

# 黄土高原水蚀风蚀交错区不同下垫面土壤水蚀特征实验研究

张丽萍, 倪含斌, 吴希媛

(浙江大学环境与资源学院, 国土资源与环境研究所, 杭州 310029)

**摘要:** 以位于黄土高原水蚀风蚀交错区的神东矿区为研究基地, 以黄土、沙黄土、风沙坡、基岩风化坡地、人为弃矿渣为物质基础, 采用野外人工模拟降雨的方法, 重点分析不同组成物质和同一物质不同固结程度斜坡地的土壤水蚀特征。对系列实验数据, 应用 SPSS 和 DPS 数据处理系统进行分析。结果表明: ①在条件相近的情况下, 场降雨侵蚀模数的排序为: 黄土> 沙黄土> 沙坡> 弃矿渣> 风化壳; ②在相同的雨强和坡度条件下, 黄土坡面产流快, 易形成细沟、浅沟, 使坡地变得起伏不平; 沙黄土坡面则产流慢, 形成沟谷的时间较迟, 但演化快。③多石块的粗骨性风化壳侵蚀量随降雨强度的增加而增加, 但产沙过程却以产流初期最大, 之后趋于减少并稳定; ④同一物质不同堆积年限的坡地, 在没有人为破坏的情况下, 随着堆积年限的增加而固结程度提高, 侵蚀模数由 16 379 t/(km<sup>2</sup>·a) 下降到 1 227 t/(km<sup>2</sup>·a)。⑤弃矿渣坡地的侵蚀容易出现滑塌和滑坡, 产沙过程波动明显, 有短暂的高含沙量的泥石流过程。

**关键词:** 水蚀风蚀交错区; 不同下垫面; 水蚀过程; 人工模拟降雨实验; 侵蚀模数

中图分类号: S 157.1      文献标识码: A      文章编号: 1005-3409(2005)05-0126-02

## Soil Water Erosion Processes on Sloping Land with Different Material in the Wind- Water Interaction Zone in the Loess Plateau

ZHANG Li-ping, NI Han-bin, WU Xi-yuan

(Institute of Soil and Water Resource and Environment Sciences, College of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310029, China)

**Abstract:** Shenfu- Dongsheng mine region, which is in the central of wind- water interaction zone of the Loess Plateau, was taken as researching region. Loess, sand loess, sand, regolith and accumulation of waste mine residue were taken as researching material. By the tests of artificial simulation of rainfall on sloping land with different material and on the sloping land with same material( sand) and different accumulation years, and the statistic analysis of test data with SPSS and DPS, some new and peculiar water erosion processes were observed and described. The conclusions were listed as following. ①In the similar conditions, the order of erosion modulus per set artificial simulated rainfall is loess> sand loess> sand slope> accumulation of waste mine residue> regolith). ②In the same the intensity of rainfall and slope, it is easier to come into being the runoff and gully on the sloping land with loess than sand loess, but the gully evolution is speedier on the sloping land with sand loess than loess. ③On regolith slope land with much rock block, erosion modulus increase as intensity of rainfall increase. The runoff silt content is the highest at initial stages of runoff forming and goes gradually lower and more stable. ④On the sloping land with same material(sand) and different accumulation years, the soil erodibility increases as accumulation years increase and erosion modulus decreases from 16 379 t/(km<sup>2</sup>·a) to 1 227 t/(km<sup>2</sup>·a), under the conditions of no human activity. ⑤On the accumulation slope of waste mine residue, slide and landslide are main erosion ways, the processes of runoff silt content is undulate, there is debris processes with short time and high silt content.

**Key words:** wind- water interaction zone; sloping land with different material; water erosion process; artificial simulated rainfall; erosion modulus

### 1 引言

水蚀风蚀交错带是典型的生态环境脆弱带、土壤侵蚀最严重地区。由中华人民共和国水利部 2002 年颁发的“全国水土流失公告”指出, 我国水蚀风蚀交错带的水土流失面积已达到了 26×10<sup>4</sup> km<sup>2</sup>, 是目前重点治理区。其中黄土高原水蚀

风蚀交错区占到了近 30% 的面积, 是水蚀风蚀交错带土壤侵蚀最严重的地区。

黄土高原水蚀风蚀交错区地处黄土丘陵沟壑区向毛乌素沙漠的过渡地带, 自然条件具有明显的过渡性和复杂性。西北以荒漠、半荒漠为主, 风成沙丘广布, 土壤风蚀严重, 是土地沙漠化正在发展区; 逐渐过渡到东南部是典型的沙盖黄土丘陵

① 收稿日期: 2005-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(40271071); 中国科学院黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金项目(10501- 113)

作者简介: 张丽萍(1960- ), 女, 教授, 博导, 主要从事地貌与第四纪、土壤侵蚀和水土保持、和环境地学方面的教学与科研, 多次主持和参加了国家、省、部级科研项目, 已发表论文 90 余篇。

区,物质组成以沙黄土为主,质地粗,结构性差,抗蚀性弱,是土壤侵蚀的主要对象,随季节的变化,终年风力水力侵蚀交替进行,夏季的暴雨侵蚀是主要的产沙过程。在河谷切割严重地区,中生代岩层广泛出露,主要为一些极易风化的、富含煤层的砂岩及页岩,其上堆积第四纪黄土,表层覆盖了成片的沙层。相应的生物气候带属中温带干旱、半干旱典型草原地带,具有温带大陆性季风气候的特点,冬春季节干旱少雨多风,土壤风蚀严重,夏秋季节暴雨集中,土壤水蚀强烈。

松散的地表组成物质,低而稀疏的植被,波状起伏丘陵地形,终年风力水力侵蚀交替进行,土壤侵蚀极为严重。然而在不同物质组成的下垫面坡地,土壤的水蚀过程和强度差异很大。本文以位于黄土高原水蚀风蚀交错区中部的神府东胜矿区为研究基地,以沙黄土、风沙坡和基岩风化坡地为物质基础,采用野外人工模拟降雨的方法,重点分析不同物质组成的下垫面坡地和同一物质不同固结程度斜坡地的土壤水蚀特征。

## 2 实验设计及过程

### 2.1 实验设计<sup>[1,2]</sup>

在研究区选择不同组成物质的典型裸露坡段,进行人工降雨实验。径流小区的坡度范围分布在 15~35°;大部分在 28~35°的区间。径流小区面积 3~7.5 m<sup>2</sup>,即宽度为 1.5 m,长度分布在 2~5 m 之间,小区边界墙由钢板密封组成,高出地面 20 cm,植入土深 10 cm,小区下端设置可嵌入地表的钢制集水槽,以保证小区内的径流全部汇入设于出水口处的径流桶中。

根据神木县、东胜市、府谷县、榆林地区 1958~2003 年的气象、水文统计资料分析,当地的降雨方式以短历时、高强度的暴雨为主。我们选择高频率、大概率的雨强为实验设计降雨强度,分别为 1.5~2.5 mm/min,降雨历时为 25~35 min。人工模拟降雨装置为由两个 5 m 高的三角架组成的变孔喷头的压控双向侧喷式人工模拟装置(自备压力水箱),安置在径流小区两侧;潜水泵扬程高 26 m,抽水管直径 46 mm;为了减少压强、潜水泵的误差以及现场外界环境条件(如风、降雨等)的影响,我们在径流小区周围设置六个均匀布置的雨量筒,对不同孔径喷头的雨强进行了现场标定,采用克里斯琴森<sup>[3]</sup>提出的描述喷灌水量分布均匀性的定量指标——喷灌均匀系数 CU 进行每场降雨的均匀系数计算。

$$CU=100\times\left(1-\frac{\sum_{i=1}^N|x_i-\bar{x}|}{N\bar{x}}\right)\tag{1}$$

式中: $x_i$ ——第*i*个雨量筒的水深; $\bar{x}$ ——雨量筒平均水深; $\bar{x}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^Nx_i$ ;N——雨量筒数。

为了观测取样测定侵蚀量、径流量,在集水槽下部设置两层径流桶,每个径流桶深 40 cm,直径 30 cm,在距桶底 30 cm 处钻有九个流孔,其中有一个孔流向下一个径流桶。

### 2.2 实验过程

在每场降雨实验之前,测定土壤前期含水量;降雨过程中,统计产流时刻,沟谷形成时间,隔 3~5 min 测第 2 个径流桶水深进行累积径流量计算。同时在集水槽出口处取径流含沙水样,测定含沙量,计算每场降雨的侵蚀量,分析其产沙过程。实验之后测降雨入渗深度及降雨后土壤含水量,量测所有径流小区沟谷侵蚀量(体积)、形态特点。

### 2.3 实验数据的处理

根据上述实验过程,将取回的土样及径流泥沙样进行称重、烘干,计算其侵蚀量,用第 2 个径流桶水样计算径流量、入渗量及入渗过程。根据计算的系列实验数据,应用 SPSS 和 DPS 数据处理系统<sup>[4,5]</sup>进行分析。由于降雨实验历时,在计算过程中,只计算径流、产沙及入渗,忽略降雨的其他损失。

## 3 结果与分析

径流是土壤水蚀的主要外动力,但由于降雨强度及地表组成物质不同,所引发的径流含沙量和侵蚀模数差别很大。关于本研究课题的内容,前后几年共进行人工模拟降雨实验 40 余场,现根据物质组成的差异和同一物质不同固结程度,选择几场典型的、可比较的实验计算结果列于表 1 和表 2。

表 1 不同组成物质坡地人工模拟降雨实验参数和计算结果

| 物质组成 | 小区面积/m <sup>2</sup> | 坡度/° | 雨强/(mm·min <sup>-1</sup> ) | 均匀系数 | 总雨量/mm | 总产沙量/kg  | 场降雨侵蚀模数/(kg·hm <sup>-2</sup> ) |
|------|---------------------|------|----------------------------|------|--------|----------|--------------------------------|
| 黄土   | 7.5                 | 28   | 2                          | 93   | 50.4   | 17.69    | 23586.7                        |
| 黄土   | 7.5                 | 28   | 1.5                        | 90.5 | 51     | 14.03    | 18706.7                        |
| 沙黄土  | 7.5                 | 15   | 2                          | 88.5 | 50     | 16.77    | 22360                          |
| 沙黄土  | 7.5                 | 15   | 1.5                        | 89.6 | 51     | 10.78    | 14373.3                        |
| 沙坡   | 7.5                 | 28   | 2                          | 92   | 50     | 10.993   | 14657.3                        |
| 沙坡   | 7.5                 | 28   | 1.2                        | 91   | 50.4   | 0.0      | 0.0                            |
| 风化壳  | 3.0                 | 30   | 2.14                       | 85.1 | 64.2   | 0.138.21 | 691.1                          |
| 风化壳  | 3.0                 | 30   | 2.46                       | 87.6 | 73.8   | 0.1433   | 716.5                          |
| 弃矿渣  | 3.0                 | 35   | 2                          | 86   | 50     | 2.410    | 3213.4                         |
| 弃矿渣  | 3.0                 | 35   | 1.2                        | 89.1 | 48     | 1.418    | 1890.3                         |

表 2 矿区同一物质(沙土)不同弃土年限堆积坡地人工降雨实验计算结果

| 弃土年限      | 坡度/° | 植被覆盖度/% | 降雨强度/(mm·min <sup>-1</sup> ) | 均匀系数 | 侵蚀模数/(t·km <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup> ) |
|-----------|------|---------|------------------------------|------|---|
| 2002~2003 | 32   | 3       | 1.39                         | 80.0 | 16379                                       |
| 1996~1997 | 30   | 5       | 2.39                         | 88.2 | 13473                                       |
| 1994~1995 | 35   | 10      | 2.21                         | 89.7 | 9303  |
| 1990~1991 | 33   | 20      | 2.08                         | 88.5 | 1227  |
| 原状土       | 32   | 40      | 2.07                         | 90.1 | 1626  |

表 1 列出了 5 种主要的物质组成坡地的实验计算结果。结果表明,在条件相近的情况下,场降雨侵蚀模数的排序为:黄土>沙黄土>沙坡>弃矿渣>风化壳;在相同雨强的情况下,黄土和沙黄土坡地侵蚀量大于沙坡地;在相近的条件下,多石块的粗骨性风化壳侵蚀量小于弃矿渣的堆积斜坡;为了揭示同一物质不同固结程度的土壤水蚀特征,我们的人工模拟降雨实验是在保证物质组成不变、弃土堆积地形类似、不受人为破坏的基础上进行不同弃土年限的土壤侵蚀模数的模拟。从表 2 可以看出,同一物质的堆积坡地,在没有人为破坏的情况下,不同开发阶段的植被覆盖度随着弃土年限的增加而提高,从 3% 逐渐增加到 20%,侵蚀模数由 16 379 t/(km<sup>2</sup>·a) 下降到 1 227 t/(km<sup>2</sup>·a)。弃土年限在 7 年以下堆积土壤抗侵蚀能力很弱,土壤流失严重;弃土年限超过 7 年的土壤抗侵蚀能力有较好恢复,超过 10 年的基本达到原状土土壤水平。

## 4 结 论

(1) 黄土和沙黄土主要分布在水蚀风蚀交错带的南部,土壤侵蚀是随着坡度、雨强的增大而增大。在每年春末夏初的大强度、长历时的降水过程是土壤水蚀的关键因素。该区

(下转第 192 页)

是多步预测, 探求年径流出现的不稳定“周期”, GM(1, 1) 模型为指数函数, 有可能导致误差逐步增加。

| 表 1 误差分析表 |         |
|-----------|---------|
| 灰色拓扑预测    |         |
| 最大绝对误差    | 15.1664 |
| 最大相对误差/%  | 25.1934 |
| 合格率/%     | 93.33   |

(2) 灰色拓扑预测理论是高度非线性模型, 能较有效地

参考文献:

[1] 李希灿, 等. 水文中长期预报成因模糊综合分析预测模式[J]. 黑龙江水专学报, 1998, 25(3): 67– 71.  
[2] 钱家忠, 等. 矿井涌水量的灰色马尔可夫预报模型[J]. 煤炭学报, 2000, 25(1): 71– 75.  
[3] 杨培勇. 中、长期预报中的关联分析方法[J]. 四川气象, 1998, (3): 36– 39.  
[4] 阎俊爱, 等. 基于遗传算法的神经网络优化预测模型及其在年径流预报中的应用[J]. 水利水电技术, 2003, 34(6): 64– 67.  
[5] 邓聚龙. 灰色控制系统[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1985. 309– 318.  
[6] 冯强, 等. 灰色拓扑预测理论在暴雨洪涝灾害预测中的应用[J]. 自然灾害学报, 1996, 5(4): 98– 103.

(上接第 127 页)

年日温差均很大, 冻融作用破坏了土层结构, 使土层疏松; 另一方面, 春末夏初植物刚刚发芽, 植被度低, 根系固结作用弱, 所以一旦产流, 土壤遭受严重侵蚀。

在相同的雨强和坡度条件下, 黄土坡面产流快, 易形成细沟、浅沟, 使坡地变得破碎, 起伏不平; 在沙黄土坡面则产流慢, 一般在 16~20 min 之后才出现, 形成沟谷的时间较迟, 但演化快。

(2) 在水蚀风蚀交错带的沙坡地, 主要是沙盖的黄土坡地, 由于表层物质的多孔性及可渗透性, 地表径流量很小, 若降雨强度小, 则无径流发生。但是一旦产生径流则含沙量很大。沙坡地的下伏地形是黄土丘陵沟壑, 具有辐散脊和辐合槽。黄土的渗透能力相对于其上部的沙层是弱透水的, 所以从上部渗下来的水, 沿着原始地形的辐合槽以潜流形式流出; 又由于片沙的结构性差, 黏聚力弱, 故一旦下部发生潜流, 上部沙层便发生崩塌, 从而形成了深度远远大于宽度的 U 字型沟谷雏形, 它明显不同于黄土丘陵区的 V 字型沟谷。沟谷的形成过程是垂直渗流—坡面潜流—崩塌。

坡沟系统的演化过程是流沙堆积, 风蚀及水蚀交互作用的结果, 沟谷侵蚀速率慢于黄土丘陵区, 但侵蚀量很大。作者在神木县一些典型坡沟调查测量中发现, 在冬春季节坡沟上、中游被流沙堆积, 厚度达 0.5~0.7 m, 下游被风蚀。由于有松散的流沙堆积物, 到了夏秋季节, 暴雨侵蚀, 径流含沙量骤增。

(3) 在本研究区, 易风化的中生代砂岩和页岩分布很广, 形成了许多石块的粗骨性风化壳。本类物质组成的坡地, 侵蚀量随降雨强度的增加而增加, 但产沙过程却以产流初期最大, 之后趋于稳定(图 1)。

(4) 弃矿渣坡地的侵蚀容易出现滑塌和滑坡, 产沙过程波动明显, 有短暂的高含沙量的泥石流过程。作者曾在坡度为 40° 的弃煤渣堆积坡地和 36° 的弃石渣堆积坡地进行过人工模拟降雨实验, 虽然径流桶的产沙不多, 但出现煤渣堆积坡的整体下滑, 最大滑距达 25 cm, 滑坡坡长 7 m, 宽度 10 m 的滑坡

参考文献:

[1] Robinson K M, Hanson G J. Large-scale headcut erosion testing[J]. Transactions of the ASAE, 1995, 38(2): 429– 434.  
[2] 张丽萍, 唐克丽. 矿山泥石流[M]. 北京: 地质出版社, 2001. 77– 87.  
[3] Christiansen J E. The uniformity of application of water by sprinkler systems[J]. Agricultural Engineering, 1941, 22: 89– 92.  
[4] 三味工作室. 世界优秀统计软件 SPSS v10.0 for Windows 实用基础教程[M]. 北京: 希望电子出版社, 2001.  
[5] 唐启义, 冯明光. 实用统计分析及其 DPS 数据处理系统[M]. 北京: 科学出版社, 2002.

模拟本质为非线性的实际水文系统。

(3) 作为年径流预报, 灰色拓扑预测理论要求所选用的系列必须具有一定的代表性, 且系列的资料不宜过长, 因为指数函数有导致误差进一步增大。因此, 这就要求在预报未来年份不宜过长, 最好是预报未来 1~2 年的年径流量。

(4) 作为灰色拓扑预测, 实际上为数理统计分析, 它不考虑系列数据的来源。因此, 为了更好的探求未来年径流发生发展趋势, 最理想的方法是建立年径流预测的概念性模型。

过程: 煤渣取样容积 1 000 ml, 含煤渣 791.43 g; 弃石渣泥石流过程中的泥浆取样容积 1 000 ml, 含石渣 1 513.4 g。

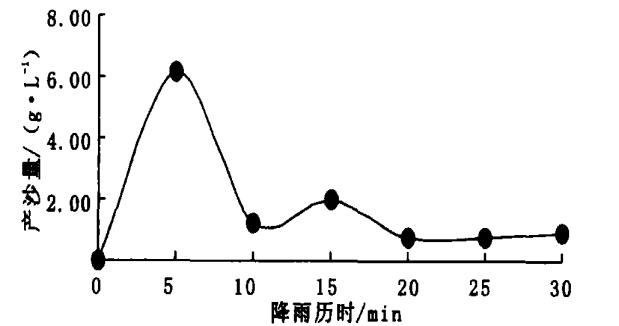


图 1 风化壳斜坡雨强为 2.14 mm/min 时的产沙曲线

(5) 由于神府东胜矿区开发导致地表剧烈扰动, 地表物质经搬离而重新堆积, 新弃土壤结构疏松, 植被根系稀少, 不能进行很好的固沙保土, 在高强度降雨发生时, 土壤侵蚀严重, 较原状土有近十倍的增加。随着堆积年限的增加, 由于堆积土壤颗粒间重力压实, 以及植被的逐渐增加, 土壤抗侵蚀能力有显著提高。经过实地调查矿区内弃土的生态恢复情况, 发现在一些人为扰动明显的地区植被生长很差, 地表的土壤流失严重。通过分析, 我们认为, 为了保证堆积土的自然生态恢复, 应严格限制人为干扰, 特别是对地表的扰动和对植被的破坏。虽然通过不同地表组成物质、不同雨强、同一物质不同固结程度的人工模拟降雨实验, 初步揭示出水蚀风蚀交错带不同下垫面土壤水蚀过程的一些特性, 但由于野外人工模拟降雨环境的多变性、实验工作时间限制, 实验数据系列较短, 有关详细的不同下垫面土壤水蚀力学机理还需进一步研究; 人为扰动土体自我恢复过程的生态机理是未来加强研究的主体。