

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.08.031

# 黄土堆积体植物篱减沙效益与泥沙颗粒分形特征研究

杨 帅<sup>1,2</sup> 李永红<sup>1,3</sup> 高照良<sup>1,3</sup> 牛耀彬<sup>1,3</sup> 白 皓<sup>3</sup> 王 凯<sup>1</sup>

(1. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 为探究植物篱措施对工程堆积体边坡的减流减沙效益及其对侵蚀泥沙颗粒分形维数的影响, 以堆积体未防护边坡为对照, 以不同放水流量对不同坡度堆积体植物篱防护边坡进行了放水冲刷试验。结果表明: 与对照相比, 植物篱边坡初始产流时间滞后 100 ~ 500 s, 其产流率、产沙率整体均较小, 产流率在时间尺度上表现为间歇性波动上升; 植物篱减流效率在 4% ~ 60% 之间, 减沙效率范围在 15% ~ 50% 之间, 减流减沙效率均随坡度和放水流量的增加呈幂函数形式减小; 各处理侵蚀泥沙颗粒中粉粒均占主导地位, 黏粒次之, 砂粒含量最少。与对照小区相比, 植物篱防护边坡侵蚀泥沙砂粒体积分数降低, 黏粒和粉粒体积分数升高; 黏粒富集率增加, 砂粒富集率减小, 泥沙颗粒分形维数增大。分形维数与黏粒和砂粒体积分数之间均呈极显著线性相关, 侵蚀泥沙颗粒分形维数主要由黏粒体积分数决定。

**关键词:** 工程堆积体; 植物篱; 土壤颗粒; 分形维数; 径流冲刷; 减流减沙效益

**中图分类号:** S157.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2017)08-0270-09

## Runoff and Sediment Reduction Benefit of Hedgerows and Fractal Characteristics of Sediment Particles on Loess Plateau Slope of Engineering Accumulation

YANG Shuai<sup>1,2</sup> LI Yonghong<sup>1,3</sup> GAO Zhaoliang<sup>1,3</sup> NIU Yaobin<sup>1,3</sup> BAI Hao<sup>3</sup> WANG Kai<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** As a kind of special landform unit, engineering accumulation is an important source of soil erosion. To explore effects of hedgerows on sediment particles fractal dimension on hillslope, and the runoff and sediment reduction effects of engineering measures, the field pouring water scouring experiments were designed for different inflow rates (35 L/min, 45 L/min and 55 L/min) and slopes (24°, 28° and 32°) in six normal runoff plots (20 m × 5 m). The results showed that the lagged time of initial runoff of hedgerow plots was 100 ~ 500 s, and the runoff rate and sediment yield rate were less than those of the control plot. Runoff rate rose for intermittent fluctuations in time scale compared with the control plot. Hedgerow reduced the flow rate by 4% ~ 60%, and decreased the rate of sediment by 15% ~ 50%. Significant power function relationships of runoff and sediment reduction rate with slope and flow rate were observed, and the effect of sediment reduction was better than that of runoff reduction rate equation. Runoff sediment was dominant with silt particle, followed by clay. Compared with the control plot, the volume percentage of sand particle in sediment of the hedgerow plots was reduced. In contrast, the volume percentage of clay and silt was increased. Hedgerow plots clay enrichment rate was higher than those in the control plot, and the sand accumulation rate was less than the control plot. The fractal dimension of the hedgerow plots was bigger than that in control plots. The relationships between fractal dimension and the volume fraction of clay and sand were available for better fitting linear model, and fractal dimension of sediment erosion was mainly determined by the volume fraction of clay. The research

收稿日期: 2017-03-29 修回日期: 2017-06-12

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671283)

作者简介: 杨帅(1993—), 男, 博士生, 主要从事工程建设区土壤侵蚀与水土保持研究, E-mail: ys930125@163.com

通信作者: 李永红(1971—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事农业水土工程研究, E-mail: lyh712100@163.com

results could provide some basic data for establishing the model of soil erosion of engineering measures under the condition of accumulation, and provide a theoretical reference for the optimal allocation to hedgerow slope.

**Key words:** engineering accumulation; hedgerows; soil particle; fractal dimension; runoff scouring; runoff and sediment reduction benefit

## 引言

中国正处于现代化建设加速期,近 20 a 来资源开发力度大,工矿企业和基础设施建设项目多,产生了数量众多的排土场、排矸场、尾矿库等各类工程堆积体<sup>[1]</sup>。工程堆积体是指生产建设项目因挖填不平衡所产生的弃土弃渣堆置而成的特殊地貌单元,具有独特的土壤组成及复杂的脆弱下垫面条件,其土壤土质松散、结构缺失、土壤有机质及植物根系缺乏,致其抗冲性极差。据李建明等<sup>[2]</sup>对全国主要水蚀区(6 大区)的 368 座工程堆积体的调查总结,工程堆积体具有堆置形态各异、下垫面物质组成复杂、坡形高陡,极易产生水土流失等四大基本特征,是生产建设区新增水土流失的重要来源,受到社会各界广泛关注<sup>[3]</sup>。关于工程堆积体坡面土壤侵蚀的研究,多集中在以放水冲刷和人工降雨<sup>[4-5]</sup>条件下进行模拟试验,探究工程堆积体土壤侵蚀的影响因素和产流产沙规律<sup>[6]</sup>,以期能准确预测侵蚀量,找出最佳治理措施和防治技术模式。植物措施其对坡面径流和泥沙具有重要的调控作用<sup>[7]</sup>,通常被认为是防治土壤侵蚀的最根本措施,大量研究表明,植物篱有明显的减流减沙效益<sup>[8-9]</sup>。国内外许多学者对植物篱控蚀保水的机理进行了研究,RACHMAN 等<sup>[10]</sup>认为植物篱提高了土壤入渗能力、导水率;许峰等<sup>[11]</sup>研究表明,经过较长时间,植物篱对微地貌的改变对减沙效果也有一定贡献。侵蚀泥沙土壤颗粒组成是土壤最基本的物理属性之一,常被用来描述土壤质地状况和结构性质,对了解土壤侵蚀机制、评价土地生产力意义重大。土壤粒径、颗粒表面积、颗粒体积、孔隙大小等具有自相似结构,具有一定的分形特征<sup>[12]</sup>。分形维数是用来描述复杂形体不规则性的量度,反映不规则形体占有空间的有效性。分形理论在土壤科学方面的研究取得了一定的进展,MARTINEZ-MENA 等<sup>[13]</sup>和 AHMADI 等<sup>[14]</sup>认为土壤颗粒分形维数可以作为可蚀性差异的区分指标;WARRINGTON 等<sup>[15]</sup>和 BERGER 等<sup>[16]</sup>对重度、轻度侵蚀及细沟侵蚀的下泥沙颗粒的组成进行研究,都强调了雨强变化的作用;而国内对泥沙颗粒与侵蚀影响因素之间的关系研究较少,杨帆等<sup>[17]</sup>通过侵蚀泥沙有效粒径分布和最终粒径分布的比值分析泥沙

团粒的粒径分选特征,发现产流初始阶段粗砂、细砂、细粉粒和粘粒多以团聚体形式存在,而粗粉砂以初级粒子形式存在。把分形理论及其方法应用到土壤学领域,可推动土壤形态、过程等复杂问题的解决,并可在一定程度上使其定量化<sup>[18]</sup>。

目前,已有研究主要集中于以缓坡耕地作为下垫面,研究植物篱措施的配置模式及其减流减沙过程和机制,且大多研究主要集中在缓坡模拟冲刷和室内装填土槽的试验中,而对人工模拟暴雨在野外陡坡原位小区上土壤侵蚀研究相对较少,有关陡坡工程堆积体坡面植物篱条件下运用分形理论与方法分析植物篱对侵蚀泥沙颗粒特征及其减流减沙效果的研究也较为少见。本文主要通过野外径流小区放水冲刷试验模拟陡坡工程堆积体植物篱措施条件下的径流冲刷过程,引入分形理论,用侵蚀泥沙分形维数来表征整个坡面侵蚀动态变化,探究植物篱措施对工程堆积体坡面侵蚀泥沙颗粒分布特性及其减流减沙效果,以期揭示植物篱对堆积体坡面土壤侵蚀过程及规律,为生产建设项目新增水土流失的预测及植物篱措施的合理配置提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验小区概况

试验区位于中国科学院长武黄土高原农业生态试验站王东沟小流域(35°14'24.5"N、107°40'21.2"E),海拔高度 1 107 m,属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均降水量 584 mm,降水季节分布不均匀,多集中于 7—9 月份,年均气温 9.1℃,年积温 2 994℃,光照资源充沛,昼夜温差大,无霜期 171 d,地下水位 50 ~ 80 m。该区属典型黄土高原沟壑区,地带性土壤为黑垆土,土壤母质为中壤质马兰黄土。本试验小区的布设是基于李建明等<sup>[2]</sup>对全国主要水蚀区 368 座工程堆积体的堆置类型、下垫面物质组成、坡形因子和侵蚀规律等概化结果,确定了模拟试验的径流小区标准化参数,本研究采用的径流小区从形式上与标准径流小区没有差别,试验小区为标准径流小区(坡面投影长 20 m,宽 5 m),覆土厚度 0.5 m;其下垫面物质组成和坡形因子等均是依据黄土高原水蚀区工程堆积体下垫面物质组成的调查概化结果构建,本试验堆积体土壤质地为砂壤,碎石粒径范围指大

于 10 mm 的砾石,土石质量比超过 9:1,土壤粒径多在 1 mm 以下,原状土土壤颗粒粒径 0.1~0.2 mm、0.05~0.1 mm、0.02~0.05 mm、0.01~0.02 mm、0.005~0.01 mm、0.002~0.005 mm、0.001~0.002 mm 和 0~0.001 mm 的体积分数依次为 0.09%、5.96%、32.59%、24.97%、10.77%、6.67%、5.63% 和 13.33%;其具体布设方式为:在人工开挖面上构建,开挖面达到了土壤母质层。试验小区经现场机械开挖后进行人工回填,回填土壤来自周边高陡边坡开挖产生的弃土,回填前清除弃土中杂草和有机残落物层,使其更接近工程堆积体真实情况并避免土壤中根系影响试验效果,回填后对下垫面进行颗粒组成、土壤容重和含水率等检验,经检验其下垫面物质组成符合水蚀区工程堆积体概化结果(表 1)。本试验采用径流冲刷方式,用稳压水箱保持放水流量恒定,调节阀与水表配合进行率定流量,通过稳流槽获得平稳、恒定的出流。试验小区及模拟径流放水装置示意图见图 1,试验供水来自王东沟民用水井。

表 1 试验区和黄土水蚀区堆积体下垫面物质组成对比

Tab.1 Composition comparison of accumulation body underlying-surface in experimental area and loess area

下垫面物质参数	试验区	黄土水蚀区
黏粒(0~0.002 mm)质量分数/%	18.96	17.63
粉粒(0.002~0.05 mm)质量分数/%	74.99	75.85
砂粒(0.05~0.2 mm)质量分数/%	6.05	6.52
土石质量比	9:1	9:1
土壤容重/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	1.30~1.40	1.28~1.52
土壤质量含水率/%	15.22~17.88	9.80~19.20

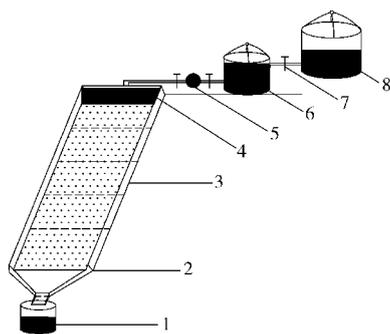


图 1 试验设备示意图

Fig.1 Device sketch for experiments

1. 集流桶
2. 集流槽
3. 试验小区
4. 稳流槽
5. 流量计
6. 恒压桶
7. 阀门
8. 蓄水桶

## 1.2 试验设计与方法

根据试验区一年中发生的最大暴雨强度,并结合前期放水试验的研究成果,设置 35、45、55 L/min 共 3 个放水流量梯度(对应雨强分别为 24、31、38 mm/h)。由于野外调查发现工程堆积体边坡坡度

集中在 23°~40°,因此试验设计边坡坡度为 24°、28°和 32°,每个坡度设置一个植物篱小区(H)并同时设置裸坡小区作为对照(C),每个小区在其它相同条件下依次按 3 个放水流量梯度进行冲刷,共计 18 场试验。

试验小区布设见图 2,本小区布设是基于唐克丽<sup>[19]</sup>对坡耕地植物篱间距设置为 2.8~6 m 研究结果,并结合工程堆积体特殊下垫面、坡形因子及前期预试验修正所得,植物篱小区内布置 4 道植物篱,篱间距 4 m,从距离坡顶 3 m 处开始布设。从坡顶到坡底按照 6、4、4、6 m 的长度将坡面分为 4 个区段,从上至下编号为 I~IV,使植物篱小区每个区段内均包含一道植物篱,以便于对比分析对照坡面和植物篱小区细沟侵蚀分布的差异。每场试验结束后,通过测量细沟尺寸计算细沟体积,以此反映细沟侵蚀量。

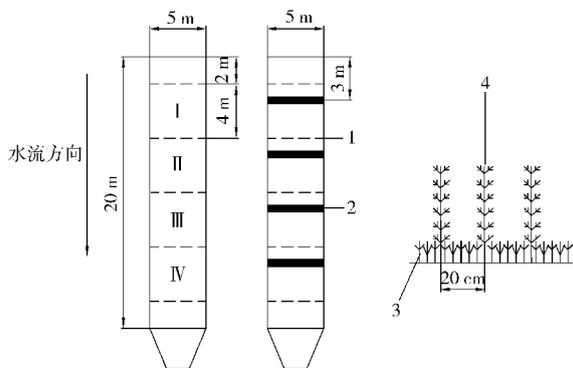


图 2 径流小区布置示意图

Fig.2 Layout of different experiments

1. 测量断面
2. 植物篱带
3. 紫花苜蓿
4. 紫穗槐

依据黄土高原植被建设经验,本试验在堆积体坡面沿等高线一定间距种植速生、萌生能力强的灌木和草本植物(紫穗槐和紫花苜蓿)构建植物篱带。为给植物提供较好的生长条件并利于前期种植,试验以水平阶整地,构建植物篱宽 60 cm,试验前 1 a 以株距 20 cm 栽植紫穗槐幼苗,试验当年以 67 kg/hm<sup>2</sup> 的密度播种紫花苜蓿,以保证至试验前篱带内覆盖率达到 90%。每次试验前对坡面进行重新平整,并控制土壤容重和含水率(分别选取 5 个观测断面 0~20 cm 土壤容重和含水率,土壤容重介于 1.30~1.40 g/cm<sup>3</sup> 之间,均值 1.33 g/cm<sup>3</sup>,变异系数为 4.52%;土壤质量含水率介于 15.22%~17.88% 之间,均值 16.52%,变异系数 5.98%)。每小区设置 5 个测量断面,分别为距坡顶 2、6、10、14、18 m 的位置。试验从有径流流出小区时开始计时,持续 39 min,最初 6 min 内每隔 2 min,其后每隔 3 min 测定 1 次浑水总量并收集径流泥沙样,同时每个测量断面处测定对应时刻的水宽及流速。在实验室采

用 MS2000 型激光粒度分析仪分析土壤侵蚀泥沙颗粒组成, 烘干法测定样品中的含沙量, 高锰酸钾示踪法测定流速(染色剂法测定流速为径流表层流速, 实测流速乘以 0.75 作为断面平均流速)。

### 1.3 数据分析

分形维数采用杨培岭等<sup>[20]</sup>提出的用粒径的质量分布描述土壤分形模型

$$\frac{W(\delta > d_i)}{W_0} = 1 - \left(\frac{d_i}{d_{\max}}\right)^{3-D} \quad (1)$$

王国梁等<sup>[21]</sup>对体积分形维数模型进行了推导, 两边取对数后得

$$\lg \frac{W(\delta < d_i)}{W_0} = (3 - D) \lg \frac{d_i}{d_{\max}} \quad (2)$$

其中  $d_i = (d_j + d_{j+1})/2$   
 式中  $W(\delta > d_i)$ ——粒径大于  $d_i$  累积土粒质量  
 $W_0$ ——各粒级土粒质量之和  
 $d_i$ ——筛分粒径范围  $[d_j, d_{j+1}]$  平均值  
 $d_{\max}$ ——某个粒径级  $[d_j, d_{j+1}]$  最大粒级平均直径

以  $\lg \frac{W(\delta < d_i)}{W_0}$  和  $\lg \frac{d_i}{d_{\max}}$  为因变量和自变量进行线性拟合, 拟合的直线斜率即为  $3 - D$ , 从而可求出分形维数  $D$ 。

## 2 结果与分析

### 2.1 径流和泥沙分析

#### 2.1.1 植物篱对堆积体边坡产流过程的影响

植物篱可以延缓径流的产生, 将坡度  $32^\circ$ , 放水流量 35、45、55 L/min 条件下对照小区和植物篱小区的初始产流时间对比情况见表 2。由表 2 可知, 植物篱边坡初始产流时间明显滞后于对照小区, 其初始产流时间比对照小区滞后 100 ~ 500 s, 分别增加了 186%、235% 和 125%。植物篱条件下产流滞后的主要原因是植物篱带通过机械阻力消减了径流能量, 降低了径流流速, 从而增加了径流在坡面表面停留的时间。冯浩等<sup>[22]</sup>对草地的研究也显示, 植被覆盖将坡面的起流历时延长了 3 倍左右。

表 2  $32^\circ$  对照小区和植物篱小区初始产流时间变化

Tab. 2 Change of runoff time of  $32^\circ$  runoff discharge and gradient

放水流量/(L·min <sup>-1</sup> )	对照小区/s	植物篱小区/s
35	255	731
45	101	338
55	100	225

在坡度  $32^\circ$  条件下, 植物篱坡面和裸坡对照坡面产流率随冲刷时间的变化过程如图 3 所示。由

图 3 可知, 对照小区和植物篱小区的产流率均随着放水流量的增加而增大, 当放水流量由 35 L/min 增加到 55 L/min, 坡面平均产流率增加了 2.0 ~ 2.9 倍; 随着时间的推移可分为增长-稳定 2 个变化阶段: 在产流前 9 min 产流率均增长较快, 随后坡面产流过程趋于稳定或略有波动, 原因是冲刷试验中对小区输入的水量先经过入渗和汇流过程之后, 水流才能到达坡底形成出流; 试验开始时, 土壤含水率相对较低, 水分下渗率较大, 因此产流率较小, 而随着时间的推移, 土壤含水率增大, 下渗率减小, 致使产流率随之增大, 当坡面逐渐达到稳定下渗率, 产流率也趋于稳定。对比 2 种小区可得, 植物篱小区的产流率始终小于对照小区产流率, 这是由于植物篱带改良了土壤结构使其土壤孔隙度增加, 从而增强了土壤入渗及持水能力, 增加了坡面蓄满产流所需的径流量; 同时, 植物篱带通过机械阻力增加了径流在边坡表面停留的时间, 这种滞后现象也是植物篱水土保持效果的重要影响因素<sup>[23]</sup>, 对于同一时间的冲刷或降雨时间, 产流时刻的推移缩短了坡面受到径流侵蚀的总时间, 从而降低坡面侵蚀量。

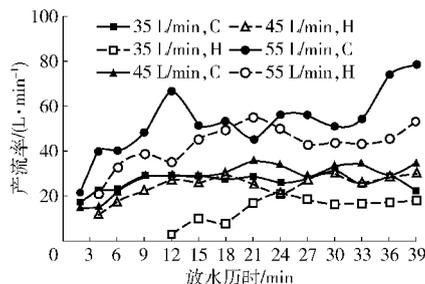


图 3  $32^\circ$  小区产流率随时间变化过程

Fig. 3 Variation process of runoff yield rate with time under  $32^\circ$  runoff plot

#### 2.1.2 植物篱对堆积体边坡产沙过程的影响

在坡度  $32^\circ$  条件下, 植物篱坡面对对照坡面产沙率随冲刷时间的变化过程如图 4 所示。由图 4 可知, 对照小区和植物篱小区的产沙率在放水冲刷的前中期总体随着放水流量的增加而增大; 同时, 其产沙率的变化存在 2 种情况: 其中高放水流量下 (45、55 L/min) 趋势变化过程对比明显, 前期快速上升, 而后明显下降, 产流结束时的产沙率已经小于产流初期的产沙率; 而低放流量下 (35 L/min), 前期产沙率略有上升, 而后渐趋稳定, 变化量不大。从对照小区和植物篱小区的产沙对比来看, 在产流前中期, 对照小区的产沙率均明显大于植物篱小区, 随着时间的推移, 产沙率下降, 但对照小区的产沙率变化幅度较大, 使得在产流后期, 2 种小区的产沙过程线逐渐接近, 产沙率差距越来越小, 在放水流量 55 L/min 时, 植物篱与对照坡面产沙率基本相同, 分别为

16.32 kg/min 和 16.76 kg/min。原因是在小区的产流初期,堆积体表面大量松散物质被径流剥离、搬运,且从坡面顶部开始沟蚀迅速发育,径流可以挟带大量泥沙,因此产沙率较高,随着放水历时的推移,面蚀的面积减小,侵蚀沟逐渐发育完善,特别是沟头已经稳定,而径流到达下部坡面时由于含沙量的增加其剥蚀能力下降,对坡面的侵蚀速率下降,最终导致了坡面产沙率的不断减小。植物篱的控蚀作用使得坡面的产沙率小于裸坡,但后期二者的产沙率越来越相近,表现出控蚀能力随时间推移会逐渐减小。

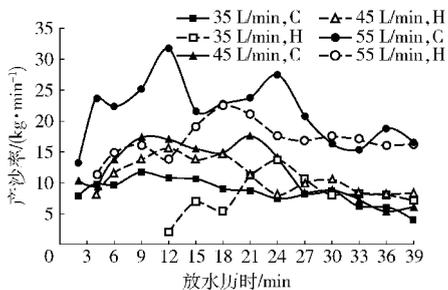


图4 32°小区产沙率随时间变化过程

Fig. 4 Variation process of sediment yield rate with time under 32° runoff plot

## 2.2 植物篱措施的减流、减沙效率分析

减流、减沙效率是指实施水土保持措施后减少的径流和产沙量相对于对照的百分数。不同坡度、不同放水流量条件下各小区的累积径流量如图5所示。由图5可知,对照小区和植物篱小区的累积径流量都随着小区坡度和放水流量的增加而增大,植物篱小区的累积径流量较对照小区减少了0.1~0.6倍;表3显示了不同条件下植物篱的减流效果,其减流效率在4%~60%之间。经平均值计算,从坡度单一因素分析,植物篱减流效率由小到大表现为:24°(18.45%)、28°(20.48%)、32°(33.82%),随坡度的增加而增大;从流量单一因素分析,植物篱的减流效率由小到大表现为:55 L/min(10.73%)、35 L/min(29.70%)、45 L/min(32.32%),可见植物篱的减流能力与径流流量不是简单的正相关

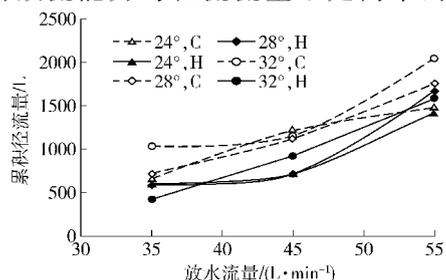


图5 不同坡度及流量下对照坡面与植物篱坡面的累积径流量对比

Fig. 5 Comparison of control plot and hedgerows plot cumulative runoff under different slopes and flows

关系。

表3 不同坡度及流量下植物篱措施的减流减沙效率

Tab. 3 Runoff and sediment reduction benefit of hedgerows under different runoff discharges and gradients

坡度/(°)	流量/(L·min <sup>-1</sup> )	减流效率/%	减沙效率/%
24	35	10.43	44.58
	45	40.77	37.33
	55	4.14	46.45
28	35	19.58	43.76
	45	36.15	34.80
	55	5.71	33.61
32	35	59.09	30.47
	45	20.03	15.14
	55	22.34	23.46

不同坡度、不同放水流量条件下各小区的累积产沙量如图6所示。由图6可知,对照小区和植物篱小区的累积产沙量都随着坡度和放水流量的增加而增大,植物篱小区的累积产沙量较对照小区减少了0.2~0.5倍;表3显示了不同条件下植物篱的减沙效果,植物篱的减沙效果总体趋势是随着坡度和放水流量的增大而减小,其减沙效率在15%~50%之间。从坡度单一因素分析,24°、28°、32°植物篱小区的平均减沙效率分别为42.78%、37.39%、23.02%;从流量单一因素分析,35、45、55 L/min流量下植物篱平均减沙效率分别为39.61%、29.09%、34.51%,相比减流效果,植物篱的减沙效果更为明显且稳定。同时,由表4中的减流、减沙效率与坡度、流量拟合回归方程的决定系数 $R^2$ 及其相关性( $P < 0.01$ )检验结果可见,减沙效率方程的拟合效果更好,且符合随坡度和流量的增加,减沙能力降低的规律,这进一步验证了减缓边坡坡度是降低水土流失的重要策略。

在不同的下垫面及降雨条件下采用相同的水土保持措施取得的效果是不同的,总体来说,随着坡度的增加和坡面来水量的增加,水土保持效果在减弱。因而在植物篱的实际运用中,针对堆积体不同的坡

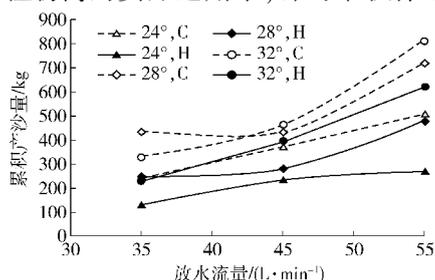


图6 不同坡度及流量下对照坡面与植物篱坡面的累积产沙量对比

Fig. 6 Comparison of control plot and hedgerows plot cumulative sediment yield under different slopes and flows

度和当地的降水条件,要达到一定的减沙效果,需要配置不同规格的植物篱, DONJADEE 等<sup>[24]</sup>和马云等<sup>[25]</sup>的研究结果对不同规格植物篱与坡度、降水等因素的关系进行了量化,表明在大坡度大雨强的情况下,需要适当通过提高植物篱布设密度等方式来增强其控蚀效果。

表 4 减流、减沙效率与坡度、流量的回归分析

Tab. 4 Fitted relation of runoff and sediment reduction benefit and runoff discharge and gradient

类型	拟合方程	决定系数 $R^2$
减流效率	$C_W = 0.0215^{5.301} Q^{-3.086} + 11.174$	0.52
减沙效率	$C_M = -0.0125^{1.995} Q^{0.375} + 69.959$	0.79**

注: \*\*表示侵蚀泥沙颗粒与分形维数相关性极显著 ( $P < 0.01$ ),下同。

### 2.3 植物篱措施对侵蚀泥沙粒径分选特性的影响

#### 2.3.1 侵蚀泥沙颗粒组成特征

按照美国制土壤组成分级标准,将土壤颗粒分为黏粒(粒径  $0 \sim 2 \mu\text{m}$ )、粉粒( $2 \sim 50 \mu\text{m}$ )和砂粒( $50 \sim 2000 \mu\text{m}$ )。MARTINEZ-MENA 等<sup>[26]</sup>、WARRINGTON 等<sup>[15]</sup>和 BERGER 等<sup>[16]</sup>对重度、轻度侵蚀及细沟侵蚀下的泥沙颗粒组成进行的研究,都强调了降雨强度变化对颗粒组成及其分选特性的影响作用。对照小区和植物篱小区不同流量和坡度条件下侵蚀泥沙平均值颗粒体积分数分布情况如图 7 所示,侵蚀泥沙颗粒分布具体情况统计见表 5。由图 7 和表 5 可知,各流量和坡度下径流小区的侵蚀产沙中粉粒均占主导地位,均超过 70%,黏粒次之,主要位于 19%~21%之间,砂粒所占比重最少,在 5%~7%之间;由图 7 可知,在单一坡度因子或单一放水流量因子下,对照小区侵蚀泥沙中砂粒的含量逐渐增加,黏粒含量减少。在单一坡度因子下,其侵蚀泥沙黏粒含量由大到小为:  $C_{24^\circ}$  (19.60%)、 $C_{28^\circ}$  (19.43%)、 $C_{32^\circ}$  (19.09%),其砂粒含量由小到大为:  $C_{24^\circ}$  (6.13%)、 $C_{28^\circ}$  (7.35%)、 $C_{32^\circ}$  (7.40%),这与彭怡等<sup>[26]</sup>的研究结论相似,原因可能是在本试验中小坡度和低流量下坡面径流的剪切力已经

远超过黏粒之间的粘结力,通过增大坡度和流量而增加的径流能量使得径流的挟沙能力提高,可以推移、搬运更多的大颗粒土壤,使含沙径流中砂粒含量增加。

由图 7、表 5 还可得出,在不同坡度、流量条件下,植物篱坡面较对照坡面侵蚀泥沙颗粒中的砂粒所占体积分数减少了 15.59%,黏粒和粉粒所占比例升高,分别增加了 4.35%、0.46%,表明植物篱对砂粒有明显的拦截作用。原因在于当含沙径流通过植物篱时,受到的机械阻力与摩擦阻力增大,径流流速降低,挟沙能力下降,对大颗粒搬运能力下降明显,但对较细颗粒的输移能力影响相对较小,因而砂粒的含量相对降低。

#### 2.3.2 侵蚀泥沙中富集颗粒的对比分析

富集率 ( $E_R$ ) 是侵蚀泥沙分散后某粒级的颗粒含量与供试土样分散后该粒级颗粒含量的比值。与供试土壤相比,当  $E_R < 1$  时,说明该粒级颗粒在侵蚀泥沙中含量低,发生沉积;而当  $E_R > 1$  时,该粒级颗粒在侵蚀泥沙中含量高,发生富集;通过分析分散后侵蚀泥沙颗粒含量与原始颗粒含量的比值,可了解土壤颗粒在侵蚀过程中的分选性<sup>[27]</sup>。

不同坡度、流量条件下,各黏粒、粉粒、砂粒的富集率如表 5 所示。由表 5 可知,各坡度、流量下,黏粒的富集率整体上都大于 1,粉粒的富集率整体上都约为 1,而砂粒的富集率随坡度和流量的增强而增加,并最终整体上富集率由约为 1 变化为明显大于 1,说明对整个侵蚀过程而言,黏粒容易被侵蚀,并表现为在侵蚀泥沙中发生富集,粉粒在侵蚀过程中其含量和供试土壤中粉粒含量几乎相同,表明其未发生明显的沉积或侵蚀;而砂粒富集率随坡度流量变化较大的原因是在整个侵蚀过程中坡度或流量越大,其径流冲刷作用和搬运能力越强,从而促使侵蚀泥沙中粗颗粒运移,发生富集。在各坡度、流量条件下,植物篱小区黏粒富集率均大于对照小区,砂粒富集率均小于对照小区,且其砂粒富集率整体小于 1,说明较对照小区,植物篱小区黏粒更容易被侵蚀,

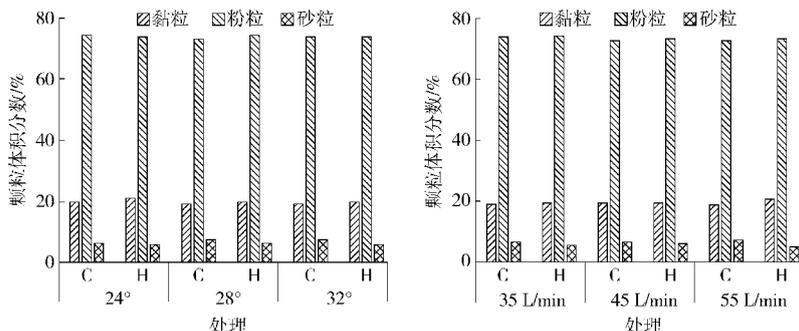


图 7 对照小区和植物篱小区侵蚀泥沙平均值颗粒体积分数分布

Fig. 7 Average value of particle size distribution of sediment under different runoff discharges and gradients

而砂粒则难以被侵蚀,更易沉积,原因主要是植物篱对大颗粒具有更强的机械拦截作用。同时,由表5还可知,植物篱小区砂粒富集率随坡度或流量的增强而增加,具体表现为:由沉积( $E_R < 1$ )到富集

( $E_R > 1$ ),这表明植物篱对大颗粒的机械拦截能力是有限度的。因此,在植物篱的实际应用中,应根据各坡度、流量条件,通过减小植物篱布设间距等方式以提升其对大颗粒的机械拦截能力。

表5 不同流量和坡度下侵蚀泥沙颗粒分布及分形维数

Tab.5 Particle size distribution and fractal dimension of sediment under different runoff discharges and gradients

坡度/ (°)	流量/ (L·min <sup>-1</sup> )	处理	粒径体积分数/%			颗粒富集率			分形维数
			黏粒	粉粒	砂粒	黏粒	粉粒	砂粒	
24	35	C	19.39	74.41	6.19	1.02	0.99	1.03	2.66
		H	20.05	74.38	5.57	1.06	0.99	0.92	2.67
	45	C	19.82	73.58	6.20	1.05	0.98	1.03	2.66
		H	20.27	73.83	5.90	1.07	0.98	0.98	2.66
	55	C	19.60	74.41	5.99	1.03	0.99	0.99	2.66
		H	21.65	72.51	5.84	1.14	0.97	0.97	2.68
28	35	C	19.14	73.86	7.00	1.01	0.98	1.16	2.65
		H	19.32	74.91	5.77	1.02	1.00	0.96	2.66
	45	C	19.44	73.54	7.02	1.03	0.98	1.16	2.66
		H	19.65	74.06	6.29	1.04	0.99	1.04	2.66
	55	C	19.71	72.27	8.02	1.04	0.96	1.33	2.65
		H	19.81	73.66	6.54	1.04	0.98	1.08	2.66
32	35	C	19.54	73.75	6.71	1.03	0.98	1.11	2.66
		H	19.87	74.18	5.95	1.05	0.99	0.98	2.66
	45	C	19.20	73.05	7.38	1.01	0.97	1.22	2.66
		H	19.80	73.44	6.75	1.04	0.98	1.12	2.66
	55	C	18.54	73.35	8.11	0.98	0.98	1.34	2.65
		H	21.53	74.22	4.24	1.14	0.97	0.70	2.68

## 2.4 植物篱措施对侵蚀泥沙颗粒分形维数的影响

三维颗粒分形维数是由 TYLER 等<sup>[28]</sup> 根据 MANDELBROT<sup>[29]</sup> 的二维分形理论而建立的颗粒体积分物理模型,其通过用粒径质量分布代替数量分布的方式来描述土壤分形,突破了土壤颗粒分析条件的限制,解决了无法快速准确测到土壤粒径分布体积和数量的难题。分形维数通过表征土壤颗粒粒径分布、土壤质地均一程度、土壤团粒结构团聚体、水稳性团聚体和粒径组成等<sup>[30]</sup>,可用于反映坡面土壤质地及肥力对侵蚀过程的响应<sup>[25]</sup>及坡面土壤结构对侵蚀的影响<sup>[4]</sup>。

表5中分别列出了不同坡度和放水流量下对照小区和植物篱小区的土壤颗粒分形维数,通过计算

分形维数的差值可知,植物篱小区的分形维数均大于对照小区(32°小区在放水流量为35 L/min条件下除外)。侵蚀泥沙颗粒体积分形维数与黏粒、粉粒和砂粒体积分数之间的关系如图8所示。由图8可知,分形维数与黏粒和砂粒体积分数之间的关系均可以用线性模型进行较好拟合( $P < 0.01$ ),其中,分形维数与黏粒体积分数之间为极显著正相关关系,但与粉粒和砂粒体积分数之间为负相关关系(其中与砂粒体积分数呈极显著负相关),侵蚀泥沙颗粒分形维数主要由黏粒体积分数决定,这与刘森等<sup>[31]</sup>、慈恩等<sup>[32]</sup>、王国梁等<sup>[21]</sup>和党亚爱等<sup>[33]</sup>的研究结果相符。因此,植物篱小区的分形维数相对较高反映了侵蚀泥沙中砂粒比重的下降,黏粒比重升

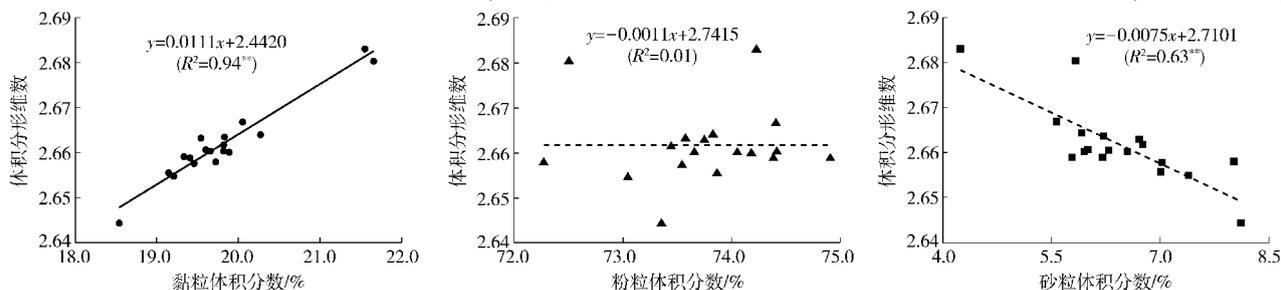


图8 分形维数与黏粒、粉粒和砂粒体积分数的相关关系

Fig.8 Correlations between fractal dimension and contents of clay, silt and sand

高,可以作为植物篱对侵蚀产沙中泥沙颗粒级分布的评价指标。

### 3 结论

(1)植物篱可以延缓径流的产生,植物篱的初始产流时间明显滞后于对照小区。与对照相比,植物篱小区的产流率较小,同时其产沙率在前中期较小,而在后期,产沙率差距越来越小。随着放水历时的推移,受坡面植物篱和放水强度的综合影响,坡面产流产沙过程较为复杂。

(2)不同坡度、放水流量条件下,与对照相比,植物篱减流效率在4%~60%之间,减沙效率范围在15%~50%之间。植物篱减流、减沙效率与坡度、流量间的关系可用幂函数进行拟合,拟合效果较好,植物篱减沙较减流效益更为明显且稳定。

(3)随着流量和坡度的增加,植物篱坡面较对照侵蚀泥沙颗粒中的砂粒体积分数减小,而黏粒和粉粒所占比例增加。与对照相比,植物篱坡面小颗粒(黏粒)富集率较大,大颗粒(砂粒)富集率相对较小。植物篱坡面黏粒更易被侵蚀,而砂粒则更易沉积,植物篱对砂粒有明显的拦截作用,实际运用中可通过减小植物篱布设间距等方式以提升其对大颗粒的机械拦截能力。

(4)不同坡度和放水流量下,植物篱坡面较对照的分形维数整体较大。分形维数与黏粒和砂粒体积分数之间的关系均可用线性模型进行较好的拟合,颗粒分形维数主要由黏粒体积分数决定。植物篱小区的分形维数较高,反映了侵蚀泥沙中砂粒比重的下降,黏粒比重升高,分形维数可以作为植物篱对侵蚀泥沙颗粒级分布的评价指标。

### 参 考 文 献

- ZHANG Letao, GAO Zhaoliang, YANG Shiwei, et al. Dynamic processes of soil erosion by runoff on engineered landforms derived from expressway construction: a case study of typical steep spoil heap[J]. CATENA, 2015, 128: 108 - 121.
- 李建明, 牛俊, 王文龙, 等. 不同土工工程堆积体径流产沙差异[J]. 农业工程学报, 2016, 32(14): 187 - 192.  
LI Jianming, NIU Jun, WANG Wenlong, et al. Differences in characteristics of runoff and sediment yielding from engineering accumulations with different soil textures [J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(14): 187 - 192. (in Chinese)
- YANG H P, LIN L P, HE Y X. Soil erosion caused by highway construction in expansive soils districts and its prevention measures [C] // Geotechnical engineering for disaster mitigation and rehabilitation. Proceedings of the 2nd International Conference GEDMAR08, 2008: 781 - 789.
- 王全九, 赵光旭, 陶汪海, 等. 径流冲刷条件下下坡地养分随地表径流迁移数学模型[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(7): 189 - 195. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160726&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160726&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.07.026.  
WANG Quanjiu, ZHAO Guangxu, TAO Wanghai, et al. Mathematical model of soil nutrient along surface runoff under water scouring condition[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(7): 189 - 195. (in Chinese)
- 郑粉莉, 边锋, 卢嘉, 等. 雨型对东北典型黑土区顺坡垄作坡面土壤侵蚀的影响[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(2): 90 - 97. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160213&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160213&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.02.013.  
ZHENG Fenli, BIAN Feng, LU Jia, et al. Effects of rainfall patterns on hillslope erosion with longitudinal ridge in typical black soil region of Northeast China[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(2): 90 - 97. (in Chinese)
- 张翔, 高照良, 杜捷, 等. 工程堆积体坡面产流产沙特性的现场试验[J]. 水土保持学报, 2016, 30(4): 19 - 24.  
ZHANG Xiang, GAO Zhaoliang, DU Jie, et al. Field experiment on the characteristics of runoff and yield on slope of engineering accumulation body[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(4): 19 - 24. (in Chinese)
- 杨帆, 程金花, 张洪江, 等. 坡面草本植物对土壤分离及侵蚀动力的影响研究[J/OL]. 农业机械学报, 2016, 47(5): 129 - 137. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160518&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160518&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.018.  
YANG Fan, CHENG Jinhua, ZHANG Hongjiang, et al. Effect of herb plants on soil detachment and erosion dynamics[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(5): 129 - 137. (in Chinese)
- WU J Y, HUANG D, TENG W J, et al. Grass hedges to reduce overland flow and soil erosion[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2010, 30(2): 481 - 485.
- CULLUM R F, WILSON G V, MCGREGOR C, et al. Runoff and soil loss from ultra-narrow row cotton plots with and without stiff-grass hedges[J]. Soil and Tillage Research, 2007, 93(1): 56 - 63.
- RACHMAN A, ANDERSON S H, GANTZER C J, et al. Influence of stiff-stemmed grass hedge systems on infiltration[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004, 68(6): 2000 - 2006.
- 许峰, 蔡强国, 吴淑安, 等. 等高植物篱控制紫色土坡耕地侵蚀的特点[J]. 土壤学报, 2002, 39(1): 71 - 80.  
XU Feng, CAI Qiangguo, WU Shu'an, et al. Characteristics of erosion control by contour hedgerows on cultivated slope land of purplish soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2002, 39(1): 71 - 80. (in Chinese)
- 王素娜, 吕军. 分形及其在土壤科学中的应用[J]. 土壤通报, 2005, 36(2): 249 - 252.  
WANG Su'na, LÜ Jun. Fractal and its applications in soil science[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(2): 249 -

252. (in Chinese)
- 13 MARTINEZ-MENA M, DEEKS L K, WILLIAMS A G. An evaluation of a fragmentation fractal dimension technique to determine soil erodibility[J]. *Geoderma*, 1999, 90(1): 87–98.
- 14 AHMADI A, NEYSHABOURI M R, ROUHIPOUR H, et al. Fractal dimension of soil aggregates as an index of soil erodibility[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 400(3): 305–311.
- 15 WARRINGTON D N, MAMEDOV A I, BHARDWAJ A K, et al. Primary particle size distribution of eroded material affected by degree of aggregate slaking and seal development[J]. *European Journal of Soil Science*, 2009, 60(1): 84–93.
- 16 BERGER C, SCHULZE M, RIEKE-ZAPP D, et al. Rill development and soil erosion: a laboratory study of slope and rainfall intensity[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 35(12): 1456–1467.
- 17 杨帆, 张洪江, 程金花, 等. 基于模拟降雨的北京褐土坡地土壤团粒流失特征试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2016, 47(8): 137–145, 215. [http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view\\_abstract.aspx?flag=1&file\\_no=20160818&journal\\_id=jcsam](http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20160818&journal_id=jcsam). DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2016.08.018.
- YANG Fan, ZHANG Hongjiang, CHENG Jinhua, et al. Particle characteristics of eroded cinnamon soil from Beijing based on simulated rainfall[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(8): 137–145, 215. (in Chinese)
- 18 张秦岭, 李占斌, 徐国策, 等. 丹江鹦鹉沟小流域不同土地利用类型的粒径特征及土壤颗粒分形维数[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(2): 244–249.
- ZHANG Qinling, LI Zhanbin, XU Guoce, et al. Soil particle-size distribution and fractal dimension of different land use types in Yingwugou small watershed of Dan river[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(2): 244–249. (in Chinese)
- 19 唐克丽. 中国水土保持[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 513–523.
- 20 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.
- YANG Peiling, LUO Yuanpei, SHI Yuanchun. Characterized by partical size distribution of the weight of the soil fractal[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38(20): 1896–1899. (in Chinese)
- 21 王国梁, 周生路, 赵其国. 土壤颗粒的体积分形维数及其在土地利用中的应用[J]. *土壤学报*, 2005, 42(4): 545–550.
- WANG Guoliang, ZHOU Shenglu, ZHAO Qiguo. Volume fractal dimension of soil particles and its applications to land use[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(4): 545–550. (in Chinese)
- 22 冯浩, 吴淑芳, 吴普特, 等. 草地坡面径流调控放水试验研究[J]. *水土保持学报*, 2005, 19(6): 23–25.
- FENG Hao, WU Shufang, WU Pute, et al. Study on scouring experiment of regulating runoff in grassland slope[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(6): 23–25. (in Chinese)
- 23 吴淑芳, 吴普特, 宋维秀, 等. 坡面调控措施下的水沙输出过程及减流减沙效应研究[J]. *水利学报*, 2010, 41(7): 870–875.
- WU Shufang, WU Pute, SONG Weixiu, et al. Study on the outflow processes of slope regulated by works and its effects on overland flow and sediment reduction[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010, 41(7): 870–875. (in Chinese)
- 24 DONJADEE S, CLEMENTE R S, TINGSANCHALI T, et al. Effects of vertical hedge interval of vetiver grass on erosion on steep agricultural lands[J]. *Land Degradation & Development*, 2010, 21(3): 219–227.
- 25 马云, 何丙辉, 何建林, 等. 三峡库区皇竹草植物篱对坡面土壤分形特征及可蚀性的影响[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(4): 79–82.
- MA Yun, HE Binghui, HE Jianlin, et al. Effects of herba andrographit is hedgerow on soil fractal characteristics and erodibility on sloping cropland in Three Gorges Reservoir region[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(4): 79–82. (in Chinese)
- 26 MARTINEZ-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): 261–275.
- 27 彭怡, 王玉宽, 傅斌, 等. 紫色土流失土壤的颗粒特征及影响因素[J]. *水土保持通报*, 2010, 30(2): 142–144.
- PENG Yi, WANG Yukuan, FU Bin, et al. Particle characteristics and influencing factors of eroded purple soil[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010, 30(2): 142–144. (in Chinese)
- 28 TYLER S W, WHEATCRSFT S W. Fractal scaling of soil particle-size distributions-analysis and limitations[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(2): 362–369.
- 29 MANDELBROT B B. *The fractal geometry of nature*[M]. San Francisco: W H Freeman, 1983: 488.
- 30 刘永辉, 崔德杰. 长期定位施肥对潮土分形维数的影响[J]. *土壤通报*, 2005, 36(3): 324–327.
- LIU Yonghui, CUI Dejie. Effects of long-term fertilization on fractal dimension[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, 36(3): 324–327. (in Chinese)
- 31 刘森, 吴媛媛, 杨明义, 等. 次降雨过程中侵蚀泥沙分形维数的变化特征[J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(2): 37–43.
- LIU Miao, WU Yuanyuan, YANG Mingyi, et al. Variation characteristics of fractal dimension of eroded sediment under different rainfall conditions[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015, 13(2): 37–43. (in Chinese)
- 32 慈恩, 杨林章, 程月琴, 等. 不同耕作年限水稻土土壤颗粒的体积分形特征研究[J]. *土壤*, 2009, 41(3): 396–401.
- CI En, YANG Linzhang, CHENG Yueqin, et al. Volume fractal property of soil particle size distribution of paddy soils cultivated for different years[J]. *Soils*, 2009, 41(3): 396–401. (in Chinese)
- 33 党亚爱, 李世清, 王国栋, 等. 黄土高原典型土壤剖面土壤颗粒组成分形特征[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(9): 74–78.
- DANG Ya'ai, LI Shiqing, WANG Guodong, et al. Fractal characteristics of soil particle composition for typical types of soil profile on Loess Plateau[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(9): 74–78. (in Chinese)