

# 不同降雨强度下土壤结皮强度对侵蚀的影响

路培<sup>1</sup>, 王林华<sup>1</sup>, 吴发启<sup>2\*</sup>

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100; 2. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100)

**摘要:** 为定量分析土壤结皮对坡面侵蚀的影响, 该文选择塿土、黄绵土、黑垆土和黄壤土 4 类土壤, 分析其在 3 种雨强 (60、90、120 mm/h) 下的结皮强度变化规律。结果表明, 当土壤含水率高于 30% 时, 不同降雨强度下结皮强度差异不显著 ( $P>0.05$ ), 当含水率小于 30% 时, 结皮强度随降雨强度增大而增强。以杨凌塿土 10° 坡面为例, 进行坡面人工模拟降雨试验, 分析计算不同强度结皮坡面的侵蚀产沙、径流剪切力、阻力系数以及流速, 结果表明: 结皮对坡面产流的影响并不显著, 但其存在有效地减少坡面的侵蚀产沙量。结皮存在能有效地减少坡面产沙量, 无结皮坡面的产沙量是结皮坡面产沙量的 1.24~8.72 倍。相同降雨条件下, 结皮强度越大, 其产沙量越小。进一步通过灰色关联分析得出: 随着坡面结皮强度增加, 水流功率对坡面侵蚀的作用效益不断减小, 而阻力系数的作用效益增加, 即水流增加产沙的正效应不断减弱; 另一方面, 结皮强度增大使得坡面土壤抗蚀性增强, 因此, 结皮强度越大, 坡面侵蚀量将大幅度减少。研究可为准确有效预报坡面土壤侵蚀提供重要依据。

**关键词:** 流量; 侵蚀; 土壤; 结皮强度; 径流功率; 阻力系数; 流速

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.08.019

中图分类号: S157

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-08-0141-06

路培, 王林华, 吴发启. 不同降雨强度下土壤结皮强度对侵蚀的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8): 141-146.

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.08.019 <http://www.tcsae.org>

Lu Pei, Wang Linhua, Wu Faqi. Effect of soil crust strength on erosion under different rainfall intensity[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(8): 141-146. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.08.019 <http://www.tcsae.org>

## 0 引言

土壤结皮是指表面土壤团聚体在理化作用下破碎形成的致密结构表层, 其容重大, 孔隙度较小, 导水率差<sup>[1-3]</sup>。影响结皮形成的因素主要包括土壤理化性质和降雨, 前人对此已进行了大量的研究并已取得一定的成果, 但在结皮对侵蚀的影响作用方面仍存在着争议, 部分学者认为结皮能有效的减少侵蚀, 一些结论则认为结皮会增加坡面侵蚀效应。Chamizo 等<sup>[4]</sup>通过研究得出在稳定侵蚀条件下, 结皮的存在会增加侵蚀。程琴娟等<sup>[5-6]</sup>认为结皮坡面增加侵蚀的原因是: 结皮使得坡面的径流剪切力的增加值远大于土壤抗蚀性的增加, 完全结皮坡面的土壤侵蚀效应率要高出未完全结皮坡面的土壤侵蚀效应率。Epstein 等<sup>[7]</sup>得出土壤可蚀性是结皮形成程度的函数, 并且土壤流失量一般随结皮形成而减少。吴发启等<sup>[8]</sup>得出结皮的存在使产流时间提早, 结皮径流峰值早于无结皮坡面, 但产沙量相较于无结皮坡面较小。Moore 等<sup>[9]</sup>通过试验得出, 土壤结皮的存在能有效地减少坡面侵蚀, 且减

蚀作用主要发生于稳定状态的侵蚀过程。

结皮的存在主要从 2 方面影响着侵蚀过程: 1) 结皮的存在有效地提高了土表的抗剪强度; 2) 结皮的存在会影响坡面流的形态及其水动力学特征, 而径流冲刷力是侵蚀过程中的动力。土表的抗剪强度与径流冲刷力二者间的平衡关系是影响土壤侵蚀过程的重要因素<sup>[10-12]</sup>。

目前多数研究只是通过对比分析结皮坡面和无结皮坡面的产沙、产流以及水动力学特征来分析结皮的存在对侵蚀产生的影响效应, 而对于不同强度结皮的产沙产流特征及其水动力学特征变化规律的研究还鲜有报道, 并且对于各水力学参数与侵蚀量的相关性强弱没有给出定量评估。因此, 本文通过对比分析不同结皮强度下的坡面产沙特征, 依据结皮强度变化和不同降雨条件下的水力学特征定量分析结皮对坡面侵蚀的影响效应, 进一步分析结皮坡面水力学参数的变化特征, 量化地描述各因素影响效应的强弱, 以期为准确有效地预报坡面土壤侵蚀提供重要依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试土样

试验所用土壤均为耕层土, 采集深度 0~10 cm。塿土、黑垆土、黄壤土、黄绵土分别采自于陕西杨陵、淳化西坡村、泥河沟、延安市, 采样地容重通常在 1.1~1.4 g/cm<sup>3</sup>之间<sup>[13]</sup>。土壤颗粒组成由马尔文激光粒度仪测定<sup>[14]</sup>, 阳离子交换量、有机质含量、微团聚体采用土壤农化分析常规分析法<sup>[15]</sup>。土壤各项理化性质如表 1 所示。

收稿日期: 2016-07-11 修订日期: 2017-03-10

基金项目: 国家自然科学基金项目“黄土坡耕地地表糙度对产汇流的影响研究”(41271288)

作者简介: 路培, 女, 陕西富平人, 博士生, 主要从事土壤侵蚀方面的研究。杨凌 西北农林科技大学水土保持研究所, 712100。

Email: lupei728@nwfu.edu.cn.

\*通信作者: 吴发启, 男, 陕西黄陵人, 教授, 博士生导师, 主要从事土壤侵蚀与流域管理方面的研究。杨凌 西北农林科技大学资源环境学院, 712100。Email: wufaqi@263.net

表1 试验土壤理化指标  
Table 1 Physicochemical index of tested soil

| 土壤类型<br>Soil type        | 颗粒组成<br>Particle composition/% |                                |                           | 阳离子交换<br>容量/<br>(cmol·kg <sup>-1</sup> ) | 有机质<br>质量分<br>数/<br>content/<br>% | 微团聚体<br>质量分数<br>Micro-aggr<br>egate<br>content<br>(<0.25<br>mm)/% |
|--------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---------------------------|--|-----------------------------------|---|
|                          | 砂粒<br>Sand<br>(0.05~<br>2 mm)  | 粉粒 Silt<br>(0.002~<br><0.05mm) | 黏粒 Clay<br>(>0.002<br>mm) |  |                                   |   |
| 壤土<br>Lou soil           | 4.45                           | 85.25                          | 10.29                     | 14.52                                    | 0.2998                            | 56.8  |
| 黄绵土<br>Loess soil        | 32.73                          | 62.16                          | 5.09                      | 12.59                                    | 0.0001                            | 27.3  |
| 黑垆土<br>Heilu soil        | 8.02                           | 79.16                          | 12.89                     | 9.86                                     | 0.7275                            | 40.1  |
| 黄壤土<br>Huangshan<br>soil | 5.08                           | 83.98                          | 10.92                     | 10.32                                    | 1.7478                            | 69.7  |

## 1.2 试验设计及过程

### 1.2.1 降雨强度对结皮影响的试验

本试验在西北农林科技大学水土保持与荒漠化防治实验室进行, 试验采用室内人工模拟降雨试验, 采用的人工降雨装置为中科院水利部水土保持研究所研制的下喷式降雨机, 喷头为 Fulljet GW 系列喷头, 安装高度为 4 m, 有效降雨面积约为 3 m×3 m, 平均雨滴直径 1.8 mm, 降雨动能是天然降雨动能的 75%, 降雨均匀度可达 80%, 可通过进水口处的压力表实现降雨强度的调节, 可调降雨强度范围为 20~160 mm/h。

根据当地降雨多集中于 6—9 月, 且多大到暴雨的特点, 设计雨强 60 mm/h 模拟大雨条件, 90 mm/h 模拟暴雨条件, 120 mm/h 降雨模拟特大暴雨条件<sup>[16-17]</sup>。本文选择 60、90、120 mm/h 降雨强度下, 分析 4 种土壤结皮强度随降雨强度变化规律。

试验土槽规格为长 150 cm, 宽 20 cm, 深 40 cm, 装填土壤之前, 土槽底部平铺 10 cm 深的天然沙, 保持良好的透水性。由于本试验使用的降雨机有效降雨面积为 3 m×3 m, 将该区域划分为 20 cm×20 cm 的小方格, 布设土盘, 进行降雨, 分别测定各土盘结皮强度, 率定出的结皮强度相近的区域只有 160 cm×60 cm, 为了使整个坡面结皮强度保持一致, 且充分利用有效降雨区域, 选取坡长为 1.5 m 的土槽。沙层上部覆盖纱布后填装土壤, 土层厚度 25 cm, 用抹子将坡面抹平, 保证坡面平整, 土槽内土壤容重控制 1.3~1.35 g/cm<sup>3</sup> 之间(注意: 填土时应逐层加土并压实, 使试验土体坚实均匀)。在 0°坡时, 设计前期降雨强度分别为 60、90、120 mm/h, 降雨时间 30 min, 降雨后每间隔 12 h 测定结皮强度的同时, 测定其对应含水率。

### 1.2.2 结皮强度对侵蚀影响的试验

进一步地, 以杨凌壤土为例, 分析 10°坡面上不同强度结皮对坡面侵蚀产沙过程影响, 在 3 种不同结皮强度(低强度结皮、中等强度结皮和高强度结皮) 分别进行不同雨强(60、90、120 mm/h) 的降雨试验。坡面降雨开始之前, 进行土槽含水率变化试验, 以确定坡面含水率变化特征。试验表明, 在降雨 120 h 后, 坡面土壤含水

率维持在 20%~25% 左右, 目测此时形成了结皮。因此, 在降雨前 120 h 时进行坡面降雨试验, 研究结皮强度对侵蚀的影响。

在 0°坡时, 设计前期降雨强度分别为 60、90、120 mm/h, 降雨时间 30 min, 以形成不同强度的结构结皮, 其中 1 个土槽用纱布覆盖形成无结皮对照(CK); 降雨结束后, 将土槽静置 120 h 之后, 使坡面含水率保持在 20%~25% 左右, 将坡面调至 10°, 开始降雨试验, 降雨强度分别为 60、90、120 mm/h, 降雨历时 1 h。试验中收集全部泥沙样, 接样间隔 3 min, 采用高锰酸钾染色法<sup>[18]</sup>测定坡面流速, 每隔 5 min 测定 1 次坡面流速, 每场降雨测定 20 次, 试验重复 3 次。

## 1.3 测定项目与计算指标

### 1.3.1 结皮强度测定

采用人工填土, 试验用内径为 10 cm、高 2 cm 的有机玻璃圆盘, 圆盘底部用铁丝网和纱布密封。装过 2.5 mm 筛自然风干土样, 装土质量计算公式为

$$W = \rho \cdot S \cdot H \quad (1)$$

式中  $W$  为装土质量, g;  $\rho$  为土样容重, g/cm<sup>3</sup>;  $S$  为圆盘面积, cm<sup>2</sup>;  $H$  为圆盘深度, cm。

设计雨强为: 60、90、120 mm/h, 降雨历时 30 min, 同时测定水温。降雨前需率定雨强, 确定同一雨强的点位, 每场降雨分别放置 20 个土盘, 降雨后每间隔 12 h 用数显推拉力计(艾德堡仪器有限公司, 型号 HP-2; 测定精度: 0.01 kPa)测定土壤结皮强度, 具体操作: 手动摁压使圆锥头部分刚好完全没入土层, 导出读数, 以其最大值作为衡量结皮强度的标准, 读数 5 次。同时, 重复取样 3 次, 用烘干法测定其对应含水率。

由于在坡面放置仪器不易实现, 再加上结皮极易破碎, 取样困难。因此, 坡面取样测定结皮强度很难实现。试验前, 为了检验采用土盘测定的结皮强度表征坡面结皮强度的可靠性, 选取长、宽、高分别为 40、10、20 cm 的铁皮土槽进行强度和含水率的测定, 其测定值与土盘测定值差异不显著 ( $P>0.05$ ), 表明土盘测定的土壤结皮强度表征坡面结皮强度是可靠的。

### 1.3.2 计算指标

由于设计试验坡面大致平整, 水深可用公式计算:

$$h = Q / (d \cdot v) \quad (2)$$

式中  $h$  为水深, m;  $Q$  为流量, m<sup>3</sup>/s;  $d$  为水面宽度, m;  $v$  为水流流速, m/s。

Foster 等<sup>[19]</sup>在 1984 年提出了水流剪切力  $\tau$  的计算式:

$$\tau = \gamma \cdot R \cdot J \quad (3)$$

式中  $\gamma$  为水流容重, 一般为 10 000 N/m<sup>3</sup>;  $R$  为水力半径, m, 近似等于径流深;  $J$  为径流坡能, 其值为坡度正弦值, 即  $J = \sin \theta$ 。

水流功率表示一定高度水体流动时所具有的势能, 为土壤侵蚀的发生提供了能量来源, 因此可作为表征水流侵蚀力的重要指标<sup>[20-21]</sup>。

$$\omega = \tau \cdot v \quad (4)$$

式中  $\omega$  为水流功率, W/m<sup>2</sup>。

阻力系数  $f$  计算公式：

$$f = \frac{8g \cdot R \cdot J}{v^2} \quad (5)$$

式中  $g$  为重力加速度， $g/cm^3$ ；其余同前。

灰色关联分析是一种根据不同序列曲线的几何相似性来判断其相关性的分析方法，曲线的几何形态越接近，说明其关系越紧密。灰色关联分析能有效弥补传统数理分析时需要大量数据的缺陷<sup>[22-24]</sup>。具体计算过程如下：

1) 确定分析序列，并运用初值化法对序列进行无量纲化处理。设参考序列  $x_0=\{x_0(k)\}$ ， $k=1,2,\dots,n$ ；比较序列  $x_i=\{x_i(k)\}$ ， $i=1,2,\dots,m$ 。2) 计算关联系数和关联度。

$$\mu_i(k) = \frac{\min_i \min_k |x_0(k) - x_i(k)| + \xi \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|}{|x_0(k) - x_i(k)| + \xi \max_i \max_k |x_0(k) - x_i(k)|} \quad (6)$$

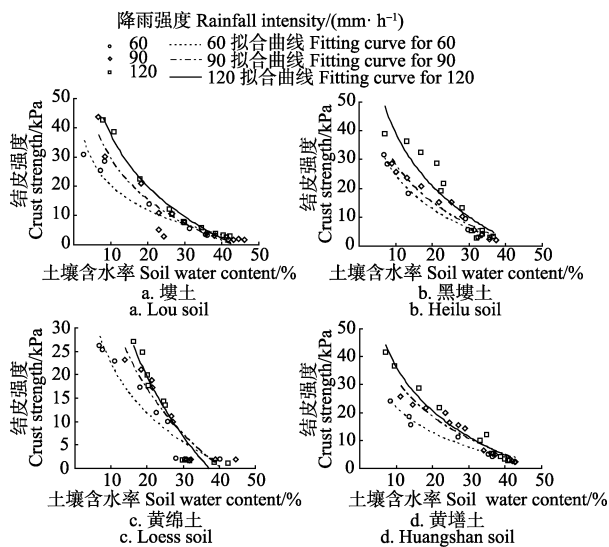
$\xi \in (0,1)$ ，本文取值 0.5。

$$r_i = \frac{1}{n} \cdot \sum_{k=1}^n \mu_i(k) \quad (7)$$

## 2 结果与分析

### 2.1 结皮强度随降雨强度与土壤含水率的变化特征

降雨是影响结皮形成的主要动力因素，降雨强度和历时对土壤结皮强度的作用很大，土壤类型对土壤结皮也会有影响，本文分析了 4 种类型土壤在 3 种不同降雨强度下的结皮强度变化特征及在坡面含水率不同时，结皮强度的变化规律（图 1）。在 3 种雨强下，结皮强度随含水率减少不断增强，黄壤土、壤土、黑垆土在含水率大于 30% 时，3 种降雨强度下结皮强度差异不大；但黄绵土在较大含水率时，结皮强度与降雨强度的关系和其他 3 类土壤并不相同。当土壤含水率小于 30% 时，结皮强度变化规律为：随着降雨强度增大，结皮强度不断增强。



注：图中拟合曲线以  $\ln(\text{土壤含水率})$  为自变量，结皮强度为因变量的线性拟合曲线，所有拟合曲线的  $R^2 > 0.85$ ， $P < 0.05$ 。

Note: Fitting curve is fitted with  $\ln(\text{soil water content})$  as independent variable and crust strength as response variable. For all the curves,  $R^2 > 0.85$ ,  $P < 0.05$ .

图 1 4 种类型土壤在不同降雨强度下结皮强度随含水率变化  
Fig.1 Crust strength changing with water content in 4 types of soils under different rainfall intensities

土壤结皮强度虽然在高含水率时差异不大，但土壤结皮强度随着含水率降低显著增加，且大雨强形成结皮强度要大于小雨强下的结皮强度。

### 2.2 不同强度结皮下坡面产流产沙分析

采用二次回归获得结皮强度与相应土壤含水率的回归曲线 ( $R^2=0.87\sim 0.98$ ,  $P < 0.05$ )，以实际田间含水率 20% 时的强度作为结皮强度的衡量指标，分析不同结皮强度下的坡面侵蚀特征。根据 2.1 所得结果可知，结皮强度随降雨强度的增大不断增加，本文将 60 mm/h 降雨形成的结皮称为低强度结皮 (11.68~12.80 kPa)，90 mm/h 降雨形成的为中等强度结皮 (15.02~18.40 kPa)，120 mm/h 降雨形成的为高强度结皮 (19.59~20.62 kPa)。图 2 表明，在相同降雨强度下，坡面产沙量随着结皮强度增大不断减少。在 60 mm/h 降雨时，对于无结皮坡面，降雨一旦发生，坡面极易被冲刷而发生细沟侵蚀，但随着降雨历时增加，细沟侵蚀逐渐减缓，坡面沉积作用会随之发生，因此，坡面产沙量呈现出波动下降过程，在 30~40 min 达到稳定阶段，结皮坡面在整个降雨过程产沙量较小且无明显的趋势变化；90 mm/h 降雨下，中等强度结皮坡面产沙量在 30 min 左右出现上升趋势，而高强度结皮的这一上升趋势出现在 50 min 之后，产沙量的增加是由于坡面细沟侵蚀的出现。中等强度结皮坡面在 30 min 左右结皮被打破，细沟侵蚀发生。高强度结皮被打破的时间在 50 min 之后，结皮强度越大，坡面结皮被降雨打破并发生细沟侵蚀的时间越晚，在 1 h 降雨时段内的产沙量也愈小。低强度结皮和无结皮坡面均表现为波动下降趋势；120 mm/h 降雨下，中等强度结皮坡面产沙量在 25 min 出现上升趋势，而高强度结皮的这一上升趋势出现在 40 min 左右，随着降雨强度增加，结皮坡面发生细沟侵蚀时间提前。坡面径流量（以 60 mm/h 雨强为例）变化始终表现为在降雨初期迅速增加并达稳定，且这一稳定状态持续了整个降雨过程，在不同强度结皮坡面径流量差异不显著。

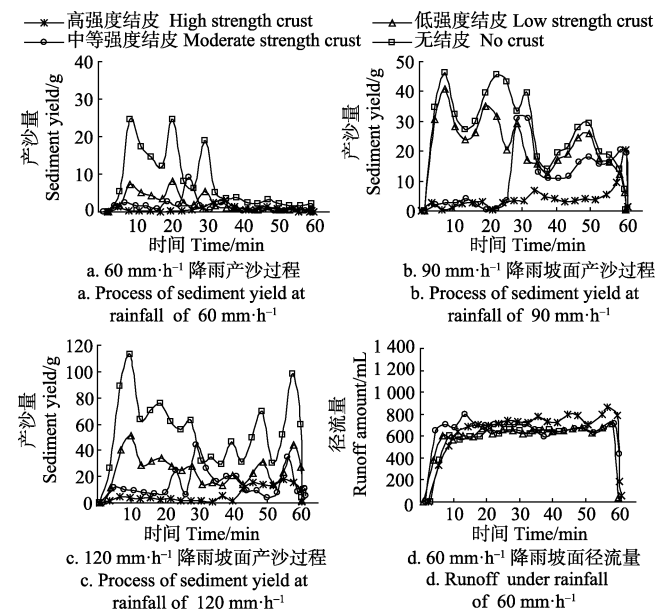
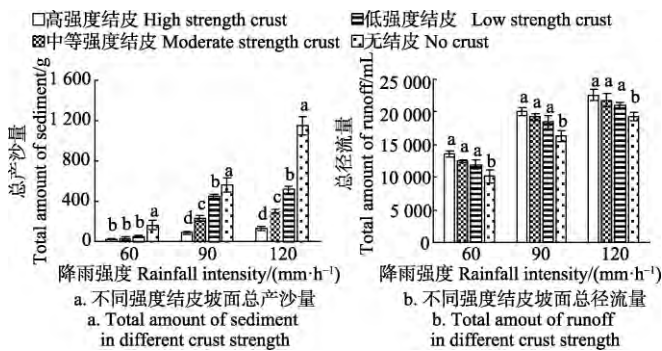


图 2 不同强度结皮的坡面产流产沙过程  
Fig.2 Processes of runoff and sediment yield under different crust strength

从图 3 可以得出, 结皮坡面的总径流量大于无结皮坡面, 且差异显著 ( $P < 0.05$ ), 但不同强度结皮坡面产流量差异不显著, 说明结皮强度对径流的影响不明显。但结皮存在能有效地减少坡面产沙量, 无结皮坡面的产沙量是结皮坡面产沙量的 1.24~8.72 倍。相同降雨强度下, 结皮强度越大, 其产沙量越小。60 mm/h 降雨强度下, 无结皮坡面产沙量分别为低强度结皮、中等强度结皮和高强度结皮的 3.43、5.35 和 10.23 倍; 90 mm/h 降雨强度下, 为 1.24、2.41 和 6.36 倍; 120 mm/h 降雨强度下, 为 2.22、3.82 和 8.73 倍。降雨强度较小时, 坡面结皮不易被打破, 能被水流搬运的松散物质越少, 坡面产沙量较少。因此, 降雨强度较小时, 结皮坡面相对减蚀效应更强。



注: 不同字母表示高、中、低强度结皮和无结皮坡面差异显著 ( $\alpha=0.05$ ), 下同。  
 Note: Different letters mean significant difference among high, moderate, low strength crust and no crust soil surface ( $\alpha=0.05$ ), same as below.

图 3 不同强度结皮的坡面总产产沙量

Fig.3 Total runoff and sediment amount on slope under different crust strength

2.3 不同强度结皮坡面水动力学参数

统计 ( $t$  检验) 结果表明结皮坡面和无结皮坡面的水流剪切力差异显著 ( $P < 0.05$ ), 无结皮坡面的水流剪切力大于结皮坡面的水流剪切力 ( $P < 0.05$ ) (图 4)。对于不同结皮强度坡面, 其水流剪切力差异不显著 ( $P > 0.05$ ), 即一旦坡面形成结皮, 水流剪切力不会随结皮强度和降雨强度发生显著变化。

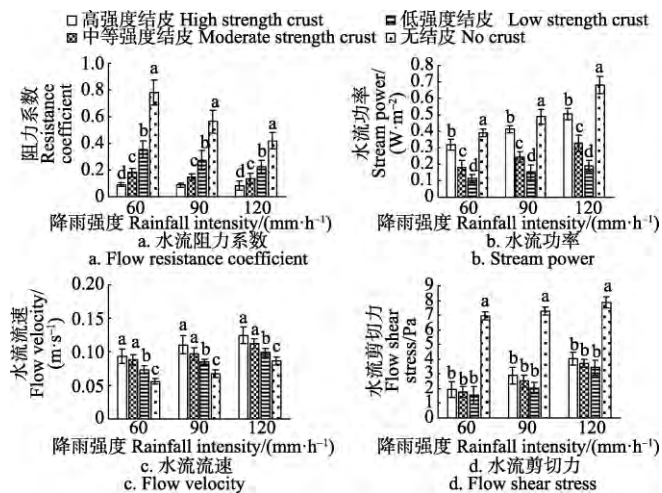


图 4 不同强度结皮降雨条件下各水力学参数

Fig.4 Hydraulics parameters under different crust strengths and rainfall intensities

图 4 还表明, 无结皮坡面的阻力系数大于结皮坡面的阻力系数, 在相同降雨条件下, 阻力系数随着结皮强度增强不断减小, 说明结皮的存在能有效地降低坡面阻力系数, 即结皮强度越大, 坡面阻力系数越小, 这是由于坡面结皮强度越高, 其表面越光滑。无结皮坡面水流功率大于结皮坡面水流功率, 可能是由于前者剪切力远大于后者。对于结皮坡面, 当结皮强度增强时, 水流功率是不断增大的, 结皮强度越大, 坡面流速越大, 因此其相应的水流功率也越大。

2.4 结皮坡面水动力学参数与坡面产沙量灰色关联分析

依据灰色关联分析, 各指标对产沙量的影响效用关联度表示, 关联度值越大表示指标的重要性越高。由表 2 可知, 无结皮坡面和低强度结皮坡面的水流功率与产沙量的关联度大于阻力系数与产沙量的关联度, 说明水流功率在其侵蚀过程中起主导作用。因此, 在无结皮和低强度结皮在坡面侵蚀过程中会有较大的产沙量。但对于高强度结皮和中等强度结皮而言, 水流功率与产沙量的关联度小于阻力系数与产沙量的关联度, 阻力系数在其侵蚀过程中占据主导性, 坡面产沙量减少。土壤结皮存在改变了坡面侵蚀动力的作用效益, 进而影响着坡面侵蚀过程。

表 2 坡面产沙量灰色关联分析结果

Table 2 Result of grey correlation analysis of sediment yield on slope

| 结皮强度<br>Crust strength | 关联度 Correlation degree |                                |
|------------------------|------------------------|--------------------------------|
|                        | 水流功率<br>Stream power   | 阻力系数<br>Resistance coefficient |
| 高强度 High strength      | 0.68                   | 1.23                           |
| 中等强度 Moderate strength | 0.73                   | 0.78                           |
| 低强度 Low strength       | 0.76                   | 0.63                           |
| 无结皮 No crust           | 0.88                   | 0.48                           |

随着坡面结皮强度的增强, 水流功率对产沙量的影响效应减弱, 但阻力系数对产沙的影响效应增强; 另一方面, 由于坡面结皮强度增强, 使得坡面土壤不易被水流冲刷转移, 产沙量减少。所以, 土壤结皮能够有效地减少坡面侵蚀。

3 讨论

土壤结皮强度是反映土壤抗蚀性的一个重要指标, 它与地表流速和土壤侵蚀程度密切相关, 一般用土壤的抗剪强度来反映土壤结皮强度<sup>[25]</sup>。刘志等<sup>[26]</sup>通过对黄绵土进行人工模拟降雨试验还发现在坡度一定时, 表土结皮强度与降雨动能为非线性关系, 结皮强度随降雨强度增加而递增。

径流侵蚀力定义为水流沿坡面向下运动时所具有的水流剪切力, 水流剪切力破坏土壤结构, 引起土粒分散并随水流一起输出坡面。Neave 等<sup>[27]</sup>通过野外试验得出结皮存在使得土壤表面变得光滑, 从而能增加坡面径流流速, 进而使得水流具有较大的剪切力, 能够增加坡面侵蚀量, 其并未对结皮增大表层土壤的抗蚀性进行分析。本研究中, 无结皮坡面水流剪切力大于结皮坡面水流剪

切力且差异显著 ( $P < 0.05$ ), 无结皮坡面产沙量大于结皮坡面, 对于无结皮和结皮坡面而言, 可见水流剪切力是影响坡面产沙的重要因素, 产沙量与坡面剪切力正相关, 但水流剪切力在不同结皮强度坡面差异不显著。王瑄等<sup>[28-29]</sup>均通过试验得出, 水流功率与土壤剥蚀率有较强的相关性, 水流功率越小, 则坡面产沙量越少。但在本文中, 对于不同结皮强度坡面, 坡面产沙量与水流功率的相关性并不强, 这是由于土壤抗蚀性也是影响坡面侵蚀的重要因素。Zhu<sup>[30]</sup>通过田间试验得出结皮的存在能够增加土壤抗蚀性, 减少地表松散物质, 从而减少坡面产沙量。无结皮坡面的阻力系数是结皮坡面阻力系数的 1.9~8.7 倍, 但产沙量是结皮坡面的 1.2~10.2 倍, 这一规律与吴秋菊等<sup>[28]</sup>所得结果相一致。由此可知, 坡面侵蚀的发生是侵蚀动力、坡面阻力和土壤抗蚀性综合作用的结果。

灰色关联分析结果表明, 在侵蚀过程中, 随着坡面土壤结皮强度的不断增大, 阻力系数的作用效益不断增加, 而水流功率的作用效益则是减小的, 再加上结皮强度增加使得坡面土壤的抗蚀性增大, 因此, 结皮的存在能够有效地抑制土壤坡面侵蚀, 结皮强度越大, 其作用越强。

#### 4 结 论

土壤结皮强度与土壤含水率具有较强的相关性, 结皮强度随含水率的减少逐渐增强, 但当土壤含水率大于 30% 时, 3 种雨强下的结皮强度几乎没有差异。结皮与降雨强度的关系表现为, 在含水率小于 30% 时, 结皮强度是随降雨强度增大而增强, 进一步说明降雨是影响结皮形成的主要因素。

降雨过程中, 坡面产沙量在有无结皮的情况下差异显著 ( $P < 0.05$ ), 结皮存在能有效地减少坡面侵蚀, 在同一结皮强度条件下, 降雨强度越大, 坡面产沙量越多。相同降雨强度下, 结皮强度越大, 其产沙量越小。

水流功率对产沙量的影响效应随着结皮强度的增大不断减弱, 而阻力系数对产沙量的影响效应是不断增大的, 同时结皮存在增强了坡面抗蚀性。因此, 土壤结皮的存在有利于减小坡面土壤侵蚀量, 且强度越大, 减蚀效应越强。

#### 参 考 文 献

- [1] McIntyre D S. Permeability measurements of soil crusts formed from by raindrop impacts[J]. *Soil Science*, 1958, 85(4): 185-189.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Chamizo S, Cantón Y, Lázaro R, et al. Crust composition and disturbance drive infiltration through biological soil crusts in semiarid ecosystems[J]. *Ecosystems*, 2012, 15(1): 148-161.
- [5] 程琴娟, 蔡强国, 廖义善. 土壤表面特性与坡度对产流产沙的影响[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(2): 9-11.

- Cheng Qinjuan, Cai Qiangguo, Liao Yishan. Effects of soil surface characteristics and gradient on runoff and sediment yield[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(2): 9-11. (in Chinese with English abstract)
- [6] 唐泽军, 雷廷武, 张晴雯, 等. 雨滴溅蚀和结皮效应对土壤侵蚀影响的试验研究[J]. *土壤学报*, 2004, 41(4): 632-635.  
Tang Zejun, Lei Tingwu, Zhang Qingwen, et al. Quantitative determination of the impacts of raindrop splash and crust on soil erosion with REE experimental data[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4): 632-635. (in Chinese with English abstract)
- [7] 吴发启, 范文波. 土壤结皮对降雨入渗和产流产沙的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2005, 3(2): 97-101.  
Wu Faqi, Fan Wenbo. Effects of soil encrustation on rainfall infiltration, runoff and sediment generation[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2005, 3(2): 97-101. (in Chinese with English abstract)
- [8] Epstein E, Grant W J. Soil losses and crust formation as related to some soil physical properties[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1967, 31(4): 19-88.
- [9] Moore D C, Singer M J. Crust formation effects of soil erosion processes[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1990, 54(4): 1117-1123.
- [10] Bradford J M, Ferris J E, Remley P A. Interrill soil erosion processes: Effect of surface sealing on infiltration, runoff, and soil splash detachment[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1987, 51(6): 1566-1577.
- [11] Levy G J, Levin J, Shainberg I. Seal formation and interrill soil erosion[J]. *Soil Science*, 1994, 58(1): 352-356.
- [12] 雷廷武, 唐泽军, 张晴雯, 等. 聚丙烯酰胺增加土壤降雨入渗减少侵蚀的模拟试验研究 II: 侵蚀[J]. *土壤学报*, 2003, 40(3): 401-406.  
Lei Tingwu, Tang Zejun, Zhang Qingwen, et al. Effects of polyacrylamide application on infiltration and soil erosion under simulated rainfalls II: Erosion condition[J]. *ACTA Pedologica Sinica*, 2003, 40(3): 401-406. (in Chinese with English abstract)
- [13] 郭兆元, 黄自立, 冯立孝. 陕西土壤[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [14] 肖海, 刘刚, 刘普灵. 集中流作用下黄土坡面剥蚀率对侵蚀动力学参数的响应[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(17): 106-111.  
Xiao Hai, Liu Gang, Liu Puling. Response of detachment rate of loess slope to hydrodynamic characteristic under concentrate flow condition[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(17): 106-111. (in Chinese with English abstract)
- [15] 李西开, 蒋柏藩, 袁可能. 土壤农业化学常规分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [16] 杨陵区地方志编撰委员会. 阳陵区志[M]. 西安: 西安地图出版社, 2004.
- [17] 马波, 马璠, 李占斌, 等. 模拟降雨条件下作物植株对降雨再分配过程的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(16): 136-146.  
Ma Bo, Ma Fan, Li Zhanbin, et al. Effect of crops on rainfall redistribution process under simulated rainfall[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2014, 30(16): 136-146. (in Chinese with English abstract)
- [18] Abrahams A D, Parsons A J, Luk S H. Field measurement of the velocity of overland flow using dye tracing[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1986, 11(6): 653-657.
- [19] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics. I: Velocity relationships[J]. *Transaction of*

- ASAE, 1984, 27(3): 790—796.
- [20] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics, II. Shear stress relationships[J]. Transactions of the ASAE, 1984, 27(3): 797—804.
- [21] 张乐涛, 高照良, 田红卫. 工程堆积体陡坡坡面土壤侵蚀水动力学过程[J]. 农业工程学报, 2013, 29(24): 94—102. Zhang Letao, Gao Zhaoliang, Tian Hongwei. Hydrodynamic process of soil erosion in steep slope of engineering accumulation[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(24): 94—102. (in Chinese with English abstract)
- [22] 张霞, 沈炳岗, 王亚萍, 等. 基于灰色关联分析的土壤水分盐动态变化研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(4): 267—270. Zhang Xia, Shen Binggang, Wang Yaping, et al. Investigation on soil water-salt dynamics based on grey correlation analysis[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2012, 32(4): 267—270. (in Chinese with English abstract)
- [23] 于国强, 李占斌, 张霞, 等. 土壤水盐动态的 BP 神经网络模型及灰色关联分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(11): 74—79. Yu Guoqiang, Li Zhanbin, Zhang Xia, et al. Dynamics simulation of water-salt using BP neural network model and grey correlation analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(11): 74—79. (in Chinese with English abstract)
- [24] Wang Yinggang, Yan Fang, Zhan Zhiyao, et al. Application of grey relational analysis in agricultural production of Northwest region of Shanxi Province[J]. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2000, 9(4): 464—466.
- [25] Luk S H, Cai Qiangguo. Laboratory experiments on crust development and rain splash erosion of loess soil[J]. Catena, 1990, 17(3): 261—276.
- [26] 刘志, 江忠善. 雨滴打击对黄土结皮影响的研究[J]. 水土保持通报, 1988, 8(1): 62—64. Liu Zhi, Jiang Zhongshan. The research of effect of raindrop on Loess crust[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation 1988, 8(1): 62—64. (in Chinese with English abstract)
- [27] Neave M, Rayburg S. A field investigation into the effects of progressive rainfall-induced soil seal and crust development on runoff and erosion rates: The impact of surface cover[J]. Geomorphology, 2007, 87(4): 378—390.
- [28] 吴秋菊, 吴发启, 王林华. 土壤结皮坡面流体力学特征[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 73—80. Wu Qiuju, Wu Faqi, Wang Linhua. Hydrodynamic characteristics of overland flow under soil crusts condition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2014, 30(1): 73—80. (in Chinese with English abstract)
- [29] 王瑄, 李占斌, 李雯, 等. 土壤剥蚀率与水流功率关系室内模拟实验[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 185—187. Wang Xuan, Li Zhanbin, Li Wen, et al. Indoor simulation experiment of the relationship between soil detachment rate and stream power[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(2): 185—187. (in Chinese with English abstract)
- [30] Zhu Tongxin. Effect of soil crusting on soil moisture, runoff and erosion: Field observation[J]. International Journal Sediment Research, 2002, 17(4): 298—303.

## Effect of soil crust strength on erosion under different rainfall intensity

Lu Pei<sup>1</sup>, Wang Linhua<sup>1</sup>, Wu Faqi<sup>2\*</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China;

2. College of Resources and Environment Sciences, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** Soil crust plays an important role in rainfall, runoff and erosion process. When it comes to the present situation, most studies analyze the impact mechanism of soil erosion on the existence of soil surface crust, through comparison analysis of sediment yield, runoff producing and characteristic of hydrodynamic under the crust and no crust slope. However, limited studies report on the characteristic of soil sediment yield, runoff produced and the rule of feature variation for hydrodynamic, also, no quantitative evaluation about the hydraulics parameter's influence on sediment yield. Therefore, in our research, according to crust strength variation and hydrodynamic characteristic under different crust strength, we conducted quantitative analysis on the impact of crust on slope erosion, and through comparison analysis for characteristic of slope sediment yield, under different crust intensities. We further analyzed the change features of hydraulics parameter under slope erosion, and described strength of effect quantitatively under influence factor, for providing important material to predicate accurately and effectively slope soil erosion. In this paper, the impact mechanism of soil crust on slope erosion was reported using quantitative analysis method. The strength of soil crust change of 4 soil types (Lou soil, Loess soil, Heilu soils and Huangshan soil) under 3 rainfall intensities (60, 90, 120 mm/h) was analyzed. Our results showed that the relationship between the crust strength and rainfall intensity was complex when soil water content was more than 30%. However, when soil water content was less than 30%, crust strength increased with the increase of rainfall intensity. Taking the 10° slope of Lou soil as an example, sediment yield, shear stress, resistance coefficient and flow velocity of different crust strength under artificial rainfall experiments were determined and analyzed. The existence of crust could reduce slope sediment yield effectively, and the sediment yield of no crust slope was 1.24–8.72 times more than crust slope's. The crust on slope effectively reduced the erosion and sediment yield. The greater the crust strength was, the stronger the reduction was. The flow shear stress, stream power, resistance coefficient of no crust slope were all larger than the crust slope, but for crust slope, flow shear stress of various crust strength was not significant different ( $P>0.05$ ). Stream power and flow shear stress were enhanced with increase of crust strength. The larger crust strength was, the smoother surface was, the larger flow velocity was, the smaller resistance was, which improved the stream power. The stream power of high strength crust was larger than low strength crust, but with the smaller sediment yield, its resistance of slope was large. Therefore, the formation of soil erosion was synthetic result of erosion dynamic, slope resistance and soil anti-erodibility. The grey correlation analysis showed that with the increase of the soil crust strength, the influence of the stream power on the erosion of the soil was decreased, and the effect of the resistance coefficient was increased. Therefore, there was a positive effect of water flow on sediment reduction, and the soil erosion resistance of the soil was enhanced with the increase of crust strength, so the erosion amount of soil would decrease greatly.

**Keywords:** flow rate; erosion; soils; crust strength; stream power; resistance coefficient; flow velocity