

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.03.014

CSTR:32310.14.stbxb.2025.03.014

雷涵喆,徐金忠,杨庆楠,等.间歇性降雨条件对黑土表层孔隙结构和团聚体周转的影响[J].水土保持学报,2025,39(3):61-69,77.

LEI Hanzhe, XU Jinzhong, YANG Qingnan, et al. Influence of intermittent rainfall conditions on the pore structure and aggregate turnover of black soil topsoil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(3):61-69,77.

间歇性降雨条件对黑土表层孔隙结构和团聚体周转的影响

雷涵喆¹, 徐金忠^{2,3}, 杨庆楠^{2,3}, 张晓娅¹, 赵怡凯¹,

李雨¹, 张玉鹏¹, 付玉¹

(1.东北林业大学林学院,哈尔滨 150040; 2.黑龙江省水利科学研究院水土保持研究所 哈尔滨 150070;

3.黑龙江省水土保持重点实验室,哈尔滨 150070)

摘要: [目的] 为探究间歇性降雨条件对黑土表层孔隙结构和团聚体周转的影响。[方法] 以黑土表层土壤为研究对象,采用稀土元素示踪法+人工模拟降雨+CT扫描相结合的研究方法,阐明表层团聚体特征、表层团聚体的周转特征、表层土壤孔隙特征对降雨强度和降雨次数的响应。[结果] 间歇性降雨条件下,孤立孔隙均集中于土壤表层。随着降雨次数的增加,雨强 40 mm/h 下连通孔隙度始终大于孤立孔隙度,雨强 70 mm/h 下连通孔隙度和孤立孔隙度交替出现最大值。对于大团聚体,随着降雨次数的增加,当连通孔隙度减小时,5~2 mm 团聚体破碎成 0.25~0.053 mm 团聚体的能力变小,5~2 mm 团聚体破碎成 <0.053 mm 团聚体的能力增大;当连通孔隙度增大时,则与之相反。对于小团聚体,随着降雨次数的增加,0.25~0.053 mm 团聚体破碎成 <0.053 mm 团聚体的能力越强,而 <0.053 mm 团聚体聚集形成 0.25~0.053 mm 团聚体的能力逐渐减小。[结论] 随间歇性降雨次数的增加,孤立孔隙集中出现在土壤表层,同时大团聚体逐渐破碎成小团聚体的能力逐渐增强,但小团聚体形成大团聚体的能力逐渐减小。

关键词: 间歇性降雨; 孔隙结构; 团聚体周转; 稀土元素; CT 扫描

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)03-0061-09

Influence of Intermittent Rainfall Conditions on the Pore Structure and Aggregate Turnover of Black Soil Topsoil

LEI Hanzhe¹, XU Jinzhong^{2,3}, YANG Qingnan^{2,3}, ZHANG Xiaoya¹, ZHAO Yikai¹,

LI Yu¹, ZHANG Yupeng¹, FU Yu¹

(1.College of Forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation,

Heilongjiang Academy of Hydraulic Sciences, Harbin 150070, China; 3.Heilongjiang Province

Key Laboratory of Soil and Water Conservation, Harbin 150070, China)

Abstract: [Objective] To investigate the effects of intermittent rainfall conditions on the pore structure and aggregate turnover in the black soil topsoil. [Methods] Black soil topsoil was studied using a combination of rare earth element tracer method, artificial rainfall simulation, and CT scanning research method. The aim was to elucidate the responses of topsoil aggregate characteristics, turnover characteristics of topsoil aggregates, and topsoil pore characteristics to rainfall intensity and frequency. [Results] Under intermittent rainfall conditions, isolated pores were concentrated in the topsoil layer. With the increase of the number of rainfall events, the connected porosity was always greater than the isolated porosity at a rainfall intensity of 40 mm/h, and the maximum values of connected porosity and isolated porosity alternated at a rainfall intensity of 70 mm/h. For large aggregates, as the number of rainfall events increased, the ability of 5–2 mm aggregates to break up into 0.25–0.053 mm aggregates decreased when the connecting porosity decreased, while the ability of 5–2 mm

收稿日期: 2024-11-22

修回日期: 2024-12-30

录用日期: 2025-01-02

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-03-20

资助项目: 国家自然科学基金项目(42207377); 黑土地保护与利用重点实验室开放基金项目(2023HTDGZ-KF-02)

第一作者: 雷涵喆(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: lhz00112@163.com

通信作者: 付玉(1991—), 女, 副教授, 博士生导师, 主要研究土壤侵蚀机理与水土流失防控研究。E-mail: aily_fy@163.com

http://stbxb.alljournal.com.cn

aggregates to break up into <0.053 mm aggregates increased. The opposite was true when the connectivity porosity increased. For small aggregates, as the number of rainfall events increased, the ability of $0.25-0.053$ mm aggregates to break up into <0.053 mm aggregates increased, while the ability of <0.053 mm aggregates to aggregate to form $0.25-0.053$ mm aggregates gradually decreased. [Conclusion] With the increase in the number of intermittent rainfall, isolated pores tend to concentrate in the topsoil layer. Meanwhile, the ability of large aggregates to break up into small particle sizes gradually increases, while the ability of small aggregates to form large aggregates gradually decreases.

Keywords: intermittent rainfall; pore structure; aggregate turnover; rare earth element; CT scanning

Received: 2024-11-22

Revised: 2024-12-30

Accepted: 2025-01-02

Online(www.cnki.net): 2025-03-20

东北黑土区土壤侵蚀严重,水力侵蚀是主要外营力之一。降雨导致土壤表层出现溅蚀和面蚀,引起水土流失,破坏表层土壤结构^[1]。土壤结构是由团聚体和孔隙在不同尺度上的空间排列组成的三维结构^[2]。土壤结构的变化和破坏是土壤可蚀性明显改变的原因之一^[3]。健康的土壤结构表现为具有良好团聚结构和连通性良好的土壤孔隙系统,能够为植物和其他生物提供足够的空气、水分补给,孔隙连通性好,降低土壤可蚀性,从而保证土壤功能更好地发挥作用,对保证农业可持续发展至关重要^[4]。

目前对于水力侵蚀对土壤团聚体的影响研究主要是从宏观方面进行。陈仕媛等^[5]研究表明,不同粒径范围团聚体稳定性差异显著,表现为较小粒径团聚体稳定性高于较大粒径团聚体;杨程高歌等^[6]研究表明,土壤紧实度和根系密度是影响团聚体稳定性差异的显著相关和极显著相关因素;方弘毅等^[7]探索冠层截留后形成的透冠雨对土壤水稳性团聚体粒径组成的影响,随着透冠雨雨量的减少,缓解表层土壤中 >2 mm 团聚体的破碎,促进深层土壤中 >2 mm 团聚体的胶结,进而提高土壤平均重量直径和几何平均重量直径。这些研究都是通过干筛、Yoder湿筛法和 Le Bissonais(LB)法等对土壤团聚体进行试验,从宏观角度来观测不同条件对土壤团聚体机械稳定性和水稳定性的影响。但这些方法只能得到团聚体受到外力影响后改变的结果,不能明确各粒径团聚体在这个过程中破碎重聚的变化来源和程度。田均良等^[8]提出一种研究土壤侵蚀的稀土元素(REE)示踪法,稀土元素具有和土壤有较好的结合能力,不溶于水,不易被植物吸收及不损害生态环境等基本特征,从试验方法精度方面看,稀土元素还具有施加量少且易于识别、探测等特征。随着REE示踪法的普及,除研究大范围土壤侵蚀的迁移和沉积规律,研究小范围团聚体的周转规律也十分重要。陈思思等^[9]

研究发现,团聚体在雨滴击打下逐级发生破碎,随着雨水的累积,土壤体积含水率不断上升,促使部分小团聚体进行再团聚过程;曹凌华^[10]研究表明,土壤团聚体的破碎和重组过程均呈现随着时间的增加占比逐渐减小趋势;张晨阳等^[11]研究表明,在降雨一薄层水流的连续侵蚀条件下,残留团聚体不断发生周转变化,随着降雨时间的增加,更多的团聚体逐渐参与到土壤周过程中。对于土壤整体而言,土壤团聚体累积破碎率始终高于累积团聚率,土壤整体破碎程度不断增加,分形维数增大,最终土壤团聚体粒径向逐渐减小的趋势转化。刘雅俊^[12]研究发现,在团聚体周转路径上,干湿交替增加团聚体的相对形成量,减少团聚体的相对破碎量。

土壤孔隙结构是土壤孔隙的形态大小、数量搭配和空间分布状况的综合反映,其结构的复杂性和异质性决定着土壤水分迁移、气体扩散和生物活动等过程。对于土壤孔隙三维结构的研究方法目前主要有切片观察、扫描电子显微镜、CT扫描和核磁共振等^[13]。其中,与切片观察和扫描电子显微镜(SEM)技术相比,CT扫描技术是一种非侵入性的三维成像技术,具有无损、分层识别土体内部组成与可视化三维结构的优势^[14],在土壤科学研究中广泛使用。张晓茹等^[15]通过CT扫描发现雨滴击溅通过改变土壤孔隙的大小、形状和连通状况对土壤的入渗能力造成影响;张佐源等^[16]通过CT扫描探索坝地剖面层状土壤孔隙随深度的变化特征发现,孔隙特征参数均呈现过渡位置渐变、界面位置突变的规律;余冬立等^[17]通过建立孔隙网络模拟和试验测定结果进行对比,证明孔隙网络模型在表征土壤孔隙结构方面具有较好的适用性和可靠性。综上可知,CT扫描既可量化又能可视化土壤结构。因此,可通过CT扫描量化表层土壤孔隙的分布特征,在空间上可视化表层土壤孔隙结构。

目前,大部分研究均基于一次降雨研究表层土

壤结构变化。但在雨季期间降雨事件通常多次间歇发生, 表层土壤孔隙和团聚体周转随多次间歇性降雨的连续性变化目前还不清楚。鉴于此, 本文以黑土表层土壤为研究对象, 采用稀土元素示踪法+人工模拟降雨+CT 扫描相结合的研究方法, 分析表层团聚体特征、表层团聚体的周转特征、表层土壤孔隙特征随降雨强度和降雨次数的变化关系, 探究间歇性降雨条件下表层土壤孔隙结构和团聚体周转特征的关系, 以期为我国黑土区土壤侵蚀规律研究提供基础数据和理论依据。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

本研究地点在中国黑龙江省宾县(45°30'37"~46°01'20"N, 126°55'41"~128°19'17"E)。该区属于中温带大陆性季风气候, 降水主要集中在 7—9 月, 年平均降水量 573.43 mm, 全年无霜期 134 d。试验在宾县水保科技园进行, 试验前, 取耕地表层 0~10 cm 土壤, 去除土壤中石头、根系等杂物。采集散土 120 kg 风干后过 2 mm 筛, 用于试验槽土壤回填; 原状土样品 1 kg 用于土壤基本理化性质测定; 环刀 4 个用于土壤体积质量测定。样地土壤有机质为(20.93±0.16) g/kg, pH 为 6.49±0.09, 体积质量为(1.10±0.03) g/cm³, 土壤质地为粉壤土(砂粒 6.14%±0.86%, 粉粒

65.32%±2.57%, 黏粒 28.54%±1.33%), 各粒径团聚体占比分别为 2.85%±1.48% (5~2 mm)、74.05%±1.84% (2~0.25 mm)、12.54%±2.03% (0.25~0.053 mm) 和 0.56%±0.19% (<0.053 mm)。

1.2 试验方法

1.2.1 稀土元素添加 研究中使用的稀土元素各氧化物纯度均>99.9%, 粒径均<2 μm。用于标记团聚体的 4 种稀土氧化物, 分别为氧化钆(Gd₂O₃)、氧化镧(La₂O₃)、氧化钐(Sm₂O₃)和氧化铈(Nd₂O₃), 试验土壤中 4 种稀土氧化物的背景值分别为 37.04 mg/kg La₂O₃、32.47 mg/kg Nd₂O₃、6.29 mg/kg Sm₂O₃ 和 5.41 mg/kg Gd₂O₃。

本研究采用 LIU 等^[18]湿法标记土壤, 稀土元素标记浓度为 500 mg/kg。将稀土元素与少量去离子水混合, 均匀喷洒到土壤中, 使稀土元素与土壤颗粒混合均匀。同时, 通过烘干法测定研究区的田间持水量, 将标记土壤的含水量调整为田间持水量的 60%。随后将标记土壤置于 4 °C 的密封条件下进行水分平衡。最后, 将标记土壤放置在避光的地方进行自然干燥, 筛分成 5~2、2~0.25、0.25~0.053、<0.053 mm 4 部分, 并称量。土壤的 4 个部分按照原始土壤粒度比例重新配比成样品, 其中每个粒度包含不同的稀土元素示踪剂(图 1)。

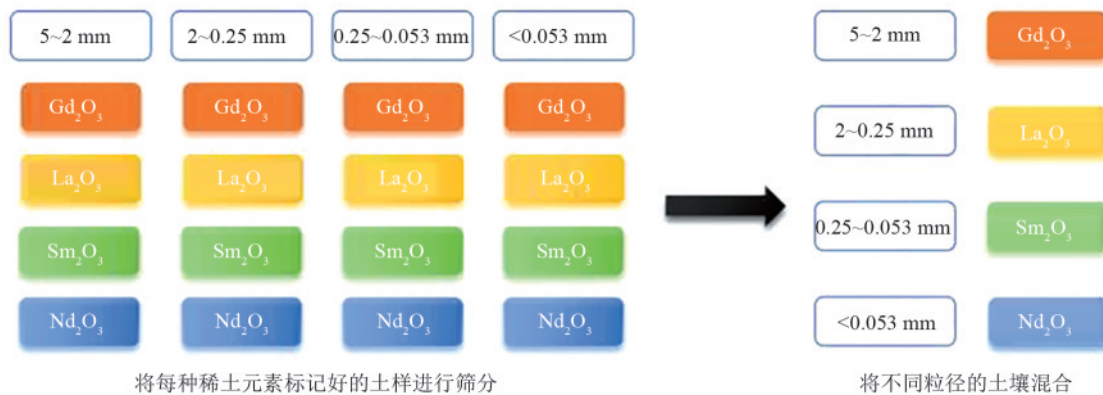


图 1 稀土元素标记后土壤重新配比示意

Fig. 1 Schematic diagram of soil re-proportioning after labeling with rare earth elements

1.2.2 降雨试验 试验采用人工模拟降雨观测装置, 该装置由降雨箱和试验土槽组成(图 2)。降雨箱为针头下滴式, 其形状为上部开口的长方体(长 200 cm×宽 120 cm), 在底部等间距布设针头、设定水头高度, 以此来调节降雨强度。根据詹敏等^[19]和张宪奎等^[20]指出, 黑土区中度侵蚀的雨强标准为 0.71 mm/min(42.6 mm/h); 宁静等^[21]指出, 在宾县地区全年降雨过程中中度侵蚀的雨强所占比例较多, 因此, 本试验共设计 2 个降雨强度(40、70 mm/h), 每个雨强进行 5 场间歇性降雨, 每场降雨历时 30 min;

根据石璞等^[22]和 ZHOU 等^[23]指出, 在降雨间歇期伴随着土壤含水率的下降, 土壤结构也随之改变。所以为统一含水量变化对土壤结构的影响, 本研究设定通过烘干法测定土壤体积含水率, 当土壤体积含水率为 34% 时进行下一场降雨。试验土槽(长 100 cm×宽 10 cm×高 10 cm)底板均匀打孔, 便于土壤水分自由渗透。

用配比好的标记土壤进行回填, 试验土槽上部依据土壤体积质量回填 5 cm 厚度的表层土, 试验土槽底部铺 5 cm 厚度的细沙, 用于水分入渗。然后将试

验土槽放入水槽饱和 12 h, 保证每个样品土壤结构稳定且含水率一致, 自然沉降至含水率 34%, 随机选取 3 个试验土槽在土壤表层各取 1 个 2 cm×2 cm×2 cm 的方形土块用于原状土 CT 扫描。其余 30 个试验土槽进行模拟降雨试验。每场降雨结束后, 对每个试验土槽土壤体积含水率进行实时监测, 当土壤含水率达到 34% 时, 随机选取每个雨强下的 3 个试验土槽进行取样, 然后对剩余土槽进行下一次降雨试验。

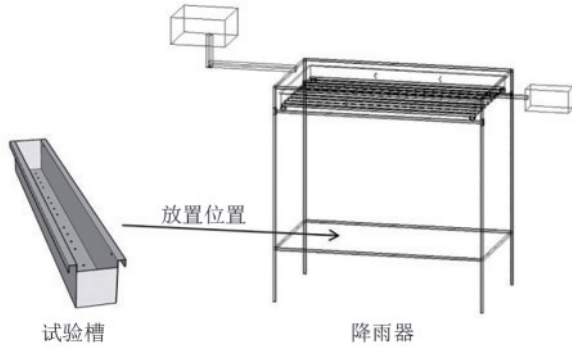


图 2 人工模拟降雨观测装置示意

Fig. 2 Schematic diagram of the artificially simulated rainfall observation device

1.2.3 CT 扫描和图像处理 在试验土槽的表层各取 1 个方形土块(长 2 cm×宽 2 cm×高 2 cm)。将土块用海绵包裹放置在用于 CT 扫描的存储容器中, 防止土样结构被破坏。对试验土样进行扫描。Easytom150 CT 扫描装置设定电压为 110 kV, 电流为 272 μA, 焦点源为 5 μm, 投影数 1 440, 分辨率 20.00 μm。将得到的低噪音图像用 AVIZO 3D 软件进行重建, 得到体素为 500×500×500 的扫描图像。土壤孔隙可视化采用 AVIZO.2020 版本获得; 单位体积上孔隙三维指标(孔隙数量、每个孔隙的大小、面积和体积)用 Label Analysis 插件完成计算; 孔隙率用 Volume Fraction 插件完成。

1.2.4 筛分方法 取试验土槽表层 0~2 cm 土层的土壤样品 200 g 用于湿筛, 湿筛后的各粒径土样再进

行稀土元素测定。土壤团聚体粒径分级采用 Elliott 湿筛法^[24], 将 50 g 烘干土样放置于孔径 5、2、0.25、0.053 mm 的套筛上, 浸泡 5 min 后将筛子上下振荡, 频率 25 次/min。振荡结束后冲洗留在各粒径筛子上的团聚体, 在 60 °C 下烘干、称重。

1.2.5 稀土元素测定方法 采用 Na₂O₂ 碱熔法^[18] 测定湿筛后的各粒径土样中稀土元素浓度。

1.3 指标测定和分析

1.3.1 团聚体平均重量直径(MWD)计算

$$MWD = \sum_{i=1}^n W_i X_i \quad (1)$$

式中: W_i 为第 i 粒级的土壤团聚体质量百分数, %; X_i 为相邻 2 级土壤团聚体的平均粒径, mm。

1.3.2 团聚体周转路径计算 本研究参照 PENG 等^[25] 稀土元素示踪计算团聚体周转速率的方法来进行团聚体周转路径的计算, 即 4 种示踪粒径的团聚体 A(5~2 mm)、B(2~0.25 mm)、C(0.25~0.053 mm)、D(<0.053 mm)。4 种团聚体共存在 12 条周转路径, 分别为破碎方向的 a~f 6 条路径和形成方向的 g~l 6 条路径(图 3)。

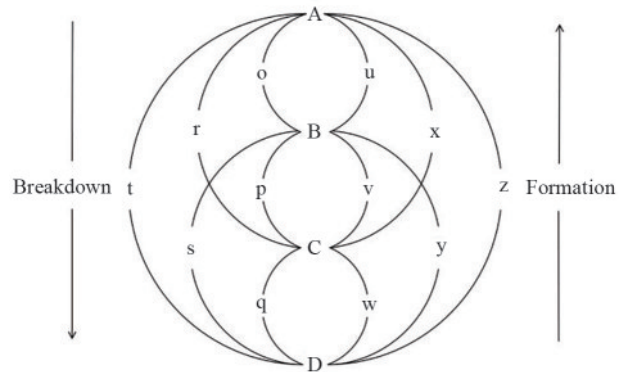


图 3 4 种不同聚合体的转移途径

Fig. 3 Turnover pathways of four different aggregates

周转起始时间为 T_1 , 终止时间为 T_2 , T_1 到 T_2 时刻各粒径团聚体的变化可以由一个转移矩阵表示。

$$K(T_2 - T_1) = \begin{pmatrix} 1 - o - r - t & u & x & z \\ o & 1 - u - p - s & v & y \\ r & p & 1 - x - v - q & w \\ t & s & q & 1 - z - y - w \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: $K(T_2 \sim T_1)$ 为 A、B、C 或 D 从 $T_1 \sim T_2$ 时间内的质量百分比的变化。

土壤团聚体形成方向过程中, 团聚体 A(5~2 mm)、B(2~0.25 mm)、C(0.25~0.053 mm) 的形

成变化率(FG)计算方法^[25]见公式(3)~公式(5); 土壤团聚体破碎方向过程中, 团聚体 A(5~2 mm)、B(2~0.25 mm)、C(0.25~0.053 mm) 的破碎变化率(BG)计算方法^[25]见公式(6)~公式(8)。

$$FG(A) = \frac{(u_{T_2} - u_{T_1})B(T_1) + (x_{T_2} - x_{T_1})C(T_1) + (z_{T_2} - z_{T_1})D(T_1)}{A(T_1)} \quad (3)$$

$$FG(B) = \frac{(v_{T_2} - v_{T_1})C(T_1) + (y_{T_2} - y_{T_1})D(T_1)}{B(T_1)} \quad (4)$$

$$FG(C) = \frac{(w_{T_2} - w_{T_1})D(T_1)}{C(T_1)} \quad (5)$$

$$BG(A)=(o_{T_2}-o_{T_1})+(r_{T_2}-r_{T_1})+(t_{T_2}-t_{T_1}) \quad (6)$$

$$BG(B)=(p_{T_2}-p_{T_1})+(s_{T_2}-s_{T_1}) \quad (7)$$

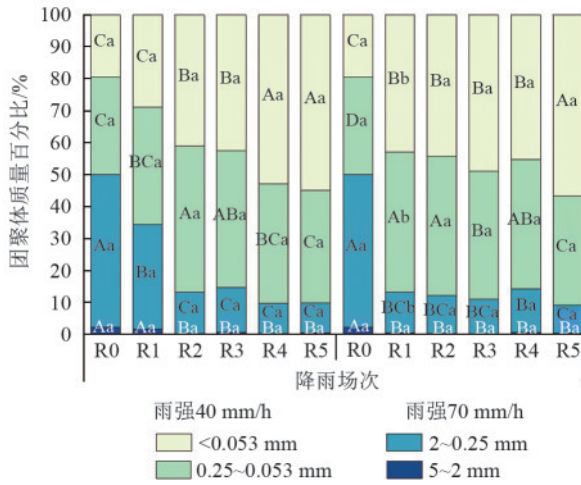
$$BG(C)=(q_{T_2}-q_{T_1}) \quad (8)$$

1.3.3 统计分析 采用Excel 2021 软件进行数据整理和计算,SPSS 16.0 软件的单因素方差分析(One-way ANOVA)和独立样本 *t* 检验,进行显著性水平检验 ($p < 0.05$)。采用 Origin 2021 软件作图,采用 AVIZO 2020 软件进行土 CT 扫描土块数据的处理。

2 结果与分析

2.1 表层团聚体特征

由图 4 可知,不同降雨强度和降雨次数下,随着降雨次数的增加,雨强 40、70 mm/h 下,粒径 5~2、2~0.25 mm 团聚体质量百分比先下降后趋于稳定;粒径 0.25~0.053 mm 团聚体质量百分比先增加后减小,其中,雨强 40 mm/h 时,粒径 0.25~0.053 mm 团聚体质量百分比在 R2 达到最高值(45.79%),雨强 70 mm/h 时,粒径 0.25~0.053 mm 团聚体质量百分比在 R1 达到最高值(43.92%);粒径 <0.053 mm 团聚体质量百分比呈上升趋势。



注:R0 为原状土,R1~R5 为降雨场次;图柱上不同大写字母表示相同雨强不同场次间差异显著 ($p < 0.05$);不同小写字母表示不同雨强相同场次间差异显著 ($p < 0.05$)。下同。

图 4 不同降雨强度和降雨次数下团聚体质量百分比

Fig. 4 Percentage of aggregate mass under different rainfall intensities and frequencies

由图 4 可知,与 R0 相比,R1 对粒径 2~0.25 mm 团聚体有明显破碎作用 ($p < 0.05$),并且雨强越大破碎程度越大 ($p < 0.05$);在雨强 40、70 mm/h 下,R1 时粒径 2~0.25 mm 团聚体质量百分比较 R0 分别减少 14.93% 和 35.17%。随降雨次数的增加,当粒径 2~0.25 mm 团聚体质量百分比达到稳定后,降雨对粒径 0.25~0.053 mm 团聚体质量百分比的破碎作用逐渐增强。R2~R5 时粒径 0.25~0.053 mm 团聚体质

量百分比都逐渐减小;在雨强 40、70 mm/h 下,R5 的粒径 0.25~0.053 mm 团聚体质量百分比较 R2 分别减少 10.54% 和 9.43%。

由图 5 可知,2 个雨强下 MWD 均随降雨次数的增加呈下降趋势。不同的是 MWD 在雨强 40 mm/h 时比雨强 70 mm/h 的下降程度小,R1 时雨强 40 mm/h 的 MWD 是 70 mm/h 的 2.04 倍。随着降雨次数的增加,2 个雨强的 MWD 在 R2 后变得逐渐稳定并接近,R2~R5 时 2 个雨强 MWD 间差异不显著 ($p < 0.05$)。

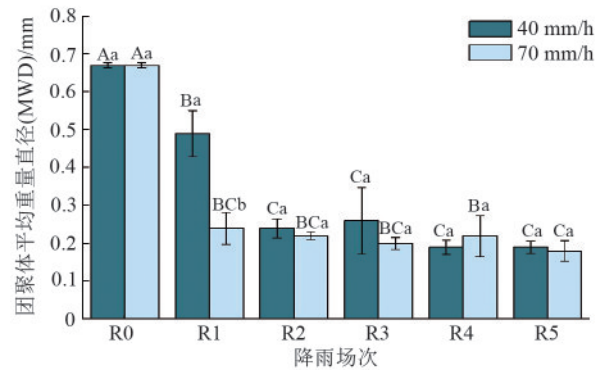


图 5 不同降雨强度不同降雨次数下团聚体平均重量直径

Fig. 5 Mean weight diameter of aggregates under different rainfall intensities and frequencies

2.2 表层团聚体的周转特征

由图 6 可知,从破碎路径看,在雨强 40 mm/h 下,R1、R2 时粒径 5~2、2~0.25 mm 团聚体主要向粒径 0.25~0.053 mm 团聚体破碎,粒径 5~2 mm 向粒径 0.25~0.053 mm 团聚体的破碎路径值为 60.37% 和 56.73%,粒径 2~0.25 mm 向粒径 0.25~0.053 mm 团聚体的破碎路径值为 38.55% 和 56.14%。R3~R5 时粒径 5~2、2~0.25 mm 团聚体主要向粒径 <0.053 mm 团聚体破碎,粒径 5~2 mm 向粒径 <0.053 mm 团聚体的破碎路径值逐渐减小,从 62.17% 到 42.73%,粒径 2~0.25 mm 向粒径 <0.053 mm 团聚体的破碎路径值逐渐增大,从 40.05% 到 49.31%。R0~R5 时粒径 0.25~0.053 mm 向粒径 <0.053 mm 团聚体的破碎路径值逐渐增加。在雨强 70 mm/h 下,与雨强 40 mm/h 不同的是 R1、R2、R4 时粒径 5~2、2~0.25 mm 团聚体主要向粒径 0.25~0.053 mm 团聚体破碎,R3、R5 时粒径 5~2、2~0.25 mm 团聚体主要向粒径 <0.053 mm 团聚体破碎。与雨强 40 mm/h 相同的是 R0~R5 时粒径 0.25~0.053 mm 向粒径 <0.053 mm 团聚体的破碎路径值也逐渐增加。

从形成路径看,在雨强 40 mm/h 下,粒径 5~2 mm 团聚体主要是由粒径 0.25~0.053 mm 团聚体形成,但路径值较小为 0.64%~5.15%。粒径 2~0.25 mm

团聚体主要由粒径 0.25~0.053、<0.053 mm 团聚体形成,这 2 个粒径的形成路径值在每场降雨中基本保持一致,均呈减小趋势,从 R1 的 31.49%、34.12% 减小到 R5 的 9.77%、9.27%。粒径 <0.053 mm 向粒径 0.25~0.053 mm 团聚体的形成路径值从 R1(39.33%)增加到 R2(52.09%),但在 R3~R5 时逐渐减小,从 41.10% 到 35.95%。在雨强 70 mm/h 下,与雨强 40 mm/h 不同,粒径 5~2 mm 团聚体主要是由粒径 2~0.25 mm 团

聚体形成的,路径值为 0.07%~3.01%;与雨强 40 mm/h 相同,粒径 2~0.25 mm 团聚体主要由粒径 0.25~0.053 mm 和 <0.053 mm 团聚体形成,这 2 个粒径的形成路径值在每场降雨中基本保持一致,均呈减小趋势,从 R1 的 13.05%、13.04% 减小到 R5 的 9.11%、7.55%。粒径 <0.053 mm 向粒径 0.25~0.053 mm 团聚体的形成路径值从 R1(41.02%)增加到 R2(43.51%),但在 R3~R5 时逐渐减小,从 39.35% 到 38.64%。

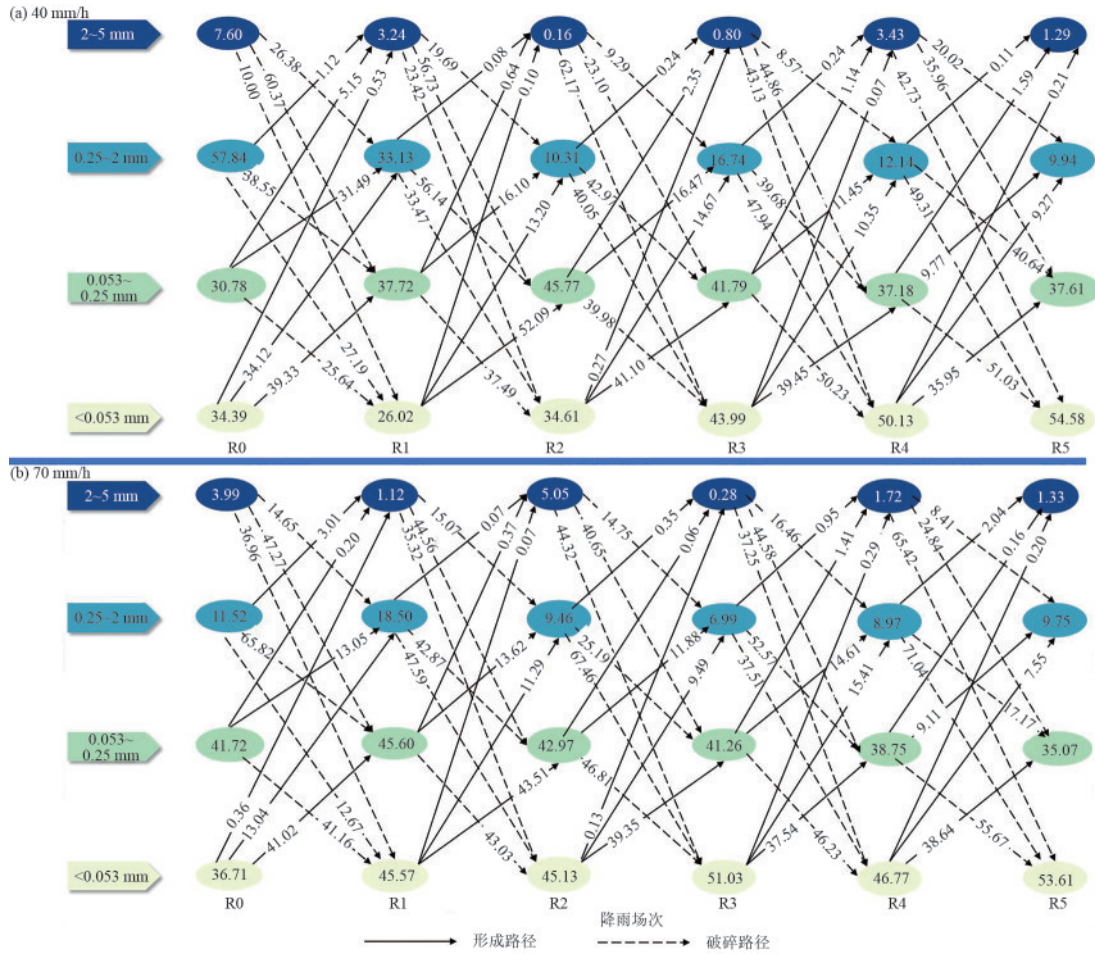


图 6 不同降雨强度下团聚体随降雨次数的周转路径

Fig. 6 Diagram of the turnover pathways of aggregates with rainfall frequency

2.3 表层土壤孔隙特征

由图 7 可知,从总孔隙度来看,降雨后 40 mm/h 雨强下的总孔隙度始终高于 70 mm/h 雨强下的总孔隙度,在 R1~R5 时高出 1.20%~15.06%。随降雨次数的增加,40、70 mm/h 雨强下,连通孔隙度和孤立孔隙度的变化趋势随降雨次数的增加呈波动式变化。不同的是,在雨强 40 mm/h 下的每场降雨中,连通孔隙度始终大于孤立孔隙度,随着降雨次数增加,连通孔隙度分别是孤立孔隙度的 88.14、8.81、61.56、7.32、17.42 倍。在雨强 70 mm/h 下的每场降雨中,连通孔隙度和孤立孔隙度交替出现最大值,同时与雨强 40 mm/h 下相比,连通孔隙度和孤立孔隙度之间的差值也明显变小。

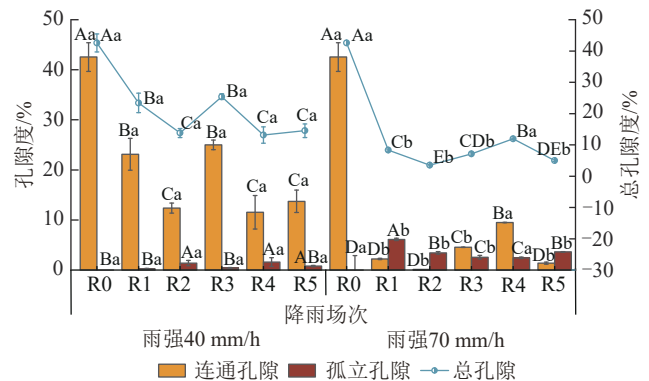


图 7 不同降雨强度不同降雨次数下土壤孔隙度

Fig. 7 Soil porosity under different rainfall intensities and frequencies

由图 8 可知, R0 时表层土壤中 <0.03 mm 的孔隙占比最大, 为 68.50%。R1~R5 时, 从 >0.1 mm 孔隙数量占比看, 雨强 40 mm/h 比雨强 70 mm/h 的孔隙数量占比较少, 40 mm/h 为 7.43%~15.90%, 70 mm/h 为 9.54%~38.86%。从 0.1~0.03 mm 孔隙数量占比看, 随降雨次数的增加, 70 mm/h 逐渐高于 40 mm/h。从 <0.03 mm 孔隙数量占比来看, 雨强 40 mm/h 下呈波动式变化, 雨强 70 mm/h 下呈先减小后增加趋势, 同时, 雨强 70 mm/h 下的数量占比始终小于雨强 40 mm/h 下的数量占比。

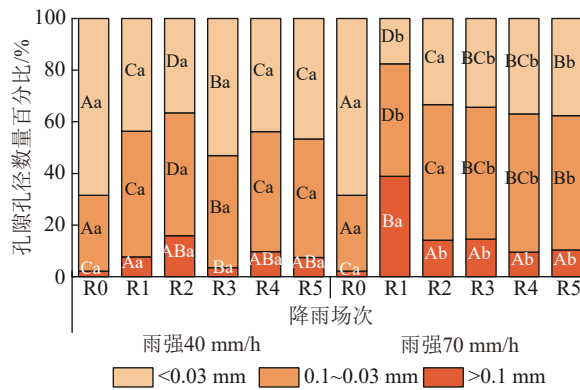


图 8 不同雨强不同降雨次数下孔隙孔径数量百分比

Fig. 8 Percentage of pore size under different rainfall intensities and frequencies

3 讨论

3.1 间歇性降雨对表层团聚体和孔隙的影响

与原状土(R0)相比, R1 对表层土壤的粒径 5~2 mm 和 2~0.25 mm 团聚体有明显破碎作用($p < 0.05$), 并且雨强越大破碎程度越大。在雨强 40、70 mm/h 下, 粒径 5~2 mm 团聚体质量百分比 R1 较 R0 分别减少 0.62% 和 1.72%, 粒径 2~0.25 mm 团聚体质量百分比 R1 较 R0 分别减少 14.93% 和 35.17%。主要是因为 R0 时表层土壤的结构是松散和均匀的, 但在 R1 时, 雨滴击溅作用直接导致处于表层的团聚体被击打破碎; 并且随着降雨强度的增大, 雨滴落到地面的动能也逐渐增强,

使团聚体被击打破碎成更小的粒径。与 ZHOU 等^[23]的研究结果一致, 在具有较高破坏能力的初始降雨后, 较大团聚体发生净崩解, 导致较大团聚体数量减少, 较小团聚体和微团聚体的数量增加。本研究发现, 随降雨次数的增加, 当粒径 5~2、2~0.25 mm 团聚体质量百分比达到稳定后, 粒径 0.25~0.053 mm 团聚体质量百分比逐渐从增加变为减少。可能有 2 个原因: 一是处于土壤最表层的大团聚体已经破碎形成小团聚体, 并形成一层致密的土壤结皮^[26], 雨滴击溅作用在之后的降雨中主要对土壤结皮进行再次打击破碎, 所以 0.25~0.053 mm 团聚体的破碎率逐渐增加, 而土壤结皮的形成减小雨滴击溅对下层团聚体的打击作用^[27], 使得处于结皮下层的大团聚体处于稳定状态; 二是随降雨次数的增加, 土壤中胶结物质逐渐减少, 小团聚体聚集形成大团聚体的能力变小^[28], 所以粒径 <0.053 mm 团聚体形成粒径 0.25~0.053 mm 团聚体的能力减小。

土壤孤立孔隙度和连通孔隙度表征土壤孔隙结构连通性。从连通孔隙和孤立孔隙看, 随着降雨次数的增加, 雨强 40 mm/h 下连通孔隙度始终大于孤立孔隙度, 雨强 70 mm/h 下连通孔隙度和孤立孔隙度交替出现最大值。由于小雨强下, 较少的大团聚体破碎成小团聚体, 并且雨滴压实作用的深度较小, 使得雨强 40 mm/h 下孤立孔隙仅占 0.02%~1.58%, 远低于连通孔隙度, 并且集中存在于土壤表层(图 9)。随着雨强越大, 表层土壤中的小团聚体越多, 雨滴的压实作用也越大, 所以雨强 70 mm/h 下表层土壤中大量连通孔隙被堵塞, 孤立孔隙率显著增加。连通孔隙和孤立孔隙交替出现最大值是因为: 降雨不仅促进表层结皮的形成^[29-30], 同时也对表层结皮有破坏剥离作用。随着雨强增大, 降雨对表层结皮的剥离作用也随之增大^[31]。在 2 种交互作用的影响下, 土壤表层结皮厚度呈波动式变化^[32-33], 土壤表层孔隙的连通性也随之改变。

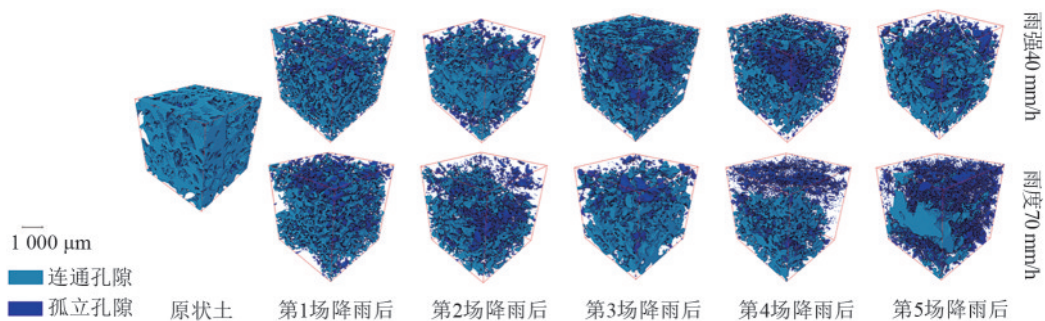


图 9 不同雨强不同降雨次数下土壤孔隙三维结构

Fig. 9 Three-dimensional structure map of soil pores under different rainfall intensities and frequencies

3.2 表层团聚体周转和孔隙的关系

每场降雨前的土壤孔隙结构都与降雨后的土壤团聚体周转密切相关。本研究发现,随着降雨次数的增加,土壤中的孤立孔隙逐渐增加并集中在土壤表层,与 FENG 等^[34]的研究结果相似。对于大团聚体,随着降雨次数的增加,当连通孔隙度减小时,粒径 5~2 mm 向 2~0.25 mm 团聚体的破碎路径值减小,粒径 5~2 mm 向 <0.053 mm 团聚体的破碎路径值增加,表明 5~2 mm 团聚体破碎成 0.25~0.053 mm 团聚体的能力变小,5~2 mm 团聚体破碎成 <0.053 mm 团聚体的能力增大;当连通孔隙度增大时,则与之相反。是由于连通孔隙度减小时,表层大团聚体被雨滴击打破碎后依旧被堵塞在土壤表层,团聚体再次受到雨滴的击溅作用^[35],进而破碎成更小的团聚体进入土壤孔隙^[15]。对于小团聚体,随着降雨次数的增加,粒径 0.25~0.053 mm 向 <0.053 mm 团聚体的破碎路径值逐渐增大,但粒径 <0.053 mm 向 0.25~0.053 mm 团聚体的形成路径值逐渐减小,表明 0.25~0.053 mm 团聚体破碎成 <0.053 mm 团聚体的能力越强,而 <0.053 mm 团聚体聚集形成 0.25~0.053 mm 团聚体的能力逐渐减小。是因为表层连通孔隙变小,孤立孔隙增加,使得下层团聚体不受雨滴动能的影响,只受到土壤水分干湿交替的影响,而干湿交替降低团聚体颗粒之间的黏结性,增加土壤颗粒的易碎性^[12]。

4 结论

1) 间歇性降雨条件下,孤立孔隙都集中在土壤表层。随着降雨次数的增加,雨强 40 mm/h 的连通孔隙度始终大于孤立孔隙度;而雨强 70 mm/h 下连通孔隙度和孤立孔隙度交替出现最大值。

2) 间歇性降雨条件下,大团聚体逐渐破碎成小粒径的能力逐渐增强,但小团聚体形成大团聚体的能力逐渐减小。随着降雨次数的增加,大部分粒径 5~2 mm 团聚体逐渐从破碎成 0.25~0.053 mm 团聚体变为破碎成 <0.053 mm 团聚体;粒径 2~0.25 mm 团聚体主要由粒径 0.25~0.053、<0.053 mm 团聚体形成,这 2 个粒径的形成路径值在每场降雨中基本保持一致,均呈减小趋势。

3) 间歇性降雨条件下,随着降雨次数的增加,对于大团聚体,当连通孔隙度减小时,5~2 mm 团聚体破碎成 0.25~0.053 mm 团聚体的能力逐渐减小,5~2 mm 团聚体破碎成 <0.053 mm 团聚体的能力逐渐增大;当连通孔隙度增大时,则与之相反。对于小团聚体,随着降雨次数的增加,0.25~0.053 mm 团聚体破碎成 <0.053 mm 团聚体的能力越强,但是 <0.053 mm 团

团聚体聚集形成 0.25~0.053 mm 团聚体的能力逐渐减小。

综上,间歇性降雨导致表层土壤孔隙结构的改变,进而影响表层团聚体的周转。随间歇性降雨次数的增加,孤立孔隙集中出现在土壤表层,同时大团聚体逐渐破碎成小团聚体的能力逐渐增强,但小团聚体形成大团聚体的能力逐渐减小。

参考文献:

- [1] 王计磊,李子忠.东北黑土区水力侵蚀研究进展[J].农业资源与环境学报,2018,35(5):389-397.
WANG J L, LI Z Z. Research progress on water erosion in the black soil region of northeast China[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2018, 35(5): 389-397.
- [2] 刘博.冻融条件对黑土结构特征及土壤分离能力的影响试验研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2023.
LIU B. Experimental study on the influence of freezing and thawing conditions on the structural characteristics and soil separation ability of black soil [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023.
- [3] 赵雪.冻融条件下土壤结构对土壤水分运移规律的影响研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2023.
ZHAO X. Study on the influence of soil structure on soil moisture migration under freezing and thawing conditions [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023.
- [4] BRONICK C J, LAL R. Soil structure and management: A review[J]. Geoderma, 2005, 124(1/2): 3-22.
- [5] 陈仕媛,马岚,陈佩岩.北方土石山区不同粒径团聚体特征及其对坡面侵蚀过程的影响[J].水土保持研究, 2025, 32(2): 102-110.
CHEN S Y, MA L, CHEN P Y. Characteristics of aggregates with different particle sizes and their effects on slope erosion process in the rocky mountainous area of north China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(2): 102-110.
- [6] 杨程高歌,雷少华,耿韧,等.黄棕壤典型草地不同根系结构土壤团聚体稳定性季节变化特征[J].水土保持研究, 2025, 32(1): 66-72.
YANG C, LEI S H, GENG R, et al. Seasonal variation of soil aggregate stability of typical yellow brown soil in grasslands with different root structures [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(1): 66-72.
- [7] 方弘毅,吴福忠,郑旭灵,等.亚热带森林透冠雨对林下土壤水稳性团聚体结构的影响[J].亚热带资源与环境学报, 2024, 19(3): 12-20.
FANG H Y, WU F Z, ZHENG X L, et al. Effects of throughfall in subtropical forests on the structure of water stable aggregate in understory soils [J]. Journal of Subtropical

- Resources and Environment, 2024, 19(3):12-20.
- [8] 田均良,周佩华,刘普灵,等.土壤侵蚀REE示踪法研究初报[J].水土保持学报,1992,6(4):23-27.
TIAN J L, ZHOU P H, LIU P L, et al. A preliminary report of REE tracer method for soil erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1992, 6(4):23-27.
- [9] 陈思思,孙洋,张凯,等.土壤团聚体周转过程和稳定性的影响因素与作用机制综述[J].江苏农业科学,2024, 52(19):8-14.
CHEN S S, SUN Y, ZHANG K, et al. A review of the influencing factors and mechanisms of soil aggregate turnover process and stability [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2024, 52(19):8-14.
- [10] 曹凌华.侵蚀-沉积作用下土壤团聚体破碎~重组对有机碳矿化的影响[D].西安:西安理工大学,2024.
CAO L H. Effect of soil aggregate fragmentation and recombination on organic carbon mineralization under erosion-deposition [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2024.
- [11] 张晨阳,杨伟,汪零,等.基于REE示踪对红壤细沟间侵蚀团聚体周转和泥沙迁移特征的研究[J].土壤学报, 2024, 61(6):1492-1505.
ZHANG C Y, YANG W, WANG L, et al. Characteristics of aggregate turnover and sediment transport by interrill erosion using rare earth elements in red soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 2024, 61(6):1492-1505.
- [12] 刘雅俊.干湿交替和冻融循环对黑土团聚体周转和有机碳的影响[D].广西桂林:桂林理工大学,2023.
LIU Y J. Effects of dry-wet alternation and freeze-thaw cycle on aggregate turnover and soil organic carbon in black soil [D]. Guilin, Guangxi: Guilin University of Technology, 2023.
- [13] 张靖,陈琳,周虎,等.基于数字图像技术的土壤孔隙结构定量研究进展[J].土壤,2023,55(1):21-29.
ZHANG J, CHEN L, ZHOU H, et al. Quantification of soil pore structure based on digital image technology: A review[J]. Soils, 2023, 55(1):21-29.
- [14] 蔡位子,刘怡颖,江俊,等.土壤孔隙结构检测技术研究现状与展望[J].沈阳农业大学学报,2023, 54(5): 627-640.
CAI W Z, LIU Y Y, JIANG J, et al. Research status and prospect of detection technology of soil pore structure [J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2023, 54(5): 627-640.
- [15] 张晓茹,刘志强,焦钊栩,等.雨滴击溅下表土孔隙变化及其对入渗能力的影响[J].土壤,2024,56(3):601-609.
ZHANG X R, LIU Z Q, JIAO F X, et al. Topsoil pore change under raindrop splashing and its effect on soil infiltration[J]. Soils, 2024, 56(3):601-609.
- [16] 张佐源,夏彬,郝旺林,等.黄土高原坝地层状土壤剖面孔隙分布特征[J].水土保持学报,2023, 37(6): 83-90.
ZHANG Z Y, XIA B, HAO W L, et al. Pore distribution characteristics of layered soil profile in dam land of Loess Plateau [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(6):83-90.
- [17] 余冬立,韩笑,孙泉沁,等.基于CT扫描的滨海土壤孔隙空间网络表征与渗流模拟[J].农业机械学报,2023, 54(5):308-315.
SHE D L, HAN X, SUN X Q, et al. Coastal soil pore space network characterization and seepage simulation based on CT scanning [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(5):308-315.
- [18] LIU S, GUO Z C, PAN Y B, et al. Rare earth oxides for labelling soil aggregate turnover: Impacts of soil properties, labelling method and aggregate structure [J]. Geoderma, 2019, 351:36-48.
- [19] 詹敏,厉占才,信玉林.黑土侵蚀区降雨参数与土壤流失关系[J].黑龙江水专学报,1998(1):40-43.
ZHAN M, LI Z C, XIN Y L. On the relationship between precipitation parameter and soil erosion [J]. Journal of Heilongjiang Hydraulic Engineering College, 1998(1):40-43.
- [20] 张宪奎,许靖华,卢秀琴,等.黑龙江省土壤流失方程的研究[J].水土保持通报,1992,12(4):1-9.
ZHANG X K, XU J H, LU X Q, et al. A study on the soil loss equation in Heilongjiang Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1992, 12(4):1-9.
- [21] 宁静,周杰,周芳琪.基于变权物元模型的黑土区土壤侵蚀风险评价[J].江苏农业科学,2022,50(15):203-209.
NING J, ZHOU J, ZHOU F Q. Risk assessment of soil erosion in black soil area based on variable weight matter element [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(15): 203-209.
- [22] 石璞, YANG Chiahue Doua, 赵鹏志.间歇性降雨对土壤团聚体粒级及磷、铜、锌富集的影响[J].土壤学报, 2021, 58(4):948-956.
- SHI P, YANG C, ZHAO P Z. Effect of intermittent rainfall on size distribution and phosphorus, copper and zinc enrichment of soil aggregates [J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(4):948-956.
- [23] ZHOU S N, WILSON C G, HATHAWAY J M, et al. Tracking in situ soil aggregate turnover under raindrop impact and wetting-drying cycles using rare earth elements [J]. Catena, 2022, 213: e106227.
- [24] 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.

(下转第77页)