

DOI: 10.11766/trxb201908210276

安娟, 陈新军, 宋红丽. 近地表水文条件对横坡垄作坡面褐土团聚体流失的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(6): 1411–1421.

AN Juan, CHEN Xinjun, SONG Hongli. Effect of Soil Surface Hydrological Conditions on Characteristic of Soil Aggregate Loss on Cinnamon Soil Slope within Contour Ridge System[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(6): 1411–1421.

## 近地表水文条件对横坡垄作坡面褐土团聚体流失的影响\*

安娟<sup>1</sup>, 陈新军<sup>2</sup>, 宋红丽<sup>1</sup>

(1. 山东省水土保持与环境保育重点实验室, 临沂大学资源环境学院, 山东临沂 276005; 2. 临沂市水利局, 山东临沂 276005)

**摘要:**以横垄褐土坡面为研究对象, 基于室内模拟降雨试验, 就 3 种近地表水文条件下(自由入渗、土壤饱和与渗流)团聚体( $\geq 5$ 、 $2\sim 5$ 、 $1\sim 2$ 、 $0.5\sim 1$ 、 $0.25\sim 0.5$ 、 $<0.25$  mm)在不同雨强(30, 60, 和  $90\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ )下的流失规律进行了探究。结果表明:(1)团聚体流失量的差异表现为:渗流 $>$ 土壤饱和 $>$ 自由入渗, 且随雨强变化土壤水分饱和与渗流对团聚体流失的贡献较水势差分别显著增加 2.02 倍 $\sim$ 3.71 倍和 1.28 倍 $\sim$ 2.51 倍;(2)土壤饱和与渗流的存在致使  $2\sim 5$ 、 $1\sim 2$ 、 $0.5\sim 1$  mm 团聚体的流失比例增加 46.74% $\sim$ 121.19%, 而削弱了 90%以上  $0.25\sim 0.5$  mm 团聚体的流失;(3)土壤饱和与渗流使 $>0.5$  mm 团聚体的富集率增加了 23.77% $\sim$ 215.80%, 但导致  $0.25\sim 0.5$  mm 团聚体的富集率减少 45.07% $\sim$ 68.90%, 主要是因为  $0.25\sim 0.5$  mm 团聚体在侵蚀过程中发生了团聚;(4)平均重量直径是反映自由入渗与土壤饱和条件下团聚体流失的重要指标, 而渗流条件下则为分形维数;(5)雨强对团聚体流失的影响在自由入渗条件下表现最明显, 尤其是对  $2\sim 5$  mm 团聚体。研究结果有助于深入理解横坡垄作对坡面侵蚀过程的作用机制, 为横垄措施的合理利用提供科学依据。

**关键词:**团聚体流失粒径分布; 富集率; 团聚体流失特征指标; 渗流; 横坡垄作

中图分类号: S157 文献标志码: A

## Effect of Soil Surface Hydrological Conditions on Characteristic of Soil Aggregate Loss on Cinnamon Soil Slope within Contour Ridge System

AN Juan<sup>1</sup>, CHEN Xinjun<sup>2</sup>, SONG Hongli<sup>1</sup>

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Water and Soil Conservation and Environmental Protection, College of Resources and Environment, Linyi University, Linyi, Shandong 276005, China; 2. Linyi Conservancy Bureau, Linyi, Shandong 276005, China)

**Abstract:** [Objective] Soil moisture content is one of the major factors determining degrees of soil aggregate breakdown, which alters the distribution of particle sizes in sediment. Soil surface hydrological condition reflects the spatial distribution of soil moisture content at slope, and strongly affects the characteristic of soil aggregate loss. However, previous researches focused on the influence of soil surface hydrological condition on runoff and sediment yield process within flat tillage system, and limited information are available about the effect of soil surface hydrological conditions on soil aggregate loss, especially under seepage condition in a contour ridge system. While, contour ridge system is an effective soil conservation practice used worldwide. [Method] In this study, simulated rainfall experiment was conducted to determine the lost characteristic of six size soil aggregates

\* 国家自然科学基金项目(41301292, 41977067, 41601086)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41301292, 41977067, 41601086)

作者简介: 安娟(1982—), 女, 山东泰安人, 博士研究生, 副教授, 主要从事土壤侵蚀过程与机理研究。E-mail: anjuan0715@126.com.

收稿日期: 2019-08-21; 收到修改稿日期: 2019-11-25; 网络首发日期(www.cnki.net): 2020-01-21

( 5, 2-5, 1-2, 0.5-1, 0.25-0.5, and <0.25 mm) under three soil surface hydrological conditions (free drainage, soil saturation, and seepage) and three rainfall intensities (30, 60, and 90 mm·h<sup>-1</sup>) for cinnamon soil in a contour ridge system. 【Result】Results showed that soil aggregate loss was in order of seepage>soil saturation>free drainage, seepage and soil saturation had 1.44-4.22 and 0.26-3.12 times soil aggregate loss greater than free drainage condition. Contribution rate of the existence of soil saturation and seepage for soil aggregate loss was significantly 2.02-3.71 and 1.28-2.51 times higher than that of water potential difference with the change of rainfall intensity. There was significantly difference in the loss distribution of soil aggregate among soil surface hydrological conditions. Soil saturation and seepage resulted the loss percentage of 2-5, 1-2, and 0.5-1 mm aggregate increased by 46.74%-121.19%, but weakened more than 90% of 0.25-0.5 mm aggregate loss. In addition, soil saturation and seepage increased by 23.77%-215.80% for the enrichment rate of >0.5 mm aggregate, but induced the enrichment rate of 0.25-0.5 mm aggregate decreased by 45.07%-68.90%. Because 0.25-0.5 mm aggregate occurred re-aggregate during erosion process, and the transport capacity of 2-5 mm aggregate was strengthened under the interaction of soil saturation and seepage. For the four characteristic indices of lost soil aggregate (the mean weight diameter, geometric mean diameter, mean weight soil specific area, and fractal dimension), difference in the mean weight diameter was the largest among soil surface hydrological conditions. The mean weight diameter was better indicator characterizing soil aggregate loss under free drainage and soil saturation conditions, while it was fractal dimension under seepage condition. Soil aggregate loss pronouncedly increased with the increase of rainfall intensity under free drainage, soil saturation, and seepage conditions. Among, effect of rainfall intensity on soil aggregate loss was the most pronounced under free drainage condition, and rainfall intensity had the greatest influence on 2-5 mm aggregate. 【Conclusion】Soil saturation and seepage significantly enhanced soil aggregate loss, and showed more pronounce influence on the loss of lager size aggregate. These findings enhance our understanding of erosion mechanism for soil surface hydrological condition and contour ridge influences on soil erosion process, and supply guidance for implementing contour ridge system.

**Key words:** Size distribution of soil aggregate loss; Enrich rate; Characteristic indices of lost soil aggregate; Seepage; Contour ridge system.

土壤团聚体作为土壤结构的基本单元, 其破碎程度和破碎后颗粒大小直接关系到团聚体的流失特征<sup>[1]</sup>。土壤含水量通过影响土壤颗粒间的相对距离、黏结力等<sup>[2]</sup>, 成为影响团聚体破碎的重要因子<sup>[3]</sup>。近地表水文条件体现了坡面不同部位的水分特征, 一般包括自由入渗、土壤饱和与壤中流/入渗流<sup>[4-5]</sup>, 而它们代表了不同的土壤含水量等级。可见, 近地表水文条件对团聚体流失具有重要影响。然而, 现有研究主要关注近地表水文条件对土壤侵蚀过程的影响, 且普遍认为土壤饱和与入渗流较自由入渗可显著提高径流量和侵蚀量<sup>[6-8]</sup>。然而, 在土壤侵蚀预测模型中, 如: RUSLE、WEPP, 入渗流条件下的侵蚀过程大多被忽视<sup>[9]</sup>, 而土壤侵蚀过程模型的建立需明晰不同空间尺度上近地表水文条件与侵蚀过程的关系。而且, 针对团聚体流失特征的研究主要集中于自由入渗条件下<sup>[10-12]</sup>。土壤水分饱和与入渗流条件下, 土壤颗粒间黏结力的削弱, 可增强降雨对土壤颗粒的打击效果, 但同时径流深度的增加在一定程度上可保护径流层以下的团聚体免于雨滴打击

对其的破坏<sup>[13]</sup>; 径流泥沙浓度的增加会提高土壤颗粒碰撞的机会, 致使颗粒发生重新团聚。说明土壤饱和与入渗流对团聚体破碎的增强和减弱作用并存。但究竟哪种作用占主导, 且主导作用主要作用于哪些粒径的团聚体? 这些问题尚不明晰。因此, 探明土壤水分饱和与入渗流条件下团聚体流失特征对于坡面空间尺度上侵蚀量的估算以及基于过程的土壤侵蚀模型的建立显得尤为重要。

由于横坡垄作能增加雨水就地入渗, 有效控制水土流失, 成为被广泛采用的保护性耕作措施之一<sup>[14-15]</sup>。因垄向坡度的存在, 使得坡面水文特征显著区别于传统耕作坡面, 具体表现在: 降雨后, 雨水会在位置较低的垄沟内汇集。雨水积聚可使垄面土壤水分饱和, 且积水形成垄沟与垄面土壤的水势梯度, 促使雨水从垄面溢出, 发生渗流<sup>[14]</sup>, 这类类似于 Huang 等<sup>[4]</sup>所建立的坡面水文与侵蚀过程概念模型中入渗流 (Seepage)<sup>[5]</sup>。横坡垄作措施下, 渗流溢出这种现象在降雨条件下十分普遍, 尤其在土壤饱和后, 且土壤饱和与渗流近地表水文情形均可

在坡中、坡下出现。然而，针对横坡垄作坡面水土流失的研究主要集中于土壤侵蚀过程及其影响因素（微地貌、降雨参数等）<sup>[14, 16-17]</sup>，关于团聚体流失特征尚不清楚。鉴于此，本研究拟以横坡垄作褐土坡面为研究对象，基于人工模拟降雨试验，分析 3 种近地表水文条件（自由入渗、土壤饱和、渗流）下团聚体流失规律，以期为横坡垄作措施的水保效益评价及合理利用提供依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验设计

根据土壤渗流状况和前期课题组野外冲刷、室内模拟降雨成果，设计自由入渗（FD）、饱和（SA）与渗流（SP）3 种近地表水文条件，且每种水文条件下主要考虑雨强对团聚体流失的影响。北方土石山区长期降雨观测数据表明，雨强范围为 4.2~120.6 mm·h<sup>-1</sup><sup>[18]</sup>，侵蚀性降雨雨强大于 30 mm·h<sup>-1</sup><sup>[19]</sup>。因此，设计雨强为 30、60 和 90 mm·h<sup>-1</sup>。根据临沂市平邑县、费县等地花生、地瓜和玉米种植垄作结构的调查结果，设置垄高 12 cm、垄宽 80 cm、垄向坡度 6°和坡面坡度 10°的横坡垄作系统，这在沂蒙山区非常具有典型性和代表性。共设计 18 场降雨实验，即各近地表水文条件每个雨强下重复 2 次。

### 1.2 试验材料

降雨试验在山东省水土保持和环境保育重点实

验室降雨大厅内进行。降雨试验装置为 Spraying system Veejet 80100 扇形喷头的槽式模拟降雨系统，有效降雨面积 2.2 m×12 m，降雨均匀度 89%以上。该模拟降雨系统通过调节喷头经过喷水窗口的频率控制雨强<sup>[20]</sup>。

为模拟横坡垄作坡面，试验所用土槽为可同时调节垄向与坡面坡度的钢槽（图 1）。该土槽主体由通过铰链连接的两个分体土槽构成，每个分体土槽长 160 cm，宽 80 cm。通过调节螺旋（图 1a），获取不同的垄向坡度，范围为 0°~15°。坡向坡度通过安装在支撑腿上的螺旋（图 1b）进行调节，范围为 0°~25°。为满足土壤饱和与渗流 2 种近地表水文条件，人工模拟降雨之前，利用两根塑料管（图 1c）向土槽垄沟内供水。为使供水平缓，塑料管壁上钻有 8 个孔径均为 1 cm 的孔，并用纱布包裹。供水过程中，因入渗量小于供水流量，为防止发生漫流，增设两根塑料管（图 1d）固定在土槽底部，用于调节垄沟内水面始终低于垄面最低点（图 1h）1 cm 左右。径流和泥沙样在出口处（g）收集。

试验所用土壤为沂蒙山区丘陵地带广泛分布的褐土。土壤取自玉米地的耕作层，黏粒、粉粒与砂粒的含量分别为 1.44%、84.59% 和 13.97%；pH 为 7.3，有机质含量为 25.6 g·kg<sup>-1</sup>。基于干筛法，对模拟降雨前团聚体的粒径分布进行了测定。2~5、1~2、0.5~1、0.25~0.5 和 <0.25 mm 团聚体的含量分别为 57.02%、10.30%、8.41%、9.17%和 15.10%。



注：a. 垄向坡度调节螺旋；b. 坡面坡度调节螺旋；c. 供水管；d. 垄沟内调节水面的排水管；f. 上坡位置产流产沙收集口；g. 垄面下坡位置产流产沙收集口；h. 垄面最低处。Note: a. screw for adjusting row grade; b. screw for field slope adjustment; c. water supply pipe; d. drainage pipe for adjusting water level in furrow areas; f. outlet to export runoff and sediment from the upper area; g. outlet for collecting runoff and sediment from the downslope area; h. the lowest point at the ridge.

图 1 试验土槽

Fig. 1 Experimental plot

### 1.3 试验步骤

试验用土风干后不过筛,按照分层法进行土槽填充,且将土槽的垄向坡度调整为 $6^\circ$ 。土槽底部以 $1.5\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的容重每 $5\text{ cm}$ 一层填装 $20\text{ cm}$ 厚的褐土,用于模拟犁底层。后按照填土之前在土槽四壁勾画的垄作轮廓线,以 $1.15\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 的容重修建垄高为 $12\text{ cm}$ 、垄宽为 $80\text{ cm}$ 的土垄两根。根据野外实地调查,垄上侧在土槽平面上的投影线长度约为下侧的2倍:即 $80\text{ cm}$ 的垄宽,上侧垄面在土槽平面上的投影为 $53.3\text{ cm}$ ,下侧垄面则为 $26.7\text{ cm}$ 。最后,将填装土槽的坡面坡度调整为 $10^\circ$ 。

土槽填装完毕后,进行雨强为 $10\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的前期预降雨,预降雨后土壤含水量约为 $28\%$ 。此过程中,将 $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 尼龙纱网覆盖在土槽之上以减弱雨滴打击对土壤表层的影响。预降雨 $24\text{ h}$ 后,为满足土壤饱和与渗流2种近地表水文条件,向垄沟内供水。在前期试验的基础上,供水流量确定为 $3\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ ,该流量能满足土壤入渗和垄沟内水面始终低于垄面最低点(图1h) $1\text{ cm}$ 要求。供水过程中由专人观察液面的变化,随时调整控制垄沟内水位高度的水管(图1d)。当横垄下侧垄面有积水时,认为满足土壤水分饱和条件;当试验土槽出口有水匀速流出时,即达到渗流条件。土壤饱和与渗流水文条件实现后,停止向垄沟内供水,并关闭水管(图1d)。此后,按照设计的雨强在不同近地表水文条件下进行降雨,降雨时间为 $60\text{ min}$ 。

降雨过程中,每 $2\text{ min}$ 收集1次径流样。将采集的径流泥沙样称重后,进行湿筛分析,即将泥沙样依次通过孔径为 $5$ 、 $2$ 、 $1$ 、 $0.5$ 和 $0.25\text{ mm}$ 的套筛。筛分后的6个粒级: $\geq 5$ 、 $2\sim 5$ 、 $1\sim 2$ 、 $0.5\sim 1$ 、 $0.25\sim 0.5$ 、 $<0.25\text{ mm}$ 的团聚体在 $105^\circ\text{C}$ 的干燥箱中干燥 $12\text{ h}$ ,并称重。累计次降雨中各粒径团聚体的流失量,获取本场降雨团聚体流失量及其粒径分布。

### 1.4 数据分析

采用平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、团聚体平均重量比表面积(MWSSA)<sup>[21]</sup>和分形维数(D)<sup>[22]</sup>4个指标评价团聚体流失特征。MWD和GMD越大,表示团聚体稳定性越强。MWSSA借鉴了土壤界面过程的思想、比表面积和平均重量直径的计算方法而构建,其值的升高,表示团聚体稳定性减弱。D越大,则团聚体的分散度越大,其稳定性越低。具体计算如下:

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n \bar{x}_i w_i \quad (1)$$

$$\text{GWD} = \exp\left(\sum_{i=1}^n w_i \ln \bar{x}_i\right) \quad (2)$$

$$\text{MWSSA} = \sum_{i=1}^n \frac{6w_i}{\rho_i d_i} \quad (3)$$

$$D = 3 - \frac{\lg w(\delta < \bar{d}_i) / w_0}{\lg \bar{d}_i / \bar{d}_{\max}} \quad (4)$$

式中, $\bar{x}_i$ 为土壤各粒径的平均直径,mm; $w_i$ 为土壤各粒径质量百分比,%; $\bar{d}_{\max}$ 为最大粒级土粒的平均直径,mm; $w(\delta < \bar{d}_i)$ 为土粒直径小于 $\bar{d}_i$ 的累积重量,g; $w_0$ 为全部粒级土粒的重量和,g; $\bar{d}_i$ 为两筛分粒级 $\bar{d}_i$ 和 $\bar{d}_{i+1}$ 的平均直径,mm; $w_i$ 为任意大小范围团聚体的相应重量占总流失土壤样品干重的百分数,%; $\rho_1 = \dots = \rho_n = 2.65\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。

富集率(ER)可表征侵蚀过程中不同粒级团聚体的富集现象。当 $\text{ER} > 1$ 时,说明与供试土壤相比,该粒级团聚体在侵蚀泥沙中含量高,发生富集; $\text{ER} < 1$ 时,该粒级团聚体发生沉积。

$$\text{ER}_i = p_i / P_i \quad (5)$$

式中, $p_i$ 和 $P_i$ 分别为侵蚀泥沙和供试土壤中第 $i$ 个粒径团聚体所占比例,%。

为对比近地表水文情形(土壤水分饱和、渗流和水势差)对团聚体流失的影响,采用贡献率进行量化,具体计算公式如下:

$$S_C = \frac{E_{i_1 s_2} - E_{i_1 s_1}}{E_{i_2 s_2} - E_{i_1 s_1}} \times 100\% \quad (6)$$

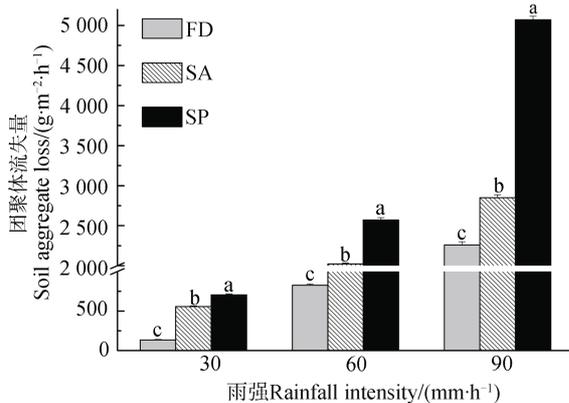
式中, $S_C$ 为贡献率,%; $E_{is}$ 为团聚体流失量, $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ; $i$ 为雨强1,2; $S$ 为近地表水文条件(自由入渗、土壤饱和或渗流)。

利用SPSS18.0软件下的方差分析(ANOVA)对近地表水文条件间的团聚体流失量、各粒级团聚体流失比例、富集率和流失团聚体特征指标进行显著性检验,基于最小显著差法(LSD)开展多重比较,并在 $0.05$ 水平上达到显著。采用Origin 8.5进行绘图。

## 2 结 果

### 2.1 近地表水文条件下团聚体流失量

30、60 和 90  $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$  雨强下，近地表水文条件间团聚体的流失量差异均表现为：渗流>土壤饱和>自由入渗（图 2）。30  $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$  雨强下，与自由入渗相比，土壤饱和与渗流条件下的团聚体流失量分别显著增加 3.12 倍和 4.22 倍，60 和 90  $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$  雨强下相应增加率分别为 1.44 倍和 2.10 倍、0.26 倍和 1.24 倍。说明土壤饱和与渗流的存在显著增大了团聚体流失强度。这是因为：（1）随土壤水分达到饱和，不同粒径团聚体间的黏结力不断被削弱<sup>[4]</sup>，且削弱程度与水势梯度息息相关<sup>[23]</sup>，而渗流的存在更为明显地增加了垄沟与垄面的水势梯度；（2）土壤饱和与渗流的存在通过增加流速等改变径流水动力特性<sup>[23]</sup>，从而可引起侵蚀营力的增强，进而导致团聚体破碎和搬运能力增强。



注：图中不同字母表示在  $P<0.05$  水平差异显著。FD：自由入渗；SA：土壤水分饱和；SP：渗流。下同。Note: Mean values for a treatment followed by identical letters are not significantly different at the 95% confidence level according to LSD tests. FD: free drainage condition; SA: soil saturation condition; SP: seepage condition. The same below.

图 2 不同近地表水文条件下团聚体流失量

Fig. 2 Soil aggregate loss under different soil surface hydrological conditions

3 种近地表水文条件下，团聚体流失量均随雨强的增加而增大，且雨强对团聚体流失的影响在自由入渗条件下体现的最明显。自由入渗条件下，60 和 90  $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$  雨强下的团聚体流失量较 30  $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$  雨强分别增加 5.12 倍和 15.72 倍，而土壤饱和与渗流条件下，60 和 90  $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$  雨强下团聚体的流失量分

别为 30  $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$  雨强的 2.63 倍和 4.12 倍、2.64 倍和 6.19 倍。这是因为自由入渗条件下，随雨强增大，雨滴打击对团聚体的破碎力度增强；土壤饱和与渗流条件下，土壤颗粒间的黏结力减弱导致大雨强下更易形成致密的结皮层，且径流深度的增加在一定程度上限制了雨滴打击对团聚体的破碎<sup>[13]</sup>，从而削弱了雨强对团聚体流失的作用强度。

### 2.2 近地表水文条件下团聚体流失分布

不同粒径团聚体破碎机制的不同，将导致土壤团聚体流失的差异<sup>[24-25]</sup>。侵蚀过程中  $>5$  mm 团聚体流失量极少，可忽略不计，说明该粒径团聚体在侵蚀过程中发生了严重破碎。3 种近地表水文条件下， $<0.25$  mm 团聚体是主要的流失粒级，流失比例为 49.77%~68.57%，这与平坡红壤和黑土坡面的研究结果一致<sup>[26-27]</sup>。然而，近地表水文条件间 2~5、1~2、0.5~1、0.25~0.5 和  $<0.25$  mm 团聚体的流失比例均存在显著差异（图 3）。其中，2~5 mm 团聚体的流失比例表现为渗流>土壤饱和>自由入渗，而 1~2 和 0.5~1 mm 团聚体的流失比例表现为：土壤饱和>渗流>自由入渗。与自由入渗相比，土壤饱和和条件下 2~5、1~2 和 0.5~1 mm 团聚体的流失比例分别增加 93.39%、121.19%和 83.35%，而渗流条件下相应增加率分别为 106.35%、108.36%和 46.74%。0.25~0.5 和  $<0.25$  mm 团聚体的流失比例表现为：自由入渗>渗流>土壤饱和。土壤饱和与渗流条件下 0.25~0.5 mm 团聚体的流失比例较自由入渗均显著减少 90%以上，而  $<0.25$  mm 团聚体的减少率仅为 5.09%~20.04%。可见，随土壤饱和和  $>0.5$  mm 团聚体的流失强度逐渐增大，而  $<0.5$  mm 团聚体的流失却呈减少趋势，且 0.25~0.5 mm 团聚体流失的减小程度最明显。

不同近地表水文条件下，雨强对各粒径团聚体流失比例的影响不同。自由入渗条件下， $>0.5$  mm 团聚体的流失比例随雨强的增加而增大，但  $<0.5$  mm 团聚体的流失比例呈减小趋势，这与平坡黑土坡面的研究结果不一致<sup>[11]</sup>。土壤饱和条件下， $>0.5$  mm 团聚体的流失比例随雨强增加呈先增大后减小趋势，而  $<0.5$  mm 团聚体的流失比例呈相反趋势。渗流条件下，2~5、1~2 和 0.25~0.5 mm 团聚体的流失比例随雨强增加呈先增大后减小趋势，而 0.5~1 mm 和  $<0.25$  mm 团聚体的流失比例呈相反趋势。进一步分析发现，雨强对 2~5 mm 团聚体流失的影

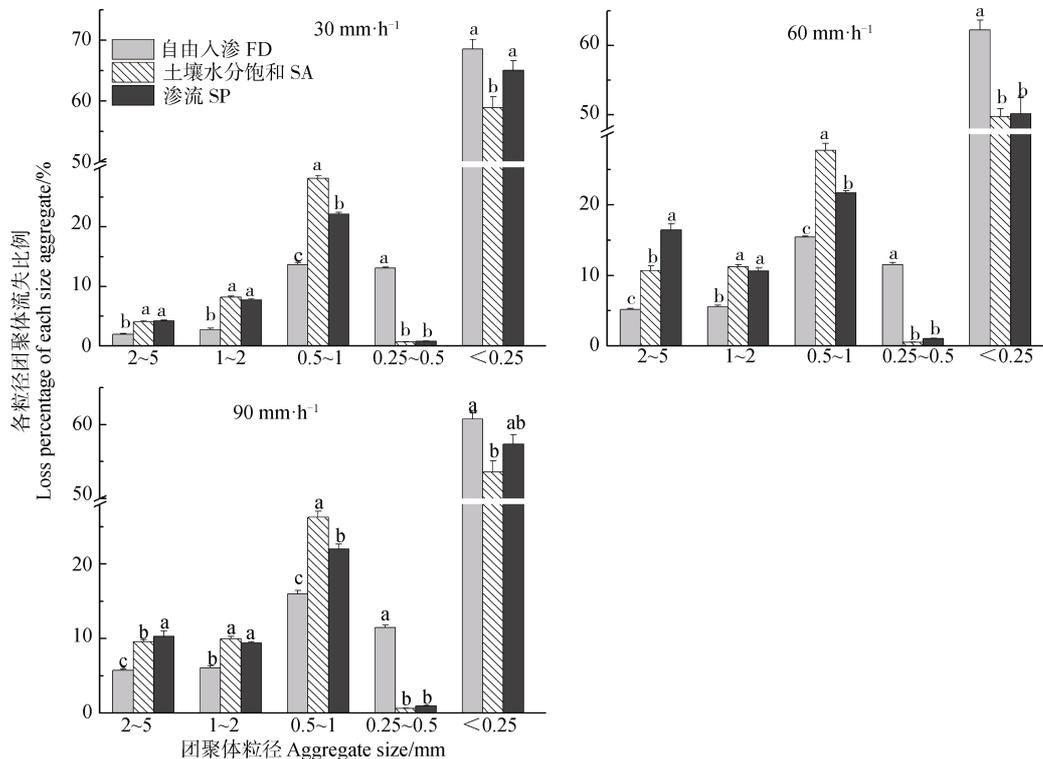


图3 不同近地表水文条件下各粒径团聚体的流失比例

Fig. 3 Loss percentage for each size aggregate varied soil surface hydrological conditions

响最大。当雨强从  $30 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  增加至  $60 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ ，自由入渗、土壤饱和与渗流条件下， $2\sim 5 \text{ mm}$  团聚体流失比例的变化幅度分别为 166.16%、165.33% 和 170.61%，而雨强从  $60 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  增加至  $90 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  相应变化率分别为 11.07%、10.49% 和 10.12%。这是因为，径流搬运能力随雨强的增加而增大，导致一部分大团聚体尚未发生破碎即被搬运，从而使其流失比例增加。

### 2.3 近地表水文条件下团聚体流失富集率

富集率反映了雨滴打击和径流对团聚体的破坏、搬运的最终结果<sup>[28]</sup>。通过分析各粒径团聚体的富集率，可了解土壤团聚体在侵蚀过程中的分选性。3 种近地表水文条件下， $<0.25 \text{ mm}$  团聚体的富集率大于 1，说明该粒径团聚体发生了富集（图 4）。而且，自由入渗与渗流条件间、自由入渗与土壤饱和间除  $60 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  雨强， $<0.25 \text{ mm}$  团聚体的富集率均无显著差异。说明土壤饱和与渗流的存在未增强微团聚体的富集程度。

近地表水文条件间各粒径大团聚体的富集率差异显著。自由入渗、土壤饱和与渗流条件下发生富集的大团聚体粒径分别为  $0.25\sim 0.5$ 、 $0.5\sim 1$  和  $1\sim 2$ 、 $2\sim 5 \text{ mm}$ 。可见，随土壤饱和，发生富集的团聚体

粒径逐渐增大。此外， $2\sim 5 \text{ mm}$  团聚体的富集率表现为渗流>土壤饱和>自由入渗，渗流与土壤饱和条件下  $2\sim 5 \text{ mm}$  团聚体的富集率较自由入渗分别增加 37.46%~215.80% 和 67.23%~106.67%。土壤饱和与渗流条件下  $1\sim 2$  和  $0.5\sim 1 \text{ mm}$  团聚体的富集率均显著高于自由入渗，增加率分别为 61.83%~215.80% 和 23.77%~171.32%。然而，土壤饱和与渗流条件下  $0.25\sim 0.5 \text{ mm}$  团聚体的富集率显著低于自由入渗，减少率分别为 45.07%~54.92% 和 56.40%~68.90%。可见，土壤饱和与渗流的存在增加了对  $>0.5 \text{ mm}$  团聚体的搬运能力，且导致了  $0.5\sim 2$  和  $2\sim 5 \text{ mm}$  团聚体的富集。

### 2.4 近地表水文条件下流失团聚体特征指标

近地表水文条件间流失团聚体的 MWD 和 GMD 均表现为：土壤饱和>渗流>自由入渗（图 5）。与自由入渗相比，土壤饱和与渗流条件下的 MWD 分别显著增加 41.38%~62.45% 和 39.71%~92.37%，而相应的 GMD 分别增加 38.96%~52.81% 和 24.30%~64.64%。说明土壤达到饱和后，流失团聚体粒径增大，从而导致团聚体团聚程度增强，进而致使流失团聚体稳定性提高。自由入渗条件下流失团聚体的 MWSSA 显著高于土壤饱和与渗流，增加

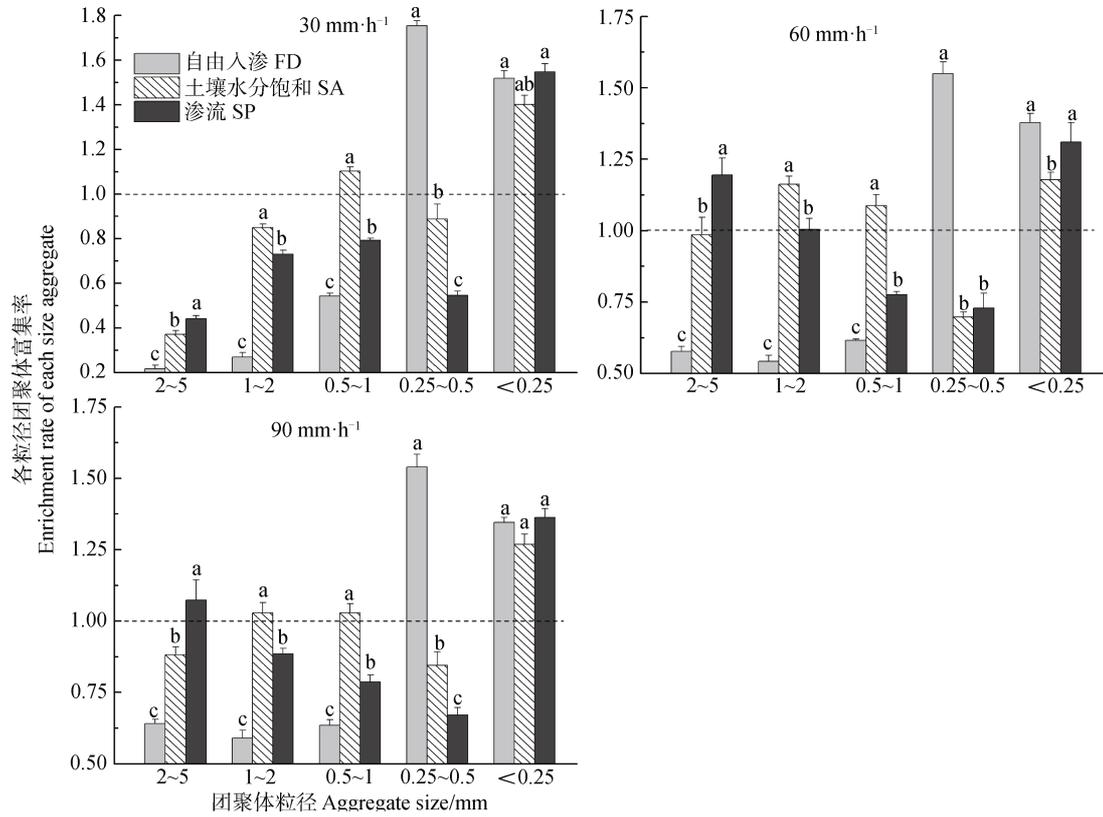


图 4 不同近地表水文条件下各粒径团聚体的富集率

Fig. 4 Enrichment rate for each size aggregate varied soil surface hydrological conditions

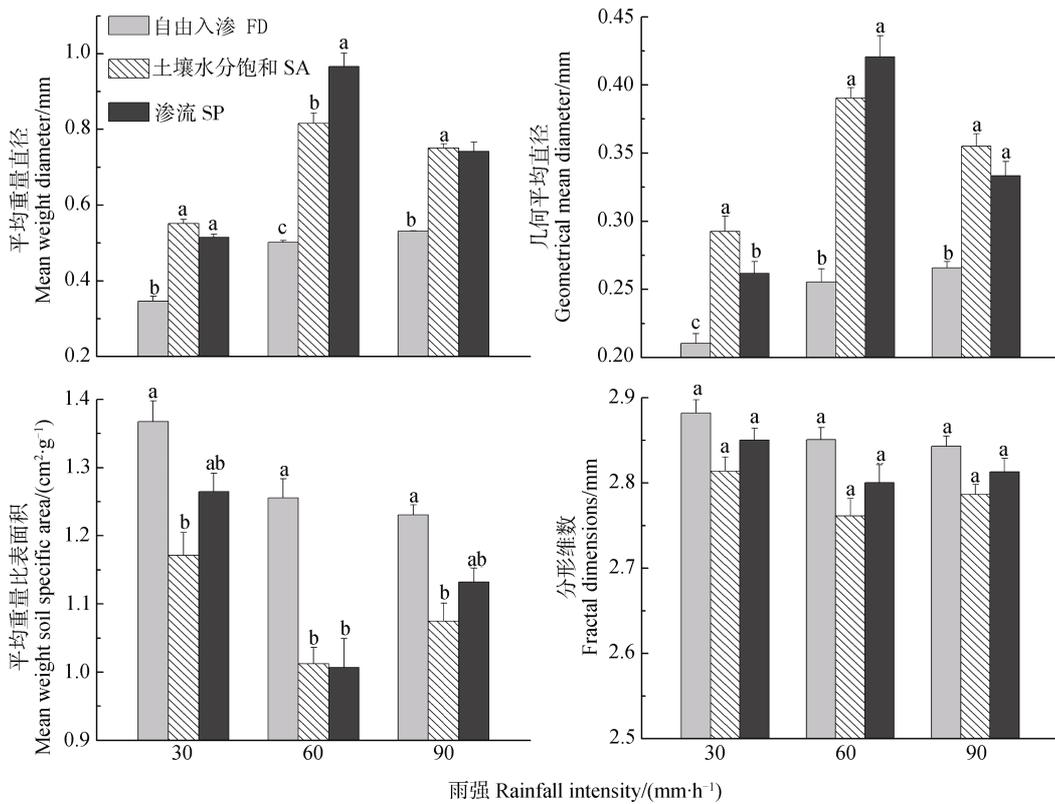


图 5 不同近地表水文条件下流失团聚体特征指标

Fig. 5 Characteristic indices of lost soil aggregate varied soil surface hydrological conditions

率分别为 12.67%~19.36%和 7.51%~19.81%，但土壤饱和与渗流条件间无显著差异。说明土壤未饱和状态下，侵蚀泥沙中小粒级团聚体含量较大，流失团聚体的稳定性较弱。然而，近地表水文条件间流失团聚体的  $D$  差异不显著。说明土壤饱和与渗流的存在并未对流失团聚体的分散度产生明显影响。4 个流失团聚体特征指标中，近地表水文条件间流失团聚体的 MWD 差异最大。说明土壤饱和与渗流条件下主要通过增强大团聚体的搬运能力来改变团聚体的流失特征。

为能较好反映横坡垄作措施不同近地表水文条件下团聚体的流失特征，本文分析了团聚体流失量与流失团聚体特征指标间的相关关系（表 1）。自由入渗与土壤饱和条件下，团聚体流失量与 MWD 呈显著正相关关系，相关系数分别为 0.819 和 0.826；渗流条件下，团聚体流失量与  $D$  呈显著的负相关关系，相关系数达 0.832。表明平均重量直径是反映横坡垄作措施自由入渗与土壤饱和条件下团聚体流失的重要指标，而渗流条件下则为分形维数。

### 3 讨论

#### 3.1 横坡垄作措施下近地表水文条件对团聚体流失的影响

自由入渗、土壤饱和与渗流代表了坡面不同部位的水分特征。渗流因易于在坡耕地和河岸侵蚀严重的区域出现，得到了广泛重视。然而，横坡垄作措施下，垄沟内积水的发生和漫流的存在<sup>[14, 16-17]</sup>，可能导致该措施下近地表水文条件对团聚体流失的影响区别于传统耕作坡面。本文研究结果表明，土壤饱和与渗流的存在增强了团聚体流失强度，这与以往的研究结

果一致<sup>[8]</sup>。但是，土壤饱和与渗流条件下团聚体流失量分别为自由入渗条件下的 1.26 倍~4.12 倍和 2.24 倍~5.22 倍（图 2），显著高于平坡措施下黑土、紫色土和红壤坡面的模拟研究结果。An 等<sup>[7]</sup>发现黑土坡面  $60 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  雨强下，土壤饱和与渗流条件下的流失量较自由入渗分别增加 11.4%和 68.1%，但自由入渗与土壤饱和间的流失量无显著差异；崔艳平<sup>[6]</sup>认为  $60 \text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$  雨强下，土壤饱和与渗流条件下紫色土的流失量分别为自由入渗的 1.7 倍和 3.1 倍，而相应红壤流失量分别增加 1.5 倍和 2.3 倍。这是因为：（1）横坡垄作措施下，垄沟内积水形成垄沟与垄面土壤的水势梯度，且土壤饱和与渗流条件下水势梯度差较自由入渗更为明显<sup>[14]</sup>；（2）横坡垄作措施下，当积水超过垄沟内蓄水能力时，易发生漫流，因其具有较高水头且为股流，剪切力较强，可剥蚀垄面土壤，且土壤饱和与渗流条件下漫流发生时间更为短暂，从而可加大团聚体流失强度。说明，横坡垄作措施下更应注重坡面排水，可布置汇流型和分流型截排水沟道<sup>[28]</sup>，或者通过增加地面覆盖（秸秆覆盖、植物篱等）增大入渗，以便更好地开展坡面土壤团聚体流失防控。

土壤饱和与渗流的存在均可通过降低团聚体抗张强度和土壤颗粒间的黏聚力<sup>[29]</sup>，增加团聚体流失量，但提高土壤含水量（土壤非饱和和过渡至饱和）或增加水势强度（土壤饱和基础上，提高水势）对团聚体流失的影响或许不同。本文以贡献率（式（6））为量化指标，定量评价土壤水分饱和、水势增加对团聚体流失的作用强度。其中，土壤饱和、渗流与自由入渗条件间团聚体流失差异分别作为土壤水分饱和、渗流的贡献，渗流与土壤饱和条件间的差异作为水势差的贡献。同一降雨条件下，贡献率表现

表 1 流失土壤团聚体的特征指标与团聚体流失量的相关关系

Table 1 Correlation relationship between characteristic indices and soil aggregate loss

近地表水文条件		流失土壤团聚体特征指标 Characteristic indices			
Soil surface hydrological condition		MWD/mm	GWD/mm	MWSSA/( $\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$ )	$D$ /mm
FD	流失量 <sup>①</sup>	0.819*	0.725	-0.677	-0.349
SA	流失量	0.826*	0.752	-0.689	-0.636
SP	流失量	0.428	0.320	-0.373	-0.832*

注：\* 在 0.05 水平（双侧）上显著相关。MWD、GMD、MWSSA 和  $D$  分别表示平均重量直径、几何平均直径、平均重量比表面积和分形维数。Note: \* Significant correlation at 0.05 level (bilateral). MWD, GMD, MWSSA, and  $D$  were mean weight diameter, geometrical meandiameter, mean weight soil specific area, and fractal dimensions, respectively. ①Soil aggregate loss

表 2 土壤水分饱和、渗流和水势差对团聚体流失的贡献

Table 2 Contribution of soil water saturation, seepage, and water potential difference for soil aggregate loss

雨强变化 Change of rainfall intensity / (mm·h <sup>-1</sup> )	土壤水分饱和贡献率 Contribution rate of soil water saturation/%	渗流贡献率 Contribution rate of seepage/%	水势差贡献率 Contribution rate of water potential difference/%
30~60	22.34a	23.42a	7.38c
60~90	59.04a	41.06b	17.97c
30~90	15.52a	11.55b	3.29c

注: 表中不同字母表示在  $P<0.05$  水平差异显著。Note: Mean values for a treatment followed by identical letters are not significantly different at the 95% confidence level according to LSD tests.

为土壤水分饱和>渗流>水势差(表2)。土壤水分饱和与渗流存在的贡献率较水势差分别显著增加 2.02 倍~3.71 倍和 1.28 倍~2.51 倍。表明土壤水分含量的增加对团聚体的流失起至关重要的作用, 但水势差的提高对团聚体流失的影响较小。这是因为: (1) 团聚体破碎程度随土壤前期含水率增大而减小<sup>[3]</sup>; (2) 土壤达到饱和后, 进一步增加水势可保护径流层以下的团聚体免于降雨打击破坏, 因为雨滴打击对土壤颗粒的分散只在一定径流深度起作用, 当超过了临界水深后土壤颗粒分散能力随水深的增加而降低<sup>[13]</sup>; (3) 水势差的增加致使泥沙浓度增大<sup>[7]</sup>, 可提高土壤颗粒碰撞的机会<sup>[12]</sup>, 导致小颗粒在无机胶结剂作用下会重新团聚在一起, 进而可削弱细颗粒的流失强度。

### 3.2 横坡垄作措施下近地表水文条件对团聚体流失分布的影响

近地表水文条件因可改变颗粒的受力方式<sup>[7, 29]</sup>、径流水动力特性<sup>[30]</sup>, 成为影响团聚体流失的重要因素。然而, 团聚体破碎程度与团聚体粒径的大小密切相关<sup>[31]</sup>, 粒径较小的团聚体因内部应力更强, 因此颗粒间结合的更为紧密<sup>[32]</sup>, 且团聚体的运动方式和输移距离也取决于团聚体粒径的大小<sup>[33]</sup>。说明近地表水文条件可导致不同粒径团聚体流失的差异, 进而致使侵蚀泥沙中团聚体分布发生改变。

本文研究结果表明, 近地表水文条件间 5 个粒径团聚体的流失比例和富集率均存在显著差异(图3)。但是自由入渗条件下 0.25~0.5 mm 团聚体的流失比例显著高于土壤饱和与渗流条件。这可能是因为土壤达到饱和后, 0.25~0.5 mm 团聚体间黏结力急剧下降, 在雨滴打击作用下更易破碎, 也可能由于 0.25~0.5 mm 团聚体在侵蚀过程中发生了碰撞, 导

致其破碎成<0.25 mm 团聚体或团聚成更大粒径的颗粒。然而, 土壤饱和与渗流条件下<0.25 mm 团聚体的流失比例较自由入渗分别减少 11.82%~20.04% 和 5.09%~19.44%(图3), 且土壤饱和与渗流条件下 0.25~0.5 mm 团聚体的富集率小于 1(图4)。说明土壤饱和与渗流条件下, 0.25~0.5 mm 团聚体碰撞过程中发生团聚的可能性更大。此外, 土壤饱和与渗流的存在导致>5 mm 团聚体的破碎程度增强, 从而为 2~5 mm、0.5~1 和 1~2 mm 团聚体的流失提供了来源, 进而导致>0.5 mm 团聚体的流失比例显著高于自由入渗条件(图3)。

土壤饱和与渗流条件下>0.5 mm 团聚体流失比例的增加, 导致其发生了一定的富集(图4)。但是土壤饱和条件下, 雨滴打击主要对 2~5 mm 团聚体进行拆分, 且该粒径不易发生迁移<sup>[34]</sup>, 因此仅导致 0.5~1 和 1~2 mm 团聚体发生了富集; 渗流条件下, 垄面径流与渗流的共同作用增大了对 2~5 mm 团聚体的搬运能力, 从而导致其发生富集。然而, 自由入渗条件下发生富集的则为 0.25~0.5 mm 团聚体, 但以往平坡坡面的研究表明, 侵蚀泥沙中发生富集的为 0.004 3~0.013 2 mm<sup>[35]</sup>或<0.02 mm 的团聚体<sup>[36]</sup>。这是因为横坡垄作措施下垄沟内的积水延长了大团聚体湿润时间, 引发其破碎程度增大, 且积水诱发的漫流为股流具有较强的搬运能力。

本研究采用的土槽面积为 1.6 m×1.6 m, 且基于两根土垄开展的模拟降雨试验。因此, 限于研究尺度的问题, 无法充分模拟坡面径流的冲刷侵蚀过程, 从而可能削弱径流对团聚体的搬运能力, 尤其是土壤饱和和后对较大粒径团聚体的搬运。此外, 野外田间垄沟在偏离等高线的情形下, 雨水可能会在垄沟内低洼区域汇聚也可能沿着垄沟向两侧蔓延, 后者会延长漫流

发生时间,进而可削弱团聚体的流失强度。因此,为进一步探明近地表水文条件对团聚体流失的影响,还需结合野外田间多垄情形下的径流观测试验。

## 4 结 论

基于横坡垄作坡面,利用可同时调节垄向和坡面坡度的土槽开展室内模拟降雨试验,研究了自由入渗、土壤饱和与渗流 3 种近地表水文条件下团聚体的流失特征,主要结论如下:与自由入渗相比,土壤饱和与渗流条件下的团聚体流失量分别显著增加 0.26 倍~3.12 倍和 1.24 倍~4.22 倍,且改变土壤饱和状态较增加水势更能显著增强团聚体流失。土壤饱和与渗流的存在使 $>0.5$  mm 团聚体的流失比例和富集率分别增加 46.74%~121.19%和 23.77%~215.80%,且分别增大了 0.5~2 和 2~5 mm 团聚体的富集程度。然而,土壤饱和后 0.25~0.5 mm 团聚体流失比例和富集率分别减少 90%以上和 45.07%~68.90%,这主要是因为 0.25~0.5 mm 团聚体在侵蚀过程中发生了团聚。表征流失团聚体的 4 个指标中(MWD、GMD、MWSSA 和  $D$ ),近地表水文条件间 MWD 的差异最大,且 MWD 是反映自由入参与土壤饱和条件下团聚体流失的重要指标,而渗流条件下则为  $D$ 。此外,团聚体流失量随雨强的增加而增大,且该影响在自由入渗条件下体现的最明显,尤其是对 2~5 mm 团聚体。

## 参考文献 (References)

- [ 1 ] Yan F L, Shi Z H, Li Z X, et al. Estimating interrill soil erosion from aggregate stability of Ultisols in subtropical China[J]. Soil and Tillage Research, 2008, 100 ( 1/2 ): 34—41.
- [ 2 ] Zhang G H, Hu J J. Review on the influence factors of soil detachment process by overland flow and its mechanism[J]. Advances in Water Science, 2019, 30( 2 ): 294—304. [张冠华, 胡甲均. 径流驱动土壤分离过程的影响因素及机制研究进展[J]. 水科学进展, 2019, 30 ( 2 ): 294—304.]
- [ 3 ] 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 CSAE, 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.]
- [ 4 ] Huang C H, Laften J M. Seepage and soil erosion for a clay loam soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60 ( 2 ): 408—416.
- [ 5 ] Lei T W, Zhang Q W, Yan L J. Physical model of rill erosion. Beijing: Science Press, 2009. [雷廷武, 张晴雯, 闫丽娟. 细沟侵蚀物理模型. 北京: 科学出版社, 2009.]
- [ 6 ] Cui Y P. Effect of near-surface soil hydrological conditions on soil erosion and nutrient losses at hillslopes[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2009. [崔艳平. 近地表土壤水文条件对坡面土壤侵蚀和氮、磷养分流失的影响研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2009.]
- [ 7 ] An J, Zheng F L, Römkens M J M, et al. The role of soil surface water regimes and raindrop impact on hillslope soil erosion and nutrient losses[J]. Natural Hazards, 2013, 67 ( 2 ): 411—430.
- [ 8 ] Yang C, Su Z A, Ma J, et al. Effects of discard soil in mine on soil erodibility under different hydrological states—an example of longmang mine of Yanbian County, Panzhihua City[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30 ( 6 ): 67—72. [杨超, 苏正安, 马菁, 等. 不同近地表水文条件下矿山弃土对土壤细沟可蚀性的影响——以攀枝花盐边县龙蟒矿山为例[J]. 水土保持学报, 2016, 30 ( 6 ): 67—72.]
- [ 9 ] Nouwakpo S K, Huang C H. The role of subsurface hydrology in soil erosion and channel network development on a laboratory hillslope[J]. Soil Science Society of America Journal, 2012, 76 ( 4 ): 1197—1211.
- [ 10 ] Lu J, Zheng F L, An J, et al. An experimental study of Mollisol aggregate loss characteristics during rainfall erosion processes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36 ( 8 ): 2264—2273. [卢嘉, 郑粉莉, 安娟, 等. 降雨侵蚀过程中黑土团聚体流失特征[J]. 生态学报, 2016, 36 ( 8 ): 2264—2273.]
- [ 11 ] Wen L L, Zheng F L, Shen H O, et al. Characteristics of soil aggregate loss in croplands in the typical black soil region of northeast China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015, 52 ( 3 ): 489—498. [温磊磊, 郑粉莉, 沈海鸥, 等. 东北典型黑土区农耕地团聚体流失特征[J]. 土壤学报, 2015, 52 ( 3 ): 489—498.]
- [ 12 ] Qian J, Zhang L P, Wang W Y. The relationship between soil aggregates and eroded sediments from sloping vegetated red soils of South China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38 ( 5 ): 1590—1599. [钱婧, 张丽萍, 王文艳. 红壤坡面土壤团聚体特性与侵蚀泥沙的相关性[J]. 生态学报, 2018, 38 ( 5 ): 1590—1599.]
- [ 13 ] Gao B, Todd Walter M, Steenhuis T S, et al. Rainfall induced chemical transport from soil to runoff: Theory and experiments[J]. Journal of Hydrology, 2004, 295 ( 1/4 ): 291—304.
- [ 14 ] Liu L, Liu Q J, An J, et al. Rill morphology and deposition characteristics on row sideslopes under seepage conditions[J]. Soil Use and Management, 2015, 31 ( 4 ): 515—524.
- [ 15 ] Wang P F, Zheng Z C, Zhang X Z, et al. Characteristics and influencing factors of rill erosion in slope land with contour ridges during maize growing season[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53 ( 4 ): 869—880. [王鹏飞,

- 郑子成, 张锡洲, 等. 玉米季横坡面细沟侵蚀特征及其影响因素[J]. 土壤学报, 2016, 53 (4): 869—880.]
- [ 16 ] Liu Q J, An J, Wang L Z, et al. Influence of ridge height, row grade, and field slope on soil erosion in contour ridging systems under seepage conditions[J]. Soil and Tillage Research, 2015, 147: 50—59.
- [ 17 ] Liu Q J, An J, Zhang G H, et al. The effect of row grade and length on soil erosion from concentrated flow in furrows of contouring ridge systems[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 160: 92—100.
- [ 18 ] Yu X X, Li Z W, Liu Q J, et al. Output characteristics of rainfall runoff *Phosphorus* pollution from a typical small watershed in Yimeng mountainous area[J]. Environmental Science, 2012, 33 (8): 2644—2651. [于兴修, 李振伟, 刘前进, 等. 沂蒙山区典型小流域降雨径流的磷素输出特征[J]. 环境科学, 2012, 33 (8): 2644—2651.]
- [ 19 ] Zhang X G, Wang C H, Cheng T T, et al. Distribution characteristics of erosive rainfall in Yaoxiang small watershed of Shandong Province[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2017, 15 (1): 128—133. [张兴刚, 王春红, 程甜甜, 等. 山东省药乡小流域侵蚀性降雨分布特征[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15 (1): 128—133.]
- [ 20 ] Xie Y, Lin X J, Liu Y N, et al. Calibration of simulated rainfall intensity and its spatial distribution for trough rainfall simulator[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28 (4): 1—6. [谢云, 林小鹃, 刘英娜, 等. 槽式摆喷头下喷式人工模拟降雨机的雨强及其空间分布率定[J]. 水土保持通报, 2008, 28 (4): 1—6.]
- [ 21 ] Wang E H, Zhao Y S, Chen X W. Effect of antecedent moisture content on aggregate size distribution and characteristics of black soil compacted mechanically[J]. Acta Pedologica Sinica, 2009, 46 (2): 241—247. [王恩姮, 赵雨森, 陈祥伟. 前期含水量对机械压实后黑土团聚体特征的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46 (2): 241—247.]
- [ 22 ] Yang P L, Luo Y P, Shi Y C. Soil fractal features characterized by the weight distribution of soil particles [J]. Chinese Science Bulletin, 1993, 38(20): 1896—1899. [杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. 科学通报, 1993, 38 (20): 1896—1899.]
- [ 23 ] Howard A D, McLane C F III. Erosion of cohesionless sediment by groundwater seepage[J]. Water Resources Research, 1988, 24 (10): 1659—1674.
- [ 24 ] Abu-Hamdeh N H, Abo-Qudais S A, Othman A M. Effect of soil aggregate size on infiltration and erosion characteristics[J]. European Journal of Soil Science, 2006, 57 (5): 609—616.
- [ 25 ] Christensen B T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover[J]. European Journal of Soil Science, 2001, 52 (3): 345—353.
- [ 26 ] Lu J, Zheng F L, Li G F, et al. The effects of raindrop impact and runoff detachment on hillslope soil erosion and soil aggregate loss in the Mollisol region of Northeast China[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 161: 79—85.
- [ 27 ] Hao H X, Wang J G, Guo Z L, et al. Water erosion processes and dynamic changes of sediment size distribution under the combined effects of rainfall and overland flow[J]. Catena, 2019, 173: 494—504.
- [ 28 ] He B H, Liang Y L, Huang H. Characteristic of soil micro-aggregates loss on slopes with different surface water drainage patterns[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33 (13): 151—158. [何丙辉, 梁艳玲, 黄欢. 坡面不同截-排水沟布置方式下土壤微团聚体流失特征[J]. 农业工程学报, 2017, 33 (13): 151—158.]
- [ 29 ] Munkholm L J, Kay B D. Effect of water regime on aggregate-tensile strength, rupture energy, and friability[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66 (3): 702—709.
- [ 30 ] An J, Zheng F L, Li G F, et al. Effect of raindrop impact on nutrient losses under different near-surface soil hydraulic conditions on black soil slope[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31 (24): 7579—7590. [安娟, 郑粉莉, 李桂芳, 等. 不同近地表土壤水文条件下雨滴打击对黑土坡面养分流失的影响[J]. 生态学报, 2011, 31 (24): 7579—7590.]
- [ 31 ] Wang J G, Li Z X, Cai C F, et al. Particle size and shape variation of Ultisol aggregates affected by abrasion under different transport distances in overland flow[J]. Catena, 2014, 123: 153—162.
- [ 32 ] Asadi H, Moussavi A, Ghadir H, et al. Flow-driven soil erosion processes and the size selectivity of sediment[J]. Journal of Hydrology, 2011, 406 (1/2): 73—81.
- [ 33 ] Zhou Y Y, Wang E H, Chen X W. Splash erosion and selective characteristics of aggregate for typical black soil under artificial rainfall condition[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22 (6): 176—179. [周一杨, 王恩姮, 陈祥伟. 模拟降雨条件下黑土溅蚀与团聚体分选特征[J]. 水土保持学报, 2008, 22 (6): 176—179.]
- [ 34 ] Pieri L D, Bittelli M, Hanuskova M, et al. Characteristics of eroded sediments from soil under wheat and maize in the North Italian Apennines[J]. Geoderma, 2009, 154 (1/2): 20—29.
- [ 35 ] 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.]
- [ 36 ] Wang L, Fang N F, Yue Z J, et al. Raindrop size and flow depth control sediment sorting in shallow flows on steep slopes[J]. Water Resources Research, 2018, 54 (12): 9978—9995.

(责任编辑: 檀满枝)