): 3170-3178. [雍太文, 杨文钰,

- 任万军,等. 两种三套作体系中的氮素转移及吸收利用[J]. 中国农业科学, 2009, 42(9): 3170-3178.]
- [ 4 ] Yong T W, Yang W Y, Fan G Q, et al. Study on the annual balance application of nitrogen fertilizer in the relay - planting system of "wheat/maize/soy-bean"[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2009(3): 31-35. [雍太文, 杨文钰, 樊高琼, 等. "麦/玉/豆"套作种植模式氮肥周年平衡施用初步研究[J]. 中国土壤与肥料, 2009(3): 31-35.]
- [ 5 ] Zhou H, Li B G, Lü Y Z, et al. Multifractal characteristics of soil pore structure under different tillage systems[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(6): 1094-1100. [周虎, 李保国, 吕贻忠, 等. 不同耕作措施下土壤孔隙的多重分形特征[J]. 土壤学报, 2010, 47(6): 1094-1100.]
- [ 6 ] Sun M, Huang Y X, Sun N, et al. Advance in soil pore and its influencing factors[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2015, 46(1): 233-238. [孙梅, 黄运湘, 孙楠, 等. 农田土壤孔隙及其影响因素研究进展[J]. 土壤通报, 2015, 46(1): 233-238.]
- [ 7 ] Zhang X W, Zhu B, Jiang M F. A 20 years' review on Yanting Agro-ecological Station of Purple Soil, Chinese Academy of Sciences[J]. Journal of Mountain Research, 2001, 19(S1): 1-3. [张先婉, 朱波, 蒋明富. 中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站建站 20 周年回顾[J]. 山地学报, 2001, 19(S1): 1-3.]
- [ 8 ] National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China statistical yearbook (2009) [M]. Beijing: China Statistics Press, 2009. [中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴(2009) [M]. 北京: 中国统计出版社, 2009.]
- [ 9 ] Liu W L, Li X P, Shen X, et al. Effects of fertilizer application regimes on soil N<sub>2</sub>O emissions in the croplands of purple soil in the Sichuan Basin during wheat season[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2014, 22(9): 1029-1037. [柳文丽, 李锡鹏, 沈茜, 等. 施肥方式对冬小麦季紫色土 N<sub>2</sub>O 排放特征的影响[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(9): 1029-1037.]
- [ 10 ] Zhu B, Wang T, Kuang F H, et al. Measurements of nitrate leaching from a hillslope cropland in the central Sichuan basin, China[J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73(4): 1419-1426.
- [ 11 ] Du J T, He W Q, Vinay N, et al. Effects of conservation tillage on soil water content in northern arid regions of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(11): 25-29. [杜建涛, 何文清, Vinay Nangia, 等. 北方旱区保护性耕作对农田土壤水分的影响[J]. 农业工程学报, 2008, 24(11): 25-29.]
- [ 12 ] Shi J P, Yang L Z. Quality assurance and quality control for soil monitoring in terrestrial ecosystem[M]. Beijing: China Environment Science Press, 2012. [施建平, 杨林章. 陆地生态系统土壤长期观测质量保证与质量控制[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012.]
- [ 13 ] Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. [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.]
- [ 14 ] Yin W Y. Pictorial keys to soil animals of China[M]. Beijing: Science Press, 1998. [尹文英. 中国土壤动物检索图鉴[M]. 北京: 科学出版社, 1998.]
- [ 15 ] Chen Y Q, Sui P, Gao W S, et al. Quantitative analysis on technological characteristics of different conservation tillage patterns in major agricultural regions of China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(18): 1-7. [陈源泉, 隋鹏, 高旺盛, 等. 中国主要农业区保护性耕作模式技术特征量化分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(18): 1-7.]
- [ 16 ] Yang Y H, Wu J C, Zhang J M, et al. Effect of tillage method on soil water infiltration, organic carbon content and structure[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(2): 258-266. [杨永辉, 武继承, 张洁梅, 等. 耕作方式对土壤水分入渗、有机碳含量及土壤结构的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(2): 258-266.]
- [ 17 ] Yang Y H, Wu J C, Mao Y P, et al. Using computed tomography scanning to study soil pores under different soil structure improvement measures[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(23): 99-108. [杨永辉, 武继承, 毛永萍, 等. 利用计算机断层扫描技术研究土壤改良措施下土壤孔隙[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 99-108.]
- [ 18 ] Dong J J, Shao F W, Zhang L, et al. Effects of tillage patterns on physical and chemical properties of paddy soils and economic efficiency[J]. Soils, 2015, 47(3): 509-514. [董建江, 邵伏文, 张林, 等. 不同耕作模式对稻田土壤理化性质及经济效益的影响[J]. 土壤, 2015, 47(3): 509-514.]
- [ 19 ] Luxmoore R J. Micro-, meso-, and macroporosity of soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1981, 45(3): 671-672.
- [ 20 ] Asare S N, Rudra R P, Dickinson W T, et al. SW—soil and water: Soil macroporosity distribution and trends in a No-till plot using a volume computer tomography scanner[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 2001, 78(4): 437-447.
- [ 21 ] Ruan X Z, Cheng J H, Zhang H J, et al. Soil macropore characteristics of different woodland and their influencing factors on Simianshan mountain in Chongqing[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(3): 68-74, 80. [阮芯竹, 程金花, 张洪江, 等. 重庆四面山不同林地土壤大孔隙特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 68-74, 80.]
- [ 22 ] Yu T Y, Zhang X Y. Effects of different soil tillage systems on soil water in the black farmland[J]. Journal of Southwest University (Natural Science Edition), 2007, 29(3): 121-124. [于同艳, 张兴义. 耕作措施对黑土

- 农田耕层水分的影响[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2007, 29(3): 121-124.]
- [ 23 ] Zhu X Y, Gao B J, Yuan S L, et al. Structure and seasonal change of soil arthropod communities in forest-steppe ecotone[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2008, 14(5): 635-639. [朱新玉, 高宝嘉, 袁胜亮, 等. 森林-草原交错带土壤节肢动物的群落结构及其季节变化[J]. 应用与环境生物学报, 2008, 14(5): 635-639.]
- [ 24 ] Kong Y. Effects of fertilization regime and straw returning on soil fauna in the fluvo-aquic soil[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2018. [孔云. 施肥措施和秸秆还田对潮土农田土壤动物的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.]
- [ 25 ] Hua C, Wu P F, He X J, et al. Effects of different amounts of straw returning treatments on soil nematode community in purple soil[J]. Biodiversity Science, 2014, 22(3): 392-400. [华萃, 吴鹏飞, 何先进, 等. 紫色土区不同秸秆还田量对土壤线虫群落的影响[J]. 生物多样性, 2014, 22(3): 392-400.]
- [ 26 ] Wang X C, Yang W Y, Ren W J, et al. Study on yield and differences of nutrient absorptions of maize in wheat/maize/soybean and wheat/maize/sweet potato relay intercropping systems[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(4): 803-812. [王小春, 杨文钰, 任万军, 等. 小麦/玉米/大豆和小麦/玉米/甘薯套作体系中玉米产量及养分吸收的差异[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(4): 803-812.]
- [ 27 ] Li C L, Yang T W, Xu J C, et al. Crop productivity and comparison of farmland nutrient loss in different crop patterns on slope land in Danjiangkou reservoir area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(4): 83-87. [李承力, 杨特武, 徐君驰, 等. 丹江口库区坡耕地不同轮作模式作物生产力及农田养分流失比较[J]. 水土保持学报, 2011, 25(4): 83-87.]
- [ 28 ] Hu J M, Chen S N, Wei X H, et al. Effects of tillage model on healthy plough layer structure and its development trends[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2018, 35(2): 95-103. [胡钧铭, 陈胜男, 韦翔华, 等. 耕作对健康耕层结构的影响及发展趋势[J]. 农业资源与环境学报, 2018, 35(2): 95-103.]
- [ 29 ] Zhong S, Zeng H C, Jin Z Q. Influences of different tillage and residue management systems on soil nematode community composition and diversity in the tropics[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2017, 107: 234-243.
- [ 30 ] Li H S. Modern plant physiology [D]. Beijing: Higher Education Press, 2008. [李合生. 现代植物生理学[D]. 北京: 高等教育出版社, 2008.]
- [ 31 ] Zhang H F, Wu Y Z, He L J. Discussion on implementation of fallow system in China[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2013, 25(1): 166-170. [张慧芳, 吴宇哲, 何良将. 我国推行休耕制度的探讨[J]. 浙江农业学报, 2013, 25(1): 166-170.]
- [ 32 ] Li Y P, Wang M B, Shi X Y, et al. Influence of different tillage methods on soil physical and chemical properties and maize yield[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2012, 40(7): 723-727. [李永平, 王孟本, 史向远, 等. 不同耕作方式对土壤理化性状及玉米产量的影响[J]. 山西农业科学, 2012, 40(7): 723-727.]
- [ 33 ] Li L, Yang L, Liao Y C, et al. Study on soil moisture effect of double cropping in the dryland of subhumid areas of the Loess Plateau[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(4): 145-151. [李露, 杨玲, 廖允成, 等. 黄土高原半湿润区旱地一年两熟复种模式土壤水分效应[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(4): 145-151.]
- [ 34 ] Gou X. The soil fertility character in the hilly area of the central Sichuan basin[D]. Yaan, Sichuan: Sichuan Agricultural University, 2007. [苟曦. 川中丘陵区土壤肥力特征研究[D]. 四川雅安: 四川农业大学, 2007.]
- [ 35 ] Zheng H B, Zheng J Y, Luo Y, et al. Change characteristic of soil compaction of long-term different tillage methods in cropland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(9): 63-70. [郑洪兵, 郑金玉, 罗洋, 等. 长期不同耕作方式下的土壤硬度变化特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 63-70.]
- [ 36 ] Liu B, Wu L S, Lu J W, et al. Research progress on the effects of different farming methods on the physical and chemical properties of soil[J]. Tillage and Cultivation, 2010(2): 55-58, 65. [刘波, 吴礼树, 鲁剑巍, 等. 不同耕作方式对土壤理化性质影响研究进展[J]. 耕作与栽培, 2010(2): 55-58, 65.]
- [ 37 ] Germann P F, Edwards W M, Owens L B. Profiles of bromide and increased soil moisture after infiltration into soils with macropores1[J]. Soil Science Society of America Journal, 1984, 48(2): 237-244.

(责任编辑: 檀满枝)