

DOI: 10.11766/trxb202109110492

陈琳, 王健, 霍春平, 杨昌. 坡耕地土壤物理结皮分层颗粒组成特征研究[J]. 土壤学报, 2023, 60(4): 983–992.

CHEN Lin, WANG Jian, HUO Chunping, YANG Chang. Study on Particle Distribution Characteristics of Soil Physical Crust Profile in Sloping Farmland[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(4): 983–992.

## 坡耕地土壤物理结皮分层颗粒组成特征研究\*

陈琳<sup>1</sup>, 王健<sup>2†</sup>, 霍春平<sup>3</sup>, 杨昌<sup>1</sup>

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 3. 西安市水利水土保持工作站, 西安 710000)

**摘要:**近年来, 径流和侵蚀对土壤物理结皮的影响得到广泛研究。然而, 关于土壤物理结皮受侵蚀影响的定量研究较少。因此, 本研究采用土壤分层处理方法, 在等高耕作的径流小区中, 通过人工模拟降雨试验, 研究坡耕地垄上(结构结皮( $C_{st}$ ))、洼地(含泥沙沉积结皮( $C_{scs}$ ))以及模拟冲毁洼地处(无泥沙沉积结皮( $C_{sfs}$ ))形成结皮颗粒组成特征以分析结皮的差异性。结果表明: (1) 侵蚀过程中,  $C_{st}$ 、 $C_{scs}$  与  $C_{sfs}$  表层砂粒发生分散, 黏粒和粉粒发生富集, 且随降雨历时延长, 程度逐渐增强; (2) 降雨历时 30 min 时, 自上而下,  $C_{st}$  砂粒减少 4.61%, 粉粒增加 1.83%, 黏粒减少 1.73%;  $C_{scs}$  和  $C_{sfs}$  砂粒分别增加 29.35% 和 36.59%, 粉粒增加 4.34% 和 0.39%, 黏粒减少 16.30% 和 14.34%。(3) 结皮形成过程中,  $C_{st}$  主导因素为雨滴打击分散作用,  $C_{scs}$  和  $C_{sfs}$  在降雨初期主导因素为雨滴打击分散程度, 降雨后期为泥沙沉积量。空间位置及降雨因素是导致物理结皮类型及其颗粒组成差异的重要因素。

**关键词:** 土壤物理结皮; 分层; 土壤颗粒; 人工模拟降雨; 坡耕地

**中图分类号:** S152 **文献标志码:** A

## Study on Particle Distribution Characteristics of Soil Physical Crust Profile in Sloping Farmland

CHEN Lin<sup>1</sup>, WANG Jian<sup>2†</sup>, HUO Chunping<sup>3</sup>, YANG Chang<sup>1</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Xi'an Water Conservancy and Soil Conservation General Station, Xi'an 710000, China)

**Abstract:** 【Objective】 The response of runoff and erosion to soil physical crust has been extensively investigated in recent decades. However, there have been few attempts to quantify the effects of the profile of soil physical crusts on erosion processes. Thus, to explore the formation mechanism of soil physical crust in microtopography, artificial simulated rainfall and stratified soil treatment method were adopted to study the distribution and characteristics of soil particle size. 【Method】 Soil plot (2.0 m long × 1.0 m wide × 0.5 m high) was set to a slope of 5°, filled with soil by contour tillage (20 cm ridges and 30 cm ditches). Simulated rainfall was designed for eight durations (5, 10, 12, 14, 16, 18, 20 and 30 minutes) and one intensity (100 mm h<sup>-1</sup>). The samples

\* 国家自然科学基金项目(41771308)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41771308)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: wangjian@nwfufu.edu.cn

作者简介: 陈琳(1996—), 女, 山东济南人, 博士研究生, 主要从事土壤侵蚀方面的研究。E-mail: ccchen\_lin@163.com

收稿日期: 2021-09-11; 收到修改稿日期: 2022-04-22; 网络首发日期(www.cnki.net): 2022-08-25

were taken out by a cutting ring (diameter 10 cm) and placed in a stratified sampling device. The bottom of the device was designed with a spiral rising bottom bracket. By turning the nut, the soil sample would be risen by 1 mm after turning one circle at a time with the bottom bracket. Each tier of soil sample was stripped with a soil sampling knife. Particles of samples in each tier of soil physical crust and the collected sediment were analyzed by Mastersizer 2000. 【Result】The results showed that: (1) During erosion, the surface sand particles of structural crust ( $C_{st}$ ), silt-containing sedimentary crust ( $C_{scs}$ ) and silt-free sedimentary crust ( $C_{sfs}$ ) were dispersed, while the clay and silt particles were enriched, and the degree gradually increased with the duration of rainfall. (2) When the rainfall lasted for 30 min, from top to bottom of the profile, the content of sand and clay in  $C_{st}$  decreased by 4.61% and 1.73%, respectively, the content of silt increased by 1.83%. The content of sand and silt in  $C_{scs}$  and  $C_{sfs}$  increased by 29.35% and 36.59%, 4.34% and 0.39%, respectively. The content of clay decreased by 16.30% and 14.34%, respectively. (3) In the process of crust formation, the dominant factor of  $C_{st}$  was raindrop dispersion, the dominant factor of  $C_{scs}$  and  $C_{sfs}$  was raindrop dispersion in the early rainfall period, and sediment deposition in the late rainfall period. 【Conclusion】 Spatial location and rainfall factors were the important factors that led to the difference in physical crust types and particle composition.

**Key words:** Soil physical crust; Tier; Soil particle; Artificial simulated rainfall; Sloping farmland

降雨是诱发土壤侵蚀的重要因子<sup>[1]</sup>, 在降雨过程中, 土壤颗粒会随雨滴打击分散、径流冲刷转移, 从而在坡面侵蚀过程中产生分选<sup>[2]</sup>。在黄土高原地区, 由降雨引发的水力侵蚀易诱发土壤物理结皮<sup>[3-5]</sup>。物理结皮的形成受自身物理化学性质(土壤质地、矿物类型、团聚体稳定性、颗粒分布、有机质含量)和外界条件(降雨程度、坡度、表面粗糙度等)的影响。研究表明, 土壤物理结皮形成过程及空间分布受耕作措施导致的地表起伏状况影响<sup>[5]</sup>。土壤物理结皮是土壤破碎压实以及颗粒重组的结果, 按照结皮的发育状况, 其形成过程可分为不同阶段。Farres<sup>[6]</sup>认为结皮发育过程可分为初始阶段、结皮发育基本物质准备阶段、结皮形成阶段、稳定结皮形成阶段; Bresson 和 Cadot<sup>[7]</sup>认为结皮发育可分为团聚破碎、结构结皮形成、沉积结皮形成 3 个阶段; 蔡强国<sup>[8]</sup>则认为结皮发育过程可分为不完整结皮阶段(降雨开始 5 min)、结皮逐渐形成阶段(降雨持续 15~20 min)、表土结皮基本形成且处于“破坏—形成”的动态平衡阶段。由此可知, 结皮在形成过程中, 初始时期结构松散, 最终趋向于稳定。

研究指出, 根据物理结皮形成方式以及微观形态差异性, 可分为结构结皮和沉积结皮<sup>[9]</sup>。结构结皮是雨滴打击作用下, 土壤表层团聚体被分散形成的细小颗粒经过重新排列组合后, 堵塞表层孔隙的一层具有低透水性的土层<sup>[10-11]</sup>; 沉积结皮是在微地形下, 由于降雨作用形成的径流携带泥沙, 在地势低洼处淤积并下沉形成的土层<sup>[12-13]</sup>。根据 Bornár 和 Hulshof<sup>[14]</sup>的研究得知田间微地形中, 地势较高处形

成的结皮为结构结皮, 地势较低的洼地结皮为沉积结皮。2 者形成方式及地理位置的差异性直接影响着其结构性质等差异。

土壤颗粒粒径分布作为表征土壤物理性质的一项重要指标<sup>[15-17]</sup>, 可用于反映土壤风化成土过程, 与土壤结构、肥力水平及水分运动等息息相关, 直接影响土壤侵蚀与土地退化<sup>[18-32]</sup>。在降雨侵蚀中, 受雨滴动能、降雨历时等因素的影响, 土壤颗粒具有分选性<sup>[33-34]</sup>, 研究表明, 在较小的雨滴动能下, 土壤细颗粒的分散更具优势; 而在较大的雨滴动能下, 则使土壤粗颗粒的分散更具优势<sup>[35-37]</sup>。而土壤颗粒的分选正是造成两类物理结皮理化性质差异的本质原因<sup>[38-41]</sup>。为研究土壤侵蚀颗粒分散情况, Martínez-Mena 等<sup>[26]</sup>将富集率(ER)应用于土壤侵蚀过程, 用以反映泥沙颗粒的富集或移除。在研究淤地坝泥沙沉积特征时, 不少学者曾针对淤地坝泥沙沉积分层进行了分析, 研究发现坝地泥沙沉积层具有明显的分层特征, 次洪水泥沙沉积层自下而上粒径呈由粗到细的变化<sup>[27-30]</sup>。

受此启发, 作者认为在坡耕地侵蚀过程中, 由于降雨作用, 表土的破坏、搬运、沉积等方式使得土壤表面结构发生改变, 泥沙沉积厚度及颗粒组成进而表现出一定差异性。受重力影响, 洼地蓄积泥沙沉积过程中同样呈现粗颗粒先沉细颗粒后沉的特点, 因此, 本文从坡耕地微地形在降雨条件下产生物理结皮出发, 以杨凌塬土为研究对象, 通过进行室内人工模拟降雨试验, 研究不同降雨历时下洼地处由泥沙沉积形成的沉积结皮与垄处受雨滴直接打

击破坏形成的结构结皮颗粒分层分布特征, 探讨结皮形成过程中土壤颗粒富集情况, 以期揭示泥沙输移特征及结皮形成机理提供理论依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区概况

试验在西北农林科技大学水土保持与荒漠化防治教学实验基地径流小区进行。该区位于陕西关中平原中部, 地理坐标介于  $34^{\circ}14'—34^{\circ}20'N$ ,  $107^{\circ}59'—108^{\circ}08'E$  之间, 气候类型为东亚暖温带半湿润半干旱气候。年均降水量 635.1 mm, 年均气温  $12.9^{\circ}C$ , 年均日照时数 2 164 h, 无霜期 211 d。试验土壤为杨凌 0~20 cm 耕层壤土, 质地为粉质壤土。按国际制土壤分类标准, 杨凌壤土颗粒组成为砂粒 ( $>0.05$  mm) 含量为 20.12%, 粉粒 (0.002~0.05 mm) 含量为 75.89%, 黏粒 ( $<0.002$  mm) 含量为 3.99%, 中值粒径为  $13.86\ \mu m$ , 土壤比表面积为  $1.17\ m^2\cdot g^{-1}$ , 有机质含量为  $9.78\ g\cdot kg^{-1}$ 。

### 1.2 研究方法

本试验设置径流小区长 2.0 m, 宽 1.0 m, 高 0.5 m, 设计坡度  $5^{\circ}$ 。为模拟黄土高原地区土地利用方式, 填充土壤设置的含水量为 12%, 容重为  $1.2\ g\cdot cm^{-3}$ , 试验前供试土壤过直径为 1 cm 的土壤筛。填土前径流小区底部按  $5.0\ cm\times 5.0\ cm$  的规格打孔, 并铺设一层 2.0 cm 厚的细砂, 以允许降雨后积水的排出。径流小区内土壤填充方式同等高耕作: 利用分层填充法将供试土壤填充于径流小区, 以纵高 5 cm 为一层单位, 每层填充 120 kg 土壤, 共填充 5 层; 在径流小区内垂直于坡面走向进行横向耕作, 形成垄和沟, 设计垄时以每处 60 kg 土壤、高 20 cm、宽 30 cm 的规格进行填充, 垄间距为 30 cm (图 1)。人工模拟降雨设备采用中国科学院水土保持研究所水保实验设备工厂设计制造的侧喷式降雨机, 设备型号为  $4\times Veejet\ 80100$ 。降雨喷头距地面 8 m, 有效降雨面积  $3\ m\times 6\ m$ , 降雨均匀度 90% 以上。设计降雨强度  $100\ mm\cdot h^{-1}$ , 降雨历时 5、10、12、14、16、18、20 和 30 min。

自然界降雨后, 雨滴在重力和非饱和土壤基质的作用下入渗。土壤水分运移路径包括垂直入渗

和沿坡面的侧向运移。在强降雨条件下, 由于降雨和径流冲刷的影响, 斜坡凹陷的边界容易被破坏, 因此其内部的蓄水被径流冲走, 造成了与被破坏前不同的泥沙淤积量。基于此, 本试验设计为试验一和试验二, 试验一、二中所有降雨条件完全相同, 每个降雨历时设置 3 个重复。降雨结束后, 由于洼地处会形成积水, 试验一中所有径流小区洼地积水让其自然沉降; 试验二中所有径流小区洼地积水则通过自制压力管排出。试验一、二径流小区在降雨结束后均置于平均温度  $28^{\circ}C$ , 湿度 13% 的环境下自然风干 7 d, 此时小区样地为裸坡, 无植被覆盖。风干后, 径流小区垄处形成结构结皮, 洼地处形成沉积结皮, 按本试验设计, 试验一、二垄处均为结构结皮 (Structural Crust,  $C_{st}$ ), 在不同降雨历时下将其缩写为  $C_{st5}$ 、 $C_{st10}$ 、 $C_{st12}$ 、 $C_{st14}$ 、 $C_{st16}$ 、 $C_{st18}$ 、 $C_{st20}$  和  $C_{st30}$ ; 同理, 试验一洼地处形成的沉积结皮将其定义为含泥沙沉积结皮 (Silt-containing Sedimentary Crust,  $C_{scs}$ ) (降雨产生的积水泥沙在此处自然沉降), 缩写为  $C_{scs5}$ 、 $C_{scs10}$ 、 $C_{scs12}$ 、 $C_{scs14}$ 、 $C_{scs16}$ 、 $C_{scs18}$ 、 $C_{scs20}$  和  $C_{scs30}$ ; 试验二洼地处形成的沉积结皮定义为无泥沙沉积结皮 (Silt-free Sedimentary Crust,  $C_{sfs}$ ) (降雨产生的积水泥沙被排出), 缩写为  $C_{sfs5}$ 、 $C_{sfs10}$ 、 $C_{sfs12}$ 、 $C_{sfs14}$ 、 $C_{sfs16}$ 、 $C_{sfs18}$ 、 $C_{sfs20}$  和  $C_{sfs30}$ 。取样时, 采用“S”形取样法, 用体积为  $200\ cm^3$  环刀分别于垄上、积水泥沙自然沉降处洼地、积水泥沙排出处洼地随机取 3 个样品作为重复, 同一个试验条件下可得到 9 个  $C_{ij}$  ( $i$  为 st、scs、sfs,  $j$  为降雨历时 5、10、12、14、16、18、20、30 min) 作为重复以消除误差。样品取出后放入由水土保持研究所水保实验设备工厂设计制造的土壤结皮分层取样装置内 (图 2)。该装置底部设计有螺旋上升底托, 通过转动螺母, 土样将随底托上升, 每次转动 1 圈土样随即上升 1 mm, 用取土刀将每层土样剥离, 因前期试验研究发现土壤结皮厚度在 2~3 mm 之间, 故此取样设置 3 次, 即取分层 0~1 mm (第 1 层)、1~2 mm (第 2 层)、2~3 mm (第 3 层) 土壤样品进行分析。

### 1.3 样品分析

将土样剥离后过 2 mm 筛, 称取土样 5 g, 加入 10 mL  $300\ g\cdot kg^{-1}$  的过氧化氢, 置于温度为  $72^{\circ}C$  的

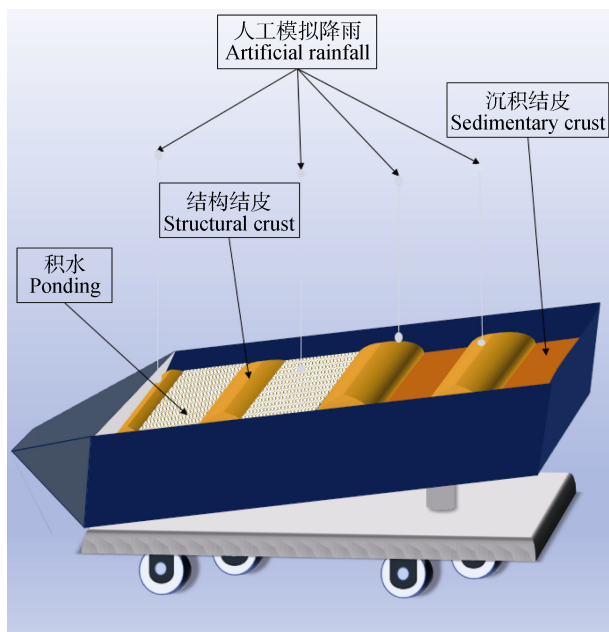


图1 径流小区布设图  
Fig. 1 Runoff plot layout

沙浴上加热使其充分反应，以便充分去除土样内所含有机质，待反应结束后，将土样静置 12 h；待气泡消失，加入去离子水稀释并静置 12 h，去除上清液，反复进行直至调节 pH 为 6.5~7.0；最后加入  $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$  的六偏磷酸钠 10 mL 分散颗粒。采用频率为  $3\,000 \text{ r}\cdot\text{s}^{-1}$  的超声波处理 5 s 后用马尔文激光粒度仪 Mastersizer2000 测量土样颗粒粒径组成。土壤粒径分级根据国际制分类标准，即砂粒（0.05~2 mm）、粉粒（粒径 0.002~0.05 mm）和黏粒（0~0.002 mm）。

#### 1.4 数据处理

用 SPSS 23 软件进行试验数据分析，利用方差分析降雨历时、分层深度、结皮类型及其交互作用对土壤物理结皮颗粒粒径百分比的影响以及各层颗粒含量差异的显著性，利用皮尔逊相关系数分析降雨持续时间和粒径之间的关系，用 Origin 2018 进行图表绘制。

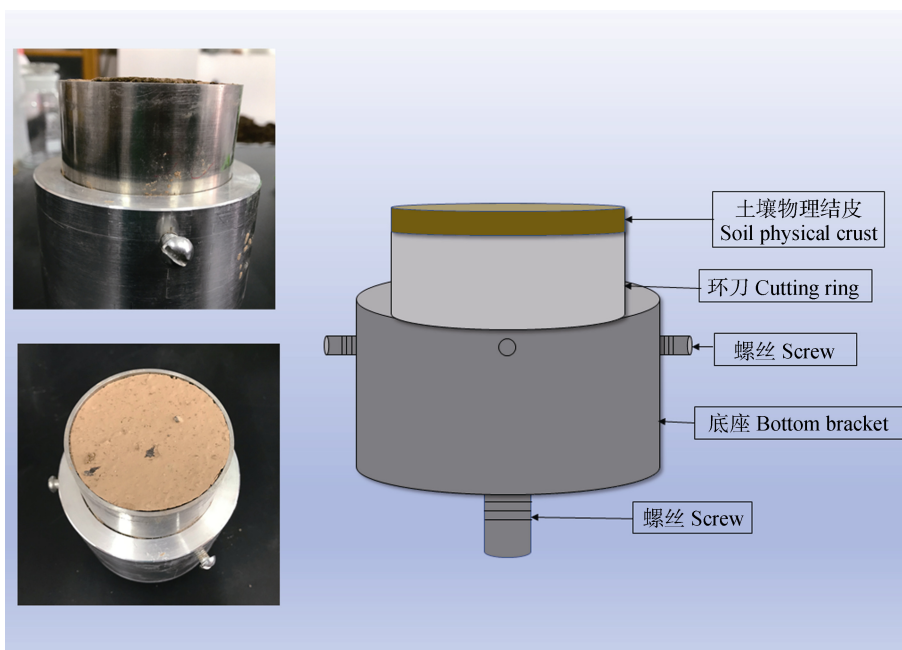


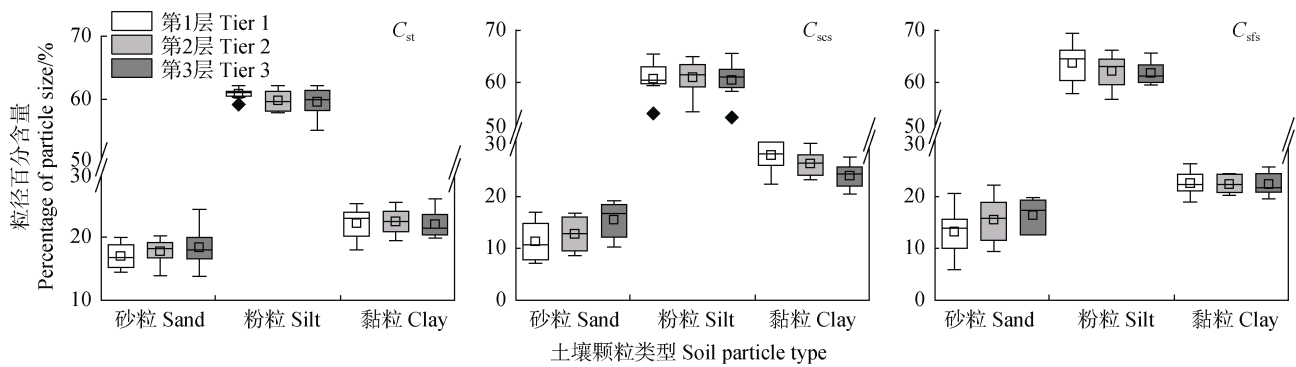
图2 土壤物理结皮分层装置  
Fig. 2 Stratified sampling device for soil physical crust

## 2 结果

### 2.1 土壤结皮粒度特征

土壤结皮粒径分层分布特征见图 3，结皮剖面颗粒组成变化较为显著，且中值粒径等粒径分配百分比差异性显著。由于杨凌塬土为粉质壤土，就微

地形不同空间位置而言，垂直剖面中结皮各层均呈现粉粒含量最多的特点，所占比例均超过 50%，但各级粒径含量仍存在差异，且结皮分层间颗粒分布亦具有明显变化。对比结皮第 1 层（0~1 mm）与第 3 层（2~3 mm）颗粒组成发现，随降雨历时的延长， $C_{st}$ 、 $C_{scs}$  和  $C_{sfs}$  第 1 层土壤颗粒所含粉粒和黏



注： $C_{st}$ 、 $C_{scs}$ 、 $C_{sfis}$  分别代表结构结皮，含泥沙沉积结皮和无泥沙沉积结皮。Note:  $C_{st}$ 、 $C_{scs}$ 、 $C_{sfis}$  represent structural crust, silt-containing sedimentary crust and silt-free sedimentary crust.

图 3 土壤物理结皮颗粒组成分层分布图

Fig. 3 Stratification distribution of particles of soil physical crust

粒均呈现富集特征，而砂粒则是呈现分散特征。

表 1 为土壤颗粒粒径百分比与分层及降雨历时的相关关系，通过分析表 1 可知，降雨历时与  $C_{st}$  砂粒呈极显著负相关性 ( $r = -0.662$ ,  $P < 0.01$ )，与  $C_{st}$  粉粒呈正相关性但不显著 ( $r = 0.032$ ,  $P > 0.05$ )，与  $C_{st}$  黏粒呈极显著正相关性 ( $r = 0.704$ ,  $P < 0.01$ )；与  $C_{scs}$  砂粒呈极显著负相关性 ( $r = -0.650$ ,  $P < 0.01$ ) 与  $C_{scs}$  粉粒呈正相关但不显著 ( $r = 0.313$ ,  $P > 0.05$ )，与  $C_{scs}$  黏粒呈显著正相关性 ( $r = 0.493$ ,  $P < 0.05$ )；与  $C_{sfis}$  砂粒呈极显著负相关性 ( $r = -0.734$ ,  $P < 0.01$ )，与  $C_{sfis}$  粉粒呈显著正相关性 ( $r = 0.649$ ,  $P < 0.01$ )，与  $C_{sfis}$  黏粒含量呈显著正相关性 ( $r = 0.469$ ,  $P < 0.05$ )。分层与  $C_{scs}$  砂粒呈显著正相关性 ( $r = 0.442$ ,  $P < 0.05$ )，与  $C_{scs}$  黏粒呈极显著负相关性 ( $r = -0.532$ ,  $P < 0.01$ )，其余在 0.05 水平下相关性不显著。以上表明降雨历时与土壤颗粒组成密切相关且不同分层间土壤颗粒

组成也存在差异。

## 2.2 土壤结皮颗粒富集随降雨历时的变化

在模拟降雨时，微地形垄处土壤表层由于始终受雨滴打击作用，因而该作用下形成的结构结皮第 1 层被打击分散最严重，其颗粒组成最能反映降雨侵蚀效应；而洼地处汇集的径流在降雨完成后逐渐下渗，亦是第 1 层颗粒组成最能反映其侵蚀效应，因此分析不同结皮类型第 1 层颗粒组成随降雨历时的变化对于分析降雨对土壤侵蚀程度的影响尤为重要。该文采用表征侵蚀颗粒变化过程的重要指标富集率 (ER) 比较侵蚀过程中  $C_{st}$ 、 $C_{scs}$  和  $C_{sfis}$  的砂粒、粉粒和黏粒变化情况，当  $ER > 1$  时，表明某一特定粒径的颗粒发生了富集，该颗粒占比高于对照土；当  $ER < 1$  时，则表明某一特定粒径的颗粒发生了分散，该颗粒占比要低于对照土。图 4 为与结皮第 3 层土壤颗粒对比，第 1 层所含颗粒富集情况。

表 1 土壤物理结皮不同层间颗粒组成与表层深度及降雨历时的相关关系

Table 1 The relationship of the percentage of soil physical crust particles with tier and rainfall duration

	$C_{st}$			$C_{scs}$			$C_{sfis}$		
	砂粒 Sand/%	粉粒 Silt/%	黏粒 Clay/%	砂粒 Sand/%	粉粒 Silt/%	黏粒 Clay/%	砂粒 Sand/%	粉粒 Silt/%	黏粒 Clay/%
降雨历时 Rainfall duration	-0.662**	0.032	0.704**	-0.650**	0.313	0.493*	-0.734**	0.649**	0.469*
结皮表层深度 Depth of physical crust	0.237	-0.308	-0.013	0.442*	-0.031	-0.532**	0.317	-0.246	-0.036

注：\*\*在 0.01 水平 (双尾)，相关性显著。\*在 0.05 水平 (双尾)，相关性显著。 $C_{st}$ 、 $C_{scs}$ 、 $C_{sfis}$  分别代表结构结皮，含泥沙沉积结皮和无泥沙沉积结皮。Note: “\*\*” shows the correlation is significant at 0.01 level (double tail). “\*” means the correlation is significant at the 0.05 level (double tail).  $C_{st}$ ,  $C_{scs}$ ,  $C_{sfis}$  represent structural crust, silt-containing sedimentary crust and silt-free sedimentary crust.

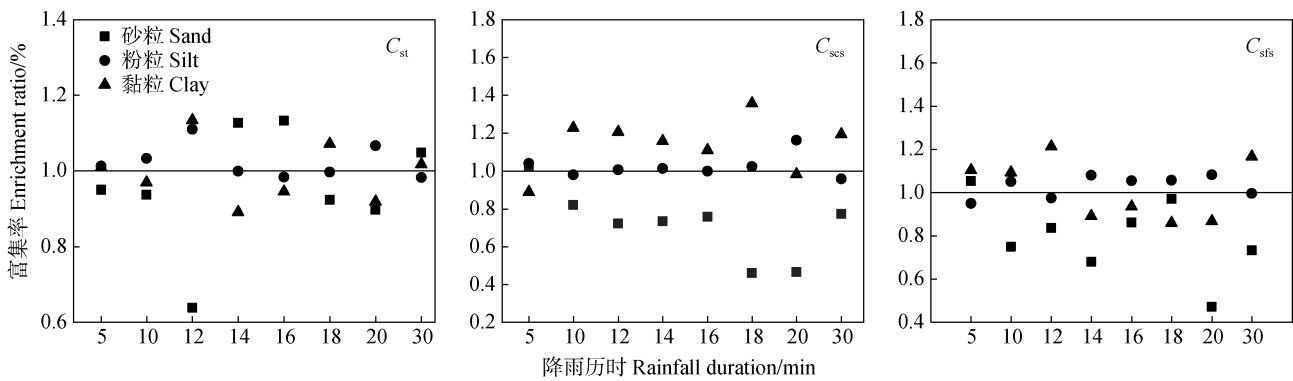


由图 4 可以看出,在人工模拟降雨条件下,结构结皮富集率变化程度不大(数值在 1.0 左右浮动)。随降雨历时的变化,  $C_{st}$  的砂粒富集率变化范围为 0.90~1.13,粉粒富集率浮动范围为 0.98~1.11,黏粒富集率浮动范围为 0.89~1.13;  $C_{scs}$  的砂粒富集率浮动范围为 0.46~1.03,粉粒富集率浮动范围为 0.96~1.16,黏粒富集率浮动范围为 0.89~1.36;  $C_{sfs}$  的砂粒富集率浮动范围为 0.47~1.05,粉粒富集率浮动范围为 0.95~1.08,黏粒富集率浮动范围为 0.86~1.21。由此可以看出,在侵蚀过程中,  $C_{st}$  砂粒发生了分散,黏粒和粉粒发生了富集,其中粉粒富集不显著;  $C_{scs}$  砂粒发生了分散且趋势较为显著,粉粒发生了轻微富集,黏粒富集趋势较为显著,且

随降雨历时的延长,砂粒消耗程度与粉粒和黏粒富集程度逐渐增强;  $C_{sfs}$  则呈现砂粒消耗、粉粒富集而黏粒随降雨历时变化的现象。这表明,降雨历时是导致土壤结皮颗粒组成差异性的主要原因,且由于结皮形成机制的差异性,其表层颗粒组成也有所差异。

### 2.3 降雨历时 30 min 下结皮颗粒粒径分层分布

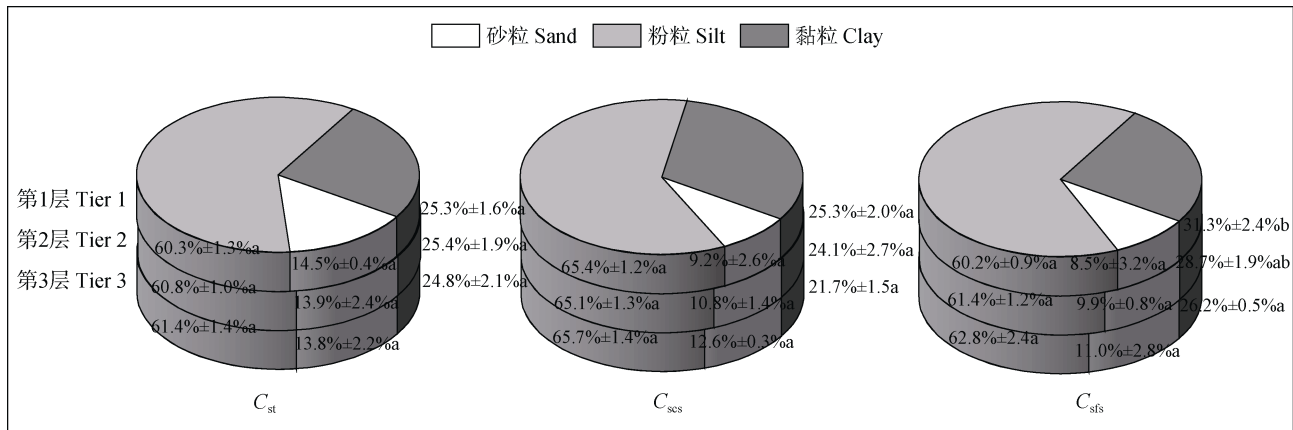
由上文可以看出,降雨是影响颗粒组成的重要因素。对于降雨历时的差异,表层土壤被打击分散程度、径流携带泥沙量、颗粒沉积量不同,因而表现为土壤分层颗粒粒径分布有所差异,由以上结果可知:降雨历时 30 min 时其打击分散效应最强,颗粒组成分布差异最明显,因此,以降雨历时 30 min 下颗粒分布情况为例(图 5),分析  $C_{st}$ 、 $C_{scs}$  和  $C_{sfs}$  的分层颗粒分布。



注:  $C_{st}$ 、 $C_{scs}$ 、 $C_{sfs}$  分别代表结构结皮,含泥沙沉积结皮和无泥沙沉积结皮。Note:  $C_{st}$ 、 $C_{scs}$ 、 $C_{sfs}$  represent structural crust, silt-containing sedimentary crust and silt-free sedimentary crust.

图 4 土壤物理结皮粒径富集率随降雨历时的变化

Fig. 4 Variable enrichment ratio of soil physical crust particles with the difference in rainfall duration



注:  $C_{st}$ 、 $C_{scs}$ 、 $C_{sfs}$  分别代表结构结皮,含泥沙沉积结皮和无泥沙沉积结皮。Note:  $C_{st}$ 、 $C_{scs}$ 、 $C_{sfs}$  represent structural crust, silt-containing sedimentary crust and silt-free sedimentary crust.

图 5 降雨历时 30 min 下土壤结皮颗粒组成成分层分布

Fig. 5 Particle size distribution of crust was stratified under rainfall duration of 30 min

图 5 为 3 类结皮在降雨历时 30 min 下土壤颗粒组成分层分布图, 饼图自上而下代表结皮的第 1、2、3 层土壤颗粒分布情况, 由图 5 可以看出,  $C_{st}$ 、 $C_{scs}$  和  $C_{sfs}$  均呈现粉粒含量最多, 砂粒含量最少的特征, 且由上而下随层数递增, 呈现粉粒占比增大的趋势, 分别由第 1 层的 60.3%、65.4% 和 60.2% 增加为第 3 层的 61.4%、65.7% 和 62.8%; 黏粒占比减小, 分别由第 1 层的 25.3%、25.3% 和 31.3% 减小为第 3 层的 24.8%、21.7% 和 26.2%;  $C_{st}$  砂粒占比逐渐减小, 第 1 层的 14.5% 减小为第 3 层的 13.8%,  $C_{scs}$  和  $C_{sfs}$  砂粒占比逐渐增大, 分别由第 1 层的 9.2% 和 8.5% 增加为第 3 层的 12.6% 和 11.0%。由此可知, 在降雨打击作用下, 土壤表层形成的结皮颗粒组成具有分层性, 且结皮形成机制的差异也导致其颗粒分层的差异。

### 3 讨论

坡耕地是研究土壤侵蚀的基本单元, 坡面发生水力侵蚀的方式可分为雨滴击溅和径流冲刷两部分。研究发现<sup>[42]</sup>: 雨滴打击土壤分散可分为两个过程: (1) 雨滴打击土壤, 土壤颗粒间的黏结力被破坏, 土壤颗粒不同程度的被分散并与表土发生分离; (2) 被分散的土壤颗粒在雨滴冲击力、水流冲刷力作用下向四周飞溅。加之地形条件差异, 土壤侵蚀过程也存在差异, 进而表现为本文模拟的自然界中形成于垄上、洼地以及被冲毁洼地处的结构结皮 ( $C_{st}$ )、含泥沙沉积结皮 ( $C_{scs}$ ) 和无泥沙沉积结皮 ( $C_{sfs}$ ) 颗粒组成差异性。

在研究降雨引起的土壤侵蚀时, 单个雨滴能量及累计雨滴能量是影响侵蚀程度强弱的重要指标<sup>[43]</sup>, 本研究, 降雨因素的变化表现为同一降雨强度下历时的区别。当降雨历时越长时, 累积雨滴能量越大, 雨滴打击使得土壤团聚体破碎, 程度越大, 可随径流运移细颗粒则越多, 因而导致了低分离泥沙中大粒径颗粒含量减少、小粒径颗粒含量增加的现象。本试验中则表现为: 受雨滴直接打击的  $C_{st}$ , 与原状土相比, 砂粒占比减少, 而粉粒、黏粒占比增多。对于  $C_{scs}$  和  $C_{sfs}$  而言, 由于降雨过程中坡面地表条件不断发生变化, 地表水层逐渐变厚, 水层对雨滴打击作用起到缓冲作用, 大大降低了雨滴对土壤的击溅能力, 且土表部分团聚体颗粒在水层的浸泡下

发生不同程度的分散解体, 从而导致可供雨滴击溅的颗粒粒径变小, 因而其颗粒占比在降雨条件的改变下, 呈现出差异性。

与第 3 层结皮颗粒分布相比,  $C_{scs}$  和  $C_{sfs}$  第 1 层土壤颗粒产生砂粒分散、粉粒和黏粒富集的现象。这是由于随降雨历时的延长, 土壤被分散程度逐渐增强, 径流携带泥沙量逐渐增多, 且径流产生泥沙持续在洼地处蓄积, 自然沉降下的泥沙颗粒表现为大颗粒先沉, 小颗粒后沉的特点<sup>[27-30]</sup>, 从而表现为  $C_{scs}$  表层与下层颗粒分布的差异。对于将泥沙抽取出的洼地处产生的  $C_{sfs}$  而言, 由于前期无蓄水时, 土壤表层颗粒受雨滴打击作用被分散, 洼地自身产生的细小颗粒以及垄处分散的细小颗粒堵塞土壤表层孔隙, 后随径流的蓄积, 将表面颗粒压实<sup>[43]</sup>, 即将抽取泥沙, 仍存在第 1 层土壤颗粒砂粒分散、粉粒和黏粒富集的现象。

当降雨历时 30 min 时,  $C_{st}$  分层间颗粒变化不显著, 是因为垄上部分土壤在整场降雨条件下持续受雨滴打击, 其分散程度较大, 细小颗粒易被击溅在空中且随径流冲刷入洼地, 大颗粒则多留于垄上, 因而其颗粒由于分散与转移的共同作用, 在分层上差异性不显著。对于  $C_{scs}$  和  $C_{sfs}$ , 虽然其形成过程的差异导致颗粒分布有所差异, 但其分层变化特征仍具有相似性, 即均呈现随层数递增, 粉粒、黏粒减小而砂粒增多的现象, 这是由于在降雨历时未达到 30 min 时, 洼地处存在蓄水, 由于雨滴的打击扰动, 泥沙沉积速度相对较慢但仍存在一定程度的沉积, 而且蓄水可将土壤表层颗粒压实, 因而二者变化趋势相近。随土层的变化, 由方差分析可知:  $C_{st}$ 、 $C_{scs}$  和  $C_{sfs}$  所含砂粒均表现为中等变异性, 粉粒和黏粒表现为弱变异性。进一步分析降雨历时、分层以及结皮类型对颗粒组成的影响发现: 在坡耕地微地形作用下, 土壤颗粒组成与结皮形成过程息息相关, 降雨历时、分层以及结皮类型均表现为极显著影响, 且在 3 种因素的交互作用下, 结皮的黏粒、粉粒及砂粒则呈现了不同差异显著性。这表明: 降雨打击作用下, 由于垄处受打击颗粒被分散后随径流流入洼地处, 则洼地黏粒含量表现为较高水平, 而砂粒含量表现为较低水平, 取出泥沙以及让泥沙自然沉降的沉积结皮则是由于泥沙细小颗粒含量较多, 黏粒占比较大, 所以  $C_{sfs}$  黏粒占比低于  $C_{scs}$ 。

在研究土壤结皮形成过程时, 很多学者提出了

不同见解<sup>[6-8]</sup>。通过分析  $C_{st}$ 、 $C_{scs}$  和  $C_{sfs}$  分层颗粒分布差异性以及降雨对结皮颗粒组成的影响, 本文发现结构结皮在侵蚀过程中形成的方式与 Agassi 等<sup>[10]</sup> 研究结果相似, 受降雨影响较为显著。对于沉积结皮的形成过程, 由于其形成与洼地蓄水泥沙含量密切相关, 因此本文通过将沉积结皮分为  $C_{scs}$  和  $C_{sfs}$  两类, 分析泥沙沉积对沉积结皮的形成效应。通过对比  $C_{scs}$  和  $C_{sfs}$  的差异性可知土壤沉积结皮在形成过程中, 存在两种诱因——雨滴分散与泥沙沉积, 若降雨历时较短, 洼地无明显蓄水,  $C_{scs}$  和  $C_{sfs}$  差异不显著, 即降雨初期, 雨滴打击分散为沉积结皮的形成过程的主导因素; 若降雨历时较长, 洼地处蓄水量较多,  $C_{scs}$  和  $C_{sfs}$  差异显著, 即降雨后期, 泥沙沉积为沉积结皮形成过程的主导因素。

本研究采用杨凌塬土作为试验土样, 因此, 研究结果不能立即应用于其他具有不同理化性质的土壤类型。此外, 不同降雨条件以及影响结皮形成的土壤颗粒黏结力也需要进一步试验。尽管存在这些局限性, 但本研究为进一步研究物理结皮对土壤侵蚀过程的影响提供了不可忽视的作用。值得注意的是, 试验中所用结皮颗粒分层分析方法可为确定侵蚀过程中物理结皮的形成以及结皮类型性质差异性提供一种新思路。

## 4 结 论

在人工模拟降雨条件下, 试验过程中产生的结构结皮 ( $C_{st}$ )、含泥沙沉积结皮 ( $C_{scs}$ ) 和无泥沙沉积结皮 ( $C_{sfs}$ ) 各分层粒径构成均以粉粒为主, 所占比例超过 50%。在侵蚀过程中,  $C_{st}$ 、 $C_{scs}$  和  $C_{sfs}$  砂粒均发生了分散, 黏粒和粉粒发生了富集; 且随降雨历时的延长, 砂粒消耗程度与粉粒和黏粒富集程度逐渐增强。其中降雨 30 min 打击分散效应最强, 颗粒组成分布差异最明显。结构结皮的形成过程受雨滴打击分散土壤表层团聚体主导, 沉积结皮的形成过程则受雨滴分散与泥沙沉积的综合因素影响。降雨初期, 洼地处无蓄水时, 雨滴打击分散为沉积结皮的形成过程的主导因素; 降雨后期, 洼地处蓄水, 泥沙沉积为沉积结皮形成过程的主导因素。结皮表层 (第 1 层) 颗粒粒径分布随降雨历时的变化最为明显, 最能表现侵蚀特征。对比分析第 1 层与

第 3 层土壤颗粒变化情况, 侵蚀过程中的颗粒分选性是导致土壤物理结皮形成过程及类型差异性的主要因素。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] Zhang W B, Xie Y, Liu B Y. Estimation of rainfall erosivity using rainfall amount and rainfall intensity[J]. *Geographical Research*, 2002, 21 ( 3 ): 384—390. [章文波, 谢云, 刘宝元. 用雨量和雨强计算次降雨侵蚀力[J]. *地理研究*, 2002, 21 ( 3 ): 384—390.]
- [ 2 ] Zhang D Q, Ni S M, Wang J G, et al. Particle-size composition of erosion sediment on granite-derived red soil slope relative to erosion degree[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 ( 6 ): 1387—1398. [张德谦, 倪世民, 王军光, 等. 不同侵蚀程度花岗岩红壤坡面侵蚀泥沙颗粒特征研究[J]. *土壤学报*, 2020, 57 ( 6 ): 1387—1398.]
- [ 3 ] Fan Y T, Lei T W, Cai Q G. Effects of wetting rate and cumulative rainfall on crust formation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46 ( 5 ): 764—771. [范云涛, 雷廷武, 蔡强国. 湿润速度和累积降雨对土壤表面结皮发育的影响[J]. *土壤学报*, 2009, 46 ( 5 ): 764—771.]
- [ 4 ] Bu C F, Cai Q G, Zhang X C, et al. Mechanism and erosion effect of development of soil crust of loess[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46 ( 1 ): 16—23. [卜崇峰, 蔡强国, 张兴昌, 等. 黄土结皮的发育机理与侵蚀效应研究[J]. *土壤学报*, 2009, 46 ( 1 ): 16—23.]
- [ 5 ] Wu Q J, Wu J, Wang L H, et al. Effects of soil crusts on infiltration in slope land in the loess area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 ( 2 ): 303—311. [吴秋菊, 吴佳, 王林华, 等. 黄土区坡耕地土壤结皮对入渗的影响[J]. *土壤学报*, 2015, 52 ( 2 ): 303—311.]
- [ 6 ] Farres P J. The dynamics of rainsplash erosion and the role of soil aggregate stability[J]. *Catena*, 1987, 14 ( 1/2/3 ): 119—130.
- [ 7 ] Bresson L M, Cadot L. Illuviation and structural crust formation on loamy temperate soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56 ( 5 ): 1565—1570.
- [ 8 ] Cai Q G. Review on the modelling of sediment yield from watershed[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 1990 ( 6 ): 64—65. [蔡强国. 流域产沙模型概述[J]. *中国水土保持*, 1990 ( 6 ): 64—65.]
- [ 9 ] Chen Y, Tarchitzky J, Brouwer J, et al. Scanning electron microscope observations on soil crusts and their formation[J]. *Soil Science*, 1980, 130 ( 1 ): 49—55.
- [ 10 ] Agassi M, Shainberg I, Morin J. Effect of electrolyte concentration and soil sodicity on infiltration rate and crust formation[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, 45 ( 5 ): 848—851.
- [ 11 ] Onofriok O, Singer M J. Scanning electron microscope studies of surface crusts formed by simulated rainfall[J].



- Soil Science Society of America Journal, 1984, 48 (5): 1137—1143.
- [ 12 ] Arshad M A, Mermut A R. Micromorphological and physico-chemical characteristics of soil crust types in northwestern Alberta, Canada[J]. Soil Science Society of America Journal, 1988, 52 (3): 724—729.
- [ 13 ] Valentin C, Bresson L M. Morphology, genesis and classification of surface crusts in loamy and sandy soils[J]. Geoderma, 1992, 55 (3/4): 225—245.
- [ 14 ] Bodnár F, Hulshof J. Soil crusts and deposits as sheet erosion indicators in southern Mali[J]. Soil Use and Management, 2006, 22 (1): 102—109.
- [ 15 ] Ghanbarian-Alavijeh B, Millán H. The relationship between surface fractal dimension and soil water content at permanent wilting point[J]. Geoderma, 2009, 151 (3/4): 224—232.
- [ 16 ] Fallico C, Tarquis A M, de Bartolo S, et al. Scaling analysis of water retention curves for unsaturated sandy loam soils by using fractal geometry[J]. European Journal of Soil Science, 2010, 61 (3): 425—436.
- [ 17 ] Kim J W, Sukop M C, Perfect E, et al. Geometric and hydrodynamic characteristics of three-dimensional saturated prefractal porous media determined with lattice boltzmann modeling[J]. Transport in Porous Media, 2011, 90 (3): 831—846.
- [ 18 ] Tao G L, Hu Q Z, Pan M Y, et al. The density functions of pore-size and particle-size distribution established by using fractal theory and their applications[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 170/171/172/173: 148—152.
- [ 19 ] Liu J L, Ma X Y, Zhang Z H. Spatial variability of soil water retention curve in different soil layers and its affecting factors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41 (1): 46—52. [刘继龙, 马孝义, 张振华. 不同土层土壤水分特征曲线的空间变异及其影响因素[J]. 农业机械学报, 2010, 41 (1): 46—52.]
- [ 20 ] Bai Y R, Wang Y K. Monofractal and multifractal analysis on soil particle distribution in hilly and gully areas of the Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43 (5): 43—48, 42. [白一茹, 汪有科. 黄土丘陵区土壤粒径分布单重分形和多重分形特征[J]. 农业机械学报, 2012, 43 (5): 43—48, 42.]
- [ 21 ] Sepaskhah A R, Tafteh A. Pedotransfer function for estimation of soil-specific surface area using soil fractal dimension of improved particle-size distribution[J]. Archives of Agronomy and Soil Science, 2013, 59 (1): 93—103.
- [ 22 ] Jia X H, Li X R, Li Y S. Fractal dimension of soil particle size distribution during the process of vegetation restoration in arid sand dune area[J]. Geographical Research, 2007, 26 (3): 518—525. [贾晓红, 李新荣, 李元寿. 干旱沙区植被恢复过程中土壤颗粒分形特征[J]. 地理研究, 2007, 26 (3): 518—525.]
- [ 23 ] Rawls W J, Brakensiek D L, Logsdon S D. Predicting saturated hydraulic conductivity utilizing fractal principles[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57 (5): 1193—1197.
- [ 24 ] Liu J L, Xu S H, Liu H, et al. Fractal method for estimating field hydraulic conductivity function from soil particle-size distribution[J]. Advances in Water Science, 2003, 14 (4): 464—470. [刘建立, 徐绍辉, 刘慧, 等. 确定田间土壤水力传导率的分形方法[J]. 水科学进展, 2003, 14 (4): 464—470.]
- [ 25 ] Liu J G, Wang H T, Nie Y F. Fractal model for predicting of unsaturated hydraulic conductivity of porous media[J]. Advances in Water Science, 2004, 15 (3): 269—275. [刘建国, 王洪涛, 聂永丰. 多孔介质非饱和导水率预测的分形模型[J]. 水科学进展, 2004, 15 (3): 269—275.]
- [ 26 ] Martínez-Mena M, Castillo V, Albaladejo J. Relations between interrill erosion processes and sediment particle size distribution in a semiarid Mediterranean area of SE of Spain[J]. Geomorphology, 2002, 45 (3/4): 261—275.
- [ 27 ] Zhang X, Walling D E, Quine T A, et al. Use of reservoir deposits and caesium-137 measurements to investigate the erosional response of a small drainage basin in the rolling loess plateau region of China[J]. Land Degradation & Development, 1997, 8 (1): 1—16.
- [ 28 ] Zhang X, Walling D E, He X, et al. Use of landslide-dammed lake deposits and pollen tracing techniques to investigate the erosional response of a small drainage basin in the Loess Plateau, China, to land use change during the late 16th century[J]. Catena, 2009, 79 (3): 205—213.
- [ 29 ] Wang Y F, Fu B J, Chen L D, et al. Profile distribution of sediment particle sizes at a check dam in a small watershed of Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20 (10): 2461—2467. [汪亚峰, 傅伯杰, 陈利顶, 等. 黄土高原小流域淤地坝泥沙粒度的剖面分布[J]. 应用生态学报, 2009, 20 (10): 2461—2467.]
- [ 30 ] Li M, Yang E, Li P, et al. Characteristics of sediment deposition in check dam in small watershed in Loess Hilly Area[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33 (3): 161—167. [李勉, 杨二, 李平, 等. 黄土丘陵区小流域淤地坝泥沙沉积特征[J]. 农业工程学报, 2017, 33 (3): 161—167.]
- [ 31 ] Xu J P, Li J H, Wei Y J, et al. Fractal characteristics of particle composition for soils developed from different parent materials[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (5): 1197—1205. [徐加盼, 李继洪, 魏玉杰, 等. 不同母质类型发育土壤颗粒组成分形特征[J]. 土壤学报,

- 2020, 57 (5): 1197—1205.]
- [ 32 ] Mao D L, Cai F Y, Fang D X, et al. Fractal characteristics of grain size of sand and dust in aeolian sand movement in Cele oasis-desert ecotone in Xinjiang, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (1): 88—99. [毛东雷, 蔡富艳, 方登先, 等. 新疆策勒绿洲—沙漠过渡带风沙运动沙尘物质粒径分形特征[J]. *土壤学报*, 2018, 55 (1): 88—99.]
- [ 33 ] Wu F Z, Shi Z H, Fang N F, et al. Temporal variations of clay content in eroded sediment under different rainfall condition[J]. *Environmental Science*, 2012, 33 (7): 2497—2502. [吴凤至, 史志华, 方怒放, 等. 不同降雨条件下侵蚀泥沙黏粒含量的变化规律[J]. *环境科学*, 2012, 33 (7): 2497—2502.]
- [ 34 ] Wu X L, Wei Y J, Li Z X, et al. Composition of sediments of erosion from different red soil slopes in subtropical area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (6): 1223—1233. [吴新亮, 魏玉杰, 李朝霞, 等. 亚热带地区几种红壤坡面侵蚀泥沙的物质组成特性[J]. *土壤学报*, 2014, 51 (6): 1223—1233.]
- [ 35 ] 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.
- [ 36 ] Issa O M, Bissonnais Y L, Planchon O, et al. Soil detachment and transport on field- and laboratory-scale interrill areas: Erosion processes and the size-selectivity of eroded sediment[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2006, 31 (8): 929—939.
- [ 37 ] Wang L, Shi Z H, Wang J, et al. Rainfall kinetic energy controlling erosion processes and sediment sorting on steep hillslopes: A case study of clay loam soil from the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 512: 168—176.
- [ 38 ] Lu P. Formation of soil crust and its effects of different spatial distributions of physical soil crusts on runoff and erosion[D]. Shaanxi, Yangling: Northwest A & F University, 2018. [路培. 土壤结皮形成机制及空间分布对侵蚀的影响研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2018.]
- [ 39 ] Li X P, Liu J L, Zhang J B, et al. Analysis of fractal magnitude of soil particles in loamy Chao soils in North China Plain[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30 (4): 118—124. [李晓鹏, 刘建立, 张佳宝, 等. 华北冲积平原壤质潮土的土壤粒径分形空间尺度分析[J]. *农业工程学报*, 2014, 30 (4): 118—124.]
- [ 40 ] Montero E. Rényi dimensions analysis of soil particle-size distributions[J]. *Ecological Modelling*, 2005, 182 (3/4): 305—315.
- [ 41 ] Xu P, Yu B M. Developing a new form of permeability and Kozeny-Carman constant for homogeneous porous media by means of fractal geometry[J]. *Advances in Water Resources*, 2008, 31 (1): 74—81.
- [ 42 ] Hammad A H A, Børresen T, Haugen L E. Effects of rain characteristics and terracing on runoff and erosion under the Mediterranean[J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, 87 (1): 39—47.
- [ 43 ] 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.

(责任编辑: 檀满枝)