

DOI: 10.11766/trxb202001080611

石璞, Chiahue Doua Yang, 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 Pu, CHIAHUE Doua Yang, ZHAO Pengzhi. 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.

间歇性降雨对土壤团聚体粒级及磷、铜、锌富集的影响*

石璞^{1,2}, Chiahue Doua Yang¹, 赵鹏志³

(1. 吉林大学地球科学学院, 长春 130061; 2. 瑞士苏黎世联邦理工大学环境系统科学系, 苏黎世 8092 瑞士; 3. 比利时法语鲁汶大学地球与生命科学系, 新鲁汶 1348 比利时)

摘要: 探讨间歇降雨条件下土壤干湿交替对团聚体粒级动态变化的影响, 对加深径流泥沙运移和分选机制的理解、揭示土壤微量元素随地表径流迁移的规律具有重要意义。通过 37d 内的 5 场间歇性人工降雨实验, 观测了降雨激发的团聚体破碎过程和降雨间歇段干缩过程导致的团聚体粒径分布的动态变化, 并通过分析不同团聚体粒级总磷、铜、锌含量的动态变化, 评估了间歇降雨对土壤污染物富集特征的影响。结果表明, 间歇性降雨导致的土壤干湿交替引发了剧烈的团聚体粒级周转, 团聚体稳定性随实验推移呈总体退化状态, 具体体现在 >250 μm 微团聚体的比例随实验推移显著下降, 而 <250 μm 微粒的比例显著上升 ($P < 0.05$)。团聚体粒径分布的变化引起了不同粒级磷、铜、锌含量的同步变化, 三种元素从 >250 μm 向 <63 μm 粒级逐渐转移, 造成 <63 μm 粒级内各元素浓度在实验末期达到最高, 这意味着间歇性降雨引起的团聚体结构退化和 <250 μm 微粒的增加及微量元素富集会加大水土流失及伴随的污染物排放的风险。本研究揭示了间歇性降雨引起的土壤团聚体结构变化及对泥沙分选和元素迁移过程的影响, 为土壤侵蚀引起的横向物质运移机制提供了一定的理论参考。

关键词: 土壤侵蚀; 团聚体稳定性; 模拟降雨; 重金属; 团聚体粒径分布

中图分类号: S157.1 **文献标志码:** A

Effect of Intermittent Rainfall on Size Distribution and Phosphorus, Copper and Zinc Enrichment of Soil Aggregates

SHI Pu^{1,2}, CHIAHUE Doua Yang¹, ZHAO Pengzhi³

(1. College of Earth Sciences, Jilin University, Changchun 130061, China; 2. Institute of Terrestrial Ecosystems, ETH Zurich, Zurich 8092, Switzerland; 3. Earth and Life Institute, UCLouvain, Louvain-la-Neuve 1348, Belgium)

Abstract: 【Objective】 Effects of the soil wetting-drying alternations induced by intermittent rainfall on the temporal dynamics of soil aggregate size distribution (ASD) in the soil were studied in this paper, which is of great significance to in-depth understanding of the mechanisms of sediment transport and fractionation and revealing rules of associated trace elements transfer with runoff. 【Method】 In this study, a field experiment was carried out having the field of Cambisol subjected to five separate artificial rainfall events within 37 days. During the experiment, soil aggregate breakdown process triggered by the rainfall events

* 国家自然科学基金项目(41807059)和吉林省教育厅“十三五”科学技术项目(JJKH20190012KJ)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41807059) and the “13th Five-Year” Science and Technology Project by the Department of Education of Jilin Province (No. JJKH20190012KJ)

作者简介: 石璞(1989—), 男, 山东郓城人, 博士, 副教授, 主要从事人类活动干扰下的地表水土过程研究。E-mail: shipu@jlu.edu.cn

收稿日期: 2020-01-08; 收到修改稿日期: 2020-07-26; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2020-08-25

and dynamic change in particle size distribution of the soil aggregates were observed. And through analysis of dynamic changes in the contents of P, Cu and Zn in soil aggregates of various particle size fractions, evaluation of impacts of intermittent rainfall on enrichment of pollutants in the soil was performed. 【Result】 Results show that soil wetting and drying cycles caused by the intermittent rainfall triggered drastic turnover in ASD, which consequently declined in stability as a whole with the experiment going on, especially the fraction of $>250\ \mu\text{m}$, which as a result decreased in proportion ($P<0.05$), while the fraction of $<250\ \mu\text{m}$ increased. Changes in ASD also led concurrently to variations of P, Cu and Zn concentrations in the various aggregate size classes. The three elements gradually moved from aggregates of $>250\ \mu\text{m}$ to those of $<63\ \mu\text{m}$, and peaked in concentrations in aggregates of $<63\ \mu\text{m}$ towards the end of the experiment. This shows that the intermittent rainfall triggered breakdown of aggregate structure, increased in the fraction of $<250\ \mu\text{m}$ aggregates, and enrichment of trace elements in the fraction ($<250\ \mu\text{m}$), which in turn aggravated the risk of increasing soil and water loss and associated discharge of pollutants. 【Conclusion】 The experiment revealed how intermittent rainfall affect soil aggregate structure, fractionation of sediments and element transfer processes, which may serve as certain theoretical reference for better understanding the mechanisms of lateral transfer of soil materials caused by soil erosion.

Key words: Soil erosion; Aggregate stability; Rainfall simulation; Heavy metal; Aggregate size distribution

土壤团聚体稳定性作为评价土地退化状况的重要指标，其大小反映土壤单元面对外力干扰时保持结构完整性的能力^[1-2]。在水力侵蚀事件中，团聚体稳定性决定着降雨冲击下团聚体的破碎程度，从而进一步通过影响团聚体粒级的动态变化来控制土壤微粒在泥沙搬运过程中的供给^[3-5]。由于土壤有机碳、营养元素和重金属元素的富集程度随土壤颗粒粒径的减小而增大，因此团聚体稳定性的动态变化及其引起的团聚体粒级变化还会对土壤侵蚀引起的元素横向运移过程产生不可忽视的影响^[6]。过往研究表明，不同的土地利用/覆被类型和地形特征下团聚体稳定性可呈现出明显的空间分异特征^[7]；而因气候条件变化引起的土壤含水量的不同也会导致剧烈的团聚体稳定性变化^[8]。Algayer 等^[9]通过在法国巴黎盆地区的野外观测实验对短期内的土壤含水量、降雨强度和降水量、以及区域短期水文史进行监测，分析上述因子对土壤团聚体稳定性的影响。该研究表明短期内多场间歇性降雨引起的土壤干湿交替可导致剧烈的团聚体稳定性指标的波动。由于团聚体稳定性指标对降雨过程中团聚体破碎（Rainfall-induced aggregate breakdown）过程的控制作用^[1]，间歇性降雨还会对团聚体粒径分布乃至土壤侵蚀强度带来重要影响。因此，更好地量化间歇性降雨导致的土壤干湿循环对团聚体破碎过程以及团聚体粒径分布的影响，有助于更好地理解土壤侵蚀引起的元素横向运移机制。然而，目前关于间歇性降雨条件下的团聚体粒径分布动态变化的野外观

测数据还比较缺乏。

土壤团聚体破碎机制主要包括消散作用、非均匀膨胀作用和机械作用等^[10]，不同机制的作用大小主要受降雨强度和初始土壤水分条件的影响^[11-12]。当土壤含水率较低时，降雨引起的团聚体破碎过程以消散作用为主，且该作用与降雨强度成正比；而随着初始土壤含水率的升高，团聚体破碎过程的主要作用机制由消散作用变为机械作用，故其产生的团聚体破碎产物的粒级也会因作用机制的变化而不同^[13]。从团聚体破碎的时间变化特征来看，以往人工降雨实验表明在不同的土壤属性和降雨参数下，团聚体破碎过程均呈“两段式”特征，即在降雨初段（0~10 min）团聚体破碎过程较为剧烈，具体反应在微团聚体（ $<250\ \mu\text{m}$ ）的比例大幅度上升，随后破碎过程变缓并在地表径流形成前趋于稳态^[14-15]。该稳态下的团聚体粒径分布即为泥沙搬运过程中的初始粒径分布，因此更好地了解多变气候条件下该粒径分布的动态变化将有助于地表径流中泥沙分选与沉降机制的研究和模型模拟^[16]。

此外，由于土壤颗粒可供营养元素和重金属吸附的比表面积与颗粒粒径成反比，即土壤颗粒粒径越小，元素富集程度越高。因此，随径流迁移的泥沙往往会出现营养元素和重金属在微粒径团聚体富集的现象，造成沉积区土壤污染物的累积和地表水质的恶化^[17-18]。Quinton 和 Catt^[19]研究表明，由于化肥农药等的过度施用，因土壤侵蚀流失的沉积物中铜、铅、镍等元素浓度较土壤中平均高 3.98 倍，对

地表水体造成严重的重金属污染。因此, 间歇性降雨引起的土壤干湿交替不仅可以通过影响团聚体稳定性而控制土壤侵蚀的强度, 还可以通过影响团聚体粒径分布来决定土壤侵蚀过程中土壤微粒的供给, 进而影响污染物的流失。因此, 综合考虑间歇性降雨对土壤团聚体粒级动态变化的影响机制以及随之带来的团聚体粒级间营养元素和重金属含量变化的连锁反应, 有助于更好地理解多变气候条件下土壤侵蚀引起的污染物运移的机理。为此, 本文通过间歇性人工降雨实验, 模拟多变的降雨和土壤水分条件对土壤团聚体破碎过程和团聚体粒径分布的影响, 监测不同团聚体粒级间磷素和铜、锌含量在间歇性降雨条件下的动态变化, 以探究团聚体粒级动态变化对泥沙和所携带污染物的运移过程的影响机制, 以期为准评估土壤侵蚀过程的农业和水文生态效应提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

人工降雨模拟实验在瑞士农业部 Agroscope-Reckenholz 实验站进行。该区年均降雨量 1 140 mm, 且在各月份分布较为平均。区域内整体地形较平坦,

平均海拔 408 m, 但偶见漫川漫岗。根据世界土壤资源参比基础 (WRB) 分类标准, 供试土壤类型为锥形土 (Cambisol)。土壤质地为粉质壤土, 黏粒、粉粒、砂粒的含量分别为 18.6%、57.0% 和 24.4%, 表土容重为 $1.03 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, pH (H_2O) 为 7.2, 土壤有机碳含量为 $14 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。该土壤类型可蚀性较高, 且研究区常出现较为密集的高强度降雨, 导致了严重的土壤侵蚀问题, 对该区农业可持续发展和生态环境保护产生不利影响。进行降雨实验前, 对试验田表土层 (0~15 cm) 施行均匀化机械翻耕, 并对土壤表面进行平整处理。

1.2 降雨实验

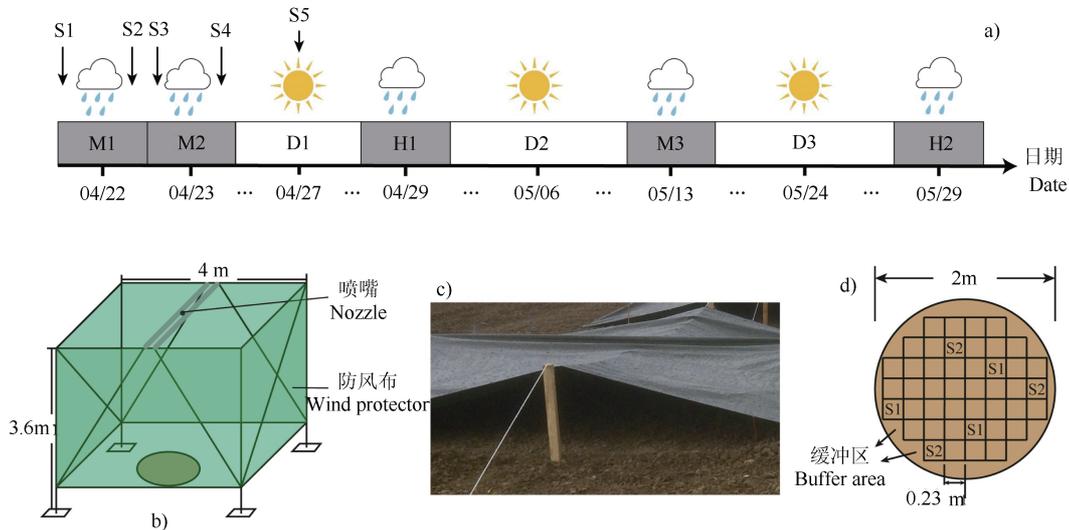
在实验场地准备完毕后, 降雨实验于 2015 年 4 月下旬至 5 月下旬进行, 实验期间日平均温度为 16°C , 其中夜间平均温度为 10°C , 白天平均温度为 22°C 。为了模拟间歇性降雨对土壤团聚体粒级的影响, 共建立两个相邻的实验小区来保证观测结果的可重复性, 并于 5 周内两个小区分别进行 5 场人工降雨, 每场降雨实验的持续时间和两场降雨的间歇时间如表 1 和图 1a 所示。首先, 在实验初期的 48h 内进行两场中等雨强的 M1 和 M2 降雨, 随后是近一周的降雨间歇段 (D1), 以评估干湿交替下土壤团聚体结构的动态变化。在降雨间歇段, 实验

表 1 人工降雨模拟和采样安排

Table 1 Rainfall simulation and sampling arrangements

人工降雨 ¹⁾	降雨时长	降雨间歇段	采样日期	采样序列 ²⁾	初始土壤含水率 ³⁾
Artificial rainfall event	Rainfall duration /min	Drying period	Sampling date	Sampling steps	Initial soil water content /%
M1	40	/	2015/04/22	S1、S2	3.60±0.27
M2	40	/	2015/04/23	S3、S4	28.57±0.19
		D1	2015/04/27	S5	24.02±0.94
H1	30	/	2015/04/29	S6、S7	21.45±1.86
		D2	2015/05/06	S8	33.19±1.00
M3	40	/	2015/05/13	S9、S10	7.77±0.31
		D3	2015/05/24	S11	7.26±0.40
H2	25	/	2015/05/29	S12、S13	4.36±0.16

注: (1) Mi: 第 i 个中等雨强事件; Hi: 第 i 个高等雨强事件。(2) 采样在每场人工降雨事件的前、后以及每次降雨间歇段进行。(3) 初始土壤含水率为两个实验小区的平均值±标准差。Note: (1) Mi: i -th rainfall event moderate in intensity; (2) HR*i*: i -th rainfall event high in intensity. Samples were taken before and after each rainfall event and during the interval between two events. (3) The initial soil water content is mean±SD of two replicate plots ($n=6$).



注：S1 和 S2 代表 M1 降雨前后的采样网格。Note: S1 and S2 represent sampling grids before and after the M1 rainfall event

图 1 (a) 降雨实验与采样步骤时间分布示意图, (b) 人工降雨模拟器示意图, (c) 降雨间歇期防水布搭建, (d) 实验小区采样网格布局

Fig. 1 (a) Sketch of artificial rainfall experiment and sampling timing and steps, (b) Sketch of the artificial rainfall simulator, (c) Set-up of water-proof cover during the interval between two events, and (d) Experimental plot layout with sampling grids

小区被防雨布遮盖以保护表土不受自然降雨的额外干扰, 影响实验结果。防雨布(晴天时被移除)在两侧留有开口, 以保证正常的表土通风和土壤蒸散作用。M1, M2 和 D1 后, 依次进行 H1 高强度、M3 中等强度和 H2 高强度三场降雨, 其中后 3 场降雨之间的两次间歇段(D2 和 D3)均为两周左右。具体的降雨实验安排和采样日期见表 1。

人工降雨模拟器见图 1b, 其包括 $4\text{ m} \times 4\text{ m} \times 3.6\text{ m}$ 的不锈钢结构, 外围配有防风布以避免风力对降雨均匀度的影响。降雨喷嘴采用美国 Spraying Systems 公司的 Fulljet 单喷嘴系统, 中等和高等雨强对应的喷嘴型号分别为 3/8GG20W 和 1/2HH35W, 两种喷嘴对应的雨滴平均直径分别为 0.8 mm 和 1.1 mm , 雨强分别为 $25.8\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 和 $49.1\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。两种雨强分别对应研究区经常出现的典型雨强以及偶尔出现的高强度降雨^[20], 以期尽可能地模拟自然条件下的降雨强度。降雨模拟过程中, 供水压力保持在 650 kPa , 降雨均匀度系数为 0.93。更多关于降雨模拟器的描述见 Shi 等^[15]。

1.3 样品采集与分析

土壤表层样品(0~2 cm)的采集在直径 2 m 的圆形小区内进行, 小区被等分成 44 个边长 0.23 m 的正方形网格(图 1d), 并在网格边缘设立缓冲区

以防止溅蚀的边界效应。降雨实验期间, 在每场降雨的前后以及每个降雨间歇段共设置 13 个采样序列(表 1), 以监测间歇性降雨条件下干湿交替对团聚体粒径分布的影响。每个采样序列包含小区内随机选择的 3 个不相邻的网格, 以覆盖小区内土壤的空间分异性。每个网格在实验期间只被采集一次。其中, 每场降雨前(即 S1、S3、S6、S9、S12)以及每个降雨间歇期, 用不锈钢铲采集约 300 g 表层(0~2 cm)土壤样品。采集的样品混匀后被分成两份, 分别进行土壤含水率(105℃烘干法)和团聚体粒径分布的分析, 而每场降雨后采集的样品则只进行团聚体粒径分布的分析。各采样序列的土壤含水率和团聚体粒径分布数据均取两个重复小区共 6 个重复样品的平均值。

土壤团聚体粒径分布的测定基于 Le Bissonnais 提出的乙醇湿筛法, 首先将每个采样序列未经烘干的新鲜土样浸入 95% 的乙醇溶液中以保持其土壤结构, 并用 $63\text{ }\mu\text{m}$ 的土筛浸入乙醇溶液中进行湿筛操作以分离 $<63\text{ }\mu\text{m}$ 的微粒和 $>63\text{ }\mu\text{m}$ 的团聚体; 随后, $>63\text{ }\mu\text{m}$ 的团聚体经过 48 h 的 $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱干燥后, 利用 63 、 250 、 $1\text{ }000$ 和 $2\text{ }000\text{ }\mu\text{m}$ 的土筛进行干筛得到各粒级的百分比, 最终得到 $0\sim 63$ 、 $63\sim 250$ 、 $250\sim 1\text{ }000$ 、 $1\text{ }000\sim 2\text{ }000\text{ }\mu\text{m}$ 的团聚体粒径分布。同时,

采用团聚体平均重量直径 (MWD) 指数对各采样序列团聚体粒径分布的时间变化进行分析。

为评估间歇性降雨条件下对不同团聚体粒度元素分布的影响, 对每场降雨事件后 (即 S2、S4、S7、S10、S13) 土壤的各团聚体粒度进行磷、铜、锌总量的分析, 以评估间歇性降雨条件对团聚体粒度间元素浓度的潜在影响。针对上述 5 个采样序列的各团聚体粒度, 将同一采样序列的 6 个重复样品混合均匀后取 1 g 烘干研磨后的样品, 加入 2 mL 超纯水和 8 mL 王水 (2 mL 70% HNO₃ 和 6 mL 37% HCL), 并置于 120°C 的 DigiPREP MS (加拿大 SCP Science) 消解系统进行 90 min 消解, 最终的元素 (P、Cu、Zn) 全量分析采用电感耦合等离子体发射光谱仪 (ICP-OES 5100, 美国 Agilent Technologies) 完成。

2 数据处理

本文的数据处理与分析采用 EXCEL 2010 和 R 软件完成, 显著性分析采用 Tukey's HSD 进行多重比较, 显著性水平取 $P < 0.05$ 。

2 结果与讨论

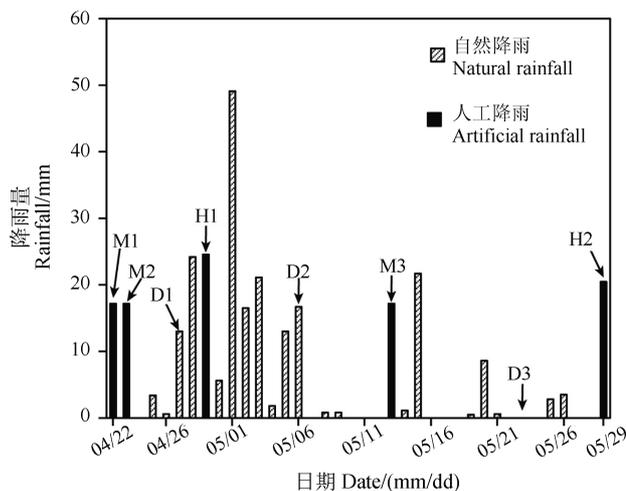
2.1 间歇性降雨引起的土壤干湿循环

实验期间的自然降雨和人工降雨分布见图 2。结果表明, 除 5 场人工降雨外, 自然降雨主要集中在野外实验的前两周, 这也导致该阶段内所采集土壤样品 (S3、S5、S6、S8) 的土壤含水率较高 (表 1)。与之对应, M2 和 H1 两场降雨前初始土壤含水率均达到 20% 以上, 而随着实验后半段自然降雨的减少, 土壤干缩过程加快导致 M3 和 H2 两场降雨前的初始土壤含水率均低于 10%。在 3 个降雨间歇段 (D1、D2、D3), 因实验前半段密集的自然降雨导致土壤蒸散作用的降低, D1 和 D2 对应的土壤含水率 (S5、S8) 高于 D3 (S11)。

2.2 干湿交替下团聚体平均重量直径的动态变化

间歇性降雨引起的土壤干湿循环造成了团聚体平均重量直径 (MWD) 大幅度且规律性的变化。从图 3a 可以看出, 团聚体 MWD 随降雨激发的团聚体破碎过程减小, 随降雨间歇段的干缩过程而增大。降雨间歇段 MWD 的增大幅度与土壤含水率有关:

前两场降雨间 (M1 与 M2) 较短的降雨间歇段导致 M2 降雨前 (S3, 见表 1) 初始土壤含水率较高, 故 S3 序列的 MWD 值较低; 受自然降雨影响 (图 2), D2 对应的 S8 采样序列含水率较高, 故 S8 的 MWD 仍处在较低水平。与此相反, S9 和 S12 因为前期较长的降雨间歇和较低的土壤含水率, MWD 的升高幅度较大。需要注意的是, 团聚体在干缩过程中的重聚合作用虽然明显, 但并没有使团聚体结构恢复到初始水平, 即最高的 MWD 出现在实验初期的 S1 序列, 且随着降雨实验过程的进行, 经过团聚体破碎过程的各降雨末期序列 (S2、S4、S7、S10、S13) 的 MWD 呈逐渐下降趋势。这说明连续的降雨造成了土壤结构的逐渐退化, 导致降雨过程中团聚体破碎的程度逐渐增大。



注: 自然降雨数据取自实验地附近的 Meterswiss Zurich-Affoltern 气象观测站。Note: Natural rainfall data were obtained from the nearby Meterswiss Zurich-Affoltern meteorological weather station.

图 2 实验期间日均降雨量

Fig. 2 Daily rainfall during the experimental period

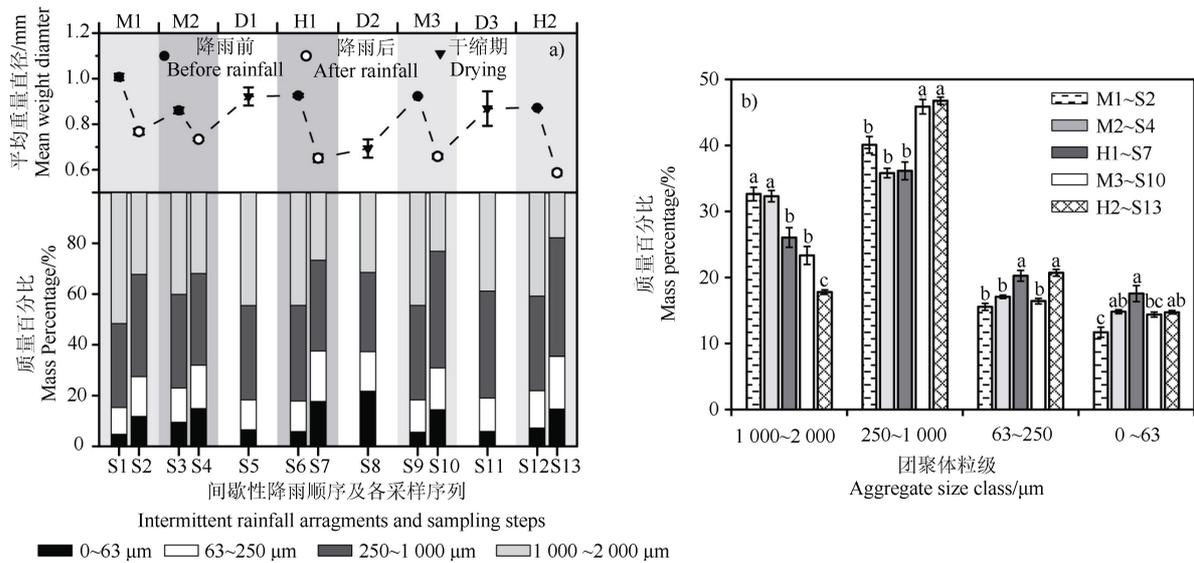
土壤初始含水率对团聚体稳定性的负面效应近年来常有报道^[9, 13]。当土壤较为湿润时, 土壤团聚体稳定性由于土壤有机黏合物的溶解和黏粒的膨胀而降低, 进而降低土壤在降雨过程中抵抗外力剥蚀的能力^[21], 造成团聚体破碎及土壤结构的退化。此外, 团聚体 MWD 即使在充分干缩后也未能充分恢复到降雨前的原始水平, 证明除了土壤含水率, 还有其他因素导致了土壤结构的退化。可能的原因包括: (1) 实验过程中淋溶作用造成了有机碳的流失,

从而削弱了团聚体聚合作用^[22]；(2) 降雨冲击下的团聚体破碎过程将之前被包裹在团聚体内部的土壤有机碳暴露，从而加快土壤微生物对有机质的降解速度^[23]。

2.3 干湿交替下团聚体粒径的动态变化

与 MWD 的时间变化特征类似，实验过程中团聚体粒径分布随土壤含水率和人工降雨呈现出明显的动态变化规律（图 3a）。从团聚体粒径分布来看，各采样序列的水稳性团聚体主要以 250~1 000 和 1 000~2 000 μm 为主，两种粒径所占百分比始终大于 60%。而降雨过程导致的团聚体破碎过程主要体现在 0~63 和 63~250 μm 粒径百分比的增加和 250~1 000 和 1 000~2 000 μm 粒径百分比的减小，

其中以 0~63 和 1 000~2 000 μm 粒径的消长最为显著。与降雨过程相反，降雨间歇段，导致的团聚体重聚合过程以 0~63 μm 粒径的减小和 1 000~2 000 μm 粒径的增加为主要特征。通过对 5 次人工降雨后的团聚体粒径分布进行显著性检验表明（图 3b），受间歇性降雨过程影响，不同时间点（S2、S4、S7、S10、S13）团聚体破碎过程产生的团聚体粒径分布呈显著不同。其中，1 000~2 000 μm 粒径的百分比随时间推移逐渐下降，其他三个粒径则未呈现出一致的变化规律。250~1 000 μm 粒径在最后两次降雨后的比例升高，63~250 μm 粒径的比例在高强度降雨（H1 和 H2）后的比例较高，而 0~63 μm 在初始土壤含水率较高且雨强大时的比例最高（H1）。



注：不同字母表示同粒径团聚体占比在不同降雨条件下差异显著 ($P < 0.05$)。Note: Different letters denote significant differences ($P < 0.05$) in proportion of each fraction of soil aggregates between rainfall events different in rainfall intensity.

图 3 (a) 团聚体平均重量直径和粒径分布的动态变化, (b) 5 场人工降雨后各团聚体粒径的显著性分析
Fig. 3 (a) Temporal dynamics of aggregate mean weight diameter and aggregate size distribution, (b) Significance tests of each fraction of soil aggregates after 5 artificial rainfall events

受初始土壤含水率和降雨条件的影响，降雨激发的团聚体破碎过程的作用机制各不相同。Le Bissonais^[10]指出，前期土壤含水率较低时，土壤快速湿润导致团聚体内部的空气被压缩而引起的消散作用更加显著，易产生更多的微团聚体 ($>63 \mu\text{m}$)；前期土壤含水率较高时，团聚体内部的空气被替换为水分，消散作用减弱，而机械破碎作用变得更为显著，产生更多的小粒径土壤微粒 ($<63 \mu\text{m}$)。本研究中，M3 和 H2 具有较低的初始土壤含水率，因此

产生相对较多的 250~1 000 μm 团聚体，而当土壤含水量较高时（如 H1）， $<63 \mu\text{m}$ 微粒的百分比含量为最高，证实了土壤初始水分条件对团聚体破碎过程的控制作用，最终产生不同的团聚体粒径分布。此外，Legout 等^[14]和 Shi 等^[15]的实验室和野外实验均揭示，团聚体破碎是一个渐进的“两段式”过程，即降雨初期团聚体迅速裂解产生碎粒造成 MWD 剧烈下降，随后破碎过程变缓，仅有 MWD 的缓慢线性下降，且这一过程通常在 20 分钟即基本完成。该

发现表明, 降雨过程超过 20 min 后, 团聚体破碎过程产生的土壤微粒粒径分布趋于稳态, 而该稳态下的粒径分布即可被当作泥沙运移和分选过程中的初始土壤粒径分布^[24]。本研究中人工降雨时常均大于 25 min (表 1), 因此可以假设在降雨结束时团聚体破碎过程已基本完成, 这意味着每场降雨后所采集样品 (即 S2、S4、S7、S10 和 S13) 的团聚体粒径分布可以代表土壤侵蚀过程中可供运移的初始土壤粒径分布, 而探明上述样品不同粒径间营养元素和重金属的分布情况及其在间歇性降雨条件下的变化规律, 将有助于更好地理解土壤侵蚀引起的污染物运移机制。

2.4 不同团聚体粒级的磷、铜、锌富集特征

间歇性降雨条件下团聚体破碎过程伴随的各团聚体粒径间总磷、铜、锌浓度变化如图 4 所示。3 种元素在不同粒径的分布特征和时间变化规律呈高度相似性。首先, 前三场降雨后 (S2、S4、S7), >250 μm 团聚体的磷、铜、锌浓度总体较 <250 μm 粒径高, 其中 63~250 μm 粒径浓度为最低, 且未呈现出明显的时间变化; 其次, 实验后期 >250 μm 粒径的磷、铜、锌随土壤结构的逐渐退化和团聚体破碎程度的增加而逐渐降低, 其中以 1 000~2 000 μm 粒径的元素浓度降低程度最为明显; 最后, 0~63 μm

粒级的磷、铜、锌浓度在 5 场降雨过程中不断升高, 至最后一场降雨 H2 时为各粒径间最高。

上述结果说明, 间歇性降雨过程中团聚体破碎过程的逐渐加剧造成了土壤微粒 (0~63 μm) 含量的上升, 而这部分上升的微粒富含营养元素和重金属, 引起这一粒径微粒元素浓度的同步上升。团聚体破碎过程产生的微粒较实验初期同一粒径元素浓度高的原因可以归结为: (1) 团聚体破碎过程释放了原本由于土壤团聚作用而分布在 >250 μm 粒径的黏粒, 这部分黏粒通常吸附较多营养元素和重金属^[18]; (2) 降雨过程中的雨滴击打破坏了土壤团聚体结构, 使得原本维持土壤团聚体结构的有机质被释放出来, 这部分有机质通常小于 63 μm 且与营养元素和重金属含量密切相关^[25]。63~250 μm 粒径的磷、铜、锌浓度始终处于较低水平且变化不大, 说明该粒径砂粒含量较大; 而 1 000~2 000 和 250~1 000 μm 两个粒径的元素浓度在实验末期达到与 63~250 μm 粒径相当的水平, 再一次证明了团聚体结构在间歇性降雨冲击下的不断恶化, 导致营养元素和重金属从大团聚体 (>250 μm) 向粉粒和黏粒粒径 (<63 μm) 转移。此外, 3 种元素在不同粒径分布的高度相似性证明其动态变化的主要驱动因素为团聚体结构在间歇性降雨下的变化, 而非生物化学作用。

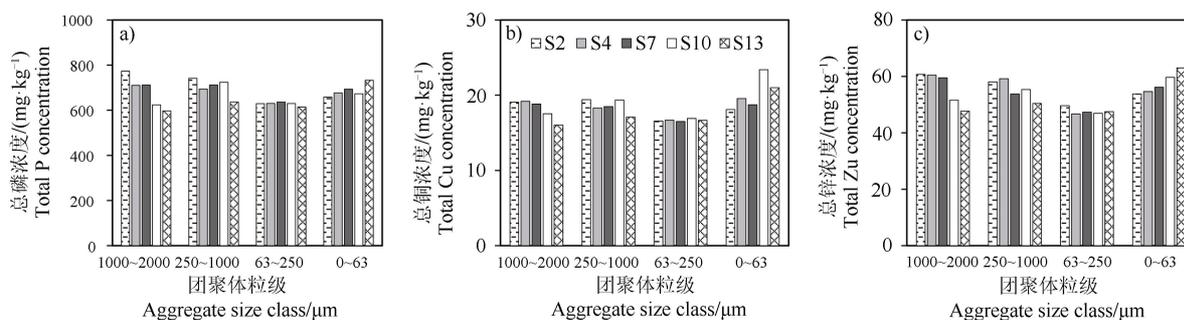


图 4 间歇性降雨条件下磷、铜、锌在各团聚体粒径间的分布

Fig. 4 Distribution of P, Cu and Zn content in each fraction of soil aggregates as affected by intermittent rainfall different in intensity

通过对团聚体粒径分布和各粒径磷、铜、锌分布进行关联分析发现, 间歇性降雨降低了土壤团聚体稳定性进而破坏土壤结构的完整性, 这一过程主要体现在 >250 μm 团聚体比例的减少和 <250 μm 粒径团聚体比例的增加, 即团聚体破碎化程度加剧。伴随着团聚体的破碎化, 磷、铜、锌等元素逐渐向小粒径团聚体 (<63 μm) 富集。由于地表径流对泥沙迁移具有显著的分选作用, 即径流优先拣选、迁

移自重较轻的小粒径团聚体^[3], 磷、铜、锌等元素在降雨过程中向小粒径团聚体不断富集过程, 便显著增加了侵蚀导致的土壤营养元素和重金属的流失, 使得地表水体富营养化及农业面源污染等风险增大, 对农业可持续发展具有深刻影响^[26-27]。因此, 充分考虑间歇性降雨导致的干湿循环对土壤团聚体结构和不同粒径元素分布的关联影响, 有助于更好地理解土壤侵蚀引起的横向物质运移机制, 以便

更准确地评估水土流失过程导致的农用地营养元素流失和污染物排放。

3 结 论

间歇性降雨引起的土壤干湿交替对团聚体粒级分布具有显著影响, 单场降雨激发的团聚体破碎过程造成了团聚体平均重量直径的剧烈减小, 而降雨间歇段的干缩过程又使得团聚体稳定性迅速回升。但由于多次降雨造成的团聚体结构的逐步退化和土壤有机质的流失, 干缩过程并没有使团聚体结构恢复初始水平。随着时间推移, 降雨造成的团聚体破碎程度逐渐增强, 具体体现在 $>250\ \mu\text{m}$ 微团聚体比例的逐步下降和 $<250\ \mu\text{m}$ 粒级比例的逐步上升。团聚体结构的逐步退化还造成了不同粒级磷、铜、锌含量的同步变化, 具体表现在 $>250\ \mu\text{m}$ 粒级团聚体在间歇性降雨过程中的破碎化造成了营养元素和重金属向小粒径团聚体 ($<63\ \mu\text{m}$) 转移, 导致 $<63\ \mu\text{m}$ 土壤微粒元素含量的逐步升高。由于这一粒级在土壤侵蚀过程中极易随地表径流迁移, 因此这会加剧侵蚀-沉积过程污染物富集的风险。本研究通过野外人工降雨实验, 揭示了间歇性降雨条件下团聚体粒径分布的变化规律, 并与不同粒级间营养元素和重金属分布特征结合, 证明了间歇性降雨导致的土壤团聚体结构退化会增加土壤侵蚀引起的污染物流失的风险。因此, 未来有关土壤侵蚀引起的横向物质运移机制的探索应充分考虑土壤团聚体结构对泥沙运移和分选机制的潜在影响。

致谢 感谢苏黎世联邦理工大学土壤保护研究组 Rainer Schulin, Maria Sommer, Martina Dietrich 和 Martin Keller 在野外实验期间给与的指导和帮助。

参考文献 (References)

- [1] Barthès B, Roose E. Aggregate stability as an indicator of soil susceptibility to runoff and erosion, validation at several levels[J]. *Catena*, 2002, 47 (2): 133–149.
- [2] Le Bissonnais Y, Blavet D, de Noni G, et al. Erodibility of Mediterranean vineyard soils: Relevant aggregate stability methods and significant soil variables[J]. *European Journal of Soil Science*, 2007, 58(1): 188–195.
- [3] Wang L, Shi Z H. Size selectivity of eroded sediment associated with soil texture on steep slopes[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79 (3): 917–929.
- [4] Sajjadi S A, Mahmoodabadi M. Aggregate breakdown and surface seal development influenced by rain intensity, slope gradient and soil particle size[J]. *Solid Earth*, 2015, 6 (1): 311–321.
- [5] Wu F Z. Soil erosion processes and the size selectivity of eroded sediment on hillslope[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2012. [吴凤至. 坡面侵蚀过程中泥沙颗粒特性研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2012.]
- [6] Shi P, Schulin R. Erosion-induced losses of carbon, nitrogen, phosphorus and heavy metals from agricultural soils of contrasting organic matter management[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 618: 210–218.
- [7] Annabi M, Raclot D, Bahri H, et al. Spatial variability of soil aggregate stability at the scale of an agricultural region in Tunisia[J]. *Catena*, 2017, 153: 157–167.
- [8] Dimoyiannis D. Seasonal soil aggregate stability variation in relation to rainfall and temperature under Mediterranean conditions[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34 (6): 860–866.
- [9] Algayer B, Le Bissonnais Y, Darboux F. Short-term dynamics of soil aggregate stability in the field[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2014, 78 (4): 1168–1176.
- [10] 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.
- [11] Fu Y, Li G L, Zheng T H, et al. Effects of raindrop splash on aggregate particle size distribution of soil plough layer[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33 (3): 155–160. [付玉, 李光录, 郑腾辉, 等. 雨滴击溅对耕作层土壤团聚体粒径分布的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33 (3): 155–160.]
- [12] Xiao H, Liu G, Zhang Q, et al. Quantifying contributions of slaking and mechanical breakdown of soil aggregates to splash erosion for different soils from the Loess Plateau of China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 178: 150–158.
- [13] Ma R M, Cai C F, Li Z X, et al. Effect of antecedent soil moisture on aggregate stability and splash erosion of krasnozems[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30 (3): 95–103. [马仁明, 蔡崇法, 李朝霞, 等. 前期土壤含水率对红壤团聚体稳定性及溅蚀的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30 (3): 95–103.]
- [14] Legout C, Leguedois S, Le Bissonnais Y. Aggregate breakdown dynamics under rainfall compared with aggregate stability measurements[J]. *European Journal of Soil Science*, 2005, 56 (2): 225–238.
- [15] Shi P, Thorlacius S, Keller T, et al. Soil aggregate breakdown in a field experiment with different rainfall

- intensities and initial soil water contents[J]. *European Journal of Soil Science*, 2017, 68 (6): 853–863.
- [16] Hairsine P B, Rose C W. Modeling water erosion due to overland flow using physical principles: 1. Sheet flow[J]. *Water Resources Research*, 1992, 28 (1): 237–243.
- [17] Beniston J W, Shipitalo M J, Lal R, et al. Carbon and macronutrient losses during accelerated erosion under different tillage and residue management[J]. *European Journal of Soil Science*, 2015, 66 (1): 218–225.
- [18] Zheng Y, Luo X L, Zhang W, et al. Transport mechanisms of soil-bound mercury in the erosion process during rainfall-runoff events[J]. *Environmental Pollution*, 2016, 215: 10–17.
- [19] Quinton J N, Catt J A. Enrichment of heavy metals in sediment resulting from soil erosion on agricultural fields[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41 (10): 3495–3500.
- [20] Hahn C, Prasuhn V, Stamm C, et al. Phosphorus losses in runoff from manured grassland of different soil P status at two rainfall intensities[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 153: 65–74.
- [21] Watts C W, Dexter A R, Dumitru E, et al. An assessment of the vulnerability of soil structure to destabilisation during tillage. Part I. A laboratory test[J]. *Soil and Tillage Research*, 1996, 37 (2/3): 161–174.
- [22] Liu T, Wang L, Feng X J, et al. Comparing soil carbon loss through respiration and leaching under extreme precipitation events in arid and semiarid grasslands[J]. *Biogeosciences*, 2018, 15 (5): 1627–1641.
- [23] Borken W, Matzner E. Reappraisal of drying and wetting effects on C and N mineralization and fluxes in soils[J]. *Global Change Biology*, 2009, 15 (4): 808–824.
- [24] Kim J, Ivanov V Y, Faticchi S. Soil erosion assessment-Mind the gap[J]. *Geophysical Research Letters*, 2016, 43 (24): 12446–12456.
- [25] Sun D S, Li K J, Bi Q F, et al. Effects of organic amendment on soil aggregation and microbial community composition during drying-rewetting alternation[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 735–743.
- [26] Hu Y X, Kuhn N J. Using settling velocity to investigate the patterns of sediment transport and deposition[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (5): 1115–1124. [胡亚鲜, Nikolaus J.Kuhn. 利用土壤颗粒的沉降粒级研究泥沙的迁移与分布规律[J]. *土壤学报*, 2017, 54 (5): 1115–1124.]
- [27] Ouyang W, Wang Y D, Lin C Y, et al. Heavy metal loss from agricultural watershed to aquatic system: A scientometrics review[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 637/638: 208–220.

(责任编辑: 檀满枝)