

长期施用外源有机物料对紫色土耕层土壤结构及水力学特性的影响^①

崔俊芳^{1,2}, 刘玲^{1,3}, 田徽^{1,4}, 孙志祥^{1,2}, 唐家良^{1*}

(1 中国科学院、水利部成都山地灾害与环境研究所, 成都 610299; 2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 国网重庆市电力公司经济技术研究院, 重庆 401121; 4 长江大学农学院, 湖北荆州 434023)

摘要: 为探究两种形式的外源有机物料(猪粪堆肥和秸秆)添加对供试土壤结构及水力学性质的影响, 本研究选取盐亭紫色土农业生态试验站长期(16 a)6 种不同施肥处理试验小区, 原位测定了土壤结构质量(Sq), 分析了土壤团聚体稳定性、水力学特征以及孔隙结构。结果表明, 与单施化肥(NPK)相比, 外源有机物料的添加(猪粪堆肥配施无机肥, OMNPK; 秸秆还田配施无机肥 RSDNPK)提高了土壤结构质量, 增加了土壤大团聚体(>2 mm)占比及团聚体稳定性; 相较于不施肥(CK), 施肥处理提高了土壤大孔隙度以及土壤饱和含水量 θ_s , 与 NPK 相比, 有机无机配施(OMNPK 和 RSDNPK)减少土壤大孔隙度, 提高土壤保水能力, 单施秸秆(RSD)效果不显著; 相关性分析结果表明, 土壤结构质量 Sq 与团聚体平均重量直径(MWD)、 $R_{0.25}$ 分别呈显著负相关($P<0.05$), 土壤团聚体 MWD 与 $R_{0.25}$ 以及凋萎系数之间呈显著正相关关系, $R_{0.25}$ 与土壤田间持水量(θ_{fc})之间呈显著正相关关系($P<0.05$)。本研究成果初步揭示了外源有机物料添加对紫色土结构及水力学特性的影响, 为未来深入探讨外源有机物料在紫色土长期改良机制等关键生态过程中的作用提供了理论基础。

关键词: 土壤结构质量; 土壤团聚体稳定性; 水力学特性; 有机物料; 紫色土

中图分类号: S344.13 文献标志码: A

Effects of Long-Term Application of External Organic Materials on Structure and Hydraulic Properties of Purple Soil in Plough Layer

CUI Junfang^{1,2}, LIU Ling^{1,3}, TIAN Wei^{1,4}, SUN Zhixiang^{1,2}, TANG Jialiang^{1*}

(1 Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610299, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 State Grid Chongqing Economic Research Institute, Chongqing 401121, China; 4 College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou, Hubei 434023, China)

Abstract: Integrated application of organic and chemical fertilizers has emerged as a critical practice for sustainable soil fertility management. Based on a 16-year field experiment with six fertilization treatments at the Yanting Agro-Ecological Station of Purple Soil, Chinese Academy of Sciences, this research examined the effects of two exogenous organic materials (pig manure compost, OM; and rice straw, RS) on soil structure and hydraulic properties. Compared with chemical fertilizer treatment (NPK), the addition of organic materials (OMNPK and RSDNPK) improved soil structural quality by increasing the proportion of large aggregates (>2 mm) and enhancing aggregate stability. Fertilization treatments increased soil macroporosity and saturated water content (θ_s) compared to the no-fertilizer control treatment (CK). However, compared with NPK, OMNPK and RSDNPK reduced macroporosity while improving soil water retention capacity. Straw application alone (RSD) had no significant effect. Correlation analysis revealed that soil structural quality (Sq) was significantly negatively correlated with both the mean weight diameter (MWD) of aggregates and the proportion of macroaggregates ($R_{0.25}$) ($P<0.05$). MWD was positively correlated with both $R_{0.25}$ and soil wilting coefficient, while $R_{0.25}$ was positively correlated with field capacity ($P<0.05$). These findings provide preliminary insights into how organic amendments affect the structure and hydraulic behavior of purple soil, offering a theoretical basis for future research on their role in key ecological processes underlying long-term soil improvement.

Key words: Soil structural quality; Soil aggregate stability; Soil hydrologic characteristics; Organic materials; Purple soil

①基金项目: 国家自然科学基金项目(42371039)资助。

* 通信作者(jltang@imde.ac.cn)

作者简介: 崔俊芳(1983—), 女, 山东平原人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为土壤水文学。E-mail: jfcui@imde.ac.cn

土壤团聚体作为表征土壤结构质量的关键指标,其稳定性和微观结构特性直接影响水分与养分在土壤中的迁移分布,并在宏观尺度决定了土壤的生态功能^[1]。近年来,随着土壤改良技术的迅速发展,不同施肥措施对农业土壤微结构演变及团聚体稳定性的调控作用逐渐成为研究热点^[2]。已有研究表明,长期有机无机肥配施能够显著改善土壤微结构,进而提升团聚体稳定性。例如,王伟鹏和张华^[1]基于 26 年长期定位试验发现,有机无机肥配施显著改善了研究区土壤微结构,有效增强了土壤团聚体的抗分散性;此外,在梨园土壤中,该施肥方式亦能显著提高机械稳定性团聚体和水稳性团聚体的含量,为改善土壤结构提供了有效途径^[3]。在红壤地区, Li 等^[4]研究进一步证明,化肥配施牲畜粪便显著提高了生物活性土壤有机碳(BASOC)含量,同时增强团聚体稳定性,其效果优于常规施肥及化肥配施绿肥的处理方式。综上所述,不同施肥措施对土壤结构的影响显著,且其效果与施肥种类密切相关。土壤水力学性质是决定水分在土壤中渗透、传导与滞留行为的重要指标,对于作物的水分供给及土壤健康具有重要意义。饱和导水率、容重和总孔隙度等参数不仅反映了土壤水分的传导能力,还与土壤结构稳定性、养分有效性及抗侵蚀能力密切相关^[5]。近年来,施肥措施对土壤水力学性质的调控作用备受关注。研究表明,施用有机肥能够有效改善土壤水力学性质。Celik^[6]研究表明,与不施肥和单施化肥相比,堆肥和粪肥的施用均能显著提高土壤饱和导水率,其中堆肥的效果更为显著。基于长期试验, Leroy 等^[7]进一步指出,施用有机物料能够有效改善土壤团聚体稳定性,并显著提高饱和导水率、容重和总孔隙度,而单施化肥的影响相对较弱。此外,有研究表明,外源有机物料通过改善土壤孔隙结构的均匀性和连续性,进一步提高土壤蓄水能力和抗旱性能^[8],各类施肥措施对土壤水力学性质均具有显著改善作用,其中有机肥的应用效果尤为显著。

紫色土是我国川中丘陵区的重要耕地资源,其中四川盆地的紫色土面积约占全国紫色土总面积的 51.5%,主要生产玉米、小麦、甘薯等粮食作物^[9]。施用有机肥是田间管理的重要措施,不仅能够提高土壤肥力,还能显著促进作物产量。已有研究表明^[10],外源有机物料的施用可有效增加紫色土土壤有机碳含量。然而,关于有机肥施用对紫色土土壤结构及水力学性质的影响仍研究不足。近几年,CT 扫描作为一种非破坏性检测手段,被广泛应用于土壤结构的研究。Cui 等^[11]利用 CT 扫描探究了三峡库区消落带中

不用淹没时间对土壤结构的影响,结果显示淹水区土壤大孔隙度降低且大孔隙结构发生变化;于皓等^[12]的研究证明,CT 扫描技术能够较好地反映不同土地利用方式对土壤大孔隙特征的影响,其中林地大孔隙发育程度相对更好。

本研究基于长期定位施肥试验,以西南地区广泛分布的紫色土为研究对象,利用 CT 扫描及图像分析技术探究不同施肥措施对土壤结构及水力学性质的影响,旨在揭示外源有机物料施用对紫色土土壤结构和水力学性质的长期效应,明确土壤结构与水力学性质之间的关系,以期为西南地区农业土壤质量评价与保护提供支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究依托中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站,该站位于四川盆地中北部盐亭县林山乡(31°16'N, 105°27'E)(图 1 A),地处涪江支流弥江与湍江的分水岭上,海拔 400~600 m,地形以中山丘陵为主,属于典型的亚热带湿润季风气候。受东南季风影响,该地区年平均气温 17.3 °C,多年平均降水量 826 mm。供试土壤为蓬莱镇组石灰性紫色土,质地疏松,田间持水量介于 28.1%~37.8 %,平均土层厚度约 20~60 cm,土壤母质为泥岩。0~20 cm 表层土壤基础理化性质为: pH 8.2,黏粒 22.3%、粉粒 34.6%、砂粒 43.1%,有机质 8.75 g/kg,全氮 0.81 g/kg,全磷 0.84 g/kg,全钾 18.01 g/kg,碱解氮 42.29 mg/kg,有效磷 9.02 mg/kg,速效钾 86.35 mg/kg,土壤容重 1.34 g/cm³。

1.2 试验设计

施肥处理布设开始于 2002 年,各小区面积为 24 m² (4 m×6 m),坡度 7°,土层厚度 60 cm,种植制度为冬小麦-夏玉米轮作。试验场按照等氮施肥原则布置,其中冬小麦季纯 N 量: 130 kg/hm²;夏玉米季纯 N 量: 150 kg/hm²。研究共设五种处理:不施肥对照(CK)、常规无机肥对照(NPK)、猪粪堆肥配施无机肥(OMNPK)、秸秆还田(RSD)以及秸秆还田配施无机肥(RSDNPK)。施肥方式为基肥于播种前一次性人工施入,冬小麦施肥时间为每年 11 月初,夏玉米为每年 6 月初,施肥和耕作同步进行;冬小麦采取撒施的方式,夏玉米为穴施,耕作方式为人工锄耕,深度为 20 cm。氮、磷、钾肥分别为碳酸氢铵,过磷酸钙和氯化钾,各处理的具体施肥方案如表 1 所示。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 原位土壤结构质量测定 2018 年 10 月玉米

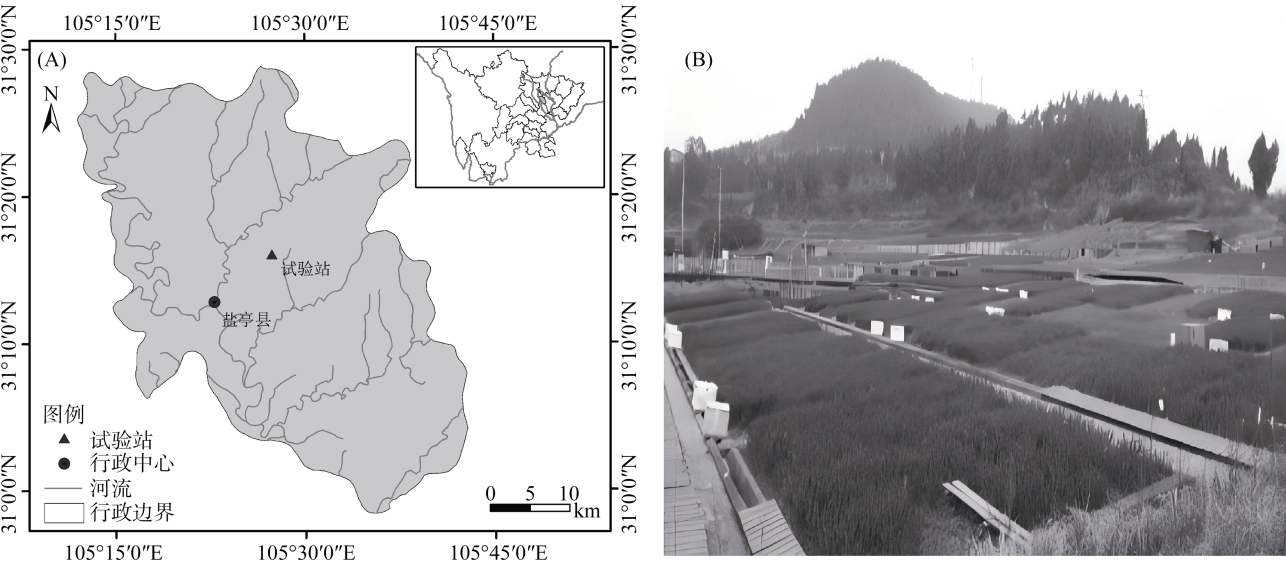


图 1 盐亭紫色土农田生态系统试验站位置(A)及试验小区景观(B)
Fig. 1 Location of the Yanting Agro-Ecological Station of Purple Soil (A) and the view of long-term field experiment (B)

表 1 各试验小区施肥方案
Table 1 Fertilization schemes for each experimental plot

生长季	物料种类	不施肥对照 CK	常规无机肥对照 NPK	猪粪堆肥配施无机肥 OMNPK	秸秆还田 RSD	秸秆还田配施无机肥 RSDNPK
玉米季	猪粪堆肥(g)			139 000		
	小麦秸秆干重(g)				13 330	13 330
	碳酸氢铵(g)		2 352	1 411		1 882
	过磷酸钙(g)		2 000	2 000		2 000
	氯化钾(g)		160	160		160
小麦季	猪粪堆肥(kg)			121		
	玉米秸秆干重(g)				18 670	18 670
	碳酸氢铵(g)		2 001	1 200		1 139
	过磷酸钙(g)		1 963	1 963		1 963
	氯化钾(g)		157	157		157

收获后，对各实验小区开展原位土壤结构质量测定。原位土壤结构质量测定(Visual evaluation of soil structure, VESS)是一种通过一系列简单工具对土壤颜色、层次、根系、土壤团聚体的大小和形状以及团聚体内部和团聚体间的孔隙情况进行评分，从而评价土壤结构整体状态的方法^[13-14]。本研究使用 VESS 方法对土壤结构进行原位评估，将采集得到的土壤样品分成 20×20×20 cm 的土块后转移到托盘上，将土壤样品自然掰开，以获得土壤自然剖面。若存在土层分异，仔细观察并记录各土层土壤颜色、根系分布、土块大小和形状以及团聚体和孔隙状况。每一层的各项得分根据 Guimarães 等^[14]给出的标准确定，并根据各项得分计算每一层的最终得分。每个土壤样品的最终得分通过每土层得分与其厚度的乘积相加，再除以土

样总深度(20 cm)，即为耕层土壤结构质量(Structural quality, Sq)，土壤的 Sq 值越小，表明土壤结构质量越好。

1.3.2 样品采集 开展原位土壤结构质量测定的同时，采集不同施肥处理下耕层 0~20 cm 土壤团聚体和环刀原状样品。团聚体样品采用混合样品的方式采集，每个实验小区采集 3 处样品作为重复，采集后装入密封盒带回实验室，经自然风干后用于测定团聚体稳定性指标。团聚体样品采集、装运和风干过程均小心操作，避免人为过度破坏土壤团聚体。

土壤原状样品采集，小心去除地表落叶、根系等杂物，利用不锈钢环刀(高 5 cm，直径 5 cm)采集 5~10 cm 原状样品，3 个重复，用于土壤水力学性质测定。同时，采用 PVC 材质环刀(高 5 cm，直径 5 cm)

同深度采集原状样品用于计算机断层图像扫描(CT Scan), 获取土壤孔隙特征。用于 CT 扫描的环刀样品每个小区采集 1 份。

1.4 样品测定

1.4.1 水稳性团聚体测定及分级 土壤水稳性团聚体分级采用湿筛法^[15]。Elliott^[16]改进后将湿筛后的土壤团聚体划分成四个粒径级别: 粗大团聚体($d > 2.000$ mm)、细大团聚体(0.250 mm $< d \leq 2.000$ mm)、微团聚体(0.053 mm $< d \leq 0.250$ mm)和粉-黏团聚体($d \leq 0.053$ mm)。将 500 g 风干的团聚体样品置于套筛中, 在水中以恒定振幅(上下 5 cm)和频率(30 次/min)振荡 30 min, 筛分出 > 2 mm、 $0.25 \sim 2$ mm、 $0.053 \sim 0.25$ mm 及 < 0.053 mm 的水稳性团聚体, 105 °C 烘箱烘干后称重, 计算各粒级团聚体相对含量占比(%)。

团聚体的稳定性通过平均重量直径(MWD, mm)表示, 计算方法见式(1):

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^{n+1} \frac{d_{i-1} - d_i}{2} \times m_i \quad (1)$$

式中: d_i 为第 i 个筛网的孔径, $d_0 = d_1$, $d_n = d_{n+1}$, 单位为 mm; m_i 为第 i 个筛子上团聚体的质量分数; n 为筛子的数量。

1.4.2 土壤水力学性质测定 土壤环刀样品采回后, 在实验室内, 首先将环刀由下端浸泡至饱和状态, 并采用定水头法(水头高度设定为 5 cm)测定饱和导水率^[17]。随后, 使用沙箱法测定低吸力段的水分特征曲线, 对于低吸力段的水分特征曲线, 使用沙箱法进行测定, 吸力依次为 -7.5 、 -15.5 、 -31.6 、 -63.1 、 -100 cm。对于高吸力段的水分特征曲线, 采用压力膜仪法测定, 吸力值分别为 -330 、 -500 、 $-1\,000$ 、 $-5\,000$ 、 $-15\,300$ cm。测定完成后, 将环刀土样放置于 105 °C 的烘箱内烘干至恒重, 以便测量土壤的容重。

土壤饱和导水率采用定水头法测量^[18], 结果换算成 10 °C 下的饱和导水率。土壤饱和导水率的计算公式如下:

$$K_s = \frac{60QL}{\Delta h \Delta t} \quad (2)$$

式中: K_s 为饱和导水率(cm/h); Q 为稳定渗流体积(cm^3); L 为环刀样品长度(cm); h 为水头高度(cm); A 为环刀样品截面积(cm^2); t 为时间间隔(min)。

不同吸力下的土壤体积含水量采用环刀法进行测定, 根据实测数据, 采用 Matlab 软件中的非线性曲线拟合函数 lsqcurvefit, 结合 van Genuchten 模型(VG 模型)^[19]得到土壤水分特征曲线及各水力参数

(α , n , θ_r , θ_s)。VG 模型可表示成式(3):

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + |\alpha h|^n\right)^m} \quad (3)$$

式中: θ 为固定水头 h (cm)下的土壤体积含水量, cm^3/cm^3 ; θ_s 和 θ_r 分别为饱和含水量和残余含水量, cm^3/cm^3 ; α 是与进气吸力相关的参数, n 和 $m(=1-1/n)$ 为形状系数。

水分特征曲线中拐点含水量 θ_{inf} 和斜率 S_{inf} 可通过以下公式计算得出:

$$\theta_{\text{inf}} = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \left(\frac{2n-1}{n-1} \right)^{\frac{1}{n-1}} \quad (4)$$

$$S_{\text{inf}} = -n(\theta_s - \theta_r) \left(\frac{2n-1}{n-1} \right)^{\frac{1}{n-2}} \quad (5)$$

通过计算得到的参数可表征土壤的孔隙结构, 土壤有效孔隙度为 θ_s 和 θ_{inf} 的差值, 记作 P_{eff} , 通常对应于土壤中的中孔或大孔, 是总孔隙度中对饱和和流贡献最大的部分^[20]。土壤空气容量(AC)和植物有效水分(PAWC)可以从土壤水分特征曲线中获得, 计算公式如下:

$$\text{AC} = \theta_s - \theta_{\text{FC}} \quad (6)$$

$$\text{PAWC} = \theta_{\text{FC}} - \theta_{\text{PWP}} \quad (7)$$

式中: θ_{FC} 和 θ_{PWP} 分别为田间持水量(cm^3/cm^3)和永久萎蔫点时的体积含水量(cm^3/cm^3)。

1.4.3 CT 扫描与图像处理 本研究利用 CT (Phoenix Nanotom S, 德国通用电气传感与检测技术公司)扫描原状土柱样品, 扫描电压为 100 kv, 电流为 100 μA , 曝光时间为 1.25 s, 探测器型号为 ham-c 7942, 分辨率为 $2\,304 \times 2\,304$ 像素, 每个扫描样本至少采集 2 000 幅 16 位二维图片。图像处理采用三维岩石图像分析软件(四川大学开发)完成, 图像处理方法参考 Cui 等^[11]。简单概括为: 将目标二值图像导入软件模块, 进行三维形态分析与三维模型构建, 基于三维孔隙网络模型可计算获得每个孔隙等效球直径(μm)、孔隙表面积(μm^2)、孔隙体积(μm^3), 以及孔隙数量, 通过模型进一步计算可得到每个样品的土壤平均孔隙等效球直径(μm)、平均孔隙表面积(μm^2)和平均孔隙体积(μm^3)。根据孔径大小, 本研究将土壤孔隙分为以下 5 个级别: $25 \sim 125$ 、 $125 \sim 250$ 、 $250 \sim 500$ 、 $500 \sim 1\,000$ 、 $> 1\,000$ μm 。大孔隙度表示 CT 图像可识别的大孔隙(本研究中指直径 > 25 μm 的孔隙)总体积与样品总体积的占比, 用大孔隙总体积除以样品总体积得到。大孔隙度范围 $0 \sim 1$, 其值越大, 表示土壤中 > 25 μm 的孔隙占比越多。此外, 孔隙的形状(即

孔隙圆扁程度)可显著影响土壤导水能力。因此，通常用孔隙形状因子(SF)来表征孔隙偏离圆形/球形的程度，形状因子 SF 越接近 1，表示土壤孔隙越接近圆/球形。其计算公式如下：

$$SF = \frac{36\pi \times D \times V \times V}{S \times S \times S}$$

(8)

式中：*D* 为孔隙直径(μm)；*V* 为孔隙体积(μm³)；*S* 为孔隙表面积(μm²)。

1.5 统计分析

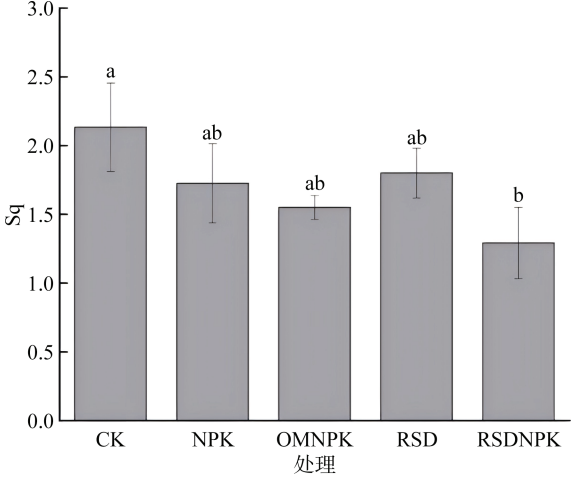
处理间差异和指标间相关性分析分别采用 SPSS 22.0 中的单因素方差分析 One-way ANOVA 和 Pearson 相关性分析，土壤各水力学参数采用 MATLAB 拟合得到。

2 结果与分析

2.1 长期不同施肥处理对耕层土壤结构的影响

2.1.1 土壤结构质量 Sq 值 不同施肥处理 0~20 cm 耕层土壤结构质量 VESS-Sq 值如图 2 所示。与 CK 相比，NPK、OMNPK 和 RSD 处理降低了土壤 Sq 值(降幅分别为 19.17%、27.39% 和 15.65%)，差异未达到显著性水平(*P*>0.05)。与其他处理对比，RSDNPK 处理的土壤 Sq 值最低，与 CK 对照相比，Sq 值减小 39.51%，且显著降低(*P*<0.05)，说明秸秆还田配施无机肥处理可有效改善土壤结构质量。与 NPK 处理相比，OMNPK 和 RSDNPK 处理均进一步降低了土壤 Sq 值，说明较猪粪和秸秆两种不同外源有机物料而言，秸秆与无机肥配施处理对改善土壤结构具有更明显的作用。

2.1.2 土壤团聚体分布及其稳定性 不同施肥处



(不同小写字母表示不同施肥处理间差异显著(*P*<0.05)，下同)

图 2 不同施肥处理土壤结构质量 Sq 值

Fig. 2 Sq values of soil structural quality under different fertilization treatments

理耕层土壤团聚体分布状况如表 2 所示。结果表明，与 NPK 处理相比，OMNPK 处理大团聚体(>2 mm)占比显著增加 116.78%，0.053~0.25 mm 粒级团聚体的比例显著降低，降幅为 30.87%(*P*<0.05)。添加秸秆(RSD 和 RSDNPK)处理较 NPK 处理而言，显著促进了大团聚体(>2 mm)的形成，增幅分别为 97.75% 和 65.53%(*P*<0.05)。

从平均重量直径(MWD)来看，与 NPK 处理相比，添加有机物料处理(OMNPK、RSD、RSDNPK)均显著增加土壤团聚体 MWD 值，增幅分别为 45.82%、40.85% 和 29.22%。研究结果表明，长期添加猪粪堆肥和秸秆等外源有机物显著降低土壤微团聚体形成，促进大团聚体形成，从而改善土壤物理结构，其中 OMNPK 处理效果优于 RSDNPK。

表 2 不同施肥处理土壤水稳性团聚体分布
Table 2 Distribution of water-stable aggregates under different fertilization treatments

处理	团聚体相对含量(%)				MWD (mm)
	>2 mm	0.25~2 mm	0.053~0.25 mm	<0.053 mm	
CK	18.53±4.35BCb	28.01±4.29ABa	35.00±4.69ABa	18.46±3.88Ab	0.748B
NPK	15.55±2.41Cc	29.24±1.50ABb	35.93±4.49Aa	19.27±4.05Ac	0.705B
OMNPK	33.71±9.07Aa	27.85±8.69Ba	24.84±5.22Cab	17.74±6.71Ab	1.028A
RSD	30.75±4.04Aa	29.58±3.87ABa	25.10±1.67Cb	14.58±4.17Ac	0.993A
RSDNPK	25.74±5.86ABa	30.56±2.68Aa	29.81±4.71BCa	13.89±1.81Ab	0.911A

注：同列不同大写字母表示同一团聚体粒级不同施肥处理之间差异显著(*P*<0.05)，同行不同小写字母表示同一施肥处理不同团聚体粒级之间差异显著(*P*<0.05)。

2.1.3 土壤大孔隙分布特征 CT 扫描分析结果显示(表 3，图 3)，与 CK 相比，所有施肥处理均提高了土壤大孔隙度，其中 NPK、OMNPK、RSD 和 RSDNPK 处理下土壤大孔隙度显著增加，

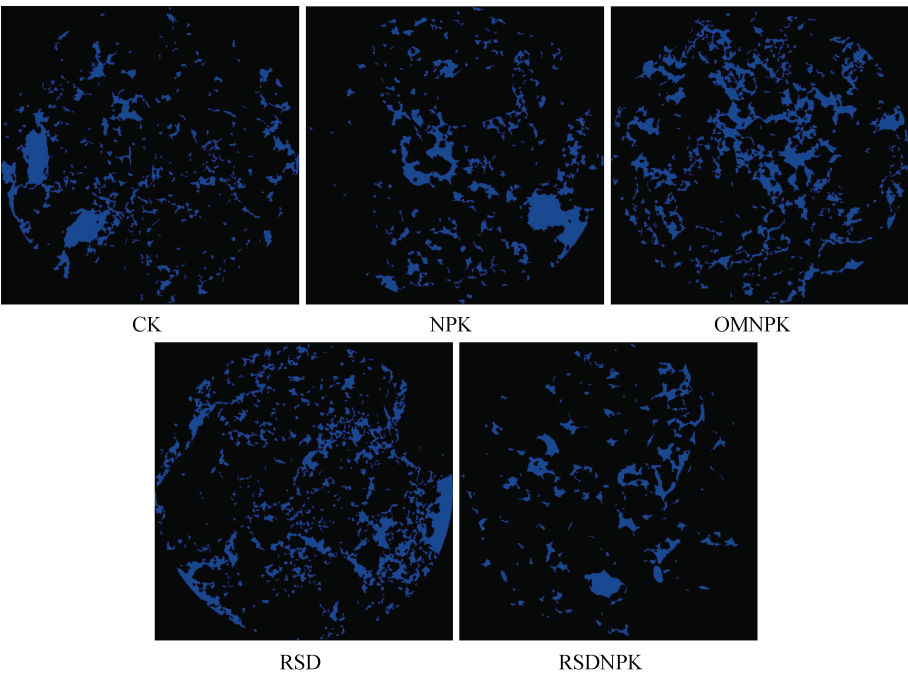
增幅分别为 50.00%、66.67%、83.33% 和 33.33%。较 NPK 处理而言，OMNPK 和 RSD 处理增加土壤大孔隙度(增幅分别为 11.11% 和 22.22%)和平均孔隙形状因子(增幅分别为 5.48% 和 9.59%)，降

低土壤平均孔隙等效球直径(降幅分别为 17.13% 和 21.20%)、平均孔隙体积(降幅分别为 10.40% 和 26.24%)以及平均孔隙表面积(降幅分别为 8.39%

和 22.44%)。然而, RSDNPK 较 NPK 处理土壤大孔隙度降低 11.11%, 而平均孔隙体积和平均孔隙表面积分别增加 79.87% 和 21.49%。

表 3 基于 CT 扫描和三维重建结果的土壤大孔隙参数统计特征
Table 3 Statistical characteristics of soil macropore parameters based on CT scanning and 3D reconstruction results

处理	土壤大孔隙度	平均孔隙等效球直径(μm)	平均孔隙体积(μm^3)	平均孔隙表面积(μm^2)	平均孔隙形状因子
CK	0.06	212.62	5.87×10^7	715 741	0.74
NPK	0.09	213.40	6.06×10^7	810 531	0.73
OMNPK	0.10	176.85	5.43×10^7	742 551	0.77
RSD	0.11	168.15	4.47×10^7	628 656	0.80
RSDNPK	0.08	214.28	1.09×10^8	984 719	0.75



(黑色为土壤基质, 蓝色为土壤孔隙, 视图大小 3.7 cm×3.7 cm)

图 3 不同施肥处理土壤大孔隙影像图

Fig. 3 Soil macropore images under different fertilization treatments

2.2 不同施肥处理对耕层土壤水力学特性的影响

不同施肥处理下的 0~20 cm 耕层土壤饱和和导水率如图 4 所示。与 CK 相比, 各施肥处理土壤饱和和导水率均有所增加, 但差异未达显著性水平($P>0.05$)。较 NPK 而言, 施用有机物料处理(OMNPK、RSD 和 RSDNPK)均降低了土壤饱和和导水率, 其中, RSD 处理降幅最大。

与 CK 相比(表 4), NPK、OMNPK 和 RSDNPK 处理均增加了土壤饱和含水量 θ_s (增幅分别为 16%、7% 和 12%)和残余含水量 θ_r (增幅分别为 6%、19% 和 25%), 表明施肥可以提高土壤保水性能。施用有机物料处理(OMNPK、RSD 和 RSDNPK)较 NPK 而言土壤饱和含水量 θ_s 分别降低 8%、10% 和 4%; 化肥配施有机物料处理(OMNPK 和 RSDNPK)土壤残余

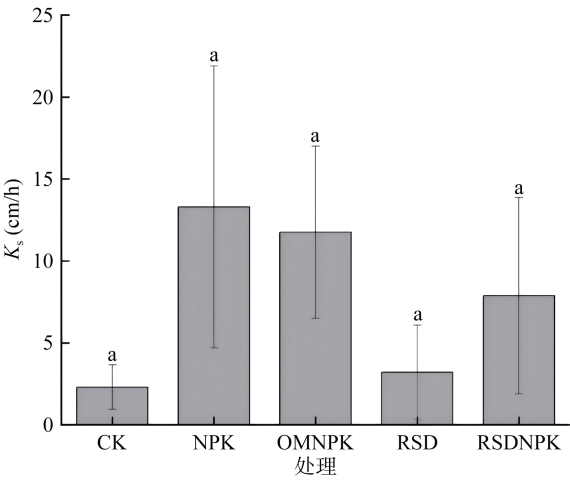


图 4 不同施肥处理下土壤饱和和导水率

Fig. 4 Soil saturated hydraulic conductivity under different fertilization treatments

含水量 θ_r 较 NPK 处理分别增加 12% 和 18%，RSD 处理土壤残余含水量 θ_r 降低 6%。表明有机无机配施可以有效增加土壤持水能力，单施有机肥效果不明显。

水分特征曲线中拐点含水量 θ_{inf} 作为界定孔隙结构中大孔隙的临界指标，与 CK 相比，各施肥处理 (NPK、OMNPK、RSD、RSDNPK) 均显著增加了土壤

θ_{inf} ，增幅分别为 14.49%、8.90%、11.08% 和 15.29%，表明施肥有利于增加土壤充满水孔隙的比例。土壤有效孔隙度 P_{eff} 表示土壤总孔隙中对饱和流贡献最大的部分，与 CK 相比，NPK、OMNPK 和 RSDNPK 处理均增加了土壤有效孔隙度，增幅分别为 21.72%、1.55% 和 1.75%，RSD 降低了土壤有效孔隙度，降幅为 11.60%。

表 4 不同施肥处理土壤水力学参数
Table 4 Soil hydraulic parameters under different fertilization treatments

处理	a (cm ⁻¹)	n	θ_s (m ³ /m ³)	θ_r (m ³ /m ³)	θ_{inf}	S_{inf} (m ³ /m ³)	P_{eff}	AC	PAWC
CK	0.05±0.01a	1.41±0.07a	0.43±0.02a	0.16±0.02a	0.33±0.01a	0.06±0.01a	0.09±0.01a	0.17±0.02a	0.08±0.01a
NPK	0.07±0.00a	1.40±0.04a	0.50±0.02b	0.17±0.02a	0.38±0.01b	0.07±0.01a	0.11±0.01b	0.23±0.02b	0.09±0.02a
OMNPK	0.08±0.02ab	1.40±0.14a	0.46±0.01a	0.19±0.03a	0.36±0.01b	0.06±0.01a	0.10±0.00a	0.19±0.03a	0.07±0.02a
RSD	0.10±0.04ab	1.20±0.09a	0.45±0.04a	0.16±0.05a	0.37±0.03ab	0.04±0.01a	0.08±0.01a	0.14±0.04a	0.09±0.00a
RSDNPK	0.10±0.02ab	1.37±0.17a	0.48±0.02ab	0.20±0.01a	0.38±0.01b	0.05±0.02a	0.10±0.02a	0.19±0.06a	0.07±0.01a

注： θ_s 和 θ_r 分别为饱和含水量和残余含水量，cm³/cm³； a (cm⁻¹)、 n 和 $m(m=1-1/n)$ 为 VG 模型经验参数； θ_{inf} 和 S_{inf} 分别为水分特征曲线中拐点含水量和斜率； P_{eff} 为土壤有效孔隙度；AC 为土壤空气容量；PAWC 表示植物有效水分；表中小写字母表示同列数据间的显著性水平($P<0.05$)。

2.3 土壤结构参数与水力学参数的相关关系

0~20 cm 耕层土壤结构与其水力学参数的相关关系见表 5。分析发现，土壤结构质量 Sq 与团聚体平均重量直径(MWD)、>0.25 mm 团聚体相对含量($R_{0.25}$)分别呈显著负相关($P<0.05$)，说明土壤结构质量较好的土壤(Sq 值越小)其大团聚体含量越高，土壤持水性能越好。

土壤团聚体平均重量直径(MWD)与 $R_{0.25}$ 之间存在极显著正相关关系，相关系数分别为 0.978($P<$

0.01)。 $R_{0.25}$ 与田间持水量(θ_{FC})之间存在显著正相关关系(相关系数为 0.526， $P<0.05$)，表明大团聚体含量越高，其稳定性越高，持水性能越好。

饱和含水量(θ_s)与拐点含水量(θ_{inf})、有效孔隙度(P_{eff})以及饱和导水率(K_s)之间均呈现显著正相关关系($P<0.01$)，相关系数分别为 0.893、0.714 和 0.595。 P_{eff} 与 K_s 之间均存在极显著正相关关系($P<0.01$)，相关系数为 0.694，其与田间持水量(θ_{FC})呈显著负相关关系($P<0.05$)。

表 5 土壤结构参数与水力学参数的相关系数
Table 5 Correlation coefficients between soil structure parameters and hydraulic parameters

	Sq	MWD	$R_{0.25}$	θ_s	θ_r	θ_{inf}	P_{eff}	θ_{FC}	K_s
Sq	1								
MWD	-0.515*	1							
$R_{0.25}$	-0.540*	0.978**	1						
θ_s	-0.324	-0.142	-0.113	1					
θ_r	-0.190	-0.054	-0.108	0.455	1				
θ_{inf}	-0.434	0.114	0.131	0.893**	0.509	1			
P_{eff}	0.002	-0.482	-0.446	0.714**	0.163	0.323	1		
θ_{FC}	-0.284	0.505	0.526*	0.014	-0.138	0.415	-0.615*	1	
K_s	-0.420	-0.126	-0.105	0.595*	0.216	0.355	0.694**	-0.438	1

注：Sq，土壤结构质量；MWD，水稳性团聚体平均重量直径(mm)； $R_{0.25}$ ，>0.25 mm 团聚体相对含量； θ_{FC} ，田间持水量(cm³/cm³)； K_s ，土壤饱和导水率(cm/h)。**：在 $P<0.01$ 水平(双尾)相关性显著；*：在 $P<0.05$ 水平(双尾)相关性显著。

3 讨论

3.1 添加有机物料对土壤结构的影响

本研究采用结构可视化法(VESS)对不同施肥处

理下土壤结构质量进行系统评价。结果显示，与 CK 相比，施肥处理显著降低土壤结构 Sq 值，有效提升土壤结构质量，其中，RSDNPK 处理提升土壤结构质量效果最显著。从不同有机物料处理效果来看，有

机无机配施(OMNPK 和 RSDNPK)优于单施化肥处理,这与前人研究结论一致^[4,21],进一步验证了有机无机肥配施在提升土壤结构质量中的重要作用。其次,土壤团聚体作为土壤结构的基本单元,其稳定性直接影响水分、养分和气体在土壤中的传输与交换^[1]。本研究发现,外源有机物料的添加(OMNPK 和 RSDNPK 处理)显著提高了直径 $>2\text{ mm}$ 大团聚体的占比,并显著增加了平均重量直径(MWD)($P<0.05$),从而增强了团聚体的稳定性。这一结果表明,有机物料能够有效促进土壤团聚体的形成与维持其长期稳定性。究其原因,一方面有机肥和秸秆还田能显著提高土壤有机碳含量^[21],而有机碳作为团聚体形成的关键粘结剂,对团聚体的形成具有决定性作用^[22];另一方面,外源有机物料的加入通过“激发效应”增加了微生物代谢底物的供应,促进有机物的分解与代谢^[23],微生物代谢过程中产生的多糖类等物质通过粘结作用进一步促进了大团聚体的形成,推动了大团聚体的形成与稳定^[24-25]。此外,较单施化肥而言,有机无机肥配施的协同作用在改善土壤团聚体结构方面尤为显著,无机肥的速效性迅速提高了土壤养分的短期有效性,从而促进了植物根系生长及根系分泌物的释放;另一方面,有机肥的长效性有助于土壤有机质的累积和微生物活性的提升,从而进一步稳定了团聚体结构^[26]。

施肥也会影响土壤孔隙结构,蔡太义等^[27]利用图像处理技术分析不同施肥处理对土壤孔隙的影响,结果表明,施用有机肥可显著增加土壤大孔隙度和孔隙数量。本研究结果表明,与 CK 相比,OMNPK 处理显著提高土壤 $75\sim 125\text{ }\mu\text{m}$ 大孔隙占比,RSDNPK 提高土壤 $75\sim 125\text{ }\mu\text{m}$ 和 $>1\text{ }000\text{ }\mu\text{m}$ 大孔隙占比。究其原因,有研究表明,施肥增加土壤有机质含量,而高含量的有机质对孔隙结构的贡献可能被低估^[28]。此外,土壤孔隙度和孔隙数量受到多种因素的共同影响,不同孔径的孔隙其形成机制也各不相同。例如,有学者认为 $0.01\sim 0.1\text{ }\mu\text{m}$ 孔隙主要与粘土片束和层间空间相关,而大于 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ 的孔隙则主要反应了团聚体间的空间结构^[29-30]。同时,土壤的矿物组成(如粘土和铁氧化物含量)、土壤类型^[31]、管理模式^[32]、植物根系分布及土壤动物活动^[2]均可能对土壤孔隙结构产生重要影响。综上所述,外源有机物料,特别是与无机肥配施时,表现出显著的协同作用,不仅改善了团聚体的形成和稳定性,还优化了土壤孔隙结构,为水分和养分的有效传输提供了有利条件。

3.2 添加有机物料对土壤水力学特征的影响

本研究发现,与不施肥对照组(CK)相比,所有施肥处理均显著提高了土壤饱和含水量、残余含水量以及土壤有效孔隙度(表 3),与常规施肥相比,有机肥配施化肥(OMNPK 和 RSDNPK)可以提高土壤持水能力,单施有机肥(RSD)效果不明显,这一结果与前期研究一致,表明外源有机物料在改变土壤水力特性及物理结构方面具有深远影响^[33]。柴冠群等^[34]的研究结果也表明施用秸秆、有机肥等炭基改良剂增大了土壤持水量和有效水库容,其原因可能在于有机物料的加入改善了土壤孔隙结构,增加土壤水流路径曲度,降低孔隙连通度,因此增加土壤持水能力^[35]。

综上所述,施用有机物料对土壤水力学特性的改善主要归因于两方面:首先,有机物料提升了土壤有机质含量,进而促进了团聚体的形成和稳定,改变了孔隙结构;其次,通过增加水流路径曲度和降低孔隙连通性,施肥措施有效延缓了水分的流失,提高了土壤的水分保持能力。未来研究应进一步探讨不同施肥模式下土壤微结构和团聚体演变的长期动态变化,以及这些变化如何与土壤微生物活动、植物根系生长相互作用,共同调控土壤水分传输和存储,从而为农业土壤管理和可持续发展提供更为系统的理论依据。

3.3 土壤结构质量与土壤水力学特征的关系

本研究通过相关性分析揭示了土壤结构质量与水力学特性之间的内在联系(表 5)。结果表明,土壤结构质量 S_q 与团聚体平均重量直径(MWD)、 $>0.25\text{ mm}$ 团聚体相对含量($R_{0.25}$)分别呈显著负相关($P<0.05$),说明土壤结构质量较好的土壤(S_q 值越小)其大团聚体含量越高,土壤持水性能越好。此外, $R_{0.25}$ 与田间持水量(θ_{FC})显著正相关($P<0.05$),说明土壤结构的改善(如大团聚体形成和稳定性增强)通过优化孔隙分布和连通性,直接调控了水分的储存与传输能力。一方面,团聚体稳定性的提升(表现为 MWD 增加)可能通过减少土壤中微团聚体的分散,促进大孔隙的连续性和均匀性,从而增强土壤的导水能力。这与 Celik^[6]的研究一致,其发现有机物料通过增加有机质含量和胶结作用,稳定了团聚体结构并改善了孔隙网络。另一方面,大团聚体占比($R_{0.25}$)与田间持水量(θ_{FC})的正相关性表明,大团聚体通过增加毛管孔隙比例,提升了土壤对水分的吸附能力。这与安艳等^[36]的研究结论相反,其认为大团聚体占比与持水量呈负相关。这种差异可能源于土壤类型和有机物料种类的不同:紫色土质地疏松且富含黏粒,大团聚体可能通过结合黏粒和有机质形成复合孔隙结构,而其他研究中砂质土

壤的大团聚体可能以机械稳定性为主, 缺乏毛管孔隙的贡献。此外, CT 扫描结果(图 3)显示, 施肥处理下孔隙形状因子(SF)的改善(如 RSD 处理 SF 值最高)表明孔隙形态更接近球形, 这可能通过降低水流路径的曲度^[35], 间接影响水分的滞留与释放。

4 结论

长期施肥提高紫色土耕层土壤 >0.25 mm 团聚体占比($R_{0.25}$)和团聚体平均重量直径(MWD), 与单施化肥(NPK)相比, 外源有机物料的添加(OMNPK 和 RSDNPK)提高了土壤结构质量, 增加了土壤大团聚体(>2 mm)占比($R_{0.25}$)及团聚体稳定性, 猪粪效果优于秸秆。与常规施肥相比, 有机无机配施(OMNPK 和 RSDNPK)均提高了土壤饱和含水量和有效孔隙度, 提高土壤保水能力, 单施秸秆(RSD)效果不显著。综上, 有机无机配施通过协同提升团聚体稳定性和优化孔隙分布, 实现了土壤结构与水力学功能的双重改善。

参考文献:

- [1] 王伟鹏, 张华. 长期施肥对华北农田褐土团聚体微结构与稳定性的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(10): 68–74.
- [2] Erktan A, Or D, Scheu S. The physical structure of soil: Determinant and consequence of trophic interactions[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2020, 148: 107876.
- [3] 如克艳木·买提司地克, 佐合热古丽, 钟雅璇, 等. 不同施肥对梨园土壤团聚体稳定性的影响[J]. 北方园艺, 2022(7): 91–98.
- [4] Li C L, Xu J B, He Y Q, et al. Dynamic relationship between biologically active soil organic carbon and aggregate stability in long-term organically fertilized soils[J]. Pedosphere, 2012, 22(5): 616–622.
- [5] 兰志龙, Muhammad N K, Tanveer A S, 等. 25 年长期定位不同施肥措施对关中壤土水力学性质的影响[J]. 农业工程学报, 2018, 34(24): 100–106.
- [6] Celik I. Effects of long-term organic amendments and mycorrhiza application on saturated hydraulic conductivity and nitrate leaching in a Typic Xerofluvent soil[J]. Fresenius Environmental Bulletin, 2009, 18(12): 2312–2322.
- [7] Leroy B L M, Herath M S K, De Neve S, et al. Effect of vegetable, fruit and garden (VFG) waste compost on soil physical properties[J]. Compost Science & Utilization, 2008, 16(1): 43–51.
- [8] 肖俊瑶, 许龄井, 王馨仪, 等. 秸秆源有机物料长期还田对土壤水分动态及孔隙结构的影响[J]. 生态学杂志, 2024, 43(9): 2729–2736.
- [9] 陈露, 章熙锋, 王艳强, 等. 紫色土坡耕地农田生态系统蒸散发与水分利用效率及其影响因素[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(6): 991–1007.
- [10] 刘玲, 崔俊芳, 杨红薇, 等. 长期外源有机物料添加对川中丘陵区农田土壤养分和有机碳组分的影响[J]. 土壤, 2023, 55(5): 991–1000.
- [11] Cui J F, Tang X Y, Zhang W, et al. The effects of timing of inundation on soil physical quality in the water-level fluctuation zone of the Three Gorges Reservoir Region, China[J]. Vadose Zone Journal, 2018, 17(1): 180043.
- [12] 于皓, 董智, 杨建英, 等. 基于 CT 扫描的不同土地利用类型土壤大孔隙特征及其入渗能力研究[J]. 干旱区资源与环境, 2023, 37(3): 55–61.
- [13] Ball B C, Batey T, Munkholm L J. Field assessment of soil structural quality—a development of the Peirlkamp test[J]. Soil Use and Management, 2007, 23(4): 329–337.
- [14] Guimarães R M L, Ball B C, Tormena C A. Improvements in the visual evaluation of soil structure[J]. Soil Use and Management, 2011, 27(3): 395–403.
- [15] Six J, Callewaert P, Lenders S, et al. Measuring and understanding carbon storage in afforested soils by physical fractionation[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(6): 1981–1987.
- [16] Elliott E T. Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1986, 50(3): 627–633.
- [17] Richards L A. A pressure-membrane extraction apparatus for soil solution[J]. Soil Science, 51(5): 377–386.
- [18] 邵明安, 王全九, 黄明斌. 土壤物理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [19] van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892–898.
- [20] 王西和, 杨金钰, 王彦平, 等. 长期施肥措施下灰漠土有机碳及团聚体稳定性特征[J]. 中国土壤与肥料, 2021(6): 1–8.
- [21] 陈超, 宓文海, 居静, 等. 长期不同施肥模式对中低产黄泥田土壤团聚体组成及碳组分的影响[J]. 华北农学报, 2022, 37(3): 168–174.
- [22] Abiven S, Menasseri S, Chenu C. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability—A literature analysis[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(1): 1–12.
- [23] Rasul M, Cho J, Shin H S, et al. Biochar-induced priming effects in soil via modifying the status of soil organic matter and microflora: A review[J]. Science of the Total Environment, 2022, 805: 150304.
- [24] 于雅茜, 裴久渤, 刘维, 等. ^{13}C 富集玉米根、茎、叶添加对长期不施肥和施肥处理棕壤土壤呼吸的影响及其激发效应[J]. 土壤学报, 2023, 60(4): 1077–1087.
- [25] 陈本学, 刘广路, 蔡春菊, 等. 不同施肥方式对毛竹林碳储量及土壤理化性质的影响[J]. 四川农业大学学报, 2018, 36(3): 323–328.
- [26] Fisk M C, Fahey T J. Microbial biomass and nitrogen cycling responses to fertilization and litter removal in young northern hardwood forests[J]. Biogeochemistry, 2001, 53(2): 201–223.
- [27] 蔡太义, 李玮, 王志刚, 等. 长期施肥对砂姜黑土大孔隙形态和数量特征的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2022, 39(6): 1106–1114.

- [28] Paz Ferreiro J, Miranda J G V, Vidal Vázquez E. Multifractal analysis of soil porosity based on mercury injection and nitrogen adsorption[J]. *Vadose Zone Journal*, 2010, 9(2): 325–335.
- [29] Lipiec J, Walczak R, Witkowska-Walczak B, et al. The effect of aggregate size on water retention and pore structure of two silt loam soils of different genesis[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 97(2): 239–246.
- [30] Sasanian S, Newson T A. Use of mercury intrusion porosimetry for microstructural investigation of reconstituted clays at high water contents[J]. *Engineering Geology*, 2013, 158: 15–22.
- [31] Zong Y T, Yu X L, Zhu M X, et al. Characterizing soil pore structure using nitrogen adsorption, mercury intrusion porosimetry, and synchrotron-radiation-based X-ray computed microtomography techniques[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15(2): 302–312.
- [32] Hajnos M, Lipiec J, Świeboda R, et al. Complete characterization of pore size distribution of tilled and orchard soil using water retention curve, mercury porosimetry, nitrogen adsorption, and water desorption methods[J]. *Geoderma*, 2006, 135: 307–314.
- [33] Cayci G, Temiz C, Sözüdogru Ok S. The effects of fresh and composted chicken manures on some soil characteristics[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2017, 48(13): 1528–1538.
- [34] 柴冠群, 赵亚南, 黄兴成, 等. 不同炭基改良剂提升紫色土蓄水保墒能力[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(1): 296–302, 309.
- [35] 刘旭, 白一茹, 马嫻, 等. 生物炭对黄绵土水分吸渗特征及水力学参数的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2023, 37(3): 77–84.
- [36] 安艳, 姬强, 赵世翔, 等. 生物质炭对果园土壤团聚体分布及保水性的影响[J]. *环境科学*, 2016, 37(1): 293–300.

(责任编辑: 王方方)