

周启涛, 丁天宇, 郭自春, 李嘉奇, 黄尚书, 吴艳, 成艳红, 张帅普, 高磊, 甘磊, 彭新华. 长期香根草篱协同稻草覆盖改善红壤坡耕地孔隙结构并增强土壤导气性[J]. 土壤学报, 2026,

ZHOU Qitao, DING Tianyu, GUO Zichun, LI Jiaqi, HUANG Shangshu, WU Yan, CHENG Yanhong, ZHANG Shuaipu, GAO Lei, GAN Lei, PENG Xinhua. Long-term Combined Vetiver Hedgerows (*Vetiveria Zizanioides*) and Straw Mulching Improves Soil Pore Structure and Air Permeability in Red Soil Sloping Cropland[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

长期香根草篱协同稻草覆盖改善红壤坡耕地孔隙结构并增强土壤导气性*

周启涛^{1,2}, 丁天宇^{2,3}, 郭自春^{2†}, 李嘉奇^{2,4}, 黄尚书^{5†}, 吴艳⁵,
成艳红⁵, 张帅普¹, 高磊², 甘磊¹, 彭新华⁶

(1. 桂林理工大学广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 桂林 541006; 2. 土壤与农业可持续发展全国重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 211135; 3. 中国科学院大学南京学院, 南京 211135; 4. 江西农业大学国土资源与环境学院, 南昌 330045; 5. 江西省红壤及种质资源研究所/耕地改良与质量提升江西省重点实验室/国家红壤改良工程技术研究中心, 南昌 330046; 6. 北方干旱半干旱耕地高效利用全国重点实验室(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所), 北京 100081)

摘要: 红壤坡耕地长期侵蚀与耕作扰动易导致耕层孔隙结构退化, 进而制约入渗与通气过程并影响作物生产力。依托连续 15 年水土保持定位试验, 结合高分辨率 X 射线 CT 技术, 探究不同水土保持措施: 等高种植 (CK)、香根草篱 (H)、稻草覆盖 (M)、稻草覆盖与香根草篱复合处理 (HM), 对耕层土壤孔隙结构特征的影响, 并揭示其与土壤饱和导水率 (K_s)、导气率 (K_a) 的关系。结果表明, 与 CK 相比, HM 处理使土壤大孔隙度 ($> 60 \mu\text{m}$)、连通孔隙度、水力半径、 $> 150 \mu\text{m}$ 孔隙度、平均孔径、全局连通性分别显著提高 79.0%、113%、30.2%、112%、51.2%和 54.4% ($P<0.05$), 使生物孔隙度和最大直径分别显著提高 129%和 80.0% ($P<0.05$); M 处理使 K_s 显著增加了 5.46% ($P<0.05$), H 和 HM 处理分别使 K_a 显著提高了 8.15%和 9.02% ($P<0.05$)。相关分析表明, K_a 与大孔隙度、连通孔隙度、水力半径、 $> 300 \mu\text{m}$ 孔隙度、临界孔径呈显著正相关 ($P<0.05$); 就生物孔隙特征参数而言, K_a 与生物孔隙度和长度密度呈显著正相关 ($P<0.05$)。综上所述, 香根草篱协同稻草覆盖能够显著改善红壤坡耕地土壤孔隙结构并增强导气率, 为该区水土保持与耕层结构改良提供技术支撑。

关键词: 红壤坡耕地; 孔隙结构; 水土保持措施; X 射线 CT 扫描; 导气率

中图分类号: S152 文献标志码: A

Long-term Combined Vetiver Hedgerows (*Vetiveria Zizanioides*) and Straw Mulching Improves Soil Pore Structure and Air Permeability in Red Soil Sloping Cropland

ZHOU Qitao^{1,2}, DING Tianyu^{2,3}, GUO Zichun^{2†}, LI Jiaqi^{2,4}, HUANG Shangshu^{5†}, WU Yan⁵, CHENG Yanhong⁵,

* 中国科学院战略性先导科技专项 (A 类) (XDA0440404) 和国家自然科学基金项目 (42267055) 资助 Supported by the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences (No. XDA0440404) and the National Natural Science Foundation of China (No. 42267055)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zcguo@issas.ac.cn; hss1232005@163.com

作者简介: 周启涛 (2000—), 男, 江西南昌人, 硕士研究生, 主要从事土壤结构及水气传输研究。E-mail: 15179127643@163.com

收稿日期: 2026-03-02; 收到修改稿日期: 2026-06-05; 网络首发日期 (www.cnki.net):

ZHANG Shuaipu¹, GAO Lei², GAN Lei¹, PENG Xinhua⁶

(1. Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin University of Technology, Guilin 541006, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Nanjing 211135, China; 4. College of Land Resources and Environment, Jiangxi Agriculture University, Nanchang 330045; 5. Jiangxi Institute of Red Soil and Germplasm Resources / Key Laboratory of Arable Land Improvement and Quality Improvement of Jiangxi Province / National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Nanchang 330046, China; 6. State Key Laboratory of Efficient Utilization of Arid and Semi-arid Arable Land in Northern China, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Beijing 100081, China;)

Abstract: 【Objective】 In red soil sloping cropland, prolonged erosion and tillage disturbance often degrade the pore structure in the plow layer, restricting infiltration and aeration processes and ultimately reducing crop productivity. This study evaluated how four soil and water conservation practices, including peanuts grown in high order (CK), vetiver hedges (*Vetiveria zizanioides*) (H), straw mulching (M), and their combined application (HM), affect plow-layer pore structure and quantified the relationships between pore structure characteristics and saturated hydraulic conductivity (K_s) and air permeability (K_a).

【Method】 A 15-year field experiment was conducted on red soil sloping cropland. Intact soil cores from the plow layer were scanned using high-resolution X-ray computed tomography (CT) to characterize pore structure under CK, H, M, and HM. Soil saturated hydraulic conductivity (K_s) and air permeability (K_a) were measured in the same cores to assess water and gas transport and to relate functional properties to CT-derived pore metrics. 【Result】 Compared to CK, HM significantly increased macropore porosity ($> 60 \mu\text{m}$), the largest connected macropore porosity, hydraulic radius, porosity of pores $> 150 \mu\text{m}$, mean pore diameter, and global connectivity by 79.0%, 113%, 30.2%, 112%, 51.2%, and 54.4%, respectively ($P<0.05$). HM also significantly increased biopore porosity and maximum biopore diameter by 129% and 80.0%, respectively ($P<0.05$). Straw mulching alone (M) significantly increased K_s by 5.46% ($P<0.05$), whereas H and HM treatments significantly increased K_a by 8.15% and 9.02%, respectively ($P<0.05$). Also, K_a was positively correlated with macropore porosity, the largest connected macropore porosity, hydraulic radius, porosity of pores $> 300 \mu\text{m}$, and critical pore radius ($P<0.05$). Among biopore parameters, K_a was positively correlated with biopore porosity and biopore length density ($P<0.05$). 【Conclusion】 Long-term integration of vetiver hedgerows (*Vetiveria zizanioides*) with straw mulching substantially improved plow-layer pore structure and enhanced soil air permeability in red soil sloping cropland. These findings provide practical evidence to support optimized soil and water conservation and plow-layer structural improvement in this region.

Key words: Red soil sloping land; Pore structure; Soil and water conservation measures; X-ray computed tomography (CT); Air permeability

红壤作为我国南方的主要土壤类型之一，分布面积约 218 万 km^2 ，占国土总面积的 23%^[1-3]。该区域水热条件优越，农业生产潜力巨大。然而，红壤普遍存在质地黏重、养分含量低且易淋失等特征，在自然因素与人为活动的共同影响下，极易发生水土流失和结构退化^[4]。长期耕作叠加强降雨作用，易导致坡耕地土壤结构退化，致使孔隙连通性下降、水分入渗能力减弱，从而制约作物生长并威胁土壤健康^[5]。因此，改善红壤坡耕地孔隙结构、提升水气传输功能并缓解土壤水土流失过程，已成为当前红壤区水土保持与农业生态领域的关键问题。

秸秆覆盖能够削弱雨滴打击、降低坡面径流流速并延长降雨后的水分入渗时间。研究表明，秸秆覆盖可使红壤坡耕地地表径流降低 78.6%^[6]，产沙量降低 558%^[7]，土壤饱和导水率提高 2.7 倍^[8]。然而，这些研究主要集中于单一措施，缺乏对坡耕地土壤孔隙结构及功能的系统研究，尤其是复合水土保持措施（如秸秆覆盖结合植物篱）对孔隙网络重构与水气传输功能的影响仍不明确。对于结构稳定性差的红壤坡耕地而言，侵蚀与干湿交替过程的叠加效应更易导致耕层结构持续退化及土壤功能下降^[9-11]。Nsabimana 等^[12]指出，干湿循环会显著降低土壤团聚体稳定性及大团聚体比例，同时

削弱孔隙连通性,导致土壤结构退化。Zhao 等^[13]的研究显示,坡度增加会显著加剧土壤流失,进一步增加坡耕地土壤结构退化的风险。植物篱种植作为重要的水土保持措施,不仅可减少侵蚀,还能通过发达的根系形成连续、稳定的生物孔隙网络,从而改善孔隙连通性和土壤功能。例如,香根草(*Vetiveria zizanioides* L.)根系可在根-土界面产生挤压作用,形成多级分叉且稳定的孔隙通道^[14-15],为气体交换和水分运移提供优先路径,同时降低径流冲刷和团聚体破碎风险,为坡耕地土壤结构的长期维持提供生物基础。此外,根系死亡腐解后,不仅可在原位形成新孔隙,其腐解产物还能作为土壤有机质的重要来源,促进团聚体形成和发育,以提高孔隙结构的稳定性^[16-17]。同时,香根草作为一种耐逆性强的水土保持作物,具有发达的根系,常被应用于红壤坡耕地以减轻水土流失^[18-19]。然而,与传统直根系作物相比,香根草根系属于较细的须根系,在土壤中呈密集且广泛分布的特点,对土壤结构扰动较小,但其是否能够通过构建稳定的生物孔隙通道而显著改善坡耕地红壤孔隙网络,仍缺乏基于三维孔隙结构的定量证据。

土壤结构是影响土壤保水和导气率的主要因素^[20]。导气率反映土壤与大气之间气体交换能力,直接影响氧气进入及 CO₂、N₂O 释放^[21]。研究表明,土壤导气率是控制温室气体产生和释放的重要物理过程,孔隙结构直接决定氧气和其他气体进入土壤的效率^[22],影响微生物分解有机物^[23]。在农业生产中,改善土壤导气率可促进作物根系氧气交换,为作物生长创造良好的空气环境。稻草覆盖与香根草篱作为该区域水土保持的关键技术措施。已有研究表明^[24],长期草篱种植与稻草覆盖可缓解坡耕地红壤微生物养分限制,这表明二者可能通过改善土壤结构与微环境产生协同效应。然而,目前有关香根草篱联合稻草覆盖对坡耕地土壤孔隙结构及水气传输功能影响的研究仍相对不足,亟待进一步深入探讨。本研究依托红壤坡耕地连续 15 年水土保持定位试验,利用 X 射线 CT 技术探究稻草覆盖、香根草篱及二者复合处理下土壤孔隙结构特征,并分析土壤水气传输功能,以期为红壤坡耕地土壤结构改良与水土保持措施优化提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

水土保持长期定位试验于 2009 年在江西省红壤及种质资源研究所开展(28°15'30"N, 116°20'24"E)。研究区属中亚热带季风气候,多年平均气温为 18.1℃,多年平均降水量为 1537 mm,年蒸发量为 1100~1200 mm;海拔高度 25~30 m,坡度约为 10°。供试土壤为第四纪红黏土发育的典型红壤。试验开始时土壤理化性质为: pH(H₂O) 5.0,土壤容重 1.27 g·cm⁻³,有机碳 9.39 g·kg⁻¹,全氮 1.93 g·kg⁻¹,全磷 0.66 g·kg⁻¹,全钾 1.39 g·kg⁻¹,有效磷 6.8 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

试验采用随机区组设计(图 1)。共设置 4 个处理:等高种植(CK)、香根草篱(H)、稻草覆盖(M)、稻草覆盖与香根草篱(HM),每个处理设置 3 次重复,共 12 个小区,小区面积为 120 m²(5 m×24 m)。各处理土壤的基础肥力水平一致,花生品种、种植密度与田间管理措施均保持一致。种植制度为花生-红薯轮作,一年一熟制,供试花生品种为粤油 991,种植密度为 32 cm×20 cm,红薯品种为苏薯 8 号,种植方式均为等高种植;花生每年 4 月播种,播种量为 150 kg·hm⁻²,10 月收获,收获后秸秆全部移除。CK 与 M 处理每小区种植 72 行;H 与 HM 处理每小区种植 66 行,其余 6 行为香根草篱。香根草篱沿等高线方向每隔 8 m 设置一条双行篱带,株距与行距均为 50 cm;试验期间定期刈割,维持株高 30~50 cm。在 M 和 HM 处理中,稻草来源于前一年附近农田中稻和晚稻收获后剩余秸秆,粉碎至 10 cm 以内,自然风干(含水量为 15%~20%)。干稻草的碳、氮、磷、钾含量分别为 430、8.5、1.2、20.5 g·kg⁻¹。每年花生出苗后将干稻草按 4500 kg·hm⁻² 均匀覆盖于作物行间,后期不再补充。HM 处理中的稻草覆盖与香根草篱按等高线方向空间布置,秸秆覆盖位于作物行间,

草篱带占用小区两侧边缘 6 行，保证稻草覆盖与草篱带间有适度间距，实现复合处理下的空间重叠管理。耕作管理方面，土壤每三年进行一次机械翻耕，耕作深度为 0~15 cm。翻耕后均匀施撒石灰 1875 kg·hm⁻²。花生播种前施用复合肥 (N-P₂O₅-K₂O: 15-15-15) 416.7 kg·hm⁻² 和钙镁磷肥 (CaO ≥ 18%, MgO ≥ 3%, P₂O₅ ≥ 12%) 525 kg·hm⁻²。

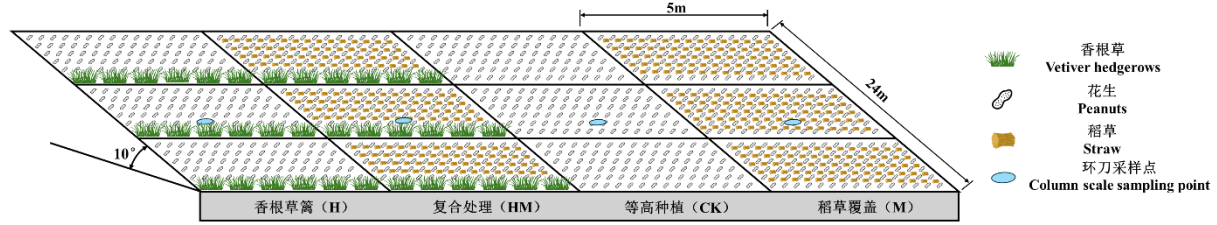


图 1 不同水土保持措施示意图

Fig. 1 Schematic diagrams of various soil and water conservation measures

1.3 土壤样品采集

2024 年 9 月下旬 (花生收获后 1 个月)，于各处理小区坡中部采集土壤样品。采用 PVC 环刀 (直径 5 cm、高 5 cm) 在 5~10 cm 深度采集原状土柱，用以表征耕层 (0~15 cm) 的结构特征^[25-27]。在香根草篱处理 (H、HM) 中，采样点位于距香根草篱上缘 2 m 范围内；在无篱处理 (CK、M) 中，于相同坡位沿等高线布点采样。采集后的原状样品用保鲜膜密封包裹以减少水分散失。共获得 16 个原状土柱样品，用于 X 射线 CT 扫描及水气传输功能测定。

1.4 CT 扫描与图像处理

利用工业 CT (v|tome|x m 300) 对原状土柱进行扫描。扫描电压为 160 kV、电流为 160 μA；样品台匀速旋转 360°，共采集 1 800 幅投影图；体素分辨率为 30 μm。利用 Datos | x2 Rec 软件进行图像重建，获得 8 位灰度图像，并以 TIFF 格式导出用于后续分析。

在 Fiji 软件中采用全局阈值分割法分割土壤孔隙，并根据目视法仔细观察灰度图像的自动阈值。为降低边缘效应，选取土柱中心区域作为感兴趣区域 (Region of interest, ROI)，ROI 尺寸为 1 333 × 1 333 × 1 400 体素 (对应实际体积为 40 mm × 40 mm × 42 mm)。在二值孔隙图像基础上，进一步计算土壤大孔隙度 (孔径 > 60 μm)、连通孔隙度、孔径分布、平均孔径、水力半径、临界孔径、全局连通性及表面积密度等指标^[28]。

土壤大孔隙度指 ROI 内大孔隙 (> 60 μm) 体积占 ROI 总体积的百分比^[29]。连通孔隙度是指土壤中的最大的相互连通孔隙的体积占 ROI 体积的百分比^[30]。计算该指标值前，利用 Bone J 插件中的 “Purify” 功能对二值图像进行处理，以获取最大的连通孔隙网络。孔径分布与平均孔径通过 Bone J 插件里的 “Thickness” 模块计算^[30]，按照孔径大小划分为 4 个等级，分别为 60~150、150~300、300~500 和 > 500 μm。水力半径定义为土壤大孔隙体积与表面积之比^[29]；临界孔径是指能够自由通过土壤孔隙网络的最大球体直径，由 “Soil J” 插件计算可得^[31]。表面积密度由 “MorphoLibj” 插件中 “Analyze Regions 3D” 功能计算得到，指单位体积 ROI 内土壤孔隙的表面积。全局连通性 Γ 是指两个孔隙为同一个孔隙的概率，其数值介于 0~1 之间，数值越大表示孔隙连通性越高^[32]，由以下公式计算：

$$\Gamma = \frac{\sum_{i=0}^n V_i^2}{(\sum_{i=0}^n V_i)^2} \quad (1)$$

式中， Γ 代表全局连通性， n 代表孔隙的个数， V_i 代表每个孔隙的体积，孔隙的数量和体积利用 “particle analyzer” 插件计算。

生物孔隙的识别与分割参考丁天宇等^[33]的方法进行。首先，利用 “Purify” 功能区分连通孔隙与孤立孔隙；其次，采用三维距离变换分水岭算法，将连通孔隙图像中的生物孔隙与非生物孔隙分离；最后，基于孔隙结构的形态特征，利用随机森林分类模型进一步筛选生物孔隙，并对少量误分类的

非生物孔隙进行人工校正。基于上述流程，计算生物孔隙度、生物孔隙占比、长度密度以及生物孔隙平均孔径和最大直径等指标。具体而言，生物孔隙度为 ROI 内生物孔隙体积占 ROI 总体积的百分比；生物孔隙占比指生物孔隙体积与大孔隙体积（> 60 μm）的比值。长度密度为单位 ROI 体积内生物孔隙的总长度，先采用“Skeletonise”对生物孔隙网络骨架化，再用“Analyze Skeleton”计算长度密度；生物孔隙平均孔径和最大直径采用“Local Thickness”功能计算。

1.5 土壤饱和导水率和导气率的测定

将原状环刀样品除去保鲜膜后置于去离子水中，水位淹没至环刀高度的 3/4，浸泡 2~3 d 至样品达到饱和状态。饱和导水率（ K_s , mm·h⁻¹）采用定水头法测定：在恒定水头条件下，记录一定时间内流出水量，据此计算饱和导水率。 K_s 计算公式为：

$$K_s = \frac{QL}{Ath} \quad (2)$$

式中， K_s 为在 t °C 时的土壤饱和导水率（按照哈赞公式换算成标准温度 10 °C 下的速率）， Q 为单位时间内的排水量， A 为环刀面积， h 为水头高度， L 为土芯高度， t 为渗漏时间。

饱和导水率测定后，将样品置于沙箱中，在基质势为 -33 kPa 条件下平衡 3 d，直至出流稳定，以获得近似田间持水状态。随后采用常压法测定土壤导气率：样品一端连通大气，另一端连接至导气装置；在样品与装置的连接处涂覆凡士林以确保气密性并防止漏气。待压力计水柱高度差稳定后，记录 10 s 内置换水量及压力计高度差，据此计算土壤导气率（ K_a , μm²）：

$$Q = K_a \cdot \frac{F \Delta P \Delta t}{h \eta} \cdot \frac{\eta_{25^\circ\text{C}}}{\eta_t} \quad (3)$$

式中， K_a 为土壤导气率， Q 为流出水量， F 为土壤通气面积， P 为压力计高差， Δt 为时间， h 为土层厚度， $\eta_{25^\circ\text{C}}$ 为 25 °C 时的空气黏滞度， η_t 为测定透气温度 t °C 时的空气黏滞度。土壤饱和导水率（ K_s ）与导气率（ K_a ）均在同一环刀样品上连续测定 3 次，取算术平均值作为该样品的最终测定值。

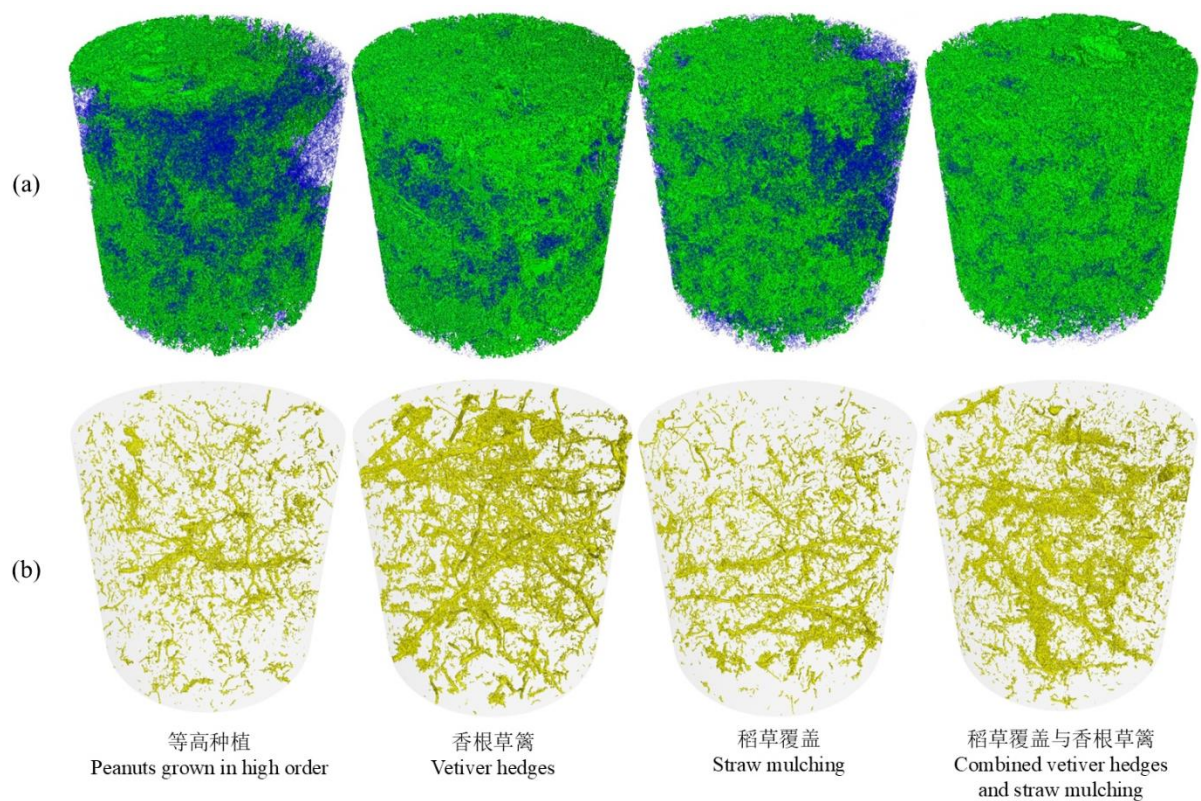
1.6 数据处理与分析

数据统计分析在 SPSS 27.0 中完成。采用单因素方差分析（One - Way ANOVA）检验不同处理对土壤孔隙特征参数及水气传输功能的影响；当处理效应达到显著水平（ $P < 0.05$ ）时，采用最小显著差异法（Least Significance Difference, LSD）进行事后多重比较。相关性分析采用皮尔逊法（Pearson），显著性水平为 0.05。考虑到饱和导水率（ K_s ）及导气率（ K_a ）存在较大变异并呈偏态分布，在方差分析与相关性分析中对 K_s 和 K_a 进行自然对数转换（ $\ln K_s$ 、 $\ln K_a$ ）以满足统计分析对数据分布的要求。孔隙结构三维可视化图像利用 VG Studio Max 3.4 绘制。

2 结 果

2.1 长期稻草覆盖和香根草篱种植对红壤坡耕地孔隙结构特征的影响

从三维图像来看（图 2a），与等高种植（CK）相比，香根草篱处理（H）和稻草覆盖处理（M）均促进耕层孔隙网络的连通与延展；其中稻草覆盖与香根草篱复合处理（HM）孔隙分布更为均匀，连通孔隙网络的连续性更强。生物孔隙三维图像（图 2b）显示，香根草篱处理与复合处理中以连续的管状生物孔隙为主导，孔隙网络贯通程度较高；而等高种植与稻草覆盖处理中生物孔隙以孤立结构为主，连通性相对较弱。说明草篱处理（H、HM）能够显著增加土壤孔隙数量并促进孔隙整体连通性。



注：图 a 中的绿色、蓝色部分和图 b 中的黄色部分分别代表感兴趣区内连通孔隙网络、孤立孔隙和生物孔隙。
Note: The green part, blue part (Fig. a), and yellow part (Fig. b) represent the connected pore network, isolated pores, and biopores within the region of interest, respectively.

图 2 不同水土保持措施下连通/孤立孔隙及生物孔隙三维可视化图像（以彩图发表）

Fig. 2 Three-dimensional visualization images of connected/isolated pores and biopores under different soil and water conservation measures

孔隙结构定量指标与可视化结论一致（表 1）。相较于等高种植处理，香根草篱处理使水力半径提高了 16.6% ($P < 0.05$)。HM 处理对孔隙结构改善幅度更大：大孔隙度 ($> 60 \mu\text{m}$)、连通孔隙度、水力半径、平均孔径和全局连通性分别提高了 79.0%、113%、30.2%、51.4% 和 54.4% ($P < 0.05$)，连通孔隙度与全局连通性均提高表明土壤孔隙网络得到改善。就孔径分布而言（图 3），4 种处理下大孔隙体积分布主要集中于 $60 \sim 300 \mu\text{m}$ 区间，其贡献占大孔隙度的 70% 以上；与 CK 相比，HM 处理显著增加中大孔径孔隙贡献率，其中 $150 \sim 300 \mu\text{m}$ 、 $300 \sim 500 \mu\text{m}$ 及 $> 500 \mu\text{m}$ 范围内的孔隙度分别提高 68.9%、195%、359% ($P < 0.05$)；H 处理亦使 $> 500 \mu\text{m}$ 范围内孔隙度提高 168% ($P < 0.05$)。表明草篱措施处理（H、HM）中的土壤孔隙由相对细小、孤立的孔隙逐步转变为有利于气体与水分传输的孔隙。

生物孔隙特征同样呈现香根草篱的作用更为显著的趋势（表 2）。与 CK 相比，H 处理使生物孔隙度和生物孔隙占比分别提高 100% 和 49.9% ($P < 0.05$)；HM 处理使生物孔隙度和生物孔隙最大直径分别提高 129% 和 80.0% ($P < 0.05$)。从图 2b、表 2 中生物孔隙度、平均孔径及最大直径可见，草篱处理（H、HM）中形成的生物孔隙更丰富、孔径更大，且孔壁光滑、表面积较小，利于气体流动。

表 1 土壤孔隙特征参数

Table 1 Soil pore characteristics parameters

处理 Treatments	大孔隙度 Macroporosity ($> 60 \mu\text{m}$) /%	连通孔隙度 Connected porosity/%	水力半径 Hydraulic radius/ μm	平均孔径 Mean pore diameter/ μm	临界孔径 Critical pore diameter / μm	全局连通性 Connection probability	表面积密度 Surface area density /($\text{mm}^2 \cdot \text{mm}^{-3}$)
CK	8.30 $\pm$ 0.67b	6.62 $\pm$ 0.89b	43.13 $\pm$ 0.79c	210.5 $\pm$ 11.0b	109.8 $\pm$ 10.5a	0.57 $\pm$ 0.08b	0.030 $\pm$ 0.001a
H	11.08 $\pm$ 0.63b	9.75 $\pm$ 0.81b	50.27 $\pm$ 2.12b	278.3 $\pm$ 36.4ab	121.6 $\pm$ 33.5a	0.74 $\pm$ 0.04ab	0.025 $\pm$ 0.001b
M	9.95 $\pm$ 1.27b	8.73 $\pm$ 1.43b	46.78 $\pm$ 0.93bc	224.0 $\pm$ 13.8b	133.2 $\pm$ 1.8a	0.71 $\pm$ 0.06ab	0.270 $\pm$ 0.001b
HM	14.86 $\pm$ 0.70a	14.13 $\pm$ 0.72a	56.14 $\pm$ 1.29a	318.8 $\pm$ 32.1a	159.9 $\pm$ 10.2a	0.88 $\pm$ 0.01a	0.023 $\pm$ 0.001c

注：CK、H、M 和 HM 分别代表等高种植、香根草篱种植、稻草覆盖和稻草覆盖与香根草篱复合处理。同列不同小写字母表示不同水土保持措施处理间差异显著 ($P<0.05$)。下同。Note: CK, H, M, and HM represent peanut contour farming, vetiver hedgerows farming, straw mulching, and combined vetiver hedgerows and straw mulching treatment, respectively. Different lowercase letters indicate significant differences under different soil and water conservation treatments ($P<0.05$). The same below.

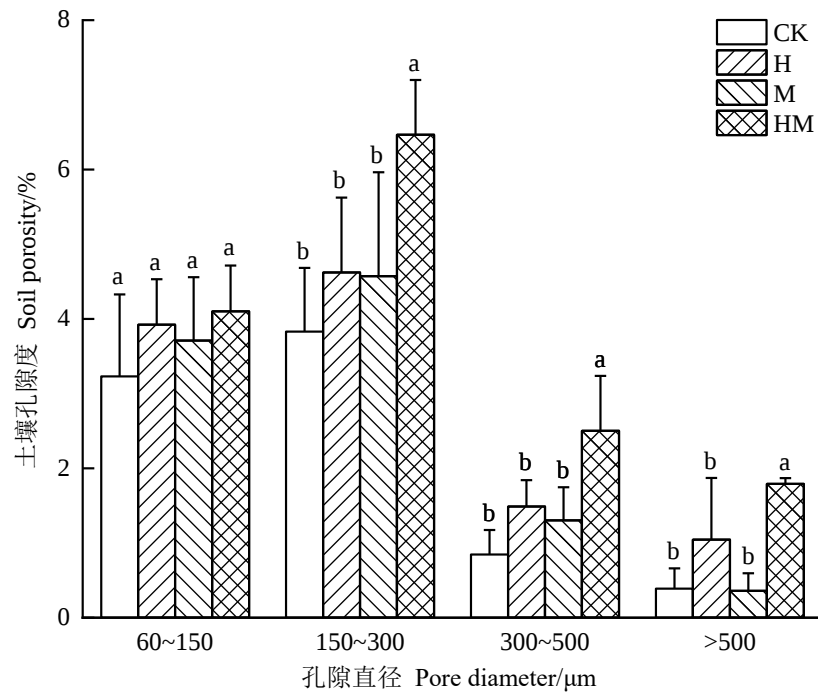


图3 不同水土保持措施下孔径大小分布

Fig. 3 Pore size distributions under different soil and water conservation measures

表 2 土壤生物孔隙特征参数

Table 2 Soil biopore characteristics parameters

处理 Treatments	生物孔隙度 Bioporesity /%	生物孔隙占比 Biopore proportion/%	长度密度 Length density /(mm·mm ⁻³)	平均孔径 Mean diameter/ μ m	最大直径 Largest diameter / μ m
CK	0.28±0.02b	3.41±0.12b	4.32±0.12a	333.8±60.8a	1052±130b
H	0.56±0.05a	5.11±0.42a	6.72±0.48a	533.4±182.6a	1471±349ab
M	0.32±0.04b	3.46±0.69b	5.49±0.75a	304.7±28.6a	1000±111b
HM	0.64±0.09a	4.24±0.43ab	5.81±0.98a	699.9±332.0a	1894±283a

2.2 长期稻草覆盖和香根草篱种植对红壤坡耕地导水导气特征的影响

不同水土保持措施对土壤饱和导水率、导气率的影响存在明显差异（图 4）。总体而言，不同水土保持措施均能不同程度地提高土壤饱和导水率和导气率。与 CK 相比，M 处理显著提高饱和导水率 5.46% ($P<0.05$)，说明 M 处理可减少雨滴击打破坏，保护原有孔隙，有利于水分入渗。在导气率方面，H 和 HM 处理下 K_a 分别显著增加 8.15% 和 9.02% ($P<0.05$)，说明 H 和 HM 处理则更有利于形成连通性孔隙，为气体传输提供优先通道，从而显著提升 K_a 。

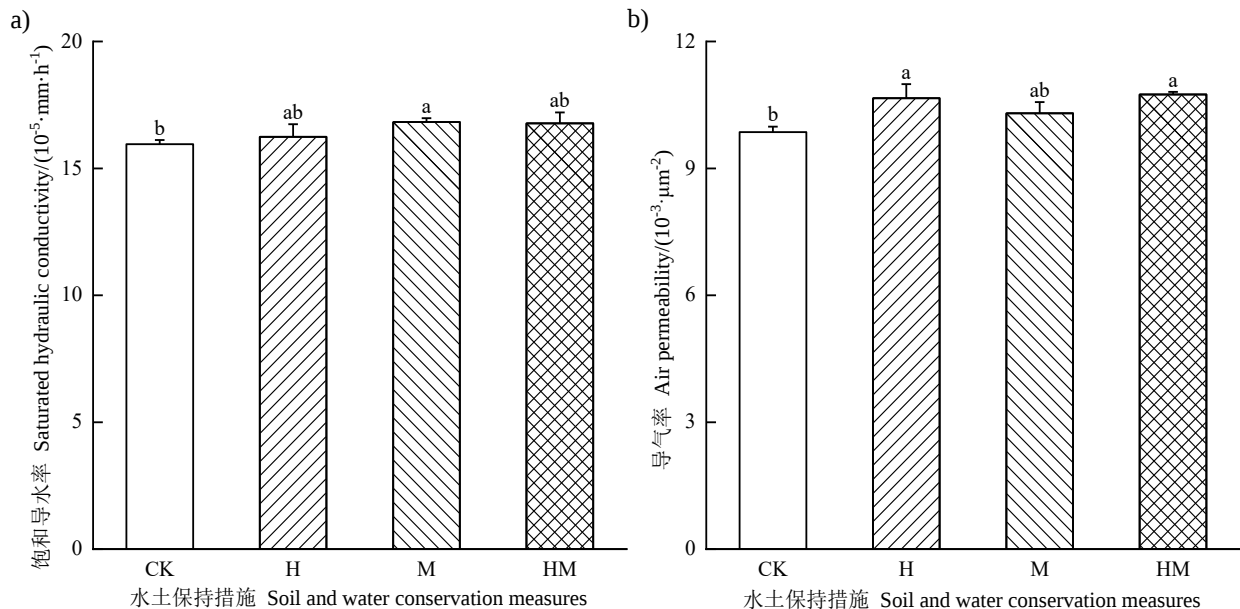


图 4 不同水土保持措施下土壤的饱和导水率 (a) 及导气率 (b)

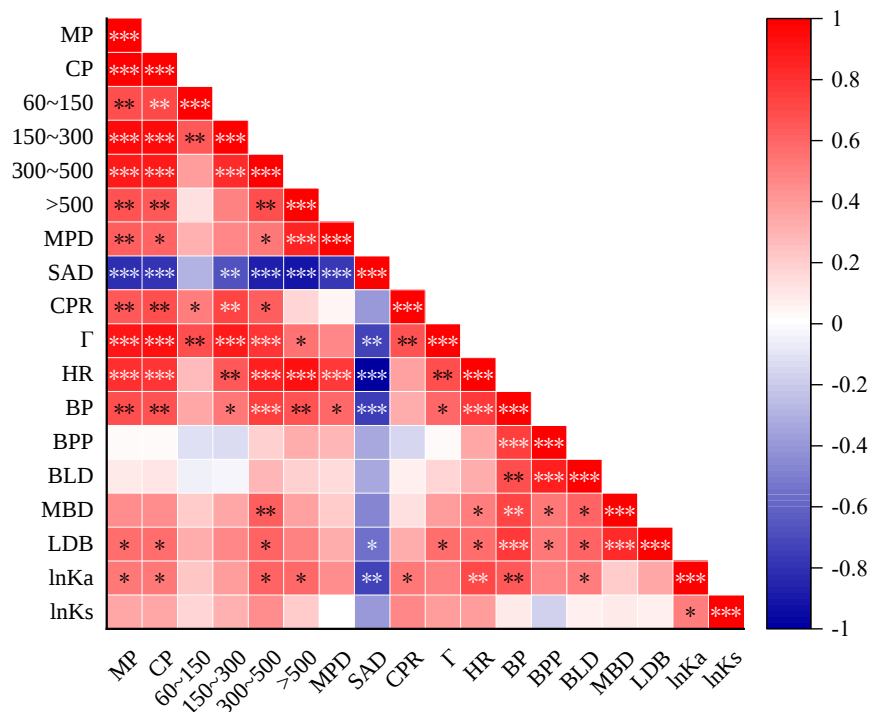
Fig. 4 Soil saturated hydraulic conductivity (a) and air permeability (b) under different soil and water conservation measures

2.3 孔隙结构特征与导水导气的关系

土壤孔隙结构参数与饱和导水率 (K_s) 及导气率 (K_a) 之间的相关关系如图 5 所示。导气率对孔隙结构变化表现出较高敏感性，而饱和导水率的响应相对较弱。在孔隙结构参数中，大孔隙度、连通孔隙度均与全局连通性、平均孔径、水力半径及临界孔径呈极显著正相关 ($P<0.01$)，而与孔隙表面积密度呈极显著负相关 ($P<0.01$)。

导气率对孔隙结构变化的响应更为敏感。 K_a 与大孔隙度、连通孔隙度、水力半径、 $>300\mu\text{m}$ 孔隙度、临界孔径均呈显著正相关 ($P<0.05$)，而与孔隙表面积密度呈显著负相关 ($P<0.05$)。进一步观察发现，在生物孔隙特征中， K_a 与生物孔隙度和长度密度呈显著正相关 ($P<0.05$)。表明土壤导气率主要受大孔隙数量、孔隙尺度和孔隙连通性的共同控制，生物孔隙提供重要气体传输通道，是导气

率的重要结构基础。相较之下，本研究中 K_s 与孔隙结构参数之间无显著相关性 ($P>0.05$)，仅与 K_a 存在显著正相关 ($P<0.05$)。这一结果表明，在当前研究尺度和测定条件下， K_s 可能受到多种因素的共同调控，如土壤优先流路径、孔隙异质性及饱和状态下流动路径重分配等，因此单一孔隙结构参数难以对 K_s 进行有效预测。



注：*, **, *** 分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 水平上（双侧）显著相关。其中 MP 为大孔隙度；CP 为连通孔隙度；60~150、150~300、300~500、> 500 为孔径分布范围；MPD 为平均孔径；SAD 为表面积密度；CPR 为临界孔径； Γ 为全局连通性；HR 为水力半径；BP 为生物孔隙度；BPP 为生物孔隙占比；BLD 为生物孔隙长度密度；MBD 为生物孔隙平均孔径；LDB 为生物孔隙最大直径； K_a 为导气率； K_s 为饱和导水率；Note: *, **, *** indicate significant levels at the $P<0.05$, 0.01 and 0.001, respectively. Where MP denotes Macroporosity (%); CP denotes the Connected porosity (%); 60~150, 150~300, 300~500, > 500 denote the Pore size distribution ranges; MPD denotes the Mean pore diameter; SAD indicates Surface area density; CPR denotes the Critical pore diameter. Γ denotes Connection probability; HR denotes Hydraulic radius; BP denotes Bioporesity; BPP denotes Biopore proportion; BLD denotes Biopore length density; MBD denotes the Mean biopore diameter; LDB denotes Largest diameter of biopore; K_a denotes Air permeability; K_s denotes Saturated hydraulic conductivity.

图 5 孔隙结构特征与饱和导水率、导气率的相关性

Fig. 5 Correlation between pore structure characteristics and saturated hydraulic conductivity and air permeability

3 讨 论

本研究表明，与等高种植（CK）相比，稻草覆盖与香根草篱复合处理（HM）显著提高了耕层土壤大孔隙度、连通孔隙度及平均孔径（图 2a、表 1），并在三维可视化中表现为更连续、均匀的连通孔隙网络。该结果表明，在红壤坡耕地长期侵蚀与干湿交替共同作用背景下，草篱协同稻草覆盖能够有效缓解结构退化并促进孔隙网络的重构。稻草覆盖改善孔隙结构主要有两个方面的原因：其一，覆盖能够减少土壤水分蒸发，缓解因频繁干湿交替引发的土壤开裂、塌陷与结构破坏，从而保护既

有孔隙结构^[34-35]；其二，覆盖削弱雨滴对地表的直接击打和地表径流剪切作用，减少团聚体破碎和孔隙堵塞^[36]。Qin 等^[37]研究亦指出，在秸秆覆盖条件下雨滴击打对孔隙结构的破坏效应显著降低，有利于维持孔隙完整性。此外，本研究中 HM 处理对较大孔径孔隙 ($> 150 \mu\text{m}$) 的提升更为突出，而对 $60\sim 150 \mu\text{m}$ 影响有限 (图 3)，主要原因是：稻草在原位分解过程中形成新孔隙，并与原有小孔隙相结合，促进连通性大孔隙的发育^[38]。同时，稻草作为颗粒有机质的重要来源，可能通过与土壤颗粒结合促进团聚体形成和稳定化，进一步提升结构抗扰动能力^[39-40]，为孔隙网络的长期维持提供物质基础。香根草篱处理 (H、HM) 显著提高了生物孔隙度 (图 2b、表 2)，并在三维图像中呈现连续的管状生物孔隙网络，表明香根草根系在促进生物孔隙形成与优化孔隙网络方面具有重要作用。香根草须根系发达密集，其根系的穿插延伸与垂直下扎可在根-土界面产生挤压作用，形成多级分叉且稳定性较高的生物孔隙网络^[30]。相较于干湿交替诱发生成的裂缝类非生物孔隙，生物孔隙往往在干湿循环、侵蚀冲刷与机械压实等外界扰动下表现出更高的结构稳定性^[28, 41]。同时，香根草地上部对降雨的拦截与对径流的阻滞可降低地表结皮与团聚体破碎风险，并减缓侵蚀导致有机质与养分流失，从而间接抑制孔隙结构退化^[42-43]。因此，稻草覆盖提供“保护+物质补给”，香根草篱带提供“生物孔隙骨架+侵蚀削减”，二者在长期尺度上形成互补与协同，是 HM 处理孔隙结构改善幅度最大的关键原因。

在水气传输方面，本研究发现稻草覆盖 (M) 显著提高了土壤饱和导水率 (K_s) (图 4)，而稻草覆盖与香根草篱复合处理 (HM) 并未进一步显著提升该指标。这一现象提示，在本研究的采样尺度与测定条件下，耕层土壤饱和水流过程对“整体孔隙结构改善”的响应可能存在阈值或饱和效应。由于本研究聚焦耕层 ($0\sim 15 \text{ cm}$) 并采用原状环刀测定，若土体中已存在较为普遍的连通孔隙网络，则水分运移可能不再受孔隙尺度参数的线性限制。在这种背景下，即便孔隙结构进一步优化，其对整体 K_s 的增益也可能不易体现为显著差异。与此一致的是，本研究中 K_s 与多数孔隙结构参数未呈显著相关 (图 5)，与部分研究结果一致^[44-45]，说明单一或少数孔隙结构指标在坡耕地红壤耕层中未必能够稳定预测饱和水流能力。需要注意的是，本研究中 K_s 与表面积密度呈负相关性，表面积密度可侧面反映土壤孔隙的粗糙程度。稻草覆盖、香根草篱及复合处理均显著降低土壤表面积密度 (表 1)，初步表明水保措施能够降低孔隙内部粗糙度，但这并非影响 K_s 的主要因素。Vervoort 和 Cattle^[46]、Ferreira 等^[47]研究表明，孔隙弯曲度是影响 K_s 的重要因素，弯曲度越大意味着水流路径越长、越复杂。因此，尽管种植草篱能够形成丰富的大孔隙及连通性孔隙，但重构的孔隙网络可能较为弯曲，使 K_s 提升并不显著。需要指出的是，已有的研究也报道孔隙结构可作为 K_s 的重要预测因子^[6, 48-49]，但此类结论多基于水分迁移受限的条件，此时孔隙结构可成为优先流路径进而促进水分运动。本研究中测定的饱和导水率均高于 $15 \times 10^{-5} \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ，显著高于 Ding 等^[50]和 Zhang 等^[15]报道的数值，表明红壤坡耕地耕层土壤具备较好的水分迁移能力。这可能是由于各处理中连通性孔隙遍布整个研究区域，促进了水分的快速运移。相比之下，本研究中复杂的孔隙网络缩短了土壤基质与孔隙表面的距离，有利于水分在土体中的扩散，导致整体饱和导水率处于较高水平，孔隙结构的改善对其影响因而未达显著程度。本研究发现，在高度连通的红壤坡耕地耕层，进一步增加孔隙结构 (如大孔隙度、连通孔隙度和生物孔隙度) 对饱和导水率的提升效果有限。这提示，在该类坡耕地条件下，水土保持措施的效益更应关注改善土壤气体交换能力，而非单纯追求水分入渗的增加。

与水分迁移不同，复合处理显著提高了土壤导气率，这主要得益于其对土壤孔隙结构的明显改善。稻草覆盖与香根草篱能缓解侵蚀引起的土壤结构退化，通过减少有机质流失维持了孔隙网络的连通性；同时，香根草根系形成的生物孔隙也为气体迁移提供了优先路径。相关性分析进一步表明，导气率与土壤大孔隙度、连通孔隙度及 $> 300 \mu\text{m}$ 孔隙度均呈显著正相关 (图 5)，证实良好的孔隙结构有助于气体交换。土壤大孔隙是气体传输的主要通道，不仅提供了气体流动的物理空间，其较高的连通性也保障了气体在土体中连续、高效的迁移^[21, 51]。当此类孔隙的比例与连通性提升时，气体扩散阻力显著降低，从而直接体现为导气率的上升。此外，生物孔隙度不仅能增强孔隙网络的连通

性, 也有助于气体快速迁移, 可作为导气率的预测指标之一。因此, 在南方红壤坡耕地强降雨频发的条件下, 良好的孔隙结构对保障作物关键生育期的氧气供应与根系生长具有重要意义。综上, 稻草覆盖与香根草篱复合处理虽未显著提高红壤坡耕地饱和导水率, 但显著增强了土壤导气率, 且孔隙结构特征对导气率具有良好的预测能力。

4 结 论

本研究通过红壤坡耕地 15 年长期水土保持定位试验, 揭示了长期稻草覆盖与香根草篱复合处理对耕层土壤孔隙结构及水气传输功能的改良效应。主要结论如下: (1) 稻草覆盖与香根草篱复合种植显著改善土壤孔隙结构, 具体表现为大孔隙度、连通孔隙度、平均孔径和全局连通性显著增加, 孔隙整体连通性得到改善; (2) 稻草覆盖显著提高耕层饱和导水率, 香根草篱种植及复合措施则显著增强土壤导气率; (3) 长期香根草篱协同稻草覆盖不仅为孔隙网络提供“物理保护+物质补给”, 而且构建了垂直连续的“生物孔隙骨架”, 有效改善红壤坡耕地耕层孔隙结构并增强导气率, 对土壤结构改良与质量提升具有重要作用。未来研究可进一步量化不同水土保持措施对土壤持水性、导气率、根系发育及作物产量之间的定量关系。

参考文献 (References)

- [1] Zhao Q G, Huang G Q, Ma Y Q. The problems in red soil ecosystem in southern of China and its countermeasures[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(24): 7615-7622. [赵其国, 黄国勤, 马艳芹. 中国南方红壤生态系统面临的问题及对策[J]. *生态学报*, 2013, 33(24): 7615-7622.]
- [2] Zhao Q G. Exploiting resource advantage and innovating research and development potential for social and economic development in red soil region of Southern China—In celebration of the 30th anniversary of the establishment of ecological experiment station of red soil, Chinese academy of sciences[J]. *Soils*, 2015, 47(2): 197-203. [赵其国. 开拓资源优势, 创新研发潜力, 为我国南方红壤地区社会经济发展作贡献——纪念中国科学院红壤生态实验站建站 30 周年[J]. *土壤*, 2015, 47(2): 197-203.]
- [3] Cheng P, Liao C L, Xiao Q L, et al. Effects of cross slope ridge cultivation and straw mulching on nitrogen and phosphorus loss in red soil slope farmland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(5): 1036-1046. [程鹏, 廖超林, 肖其亮, 等. 横坡垄作和秸秆覆盖对红壤坡耕地氮磷流失的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(5): 1036-1046.]
- [4] Fan Y L, Liu X Z, Gao L, et al. Effects of fertility-building practices on soil organic carbon loss with sediment in sloping cropland of red soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(3): 638-649. [范亚琳, 刘贤赵, 高磊, 等. 不同培肥措施对红壤坡耕地土壤有机碳流失的影响[J]. *土壤学报*, 2019, 56(3): 638-649.]
- [5] Yu D S, Shi X Z. Quantificational relationship between soil permeability of upland and soil erodibility in hilly red soil region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2000, 37(3): 316-322. [于东升, 史学正. 低丘红壤区旱地土壤渗透性与可蚀性定量关系的研究[J]. *土壤学报*, 2000, 37(3): 316-322.]
- [6] Wen D C, Liu Y J, Li T X, et al. Straw measures attenuate the differences in surface-subsurface flow and sediment yield under four rainfall patterns on red soil sloping farmlands of Southern China[J]. *Agricultural Water Management*, 2025, 321(C): 109894
- [7] Zhu J J, Chen X A, Wu B C, et al. Effects of straw mulching on sediment particle distribution and soil erosion control[J]. *Agricultural Water Management*, 2025, 319: 109815.
- [8] Lin L R, Chen J Z, Wang F, et al. Effects of straw mulch on soil hydraulic properties and water status in sloping red soil farmlands[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(2): 159-166. [林丽蓉, 陈家宙, 王峰, 等. 稻草覆盖对红壤旱坡地水力性质及水分状况的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(2): 159-166.]

- [9] Jin H F, Shi D M, Zhong Y J, et al. Diagnosis of obstacle factors and degradation characteristics of cultivated-layer quality for red soil sloping farmland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019, 35(20): 84-93. [金慧芳, 史东梅, 钟义军, 等. 红壤坡耕地耕层土壤质量退化特征及障碍因子诊断[J]. 农业工程学报, 2019, 35(20): 84-93.]
- [10] Zhou X Q, Hu J, Wei Y J, et al. Estimation of soil detachment capacity on steep slopes in permanent gullies under wetting-drying cycles[J]. Catena, 2021, 206: 105450.
- [11] Zhang G H, Wei Y J, Zhou X Q, et al. Effects of the intensity and time of wetting-drying cycles on the pore distribution of granite red soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(S1): 106-113. [张光辉, 魏玉杰, 周小荃, 等. 干湿循环强度与频度对花岗岩红壤孔隙分布的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(S1): 106-113.]
- [12] Nsabimana G, Bao Y H, He X B, et al. Assessing the impacts of wetting and drying cycles on soil aggregate structure. A global meta-analysis study[J]. Journal of Environmental Management, 2026, 398: 128572.
- [13] Zhao J L, Wang Z G, Dong Y F, et al. How soil erosion and runoff are related to land use, topography and annual precipitation: Insights from a meta-analysis of erosion plots in China[J]. Science of the Total Environment, 2022, 802: 149665.
- [14] Lucas M, Schlüter S, Vogel H J, et al. Soil structure formation along an agricultural chronosequence[J]. Geoderma, 2019, 350: 61-72.
- [15] Zhang Z B, Liu K L, Zhou H, et al. Linking saturated hydraulic conductivity and air permeability to the characteristics of biopores derived from X-ray computed tomography[J]. Journal of Hydrology, 2019, 571: 1-10.
- [16] Guo L, Liu Y, Wu G L, et al. Preferential water flow: Influence of alfalfa (*Medicago sativa* L.) decayed root channels on soil water infiltration[J]. Journal of Hydrology, 2019, 578: 124019.
- [17] Cui Z, Huang Z, Liu Y, et al. Natural compensation mechanism of soil water infiltration through decayed roots in semiarid vegetation species[J]. Science of the Total Environment, 2022, 819: 151985.
- [18] Fan H J, Huang Q R, Qin J T, et al. Effects of straw mulching and vetiver hedge on runoff, soil erosion and crop yield on red soil sloping land[J]. Soils, 2014, 46(3): 550-554. [范洪杰, 黄欠如, 秦江涛, 等. 稻草覆盖和草篱对红壤缓坡旱地水土流失及作物产量的影响[J]. 土壤, 2014, 46(3): 550-554.]
- [19] Xu H Y, Liang K, Zhu X C, et al. Characteristics of physical-crust development and runoff and sediment response under grass hedgerow measures in a typical sloping farmland in southern China[J]. Soil and Tillage Research, 2026, 257: 106970.
- [20] Xue P, Fu Q, Li T X, et al. Effects of biochar and straw application on the soil structure and water-holding and gas transport capacities in seasonally frozen soil areas[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 301: 113943.
- [21] Fu Z H, Yan Z F, Li S L. Effects of soil pore structure on gas diffusivity under different land uses: Characterization and modelling[J]. Soil and Tillage Research, 2024, 237: 105988.
- [22] Du Y L, Guo S L, Wang R, et al. Soil pore structure mediates the effects of soil oxygen on the dynamics of greenhouse gases during wetting-drying phases[J]. Science of the Total Environment, 2023, 895: 165192.
- [23] Ball B C. Soil structure and greenhouse gas emissions: A synthesis of 20 years of experimentation[J]. European Journal of Soil Science, 2013, 64(3): 357-373.
- [24] Cheng Y H, Cheng K, Li D M, et al. Long-term combined application of grass hedgerow and straw mulch alleviates microbial nutrient limitations in red soil sloping croplands[J]. Soils, 2025, 57(6): 1419-1427. [成艳红, 程坤, 李大明, 等. 长期草篱协同稻草覆盖缓解坡耕地红壤微生物养分限制[J]. 土壤, 2025, 57(6): 1419-1427.]
- [25] 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.
- [26] Leuther F, Diamantopoulos E. Simulating bare soil evaporation for undisturbed soil cores—Using HYDRUS 3D simulation on X-ray μ CT determined soil macrostructures[J]. Vadose Zone Journal, 2024, 23(4): e20339.
- [27] Schlüter S, Wu M Q, Phalempin M, et al. Divergence in physical, chemical, and biological soil properties caused by different long-term bare fallow management and natural succession[J]. Geoderma, 2025, 459: 117361.

- [28] Ding T Y, Guo Z C, Koestel J, et al. Organic fertilization under conservation tillage enhances biopore formation and particulate organic matter accumulation via fraction-specific pore relationships in a Vertisol[J]. *Geoderma*, 2025, 463: 117602.
- [29] Larsbo M, Koestel J, Jarvis N. Relations between macropore network characteristics and the degree of preferential solute transport[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(12): 5255-5269.
- [30] Ding T Y, Guo Z C, Hua K K, et al. Effects of legume-cover crop rotations on soil pore characteristics and particulate organic matter distributions in Vertisol based on X-ray computed tomography[J]. *Geoderma*, 2025, 461: 117464.
- [31] Koestel J. SoilJ: An ImageJ plugin for the semiautomatic processing of three-dimensional X-ray images of soils[J]. *Vadose Zone Journal*, 2018, 17(1): 170062.
- [32] Renard P, Allard D. Connectivity metrics for subsurface flow and transport[J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 51: 168-196.
- [33] Ding T Y, Guo Z C, Hua K K, et al. Cover crop rotations enhance biopore structure in Shajiang black soil: A multi-scale investigation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2026, 63 (3): 755-766. [丁天宇, 郭自春, 花可可, 等. 覆盖作物轮作改善砂姜黑土生物孔隙结构的多尺度研究[J]. *土壤学报*, 2026, 63 (3): 755-766.]
- [34] Peng Z K, Li L L, Xie J H, et al. Effects of different tillage practices on water consumption structure and water use efficiency during crop growth period in arid farmland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(5): 214-221. [彭正凯, 李玲玲, 谢军红, 等. 不同耕作措施对旱地作物生育期农田耗水结构和水分利用效率的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(5): 214-221.]
- [35] Chen Q, Chang L, Han F X, et al. Straw strip mulching boosts potato yields by enhancing soil moisture and water use efficiency[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2025, 16: 1659236.
- [36] Zhou H, Peng X H, Darboux F. Effect of rainfall kinetic energy on crust formation and interrill erosion of an Ultisol in subtropical China[J]. *Vadose Zone Journal*, 2013, 12(4): vjz2013.01.0010.
- [37] Qin S J, Liu Z, Tian M, et al. Long-term no-tillage farming mitigates waterlogging during extreme rainfall events in black soil (Mollisols) region of Northeast China[J]. *Geoderma*, 2025, 462: 117542.
- [38] Ding T Y, Guo Z C, Qian Y Q, et al. Effects of straw return methods on the soil organic carbon fractions and pore structure characteristics of Shajiang black soil(Vertisol)[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2023, 39(16): 71-78. [丁天宇, 郭自春, 钱泳其, 等. 秸秆还田方式对砂姜黑土有机碳组分和孔隙结构的影响[J]. *农业工程学报*, 2023, 39(16): 71-78.]
- [39] Ding T Y, Guo Z C, Wang Y K, et al. The spatial distribution of particulate organic matter within aggregates of Shajiang black soil under various straw return practices based on X-ray CT technology and machine learning[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2025, 62(2): 375-387. [丁天宇, 郭自春, 王玥凯, 等. 不同秸秆还田方式下砂姜黑土团聚体内颗粒有机质的空间分布特征——基于 X 射线 CT 技术和机器学习[J]. *土壤学报*, 2025, 62(2): 375-387.]
- [40] Ding T Y, Guo Z C, Li W, et al. Long-term straw return with nitrogen fertilization enhances soil pore structure, POM accumulation, and their positive feedback in a Vertisol[J]. *Soil and Tillage Research*, 2025, 252: 106602.
- [41] Wang S, Gan L, Zhang S, et al. Soil biopores and non-biopores responses to different tillage treatments in sugarcane fields in Guangxi, China[J]. *Agronomy*, 2024, 14(7): 1378.
- [42] Xiao T, Li P, Fei W B, et al. Effects of vegetation roots on the structure and hydraulic properties of soils: A perspective review[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 906: 167524.
- [43] Li L S, Zhang Z H, Pan Y H, et al. Transient-flow model for *in-situ* measuring of soil air permeability[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(6): 1252-1256. [李陆生, 张振华, 潘英华, 等. 一种田间测算土壤导气率的瞬态模型[J]. *土壤学报*, 2012, 49(6): 1252-1256.]
- [44] Sandin M, Koestel J, Jarvis N, et al. Post-tillage evolution of structural pore space and saturated and near-saturated hydraulic conductivity in a clay loam soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 165: 161-168.

- [45] Schlüter S, Großmann C, Diel J, et al. Long-term effects of conventional and reduced tillage on soil structure, soil ecological and soil hydraulic properties[J]. *Geoderma*, 2018, 332: 10-19.
- [46] Vervoort R W, Cattle S R. Linking hydraulic conductivity and tortuosity parameters to pore space geometry and pore-size distribution[J]. *Journal of Hydrology*, 2003, 272(1/2/3/4): 36-49.
- [47] Ferreira T R, Archilha N L, Cássaro F A M, et al. How can pore characteristics of soil aggregates from contrasting tillage systems affect their intrinsic permeability and hydraulic conductivity?[J]. *Soil and Tillage Research*, 2023, 230: 105704.
- [48] Wu G L, Liu Y, Yang Z, et al. Root channels to indicate the increase in soil matrix water infiltration capacity of arid reclaimed mine soils[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 546: 133-139.
- [49] Webb B, Robinson D A, Marshall M R, et al. Variation in root morphology amongst tree species influences soil hydraulic conductivity and macroporosity[J]. *Geoderma*, 2022, 425: 116057.
- [50] Ding T Y, Guo Z C, Chen Y M, et al. Contrasting soil structure and yield responses to 8-year conservation tillage in Fluvio-aquic and Shajiang black soils[J]. *European Journal of Agronomy*, 2026, 172: 127881.
- [51] Maillet E, Gossel A, Cousin I, et al. What is the most relevant soil structure parameter to describe field-measured N₂O emissions?[J]. *Geoderma*, 2025, 453: 117155.

（责任编辑：檀满枝）