

南方典型第四纪红黏土物理结皮发育过程和结构特征

徐慧云^{1,2}, 朱绪超², 彭诚^{2,3}, 米美霞¹

(1. 山西农业大学城乡建设学院, 山西 太谷 030801; 2. 中国科学院南京土壤研究所, 土壤与农业可持续发展
全国重点实验室, 南京 211135; 3. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要: [目的] 客观量化土壤物理结皮厚度, 明确红黏土物理结皮的发育过程和孔隙结构特征。[方法] 通过开展人工模拟降雨试验获取不同降雨历时下的土壤物理结皮样品, 基于 CT 扫描和土壤孔隙度阈值方法量化结皮厚度, 并将其作为物理结皮发育特征的分析指标, 揭示红黏土物理结皮的发育过程。通过提取结皮土样的二维和三维孔隙指标, 探究不同发育程度下结皮土样的结构特征。[结果] 1) 红黏土物理结皮发育具有不同的阶段, 可总结为初期颗粒溅散填充土壤孔隙阶段、中期雨滴压实土体阶段、后期稳定阶段和末期侵蚀阶段。在降雨 1、10、30、60、90、120 min 时, 红黏土物理结皮厚度平均值分别为 7.75、8.07、10.83、11.53、11.49、6.35 mm, 除最后 1 个数值外, 表现出先增大后稳定的趋势, 发育过程(1~90 min)可用一元三次方程 $y=10.17-4.69x+2.49x^2-0.30x^3$ 拟合 ($R^2=0.8823$)。2) 不同发育阶段, 红黏土物理结皮表现出不同的二维和三维结构特征。在中期发展阶段, 二维指标总体上表现为孔隙数量、孔隙度、当量孔径逐步降低, 成圆率逐渐增大的趋势。三维指标呈分形维数先增大后稳定、孔隙表面积和连通密度先增大后减小趋势; 各指标在不同的结皮发育阶段均具有不同程度的显著差异。3) “CT 扫描+孔隙阈值”的方法能够客观量化物理结皮厚度, 依据结皮厚度和孔隙结构的变化特征明确物理结皮的发育过程。[结论] 研究结果为土壤板结严重区水文过程研究和侵蚀模型精确模拟提供基础和依据。

关键词: 土壤物理结皮; 结皮厚度; CT 扫描; 孔隙度; 第四纪红黏土

中图分类号: S152.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)05-0053-10

Development Process and Structural Characteristics of Physical Crusts in Typical Quaternary Red Clay in Southern China

XU Huiyun^{1,2}, ZHU Xuchao², PENG Cheng^{2,3}, MI Meixia¹

(1. College of Urban and Rural Construction, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China; 2. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China;
3. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract: [Objective] This study aims to objectively quantify the thickness of soil physical crusts, clarify the development process, and characterize the pore structure of physical crusts in Quaternary red clay (QRC). [Methods] Artificial rainfall simulation experiments were conducted to obtain soil physical crust samples under varying rainfall durations. The crust thickness was quantified using X-ray computed tomography (CT) scanning and a soil porosity threshold method, serving as a key indicator for analyzing physical crust development and revealing the formation process of QRC crusts. Furthermore, the structural characteristics of crusted soil samples at different developmental stages were investigated by extracting two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) pore indicators. [Results] 1) The development of physical crusts in QRC exhibited four stages: the initial phase of particle

收稿日期: 2024-12-23

修回日期: 2025-02-20

录用日期: 2025-03-18

网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-06-09

资助项目: 中国科学院前瞻战略科技先导专项 (XDA0440202); 江苏省自然科学基金项目 (BK20220163); 江西省自然科学基金项目 (20224BAB203031); 中国科学院青年创新促进会项目 (2023327)

第一作者: 徐慧云 (1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与土壤结构作用关系研究。E-mail: huiyx1128@163.com

通信作者: 朱绪超 (1988—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: zhuxuchao@issas.ac.cn

米美霞 (1986—), 女, 博士, 副教授, 主要从事土壤物理与生态水文研究。E-mail: meixiami@126.com

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

dispersion and soil pore-filling, the second phase of soil compaction induced by raindrops, the third phase of stabilization, and the final phase of erosion. The average thickness of physical crusts in QRC measured at rainfall durations of 1, 10, 30, 60, 90, and 120 minutes was 7.75, 8.07, 10.83, 11.53, 11.49, and 6.35 mm, respectively. Except for the final measurement, crust thickness showed an initial increase followed by stabilization. The development process (1~90 min) was represented by a cubic polynomial equation: $y=10.17-4.69x+2.49x^2-0.30x^3$ ($R^2=0.8823$). 2) The QRC physical crusts exhibited distinct 2D and 3D structural characteristics across different developmental stages. In the mid-development stage, 2D parameters generally showed decreasing trends in pore number, porosity, and equivalent pore diameter, while circularity progressively increased. For 3D parameters, the fractal dimension initially expanded before stabilizing, whereas pore surface area and connectivity density first increased, then decreased. All measured parameters exhibited significant variations across different crust development stages. 3) The combined approach of X-ray CT scanning and porosity threshold analysis enabled objective quantification of physical crust thickness. The development process of physical crusts was clarified through analyzing thickness variations and pore structural characteristics. [Conclusion] The findings establish a scientific foundation for studying hydrological processes and enhancing erosion modeling accuracy in severely compacted regions.

Keywords: soil physical crusts; crust thickness; X-ray CT; porosity; Quaternary red clay

Received: 2024-12-23

Revised: 2025-02-20

Accepted: 2025-03-18

Online(www.cnki.net): 2025-06-09

土壤物理结皮是表层土壤结构致密的现象,通常伴随降雨和随后的干燥化过程出现^[1]。致密的结构层是由土壤颗粒或团聚体的破碎(如雨滴打击、水力分散、湿润膨胀、物理和化学作用等)和细颗粒的空间再分配(如飞溅、淋溶和沉积等)形成的,直接影响水分的入渗和径流的产出,进而影响坡面水文和侵蚀过程^[2]。关于物理结皮的研究最早开始于20世纪30年代^[3],目前在物理结皮的发育阶段、形成机制、入渗过程、水文和侵蚀响应等方面的研究^[4-6]已被广泛开展。了解和认识结构结皮的发育和不同阶段的结构特征,有利于加深对物理结皮形成的认识,对探究结皮形成与侵蚀的相互作用具有重要意义。

物理结皮受降雨和径流等因素的影响一直处于动态变化中,结皮的发育伴随着土壤属性的变化。厚度是表征结皮发育程度的重要指标^[7],明确结皮发育过程能够很好地监测土壤属性的变化趋势,揭示结皮形成过程对坡面侵蚀的响应。有学者^[8]通过游标卡尺直接测定结皮厚度,或借助电子显微镜观察土壤结皮切片的属性结构估算厚度值^[9],但由于结皮质薄、易碎,使用上述方法测定厚度,均对结皮样品造成破坏,且测定结果具有主观因素的影响。随着技术的发展,一些学者将X射线计算机断层扫描(CT)技术引入到物理结皮的研究中,利用CT将土壤的孔隙可视化,分析物理结皮的发育特征,并依据孔隙的变化趋势量化结皮厚度^[10-11]。ARMENISE等^[12]借助CT扫描结皮土样提出一种基于孔隙度阈值确定结皮厚度的方法;ZHU等^[13]和FENG等^[14]分

别利用该方法对中国南方红壤和西北黄土高原黄壤进行研究,客观量化结构结皮和沉积结皮的厚度。

土壤孔隙是输送水分、进行气体交换的重要通道,有研究^[13]表明,结皮土壤的孔隙结构明显区别于非结皮区。HYVÄLUOMA等^[15]利用CT分析结皮土壤孔隙结构,模拟孔隙内径流的变化过程;BADORRECK等^[16]利用CT分析自然条件下物理结皮的三维微观形态。然而,上述学者对于结皮孔隙的研究均未涉及完整的结皮发育过程,也缺乏对不同发育程度物理结皮土壤孔隙结构的定量表述。因此,借助“CT扫描+孔隙阈值”的方法计算结皮厚度,厘清物理结皮的发育过程,客观量化不同发育阶段土壤孔隙结构的动态特征,可为不同结皮程度孔隙结构参数的转换及野外水文、侵蚀等过程的模型模拟提供理论依据。

我国南方红壤区由于山地丘陵众多,雨量充沛而集中,土地人为扰动强烈,是土壤侵蚀最严重的地区之一^[17-18]。第四纪红黏土是南方地区重要的土壤类型,因其土壤黏粒较高,团聚体的水稳性较差,在当地降雨和气候的影响下,表面极易板结形成物理结皮,加上该地区土壤利用强度大,增加水土流失和土壤侵蚀发生的可能性。基于此,本文以南方典型侵蚀性土壤第四纪红黏土作为研究对象,利用CT扫描技术提取孔隙指标,通过厚度客观量化结皮发育过程并阐明不同程度结皮土壤的孔隙结构特征。该结果将为研究物理结皮对中国南方典型土壤结构、水文过程和侵蚀的影响提供基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究在中国科学院红壤生态实验站进行。站点位于江西省鹰潭市余江区(28°12'N, 116°55'E)。该地区属亚热带季风气候,年平均气温17.7℃,年平均降水量1706 mm,降雨集中在3—7月,约占全年降水的60%^[19]。该地区地势平缓,以低山和丘陵为主,主要土地利用类型为坡耕地和果园,土壤类型为第四纪红黏土。供试土壤为红壤站内的耕作土。取表层0~20 cm混合1 kg测土壤理化性质,pH为4.75,土壤有机质质量分数9.22 g/kg;全氮、全磷、全钾质量分数分别为0.68、0.72、12.44 g/kg,土壤养分总体偏低。从土壤质地来看,砂粒、粉粒、黏粒分别为22.48%、35.52%、42.00%,属于黏壤土,黏粒质量分数较高,易板结。该土壤可蚀性相对较高,在雨季水土流失广泛发生,成为中国南方水土流失的典型策源地。

1.2 试验设计

在红壤站北侧选取1处裸露缓坡地,地形坡度约为5°,在坡上围设2 m×2 m的径流微区开展模拟降雨试验。试验前对微区内土壤进行预处理,包括去除表层大土块和植物根茎,适当整平,自然沉降一段时间。利用便携式模拟降雨机开展模拟降雨试验。模拟降雨机主要包括水泵、水管、压力表、喷头、支架等,喷头和压力表固定在3根4 m长的可松卸钢管支架顶部,喷头距离坡面约3.5 m。喷头采用美国Spraying system公司的Fulljet系列实心锥形喷头,具体型号为3/8HH-24WSQ,在固定水压下可以产生约40 mm/h的降雨强度。

试验开始前,对降雨强度和均匀度进行率定。通过实测降雨资料和已有研究^[20]可知,研究区多年常规降雨平均雨强为30 mm/h,虽远低于大部分学者设定的模拟降雨强度,但更符合当地的自然降雨条件。用遮雨布覆盖微区,同时在微区四角分别放置1个径流桶,根据水压调整上水量,降雨10 min后,测量4个径流桶中降雨量,计算降雨雨强和均匀度。反复调试,使降雨强度稳定在30 mm/h,降雨均匀系数>85%。

开始降雨后,记录降雨时间,分别在降雨1、10、30、60、90、120 min时,用直径和高为5 cm的PVC环刀在微区坡面取2个原状土样。取样时选择光滑平整且具有代表性的区域,按压环刀时用力均匀,防止土壤表面发生形变。为防止表土扰动产生的影响,不同时间点环刀取样顺序总体为由坡中到坡上。取样完成后用保鲜膜将每个样品包紧,避免在运输过程中样品损坏。整个试验共取12个结皮土壤样品。

1.3 CT图片处理

采用X射线工业CT对12个土壤结皮样品进行扫描,扫描的电压为100 kV,电流为100 μA,每个土壤样品共获得2 200~2 300张断层扫描图像,图像的分辨率为25 μm。在提取土壤孔隙指标之前,确定土样切片图像分析的感兴趣区域。由于土样上部的影像包括上覆保鲜膜、环刀盖和表土间的空隙,因此,选择能代表结皮土样的第1张图片。根据ZHU等^[21]的研究,可采用图框中黑色(空气)和灰色(土壤颗粒)面积占比大致相等的图像作为第1张图像,即0 cm。考虑到环刀底部的边缘效应,一般去除底部1 cm的厚度来消除影响。选择的感兴趣区域为从确定的第1张图像及以下共1 600张(0~4 cm)。将确定的图片序列导入Image J软件,对所有图像进行中值滤波和图像增强处理。为消除土样在环刀壁处的变异和结皮土壤表面可能倾斜的影响,在每个结皮土样中确定3个边长为10 mm的正方形感兴趣区,利用灰度直方图并结合人工经验,分别进行阈值分割,得到土壤结构的二值化图像,提取孔隙指标并计算结皮厚度。

1.4 指标提取

1.4.1 结皮厚度判定 ARMENISE等^[12]首次利用CT扫描结合孔隙度阈值方法,量化英国3种不同质地土壤的物理结皮厚度;ZHU等^[21]利用该方法在中国南方红壤区进行应用,首次量化中国南方2种典型侵蚀性土壤的结皮厚度。具体量化过程见图1。假设取样环刀高度为50 mm,考虑底部边缘效应,将0~40 mm作为处理土样。利用CT扫描方法提取结皮土样并测定0~40 mm孔隙度。物理结皮厚度一般在0~10 mm,利用10~40 mm土层土壤孔隙度平均值作为结皮厚度的判断阈值,在0~10 mm,孔隙度小于此平均值对应的深度,可作为该土样的结皮厚度。

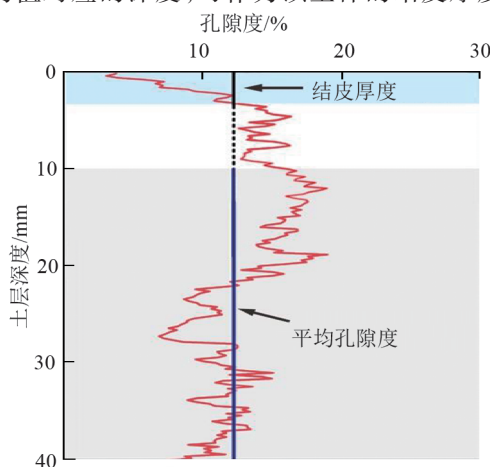


图1 结皮厚度量化示意

Fig. 1 Schematic diagram of crust thickness quantification

1.4.2 孔隙二维指标 不同发育程度的结皮土样具有不同的孔隙结构特征,量化孔隙结构特征对了解结皮土壤的水文过程具有重要意义。利用 Image J 软件提取土壤孔隙中常见的二维和三维指标。常用二维指标包括:孔隙数量(N)、孔隙度(P)、孔隙成圆率(c)和平均当量孔径(d)。 N 通过软件自动统计, P 、 c 和 d 通过软件自动计算,应用公式^[22-23]分别为:

$$P = \frac{A_T}{A_{ROI}} \quad (1)$$

式中: P 为土壤孔隙度,%; A_{ROI} 为选择的感兴趣区的面积,本研究为 100 mm^2 ; A_T 为感兴趣区域中孔隙分布面积, mm^2 。

$$c = \frac{4\pi A_T}{L^2} \quad (2)$$

式中: c 为成圆率; L 为孔隙周长, mm 。成圆率数值为 $0 \sim 1$,越接近 1,说明孔隙越接近圆形。

$$d = 2 \sqrt{\frac{A_T}{N\pi}} \quad (3)$$

式中: d 为孔隙平均当量孔径, mm ; N 为孔隙数量。

1.4.3 孔隙三维指标 为更好地量化结皮不同发育阶段土壤结构特征,在 Image J 软件中利用 Bone J 插件提取分析分形维数、各向异性、孔隙表面积和孔隙连通密度 4 个三维孔隙指标^[24]。分形维数反映复杂形体占有空间的有效性,它是复杂形体不规则性的量度。利用分形维数来分析土壤孔隙的不规则性。各向异性,亦称“非均质性”,指物体的全部或部分物理、化学等性质随方向的不同而各自表现出一定差异的特性,即在不同的方向所测得的性能数值不同。研究其数值大小可以反映孔隙度的空间分布是否具有一定的变化趋势,数值越小,代表各向异性越小,说明孔隙的在三维空间分布越均匀^[25]。孔隙表面积和连通性密度可以反映孔隙数量、大小和内部连通性,数值越大,说明孔隙相对越大,连通性越好,土壤表面的渗透性越好。

1.5 数据处理

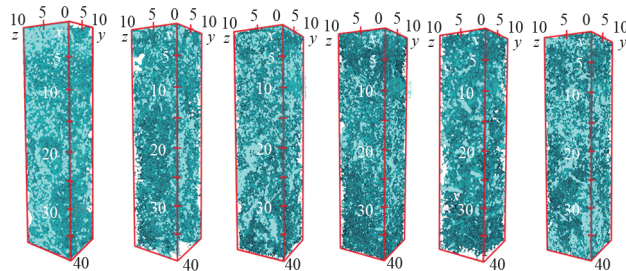
利用 Image J 软件及其插件对 CT 影像进行批处理,并提取相关指标数据。利用 Excel 2016 软件进行数据的初步整理和基本统计,包括计算指标的最小值、最大值、平均值、中位数、标准差(standard deviation, SD)和变异系数(coefficient of variation, CV)。CV 是 SD 和平均值的比值,根据 Nash and Sutcliffe 的划分标准, $CV \leq 10\%$ 时为弱变异性, $10\% < CV < 100\%$ 时为中等程度变异性, $CV \geq 100\%$ 时为强变异性。利用 SPSS 20 软件开展单因素方差分析和邓肯检验,评估结皮土样孔隙指标在不同发育阶段中的差异性,利用非线性曲线拟合结皮发育过程。利用 Image

J 软件中的 Bone J 插件进行土壤孔隙结构可视化模型的构建,其他数据图片在 Origin 2020 软件中绘制。

2 结果与分析

2.1 结皮发育过程

图 2 为不同降雨时间点结皮土样孔隙的三维空间分布图。柱形图中白色和连续的浅蓝色部分为土壤孔隙,点状和块状的深蓝色部分为土壤固体颗粒。从图 2 可以看出,土壤结构总体上表现出细碎、散乱分布的特征,与 ZHU 等^[21]对中国南方红壤区土壤结构研究的结果类似。随着降雨过程的持续,6 个土柱表层($0 \sim 10 \text{ mm}$)土壤的颗粒结构逐渐变得紧实,内部孔隙数量逐渐减少;下层($10 \sim 40 \text{ mm}$)内土样孔隙数量总体上多于表层,孔隙度高且孔隙体积较大。



注:柱形图中的 x 轴为纵轴,向下指示土层深度, mm ; y 、 z 轴为平面切片,表示裁剪出来的 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的正方形感兴趣区域。

图 2 不同降雨时间点结皮土样的孔隙结构三维分布
Fig. 2 3D distribution of pore structure in crusted soil samples under different rainfall durations

表 1 为不同降雨时间点中国南方红黏土物理结皮厚度的统计特征。6 个降雨时间 1、10、30、60、90、120 min 物理结皮厚度的平均值分别为 7.75、8.07、10.83、11.53、11.49、6.35 mm,与 BEDAIWY 等^[26]和 ARMENISE 等^[12]的研究结果一致。在每个降雨时点,各有 2 个样品共 6 个感兴趣区,6 个厚度的标准差为 $4.18 \sim 5.69 \text{ mm}$,变异系数为 $36.4\% \sim 73.4\%$,表现为中等程度变异性,因此,对 6 个数值取平均值代表该时点的结皮发育厚度。可能由于数值较少,6 个降雨时点结皮厚度的平均值并不具有显著性差异。

图 3 为结皮厚度随降雨持续时间的变化趋势,表现为初始稳定(1、10 min)、快速增加(10、30、60 min)、保持稳定(60、90 min)和快速下降(120 min)阶段。可以概括为最初的稳定发展(1、10 min),随后的快速发展(10、30、60 min)、稳定(60、90 min)和最终的侵蚀破坏(120 min)。结皮形成阶段主要发生在 $0 \sim 90 \text{ min}$ 降雨期间,对前 90 min 降雨期间的结皮厚度进行线性拟合,模拟物理结皮的发育过程。过程曲线符合一元三次方程 $y = 10.17 - 4.69x + 2.49x^2 - 0.30x^3$,可体现结皮初期缓慢发育、中期快速增长、末期保持

稳定的发育过程。拟合曲线决定系数 R^2 为 0.882 3,拟合结果在 $p<0.05$ 水平上达到显著,可认为该拟合线代表中国南方典型第四纪红黏土在当地常规降雨强度下物理结皮的发育过程具有一定合理性。

表 1 不同降雨时间结皮厚度统计特征

Table 1 Statistical characteristics of crust thickness under different rainfall durations						
降雨时间/min	最小值/mm	最大值/mm	平均值/mm	中位数/mm	SD/mm	CV/%
1	0.25	14.48	7.75	7.54	5.69	73.40
10	2.28	15.85	8.07	7.93	5.47	67.70
30	6.93	15.90	10.83	7.95	5.34	49.30
60	4.03	24.65	11.53	10.95	7.31	63.40
90	6.38	18.78	11.49	11.00	4.18	36.40
120	2.33	11.63	6.35	5.33	4.37	68.90

注:SD为标准差;CV为变异系数。下同。

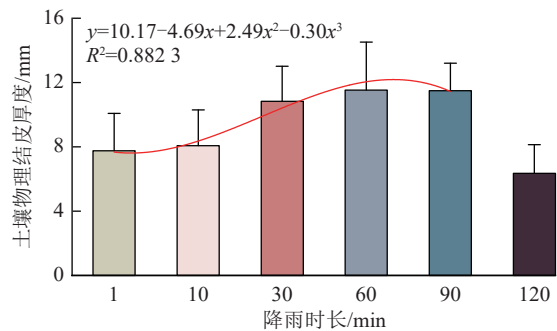


图 3 红黏土物理结皮发育过程和趋势模拟
Fig. 3 Simulation of development process and trend of physical crusts in Quaternary red clay

2.2 不同发育程度结皮土样的二维结构特征

图 4 为不同降雨历时下各土样结皮区土壤孔隙 4 个常用的二维指标(孔隙数量、孔隙度、成圆率和平均当量孔径)的垂直分布特征。不同发育阶段的结

皮区孔隙数量和孔隙度随土层深度逐渐增大。孔隙成圆率随土层深度增加而减小。结皮土样的平均当量孔径随土层深度的增加变化趋势不明显,但不同发育程度的结皮土样数值存在明显差异。

进一步统计(表 2)表明,前 5 个降雨持续时间的平均孔隙数量值为 480~785,在 10~60 min 孔隙数逐渐减少,可能是由于雨滴击溅土壤颗粒填充表层土壤孔隙,撞击并压实土壤所致。孔隙度的平均值随降雨时间的变化趋势与孔隙数量相似,在降雨 1 min 时最小,10、90 min 时最大。孔隙成圆率较高,均 >0.8 ,与孔隙数量和孔隙度的变化趋势相反。根据平均当量孔径的数值可知,不同发育阶段结皮区土壤孔径较小,为 0.116~0.175 mm,依据美国土壤科学学会对土壤孔隙的标准分类,该区间的孔隙均属于微孔^[27]。

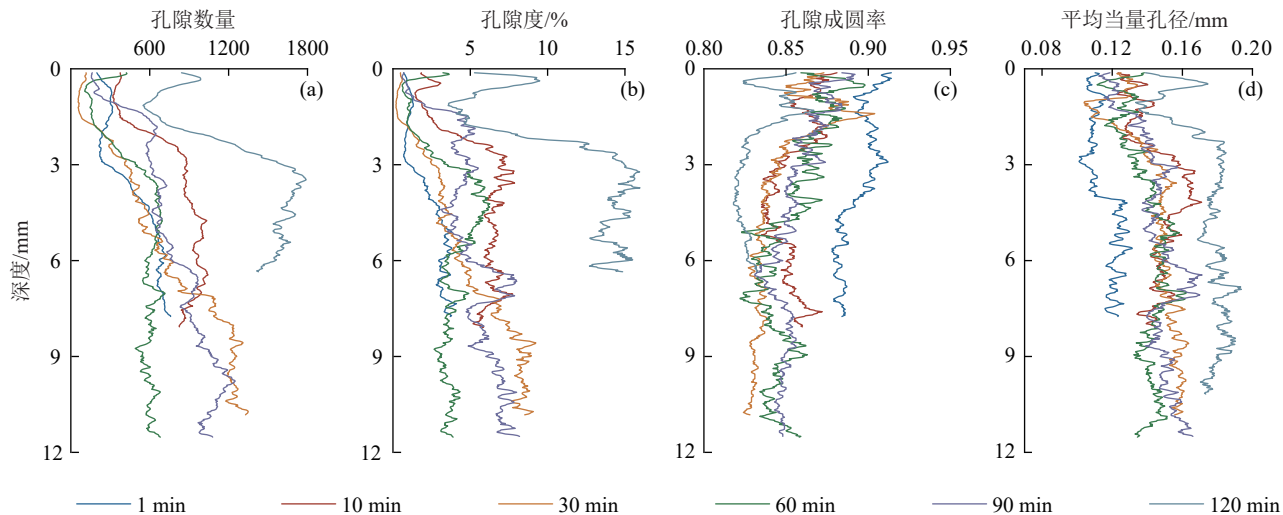


图 4 结皮土样的二维指标垂直分布特征
Fig. 4 Vertical distribution of 2D indicators of crusted soil samples

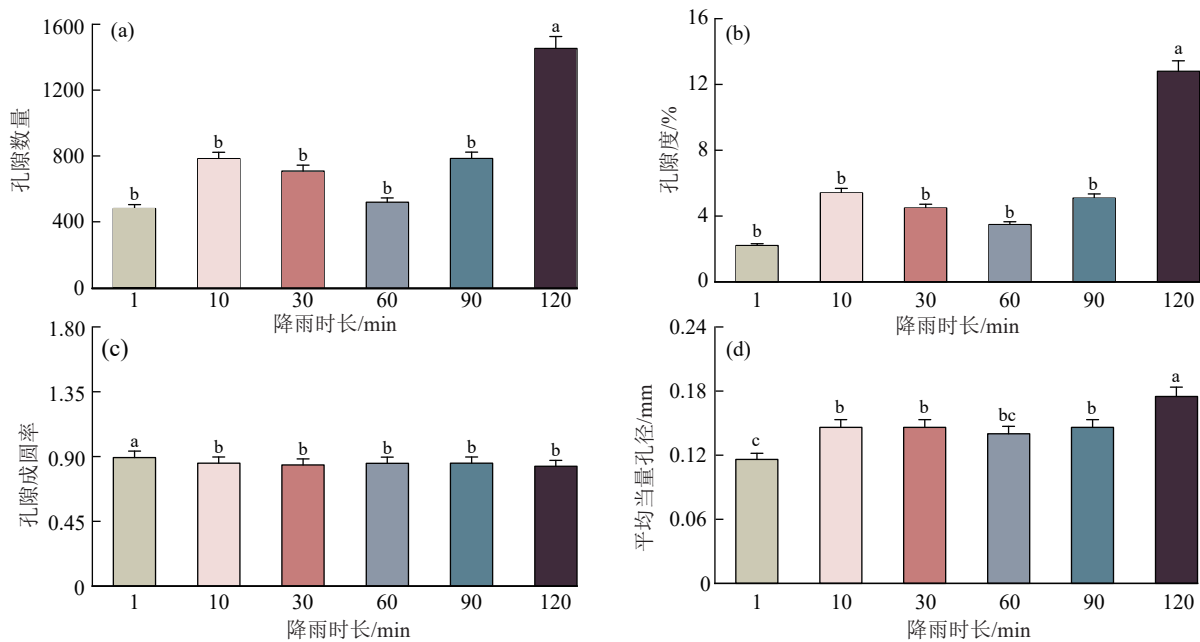
利用方差分析(ANOVA)分析 4 个二维指标在结皮不同发育阶段的差异(图 5)可知,1~90 min 发育的结皮样品与 120 min 发育的结皮样品在孔隙数量和孔隙度上存在显著差异($p<0.05$)。降雨 1 min 时的孔隙

成圆率平均值显著高于其他发育程度($p<0.05$)。在降雨 1~120 min 结皮区的平均当量孔径差异显著($p<0.05$),而在降雨 10、30、60、90 min 的结皮发育的中间阶段,结皮区孔隙的平均当量孔径值差异不显著。

表 2 不同发育程度结皮土样二维指标基本统计
Table 2 Basic statistics of 2D indicators of crusted soil samples with different stages of development

二维指标	降雨历时/min	最小值	最大值	平均值	中位数	SD	CV/%
孔隙数量	1	213	1 177	480	265	390	81.2
	10	198	1 649	783	483	656	83.7
	30	449	1 073	708	705	218	30.8
	60	63	1 133	519	455	441	85.0
	90	298	1 518	785	500	575	73.2
	120	876	2 047	1 454	1 388	485	33.4
孔隙度	1	0.56	6.52	2.21	0.99	2.36	107.0
	10	0.69	14.48	5.41	2.76	5.57	102.9
	30	2.58	8.24	4.49	3.37	2.37	52.8
	60	0.34	8.28	3.48	2.61	3.32	95.3
	90	1.65	11.06	5.09	2.82	4.31	84.6
	120	5.10	22.30	12.80	10.82	6.93	54.1
成圆率	1	0.836	0.920	0.893	0.906	0.033	3.7
	10	0.835	0.869	0.854	0.856	0.013	1.5
	30	0.826	0.859	0.842	0.847	0.013	1.6
	60	0.821	0.882	0.853	0.854	0.025	3.0
	90	0.841	0.861	0.854	0.857	0.008	0.9
	120	0.817	0.847	0.832	0.833	0.013	1.6
平均当量孔径	1	0.095	0.142	0.116	0.113	0.020	17.2
	10	0.118	0.182	0.146	0.145	0.023	15.9
	30	0.128	0.170	0.146	0.138	0.017	11.6
	60	0.118	0.165	0.140	0.139	0.020	14.6
	90	0.132	0.168	0.146	0.141	0.015	10.2
	120	0.149	0.210	0.175	0.169	0.023	13.4

注:孔隙度单位为%;平均当量孔径单位为mm。



注:图柱上方不同小写字母表示不同降雨时长间差异显著($p<0.05$)。下同。

图 5 结皮土样二维指标随降雨时间的变化特征

Fig. 5 Variation characteristics of 2D indicators of crusted soil samples with rainfall duration

2.3 不同发育程度结皮土样三维结构特征

分形维数、各向异性、孔隙表面积和连通性密度等因素不仅可以全面评估土壤固体和孔隙结构

在三维空间中的分布,而且可以识别土壤的整体结构特征^[28-29]。表3为不同发育程度下土壤结皮样品三维指标的统计分析。6个重复样本分形维数的变

异系数值相对较低,为 0.2%~1.7%,表明分形维数的变异性较弱。在此发展阶段,使用平均值来表示结皮土壤样品的三维特征是合理的。

不同发育程度下结皮的分形维数为 2.87~2.93,表明土壤黏粒质量分数高,质地好,与土壤性质的研究结果一致。分形维数在 1~90 min 逐渐增大,随后趋于稳定(图 6a),在降雨 1 min 时与其他阶段之间差异显著($p<0.05$)。

表 3 不同程度结皮土样三维指标统计特征

Table 3 Statistical characteristics of 3D indicators of crusted soil samples at different stages

三维指标	降雨历时/min	最小值	最大值	平均值	中位数	SD	CV/%
分形维数	1	2.78	2.91	2.87	2.89	0.05	1.7
	10	2.88	2.92	2.91	2.92	0.02	0.6
	30	2.90	2.92	2.91	2.92	0.01	0.3
	60	2.90	2.93	2.93	2.93	0.02	0.5
	90	2.90	2.93	2.92	2.93	0.01	0.4
	120	2.89	2.90	2.90	2.90	0.01	0.2
各向异性	1	0.07	0.52	0.18	0.13	0.17	94.4
	10	0.44	0.55	0.49	0.49	0.04	7.9
	30	0.49	0.68	0.58	0.56	0.07	12.3
	60	0.20	0.56	0.40	0.42	0.17	43.8
	90	0.43	0.66	0.60	0.63	0.09	14.3
	120	0.27	0.56	0.45	0.47	0.10	22.7
孔隙表面积	1	5 376	12 686	9 399	9 206	2 765	29.4
	10	13 332	16 778	15 432	15 471	1 215	7.9
	30	12 590	23 431	18 595	19 060	3 629	19.5
	60	18 726	27 541	23 225	23 380	4 154	17.9
	90	13 671	25 647	21 271	22 157	5 100	24.0
	120	10 208	13 506	11 444	10 748	1 400	12.2
孔隙连通性密度	1	129	469	302	274	131	43.5
	10	312	531	457	482	80	17.4
	30	259	724	530	541	171	32.2
	60	480	964	742	776	236	31.8
	90	295	678	517	542	148	28.7
	120	176	513	351	335	111	31.8

注:空隙表面积单位为 mm²;空隙连通性密度单位为 mm⁻³。

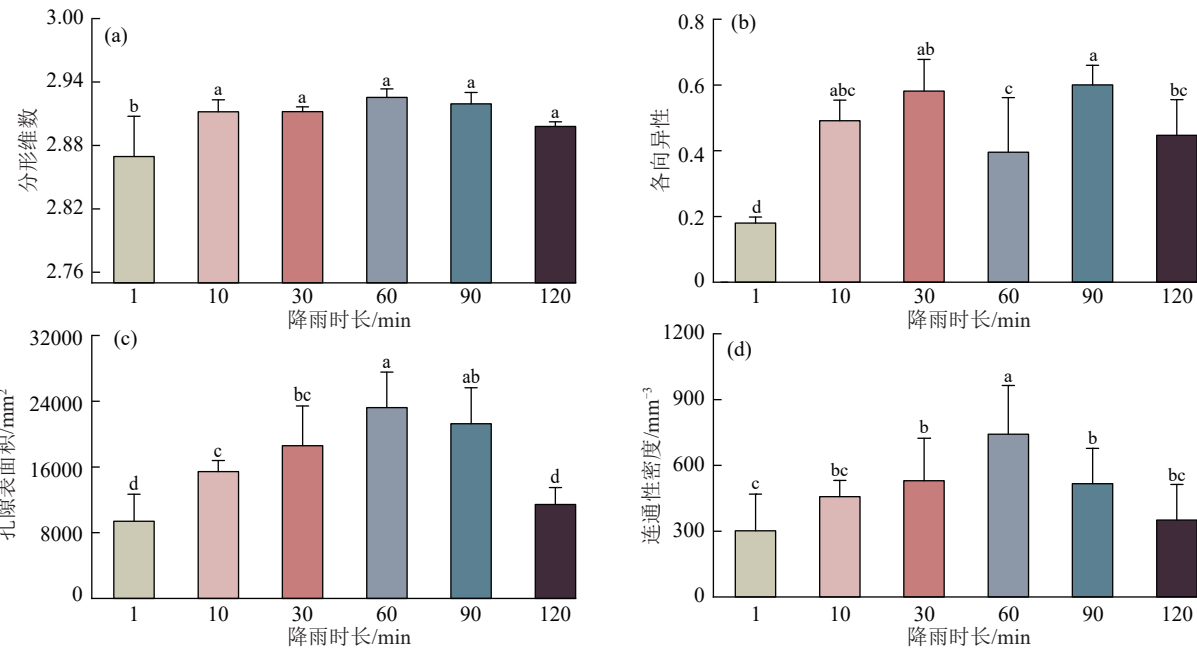


图 6 结皮土样三维指标随降雨时间的变化特征

Fig. 6 Variation characteristics of 3D indicators of crusted soil samples with rainfall duration

<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

各向异性量化孔隙结构的空間变异性和方向性。不同发育阶段物理结皮各向异性值为 0.18~0.60,表明各向异性越低,孔隙分布更随机^[22,30]。各向异性在结皮发育过程中总体呈逐渐增大趋势(图 6b),在降雨 90 min 后达到 0.6 的峰值,说明该阶段结皮土样的方向性有限。

孔隙表面积和连通性密度是三维空间中孔隙的总体数量、大小和连通性的度量。在整个结皮发育过程中,孔隙表面积和连通性密度的变化分别为 9 399~23 225 mm²和 302~742 mm⁻³,二者总体呈先增大后减小趋势(图 6c、图 6d),且在一定程度上存在显著差异性。

3 讨论

3.1 土壤物理结皮发育过程

本研究表明,中国南方典型红壤第四纪红黏土物理结皮在当地常规雨强下(30 mm/h),模拟降雨时长达到 90 min 时,结皮发育接近成熟,厚度值约为 11.53 mm(表 1),与 HARDIE 等^[4]、YAN 等^[31]、ZHOU 等^[32]、FENG 等^[33]和 HYVÄLUOMA 等^[15]的研究结果表明结皮厚度区间 0.3~7.2 mm 存在偏差。产生此结果不仅是因为研究中土壤类型和降雨条件的差异^[34],还包括结皮厚度量化方法的不同。大多数研究直接用游标卡尺或显微镜切片测量厚度,具有更多的主观性和不确定性,限制结果的可比性。本研究使用的 CT 扫描结合孔隙度阈值确定结皮厚度的方法具有相对客观且标准的优点,可以规范结皮厚度的量化方法并促进其推广使用。本研究结果表明,在降雨历时 120 min 下,结皮厚度突然降至 6.35 mm,主要是因为降雨过程的持续,导致表层土壤在雨水溅蚀和径流冲刷的作用下发生侵蚀、下层土壤裸露,上层结皮区遭受破坏^[26]。蔡强国等^[35]在探究黄土物理发育机制时表明,在降雨过程中,结皮呈“形成-破坏-再形成”周期性演替的发育过程,与本研究结果相同。

结皮厚度直接反映结皮的发育程度,依据厚度值的变化可以很好地量化结皮的发育过程。ZHOU 等^[32]通过制作结皮切片计算结皮厚度发现,物理结皮的发育过程主要包括 4 个阶段:初始湿润阶段、雨滴撞击导致的团聚体破碎阶段、坡面径流对土壤碎片的搬运和重新排列及雨滴撞击导致的压实阶段。分析不同降雨历时下红黏土物理结皮厚度值发现,在当地常规雨强的影响下,不同降雨历时下红黏土物理结皮厚度总体呈先缓慢发育、快速增大、稳定后快速减小趋势(图 3)。基于前人^[36-37]研究报道的物理结皮的形成过程、发育机制和本研究的降雨强度(30 mm/h)、土壤条件(黏性土壤)及现场试验结果,可将红黏土物理结皮的发育过程描述为 4 个阶段:1)初始稳定阶

段(1、10 min),土壤表面的细颗粒被溅散并逐步填充土壤孔隙;2)快速发展的中间阶段(10、30、60 min),进一步被溅散颗粒继续填充孔隙,雨滴累积动能不断增大,压实土壤^[34];3)后期稳定发展阶段(60、90 min),此时细颗粒几乎完全分散,雨滴的动能无法进一步压实土壤;4)最后侵蚀破坏阶段,雨滴动能累积、地表径流和径流剪切力增加,土壤表面部分结皮受到侵蚀导致结皮下部分土壤的流失^[9,38]。

3.2 结皮不同发育阶段土壤孔隙结构特征

土壤孔隙结构特征在结皮发育过程中表现出复杂的变化特征(图 5、图 6),说明物理结皮的发育程度影响土壤内部的孔隙结构。降雨初期(1、10 min),雨滴打击微区表层土壤,导致土壤颗粒分散及团聚体的破碎,细小颗粒填充土壤孔隙。伴随降雨时间的持续(30、60、90 min),雨滴动能累积对土壤表面产生一定的压实作用,导致结皮区出现孔隙数量变少、孔隙度降低的变化趋势,说明物理结皮的形成会改变土壤的孔隙状况和内部紧实度。有研究^[32]表明,在南方红壤区,以 38 mm/h 的雨强持续降雨 40 min 即可引发产流现象。因此,持续降雨至 120 min,由于前期结皮发育已经达到成熟状态,内部土壤水分趋近饱和,在径流冲刷和雨滴溅蚀的作用下,结皮层遭受破坏,下层土壤裸露,出现孔隙数量、孔隙度和当量孔径显著增加的变化特征。

三维孔隙指标可以有效反映土壤孔隙在三维空间内的形态规则和变化情况。有研究^[39]表明,三维指标孔隙表面积和孔隙连通性密度变化趋势相同,随着物理结皮厚度及发育程度的变化表现为先增加后降低的趋势,且不同阶段存在显著差异性,主要是因为降雨过程中,雨滴的击打导致土壤团聚体破碎,土壤大孔隙被分解成小孔隙形成致密的结构层。整个降雨过程中,不同发育阶段孔隙的分形维数值的变化反映土壤结构和团聚体稳定性的变化,且研究结果显示的数值为 2.87~2.93,说明试验土壤红黏土质地较细,黏粒含量高。孔隙各向异性通常被定义为平均截距长度张量的最大半径和最小半径之比,为 0~1,主要反映三维空间内孔隙的方向性。本研究结皮区土壤孔隙的各向异性呈波浪式变化,说明结皮厚度的变化显著影响各向异性,与 YU 等^[40]研究结果一致,土层深度的变化影响各向异性数值的波动。

3.3 基于 CT 扫描量化结皮厚度的局限性和意义

分析结皮发育过程中孔隙的结构特征,不仅有助于了解不同发育程度物理结皮的基本物理特征,还为不同阶段土壤孔隙结构参数化提供可能。本研究基于 CT 扫描技术提取土壤孔隙指标,依据孔隙阈

值客观量化物理结皮厚度,揭示红黏土物理结皮的发育过程和不同发育程度结皮区土壤的孔隙结构特征。然而,本研究仍存在一定的局限性:1)未进行多次模拟降雨试验,且环刀样本数量有限;2)对模拟降雨阶段物理结皮形成的讨论仍是基于先前的研究结果、试验现象的观察及对CT影像的分析;3)未测量结皮发育过程中的泥沙质量,探究结皮形成对土壤水文过程的影响。尽管如此,本研究所运用的方法“CT扫描+孔隙阈值”量化结皮厚度更客观且标准化,合理降低主观测量(游标卡尺直接读取)和估算(显微镜切片观察)所带来的误差和不确定性,该方法在量化物理结皮发育过程方面具有更大的应用潜力和推广意义。本研究选用的红黏土是中国南方的一种典型性侵蚀土壤,分布范围广。因此,本研究结果对南方红壤区的土壤侵蚀管理和农业的可持续发展具有重要的实际意义。

4 结论

1)红黏土物理结皮发育过程具有不同的阶段,可总结为初期颗粒溅散填充土壤孔隙阶段,中期雨滴压实土体阶段,后期稳定阶段和末期侵蚀阶段。在降雨1、10、30、60、90、120 min时,红黏土物理结皮厚度平均值分别为7.75、8.07、10.83、11.53、11.49、6.35 mm,除最后1个数值外,表现出先增大后稳定的趋势,发育过程可用一元三次方程 $y=10.17-4.69x+2.49x^2-0.30x^3$ ($R^2=0.8823$)拟合。

2)不同发育阶段,红黏土物理结皮表现出不同的二维和三维结构特征。雨滴打击和径流作用不仅促使物理结皮的发育,还改变土壤孔隙结构,主要表现为结皮区土壤内部多为微孔且孔隙度低。在结皮发育中期发展阶段,二维指标总体上表现为孔隙数量、孔隙度、当量孔径等逐步降低,成圆率逐渐增大。不同发育阶段,三维指标呈分形维数先增大后稳定、孔隙表面积和连通密度先增大后减小趋势,且各指标均具有不同程度的显著差异性。

3)“CT扫描+孔隙阈值”方法能够客观量化物理结皮厚度,依据结皮厚度指示结皮发育过程,揭示不同程度结皮土壤的孔隙结构特征,对优化区域侵蚀预报模型、合理布设水土保持措施具有重要作用。

参考文献:

- [1] NCHIZAH A D, WAKINDIKI I I. Soil sealing and crusting effects on infiltration rate: A critical review of shortfalls in prediction models and solutions[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2015, 61(9): 1211-1230.
- [2] DE JONG S M, ADDINK E A, VAN BEEK L P H, et al. Physical characterization, spectral response and remotely sensed mapping of Mediterranean soil surface crusts[J]. Catena, 2011, 86(1): 24-35.
- [3] 胡霞, 刘连友, 蔡强国, 等. 土壤结皮的研究进展及其评述[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(3): 145-149.
HU X, LIU L Y, CAI Q G, et al. Progress in research on soil crust[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2005, 19(3): 145-149.
- [4] HARDIE M, ALMAJMAIE A. Measuring and estimating the hydrological properties of a soil crust[J]. Journal of Hydrology, 2019, 574: 12-22.
- [5] HUANG J Y, HARTEMINK A E. Soil and environmental issues in sandy soils[J]. Earth-Science Reviews, 2020, 208: e103295.
- [6] WU S B, CHEN L, WANG N L, et al. Modeling rainfall-infiltration-runoff processes on sloping surfaces subject to rapidly changing soil properties during seal formation[J]. Journal of Hydrology, 2023, 619: e129318.
- [7] CHAMIZO S, STEVENS A, CANTÓN Y, et al. Discriminating soil crust type, development stage and degree of disturbance in semiarid environments from their spectral characteristics[J]. European Journal of Soil Science, 2012, 63(1): 42-53.
- [8] MA R M, CAI C F, LI Z X, et al. Evaluation of soil aggregate microstructure and stability under wetting and drying cycles in two Ultisols using synchrotron-based X-ray micro-computed tomography[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 149: 1-11.
- [9] HAN Y G, FAN Y T, XIN Z B, et al. Effects of wetting rate and simulated rain duration on soil crust formation of red loam[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, 75(2): e149.
- [10] PIRES L F, BACCHI O O S, REICHARDT K, et al. Gamma-ray computed tomography as a tool to evaluate porosity changes along depth for surface crusted soils[J]. Nukleonika, 2007, 52(3): 125-131.
- [11] LEE S S, GANTZER C J, THOMPSON A L, et al. Using high-resolution computed tomography analysis to characterize soil-surface seals[J]. Soil Science Society of America Journal, 2008, 72(5): 1478-1485.
- [12] ARMENISE E, SIMMONS R W, AHN S, et al. Soil seal development under simulated rainfall: Structural, physical and hydrological dynamics[J]. Journal of Hydrology, 2018, 556: 211-219.
- [13] ZHU X C, LIANG Y, CAO L X, et al. Pore characteristics of physical crust samples from two typical erodible soils in southern China[J]. European Journal of Soil Science, 2022, 73(2): e13234.
- [14] FENG R K, LIU G H, CHEN Y R, et al. Impacts of rainfall-induced physical crust on near-surface soil pore structure after drying[J]. Catena, 2024, 238: e107880.
- [15] HYVÄLUOMA J, THAPALIYA M, ALARAUDAN-JOKI J, et al. Using microtomography, image analysis and flow simulations to characterize soil surface seals[J].

- Computers and Geosciences, 2012, 48: 93-101.
- [16] BADORRECK A, GERKE H H, HÜTTL R F. Morphology of physical soil crusts and infiltration patterns in an artificial catchment [J]. Soil and Tillage Research, 2013, 129: 1-8.
- [17] FANG N F, WANG L, SHI Z H. Runoff and soil erosion of field plots in a subtropical mountainous region of China [J]. Journal of Hydrology, 2017, 552: 387-395.
- [18] 中华人民共和国水利部. 中国水土保持公报 [R]. (2024-03-31). [2024-12-01]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/202403/t20240329_1708287.html. Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Bulletin of soil and water conservation in China [R]. (2024-03-31). [2024-12-01]. http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/zgstbcgb/202403/t20240329_1708287.html.
- [19] ZHU X C, LIANG Y, QU L L, et al. Characteristics of runoff and sediment yield for two typical erodible soils in southern China [J]. International Journal of Sediment Research, 2022, 37: 653-661.
- [20] DUAN J, LIU Y J, TANG C J, et al. Efficacy of orchard terrace measures to minimize water erosion caused by extreme rainfall in the hilly region of China: Long-term continuous *in situ* observations [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 278: e111537.
- [21] ZHU X C, LIANG Y, QU L L, et al. Quantification of physical soil crust thickness and its effects on runoff and sediment yield [J]. Soil Science Society of America Journal, 2022, 86(3): 630-642.
- [22] FAN R Q, ZHANG B H, LI J Y, et al. Straw-derived biochar mitigates CO₂ emission through changes in soil pore structure in a wheat-rice rotation system [J]. Chemosphere, 2020, 243: e125329.
- [23] HU X, LI Z C, LI X Y, et al. Soil macropore structure characterized by X-ray computed tomography under different land uses in the Qinghai Lake watershed, Qinghai-Xizang Plateau [J]. Pedosphere, 2018, 28(3): 478-487.
- [24] DOMANDER R, FELDER A A, DOUBE M. BoneJ2-refactoring established research software [J]. Wellcome Open Research, 2021, 6: e37.
- [25] XIONG P, ZHANG Z B, HALLETT P D, et al. Variable responses of maize root architecture in elite cultivars due to soil compaction and moisture [J]. Plant and Soil, 2020, 455(1): 79-91.
- [26] BEDAIWY M N A. Mechanical and hydraulic resistance relations in crust-topped soils [J]. Catena, 2008, 72(2): 270-281.
- [27] ZHAO Y D, HU X, LI X Y. Analysis of the intra-aggregate pore structures in three soil types using X-ray computed tomography [J]. Catena, 2020, 193: e104622.
- [28] HU X, LI X Y, LI Z C, et al. 3-D soil macropore networks derived from X-ray tomography in an alpine meadow disturbed by plateau pikas in the Qinghai Lake watershed, north-eastern Qinghai-Xizang Plateau [J]. Journal of Soils and Sediments, 2020, 20(4): 2181-2191.
- [29] QIAO J B, LIU X T, ZHU Y J, et al. Three-dimensional quantification of soil pore structure in wind-deposited loess under different vegetation types using industrial X-ray computed tomography [J]. Catena, 2021, 199: e105098.
- [30] WINSTONE B C, HECK R J, MUNKHOLM L J, et al. Characterization of soil aggregate structure by virtual erosion of X-ray CT imagery [J]. Soil and Tillage Research, 2019, 185: 70-76.
- [31] YAN Y C, WU L H, XIN X P, et al. How rain-formed soil crust affects wind erosion in a semi-arid steppe in northern China [J]. Geoderma, 2015, 249: 79-86.
- [32] ZHOU H, PENG X H, PERFECT E, et al. Effects of organic and inorganic fertilization on soil aggregation in an Ultisol as characterized by synchrotron based X-ray micro-computed tomography [J]. Geoderma, 2013, 195: 23-30.
- [33] FENG G L, SHARRATT B, VADDELLA V. Wind-blown soil crust formation under light rainfall in a semiarid region [J]. Soil and Tillage Research, 2013, 128: 91-96.
- [34] 路培, 王林华, 吴发启. 不同降雨强度下土壤结皮强度对侵蚀的影响 [J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 141-146.
- LU P, WANG L H, WU F Q. Effect of soil crust strength on erosion under different rainfall intensity [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(8): 141-146.
- [35] 蔡强国, 陆兆熊. 黄土发育表土结皮过程和微结构分析的试验研究 [J]. 应用基础与工程科学学报, 1996(4): 363-370.
- CAI Q G, LU Z X. Experimental study on crust process and microstructure analysis of developing topsoil of loess [J]. Chinese Journal of Basic and Engineering Sciences, 1996(4): 363-370.
- [36] BU C F, W J G, CAI Q G, et al. Process and mechanism for the development of physical crusts in three typical Chinese soils [J]. Pedosphere, 2013, 23(3): 321-332.
- [37] HU X, LIU L Y, LI S J, et al. Development of soil crusts under simulated rainfall and crust formation on a loess soil as influenced by polyacrylamide [J]. Pedosphere, 2012, 22(3): 415-424.
- [38] BAHDDOU S, OTTEN W, WHALLEY W R, et al. Changes in soil surface properties under simulated rainfall and the effect of surface roughness on runoff, infiltration and soil loss [J]. Geoderma, 2023, 431: e116341.
- [39] LE BISSONNAIS Y. Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility: I. Theory and methodology [J]. European Journal of Soil Science, 1996, 47(4): 425-437.
- [40] YU K, DUAN Y, ZHANG M S, et al. Using micro focus industrial computed tomography to characterize the effects of soil type and soil depth on soil pore characteristics, morphology, and soil compression in Xi'an, China [J]. Journal of Soils and Sediments, 2020, 20(4): 1943-1959.