

ISSN 0564-3929

Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao



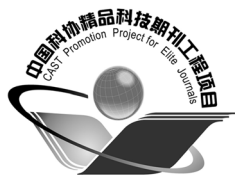
中国土壤学会
科学出版社

主办
出版

2015

第52卷 第5期

Vol.52 No.5



土 壤 学 报

(Turang Xuebao)



第 52 卷 第 5 期 2015 年 9 月

目 次

综述与评论

- 基于文献计量分析的近30年国内外土壤科学发展过程解析 宋长青 谭文峰 (957)
土壤生态系统服务的概念、量化及其对城市化的响应 吴绍华 虞燕娜 朱 江等 (970)

研究论文

- 基于土壤系统分类的河南省土壤有机质时空变异 李 玲 张少凯 吴克宁等 (979)
皖南第四纪红土伊利石结晶度值与风化强度的关系 刘莉红 胡雪峰 叶 玮等 (991)
青海民和官亭盆地喇家遗址古耕作土壤层微形态研究 张玉柱 黄春长 庞奖励等 (1002)
基于成像光谱技术预测氮素在土壤剖面中的垂直分布 李 硕 汪善勤 史 舟 (1014)
基于探地雷达的典型喀斯特坡地土层厚度估测 王 升 陈洪松 付智勇等 (1024)
淮河流域地表干湿变化的时空分布特征 曹永强 徐 丹 曹 阳 (1031)
神府矿区弃土弃渣体侵蚀特征及预测 郭明明 王文龙 李建明等 (1044)
砂石条形覆盖下土壤水分蒸发动态研究 赵 丹 李 毅 冯 浩 (1058)
pH和三种阴离子对紫色土亚硒酸盐吸附-解吸的影响 周鑫斌 于淑慧 谢德体 (1069)
土壤非交换性钾释放动力学特征及其生物有效性 李 婷 王火焰 陈小琴等 (1078)
生物质灰对红壤酸度的改良效果 时仁勇 李九玉 徐仁扣等 (1088)
小麦秸秆生物炭对高氯代苯的吸附过程与机制研究 李 洋 宋 洋 王 芳等 (1096)
不同温度玉米秸秆生物炭对萘的吸附动力学特征与机理 张 默 贾明云 卞永荣等 (1106)
十溴联苯醚对秀丽隐杆线虫毒性研究 王赢利 陈建松 阳宇翔等 (1116)
稻草和三叶草分解对微型土壤动物群落的影响 王 慧 桂 娟 刘满强等 (1124)
沿海区土壤线虫对海水入侵土壤盐渍化的响应 王诚楠 张伟东 王雪峰等 (1135)
土壤团聚体 N_2O 释放与反硝化微生物丰度和组成的关系 周汉昌 张文钊 刘 毅等 (1144)
基于产量、氮效率和经济效益的春玉米控释氮肥掺混比例 王 寅 冯国忠 张天山等 (1153)

问题讨论

- 中国土壤系统分类基层单元土族建设现状与命名上存在的问题 易 晨 马渝欣 杨金玲等 (1166)

研究简报

- 干旱与重吸水对人工藻结皮光合特性的影响 吴 丽 杨 红 兰书斌等 (1173)
咸水灌溉对沙漠防护林植物根系分布及风沙土演变的影响 李从娟 唐俊妍 高 培等 (1180)
不同 $NaNO_3$ 浓度下可变电荷土壤铜离子解吸率的分配及影响因素 张政勤 罗文贱 陈 勇等 (1188)

封面图片：不同浓度十溴联苯醚对秀丽隐杆线虫的毒性（由王赢利提供）

神府矿区弃土弃渣体侵蚀特征及预测^{*}

郭明明¹ 王文龙^{1, 2†} 李建明³ 黄鹏飞⁴ 白 芸⁵ 史倩华¹
康宏亮¹ 李艳富⁶

(1 西北农林科技大学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 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

(3 长江科学院水土保持研究所, 武汉 430010)

(4 江西省水土保持科学研究院土壤侵蚀与防治重点实验室, 南昌 330029)

(5 榆林学院生命科学学院, 陕西榆林 719000)

(6 南京水利科学研究院, 南京 210029)

摘 要 神府矿区在煤炭开采过程中形成了弃渣体、弃土体及扰动土体等不同下垫面类型, 其物质组成、结构性及产流产沙规律与撂荒地有极大差异, 且已产生严重的水土流失。采用野外模拟降雨试验方法, 对比研究了弃土弃渣体、扰动土体与撂荒地侵蚀特征的差异。结果表明, (1) 撂荒地侵蚀速率随降雨历时先下降后逐渐稳定, 扰动土体侵蚀速率呈增大后趋于稳定; 35°弃土体侵蚀速率增至峰值后减小并逐渐稳定, 40°时则一直处于波动状态; 石多砂少和砂多石少弃渣体在产流初期侵蚀波动剧烈, 并伴有泥石流现象, 15 min后基本稳定。(2) 同一下垫面侵蚀速率随雨强增大而增大, 而各坡度间侵蚀速率差异不显著 ($p > 0.05$); 雨强相同时各下垫面、坡度间侵蚀速率差异均显著 ($p < 0.05$), 复杂疏松的物质组成是弃土弃渣体及扰动土体侵蚀特殊于撂荒地的根本原因, 相同降雨条件下石多砂少弃渣体、砂多石少弃渣体、弃土体及扰动土体侵蚀速率分别是撂荒地的6.51倍~14.25倍、57.91倍~239.2倍、43.60倍~180.1倍和2.27倍~3.06倍。(3) 弃土弃渣体及扰动土体侵蚀速率与中值粒径、分形维数、降雨强度、坡度及径流参数呈幂函数关系。研究结果对矿区弃土弃渣侵蚀模型建立与生态环境建设有重要的科学意义。

关键词 神府矿区; 弃土弃渣体; 扰动土体; 撂荒地; 侵蚀速率

中图分类号 S157.1 **文献标识码** A

随着煤炭资源开发规模的不断扩大, 露天开采对地表大范围开挖形成的弃土弃渣堆积体产生了严重的水土流失, 也受到了社会广泛关注^[1-2]。矿区弃土弃渣体形成的水土流失是一种典型人为加速侵蚀^[3]。一方面, 弃土弃渣体的物质组成复杂, 结构松散, 内聚力小, 相互联结弱^[4], 并且含有一定量的砾石(粒径>2 mm), 砾石的存在既可以保护土壤免受径流直接冲刷而弱化侵蚀, 又可通

过改变土壤物理性质、坡面径流水动力特性而影响侵蚀过程, 具体结果依赖于砾石的物理特性、含量及在土壤中位置^[5-7]。另一方面, 由于土壤空间变异性及砾石分布非均匀性, 关于砾石在弃土弃渣中对侵蚀特征影响的结论也并非一致^[8-9]。由于复杂的物质组成和独特的结构, 弃土弃渣体发生侵蚀的方式与原地貌有很大的差异, 煤矿废弃堆积物坡面侵蚀类型除面蚀、细沟侵蚀外还存在滑坡、泻溜及

^{*} 国家自然科学基金项目(40771127, 41301299)、水利部公益性行业专项(201201048, 201201047)、中国科学院西部行动计划项目(KZCX-XB3-13)、中国科学院知识创新工程重大项目(KZZD-EW-04-03)项目资助

[†] 通讯作者, E-mail: wllwang@nwsuaf.edu.cn

作者简介: 郭明明(1991—), 男, 安徽阜阳人, 硕士研究生。研究方向: 开发建设项目土壤侵蚀与水土保持。E-mail: st_gmm@163.com

收稿日期: 2014-11-07; 收到修改稿日期: 2015-03-26

坡面泥石流等侵蚀类型^[10]。有研究表明水电站弃渣场平台、运渣道路及开挖边坡侵蚀模数是原地貌的73倍~887倍^[11]。Riley^[1]的研究表明矿区弃渣场坡面可蚀性是原始坡面的10倍~100倍。由此可见,弃土弃渣体侵蚀模数远高于原地貌,同时弃土弃渣体种类繁多,堆积形态各异^[12-13],堆积的不均匀性、随意性也加大了侵蚀模数的预测难度。弃土弃渣水土流失量的预测已进行了许多卓有成效的试验研究^[14-16],Rubio-Montoya和Brown^[15]通过弃渣体物理化学性质提出了弃渣体的可蚀性表达式,并与USLE方程中可蚀性建立了幂函数关系,可对弃渣体侵蚀速率进行预测。李宏伟等^[16]研究了黄土区工程堆积体可蚀性,对弃土弃渣侵蚀模数的确定有积极意义。目前尚未形成一种广泛应用的预测弃土弃渣体水土流失量的方法,而侵蚀模数的确定是制定有效水土保持措施的重要依据,也是水土保持方案新增水土流失量预测的必需参数。因此,本研究在对神府煤田各类弃渣体、弃土体及扰动土体等特征调查的基础上,进行野外人工模拟降雨试验,探究各下垫面的侵蚀特征并对侵蚀模数进行预测,以期揭示矿区弃土弃渣水土流失规律,为新增水土流失量预测及水土保持措施规划设计提供科学依据,具有重要的科学意义及实际应用价值。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

神府东胜矿区地处晋陕蒙三省交界处(37°20′~40°16′N, 108°36′~110°3′E),是我国重要的煤炭供应基地。该区属典型干旱半干旱大陆季风性气候,年均气温6.1~9.1℃,年均降雨量325~460mm,降水多集中于7—9月,且多以暴雨形式发生,年蒸发量1 636~2 535mm。该区为典型的黄土丘陵地貌,处于风蚀水蚀交错区、黄河粗泥沙来源区、干旱半干旱生态环境脆弱带。地表组成物质复杂,结构松散,易风化,抗蚀能力差,土壤类型多为黄土及风沙土。植被主要为温带半干旱植被,且覆盖度低。该区位于暴雨中心,尤其是在人类采矿活动扰动下,夏季水蚀剧烈并占主导地位,春季以风蚀为主,风蚀水蚀交替进行,成为水土流失最严重的地区之一。

1.2 下垫面类型

试验选取下垫面分别为石多砂少弃渣体、砂

多石少弃渣体、弃土体、扰动土体及撂荒地。通过对矿区典型弃渣体、弃土体及扰动土体的调查发现,扰动土体是在撂荒地基础上开挖、剥离形成的,二者坡度调查结果基本一致,撂荒地和扰动土体4°~18°的坡度各占89.60%、92.80%,试验选择为5°、10°、18°;弃土、弃渣体33°~40°坡度占95%,试验选为35°、40°,下垫面类型及坡度的选择在神府矿区具有典型性及代表性。撂荒地即为矿区周围未经耕种、开矿等开发活动而产生人为扰动的、原始的荒地。扰动土体是指人为对撂荒地挖方形成,具有土体疏松、孔隙度大的特点,扰动地面地表裸露,在风力分选作用下表层土壤大颗粒残留相对较多。此外,由于人工对表土剥离、踩踏、机械碾压破损使得2~20mm粒径的颗粒被破坏至更小颗粒,所以扰动地面0.5~2.0mm粒径级别土壤颗粒百分含量高于撂荒地。弃土体主要来源于煤层上部的土层并夹杂少许岩石层破碎物,通过人为剥离、搬运和堆积而形成。弃渣体是指煤矿开采、采石、挖损地表过程中形成的弃土、弃渣、弃石等废弃物及其混合物的大量堆砌,主要由风沙土、黄土、砾石、碎石及煤矸石混合组成,物质组成复杂,颗粒粒径的差异更大,含石量较多,孔隙度更大,疏松多孔易蚀。弃渣体中由于砂、石比例变幅较大,研究中将其分为两类即石多砂少(砂石比约1:2)、砂多石少(砂石比2:1)弃渣体。实验室测各下垫面物理性质结果如表1所示。

1.3 试验小区布设

试验在中国科学院水利部水土保持研究所神木侵蚀与环境试验站进行,试验小区规格为3m×1m,在距坡顶1.0m、2.5m处设两个1m长观测断面,小区下端设钢制三角集水槽;降雨强度根据当地多年降雨资料暴雨发生频率分析,依次选择为1.5、2.0、2.5、3.0mm min⁻¹4个级别。降雨装置为野外人工临时搭建,在小区周围利用钢管搭建降雨棚,四周用彩条布包围以防止风力对降雨的干扰,小区正上方布置槽式降雨机,张光辉等^[17]对槽式模拟降雨机进行了论证,喷头高度为3m时可满足降雨雨滴终速,且均匀度可达85%以上。小区上方置2m³储水桶,采用60m扬程水泵抽取储水桶的水,通过阀门和压力表控制雨强,在试验区域均匀摆放直径为20cm的盛雨器,启动降雨机并稳定2min后,将一定时间内盛雨器所接水量用雨量筒读取降雨量,换算为降雨强度,率定雨强与设计雨强误差

表1 各下垫面物理性质

Table 1 Physical properties of all underlying surfaces (%)																
美国农业部制System of USDA																
黏粒 Clay	粉粒Silt			砂粒Sand			砾石Gravel			容重Bulk density (g cm ⁻³)	孔隙度Porosity (%)	含水量 Moisture content (%)				
	0.002 ~ 0.005	0.005 ~ 0.01	0.01 ~ 0.025	0.025 ~ 0.05	0.05 ~ 0.1	0.1 ~ 0.25	0.25 ~ 0.5	0.5 ~ 1	1 ~ 2				2 ~ 5	5 ~ 10	10 ~ 20	
粒径Particle size (mm)	<0.002	0.002 ~ 0.005	0.005 ~ 0.01	0.01 ~ 0.025	0.025 ~ 0.05	0.05 ~ 0.1	0.1 ~ 0.25	0.25 ~ 0.5	0.5 ~ 1	1 ~ 2	2 ~ 5	5 ~ 10	10 ~ 20			
石多砂少弃渣体												34.27				
Slag with more stone and less sand	0.05	0.11	0.19	0.32	0.58	3.23	4.45	5.96	7.13	8.65	21.21	13.85	1.90 ± 0.019	28.25 ± 0.49	8.47 ± 0.39	
砂多石少弃渣体																
Slag with more sand and less stone	0.08	0.12	0.23	0.41	0.77	5.67	7.74	9.34	10.33	20.25	32.97	8.35	3.74	1.73 ± 0.011	34.86 ± 0.43	9.02 ± 0.36
弃土体Dune of overburden	0.15	0.42	0.48	0.63	0.9	13.42	28.6	35.28	7.67	5.34	2.96	2.52	1.63	1.22 ± 0.014	53.73 ± 0.56	8.85 ± 0.12
扰动土体 Disturbed soil	1.38	1.53	5.8	7.28	7.7	18.88	26.56	23.21	5.53	2.12	0	0	0	1.16 ± 0.036	56.27 ± 0.82	10.75 ± 0.24
撂荒地Deserted land	1.35	3.46	4.19	6.89	8.09	21.65	26.56	23.21	3.23	0.56	0.45	0.21	0.15	1.33 ± 0.027	49.76 ± 1.01	12.12 ± 0.22

在3%以内, 均匀系数采用文献[18]提出的均匀性计算方法, 要求均匀度在85%以上。多次率定达到设计要求后, 快速掀起遮雨布, 产流后用径流桶接泥沙样, 前3 min内, 每1 min接1次泥沙样, 3 min后每3 min接1次泥沙样, 用秒表记录取样时间, 并将所接泥沙样称重, 同时使用KMnO₄染色法在两断面处测量流速, 采用烘干法测量泥沙质量, 设计产流历时45 min。

1.4 数据计算

侵蚀速率 T_s : 即坡面径流在单位时间单位面积上剥蚀土壤的质量, 由式(1)计算。

$$T_s = \frac{M}{dL_t} \quad (1)$$

式中, T_s 为侵蚀速率, $\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$; M 为接样时间 t 内泥沙量, g ; d 、 L 分别为小区宽度和长度, m 。

径流剪切力: 是反映径流在流动时对坡面土壤剥蚀力大小的参数, 采用式(2)计算。

$$\tau = \rho_w g h J \quad (2)$$

式中, τ 为径流剪切力, N m^{-2} ; ρ_w 为水密度, kg m^{-3} ; g 为重力加速度, m s^{-2} ; h 为水深, m ; J 为水力坡度, m m^{-1} 。

径流功率: 表征作用于单位面积的水流所消耗的功率, 反映剥蚀一定量土壤所需功率, 采用式(3)计算。

$$\omega = \rho_w g h J V = \tau V \quad (3)$$

式中, ω 为径流功率, $\text{J m}^{-2} \text{s}^{-1}$; V 为流速, m s^{-1} 。

单位径流功率 P : 由式(4)计算。

$$P = V J \quad (4)$$

式中 P 为单位径流功率, m s^{-1} 。

模型效率系数 ME : 用于评价模型预测值与实测值之间的差异, $ME \leq 1$, 数值越接近1, 模型预测效果越好。由式(5)计算。

$$ME = 1 - \frac{\sum (T_{sm} - T_{sp})^2}{\sum (T_{sm} - \overline{T_{sm}})^2} \quad (5)$$

式中, T_{sm} 为实测侵蚀模数; T_{sp} 为预测侵蚀模数; $\overline{T_{sm}}$ 为实测侵蚀模数均值, 单位同前。

相对均方根误差 $RRMSE$: 用于衡量模拟侵蚀速率与实测值间的误差大小, 由式(6)计算。

$$RRMSE = \frac{\sqrt{(1/n) \sum (T_{sp} - T_{sm})^2}}{\overline{T_{sm}}} \quad (6)$$

土壤颗粒分形维数 D : 分形维数采用杨培玲等^[19]提出的用粒径的质量分布描述土壤分形模型:

$$\frac{W(\delta > d_i)}{W_0} = 1 - \left(\frac{d_i}{d_{\max}} \right)^{3-D} \quad (7)$$

两边取对数

$$\lg \left[\frac{W(\delta < d_i)}{W_0} \right] = (3-D) \lg \left(\frac{d_i}{d_{\max}} \right) \quad (8)$$

式中, $W(\delta > d_i)$ 表示大于 d_i 累积土粒质量, W_0 为各粒级质量之和, d_i 为筛分粒径范围 $[d_j, d_{j+1}]$ 平均值, $d_{\max}$ 为最大粒级平均直径, 即在某个粒级 $[d_j, d_{j+1}]$, $d_i = 1/2(d_j + d_{j+1})$ 。点绘 $\lg[W(\delta < d_i)/W_0]$ 与 $\lg(d_i/d_{\max})$ 关系, 运用线性方程拟合, 在置信度为95%时得到直线方程的斜率为 k_i , 分别为0.840、0.836、0.744、0.622、0.434, 则分形维数 $D_i = 3 - k_i$, 石多砂少弃渣体、砂多石少弃渣体、弃土体、扰动土体、撂荒地依次为2.160、2.164、2.256、2.379、2.566。

2 结果与讨论

2.1 各下垫面侵蚀过程特征

图1和图2为35°和40°坡两类弃渣体侵蚀速率随产流时间变化过程。从侵蚀变化过程分析, 侵蚀过程均属多峰多谷类型, 产流前期侵蚀尤为剧烈, 变幅巨大。石多砂少弃渣体第15分钟侵蚀进入稳定期, 35°坡侵蚀速率较40°坡稍早稳定。35°、40°坡砂多石少弃渣体均在产流第2分钟出现侵蚀速率峰值, 分别为110 $\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 、509 $\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 远大于石多砂少弃渣体。侵蚀速率于产流9 min后基本稳定, 两类弃渣体侵蚀速率在稳定期出现单次波动均因渣体局部失稳所致。以变异系数 C_v 表征侵蚀速率的波动性, 两坡度石多砂少弃渣体侵蚀速率 C_v 分别为2.23~4.95、0.40~3.40, 砂多石少为5.30~6.72、4.61~5.55, 整体上砂多石少弃渣体侵蚀波动程度高于石多砂少弃渣体。产生以上侵蚀过程特征的原因有二。首先, 弃渣体不具有土壤各项物理化学性质^[20], 结构性、稳定性差, 产流后表层细颗粒易被径流剥蚀搬运, 大颗粒之间黏结力差, 渣体稳定性易遭破坏, 失稳导致前期侵蚀速率和波动程度均较大; 其次, 坡面小颗粒在大量吸水后逐渐向坡下移动, 受到大颗粒阻挡短暂积累后, 当大颗粒失稳后即快速向下涌动并伴随小范围泥石流现象, 砂多石少弃渣体较石多砂少细颗粒含量多, 形成的坡面泥石流次数也多, 随着坡面细颗粒

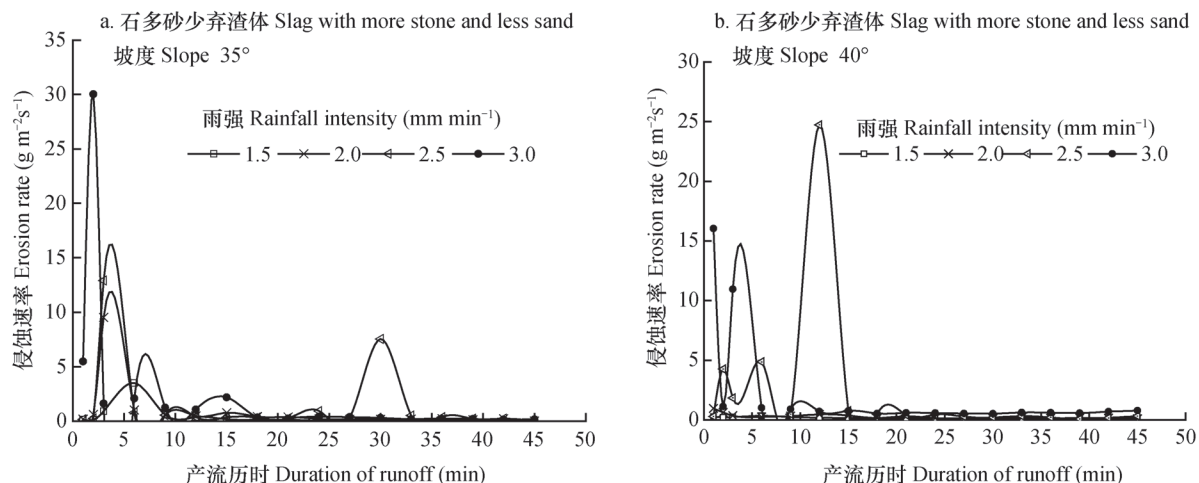


图1 石多砂少弃渣体侵蚀速率随时间变化

Fig.1 Temporal variation of soil erosion rate on the dune of waste slag with more stone and less sand

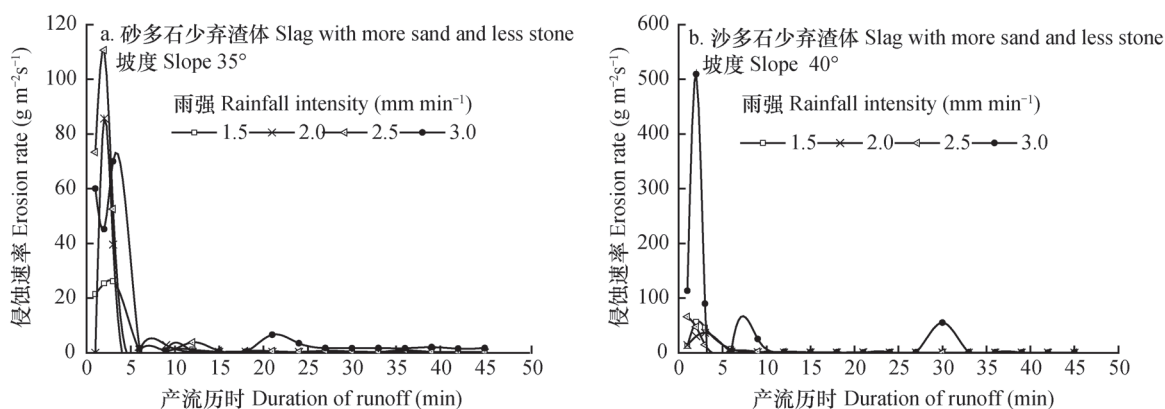


图2 砂多石少弃渣体侵蚀速率随时间变化

Fig.2 Temporal variation of soil erosion rate on the dune of waste slag with more sand and less stone

逐渐被搬运, 弃渣体中未被侵蚀的大颗粒之间相互支撑形成了稳定渣床面^[21], 侵蚀速率逐渐稳定下来。

图3为两坡度弃土体侵蚀速率变化过程。从侵蚀过程分析, 35°弃土体整体上呈上升一下降一稳定的过程, 各次降雨侵蚀速率均在产流后第6至9分钟出现单峰值, 随雨强增大侵蚀峰值分别达17.21、23.03、22.40、44.02 $\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 40°坡侵蚀过程则一直处于波动状态, 属多峰多谷侵蚀类型, 最大侵蚀速率分别为7.99、22.74、22.65、20.79 $\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$ 。35°和40°坡弃土体侵蚀速率变异系数分别为0.91、0.99、1.02、0.88和0.63、0.82、0.72、0.45, 整体上峰值和波动性均低于35°坡。产生以上侵蚀变化的原因是由于弃土体结构松散、抗蚀性差, 在降雨和径流作用下易被破坏。35°弃

土体在产流期间呈现单峰值侵蚀变化过程, 是由于在产流前期雨滴击溅坡面形成临时结皮同时, 大量松散细颗粒及表层大颗粒在径流作用下迅速输移, 侵蚀速率剧增, 随后坡面汇流增大结皮消失, 径流流路逐渐稳定, 侵蚀速率也逐渐稳定下来; 坡度增大至40°时, 径流更易汇集, 径流剪切力大大增强, 坡面形成一连串的侵蚀跌坑, 随着坡面径流率增大, 跌坑快速连通, 径流下切作用加剧, 沟壁土体随之失稳崩塌进入径流路径, 阻滞径流运动和泥沙输移, 侵蚀速率暂时降低, 此后上方径流快速汇集, 冲刷崩塌的土体并形成高浓度的固液二相体, 快速下滑搬运出坡面, 沟壁崩塌与径流汇集冲刷不断交替进行, 使得40°坡弃土体侵蚀过程表现为多峰多谷, 波动剧烈^[22]。

图4和图5为5°、10°和18°坡扰动土体和撂荒

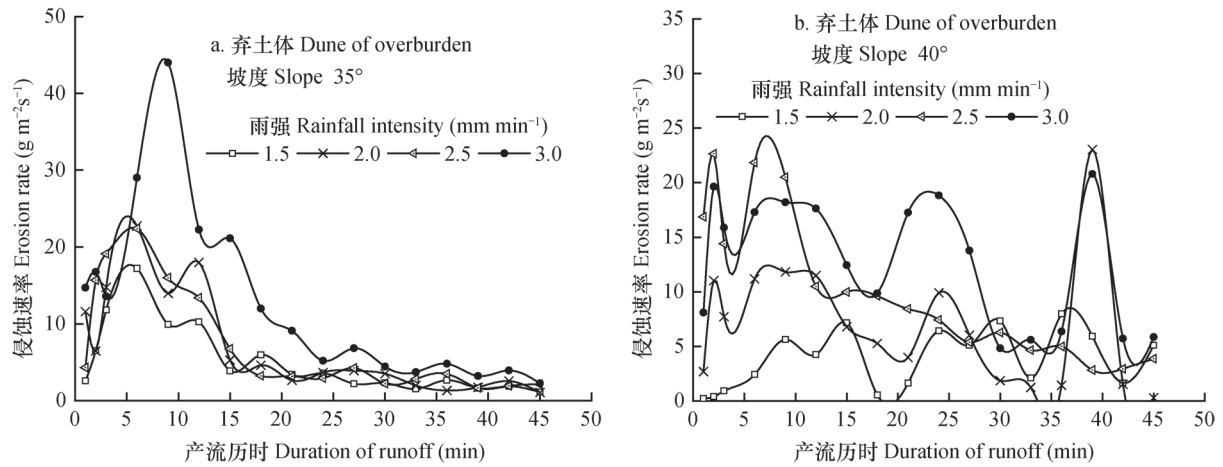


图3 弃土体侵蚀速率随产流历时的变化

Fig.3 Temporal variation of soil erosion rate on the dune of overburden

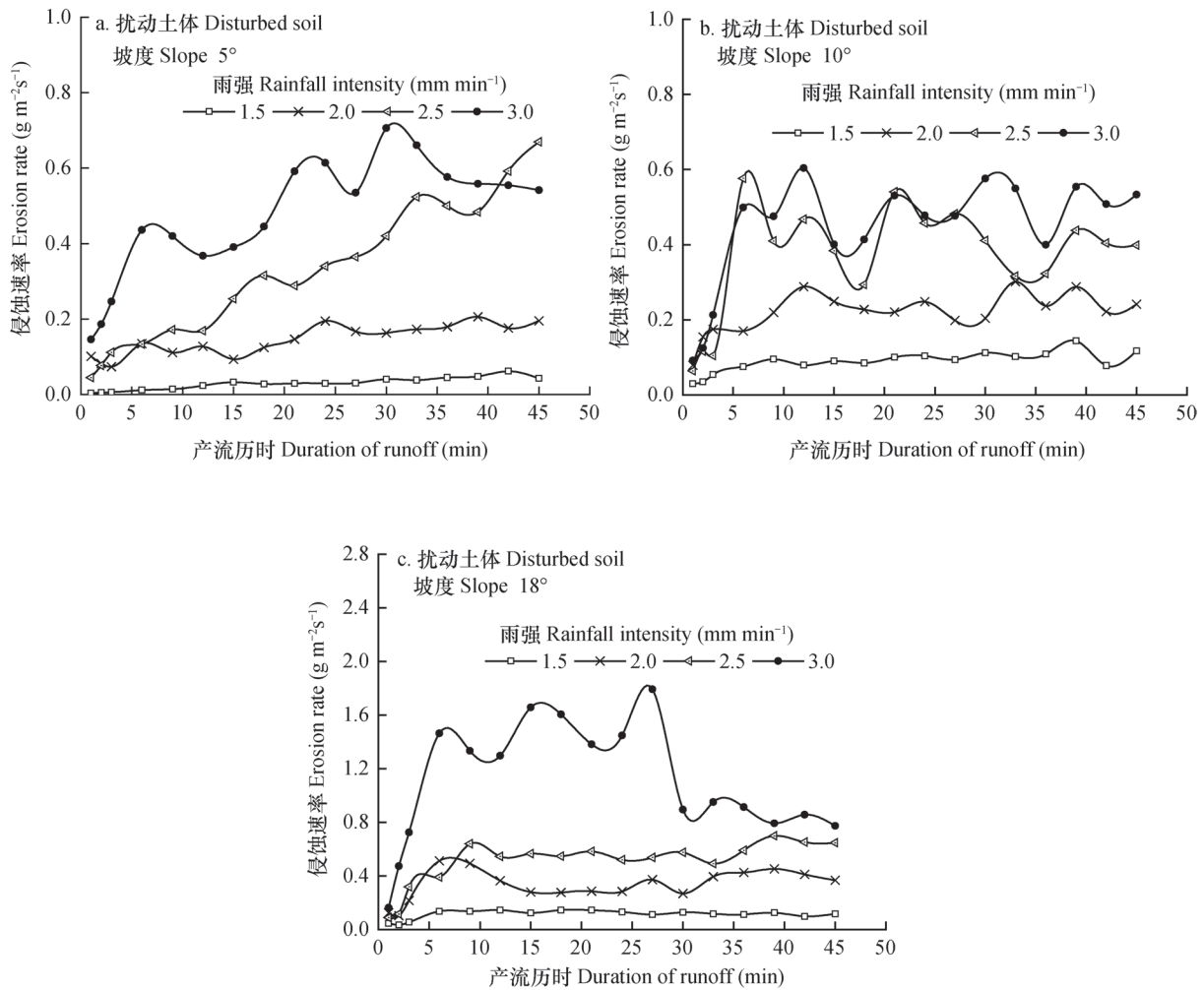


图4 扰动土体侵蚀速率随产流历时的变化

Fig.4 Temporal variation of soil erosion rate on disturbed soil with runoff

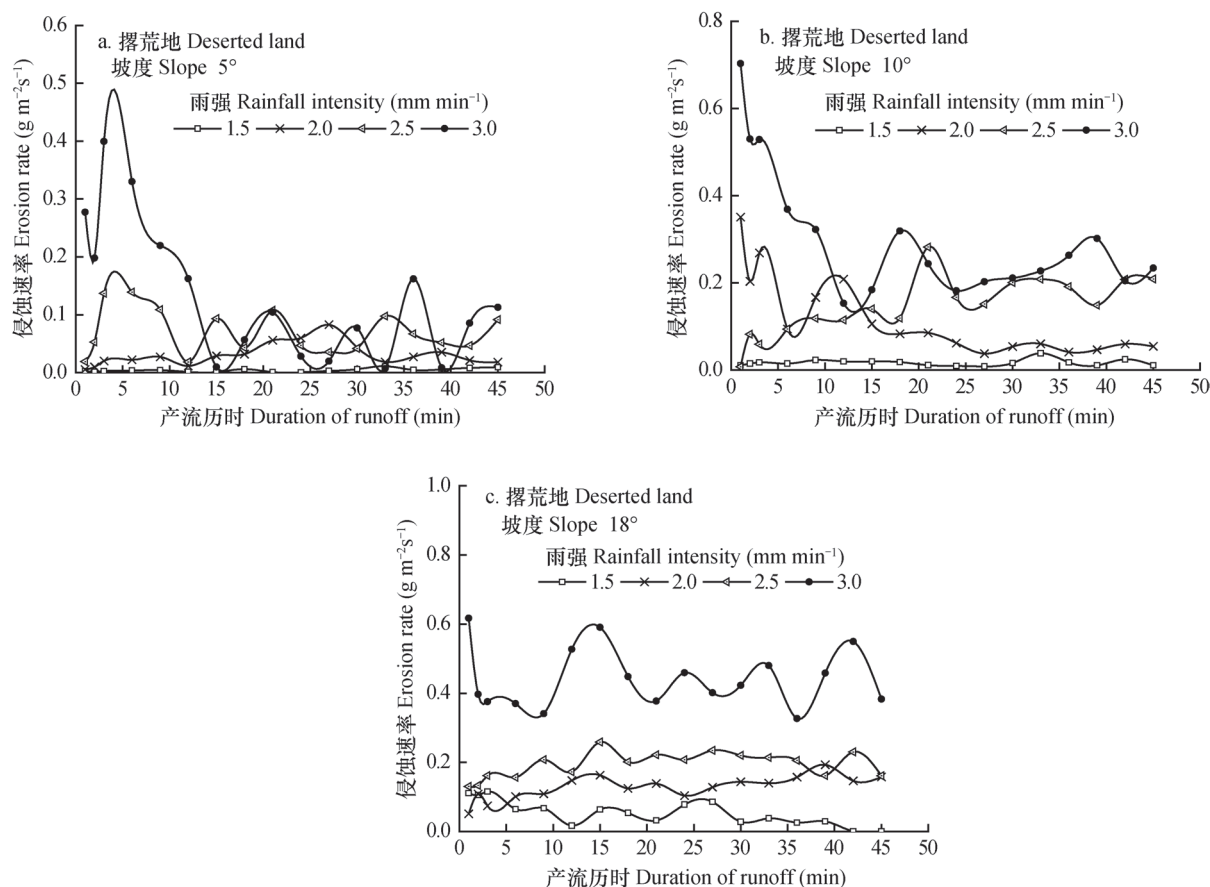


图5 撂荒地侵蚀速率随产流历时变化

Fig.5 Temporal variation of soil erosion rate on deserted land with runoff

地侵蚀速率变化过程。各坡度下扰动土体侵蚀速率均在0~3 min内增加迅速,波动一段时间后逐渐趋于稳定,而 5° 和 10° 坡撂荒地侵蚀速率则在0~3 min内呈下降趋势,随后逐渐稳定, 18° 坡侵蚀速率变化较为平稳;不同坡度条件下扰动土体和撂荒地的各次降雨侵蚀速率 C_v 分别为0.27~0.53、0.24~0.37、0.30~0.38和0.53~1.05、0.41~0.95、0.18~0.76,0~3 min撂荒地侵蚀速率趋势与扰动土体相反,整体波动性高于扰动土体。这是由于扰动土体结构较撂荒地疏松,表面大孔隙多,且整体抗蚀性差,降雨初期细颗粒在径流搬运过程中进入孔隙,随着径流汇集,搬运的颗粒越来越多,侵蚀速率才逐渐增大;撂荒地表层细颗粒被径流搬运后,抗蚀性大于表层细颗粒,故而侵蚀速率大幅降低,因此导致撂荒地侵蚀速率变异系数高于扰动土体。

2.2 坡度和雨强对各下垫面侵蚀速率的影响

石多砂少和砂多石少弃渣体在 35° 、 40° 坡度各次降雨侵蚀速率分别为0.38~2.72、0.18~2.37和

4.56~17.83、5.33~22.15 $\text{g m}^{-2} \text{s}^{-1}$,随雨强增大而增大,各雨强间侵蚀速率差异显著(表2)。1.5、2.0、3.0 mm min^{-1} 雨强下 40° 坡石多砂少弃渣体侵蚀速率低于 35° 坡,2.0、2.5 mm min^{-1} 雨强下 40° 砂多石少弃渣体侵蚀速率小于 35° 坡;其他雨强下, 40° 坡侵蚀速率均大于 35° 。坡度对侵蚀速率的影响不显著(表2),这是由于坡面侵蚀过程中沟床形态和径流水力条件之间是相互影响,存在反馈关系^[23]。相同雨强不同坡度条件下,径流使床面的粗糙度造成差异,坡度增大时,径流速度增加使坡面侵蚀加剧,但床面粗糙度亦会随之增大。这就意味着径流阻力增大,从而减缓侵蚀^[24],两种效应相互作用产生以上结果。相同条件下, 35° 坡砂多石少弃渣体各次降雨侵蚀速率分别是石多砂少弃渣体的11.86倍、8.73倍、11.65倍、4.36倍, 40° 坡为40.22倍、17.47倍、3.49倍、9.95倍。原因有二,其一,是由于砂多石少弃渣体中细颗粒含量高于石多砂少弃渣体,相同雨强条件下,砂多石少弃渣体被剥蚀的颗粒多于石多砂少弃渣体;其二,石多砂

表2 相同下垫面不同雨强、坡度之间侵蚀速率方差分析

Table 2 ANOVA of soil erosion rates on lands the same in underlying surface and different in rainfall intensity and slope			
下垫面Underlying surface	变量Variables	F检验值 F value	显著水平p
石多砂少弃渣体Slag with more stone and less sand	雨强Rainfall intensity	10.29	0.044
	坡度Slope	0.113	0.759
砂多石少弃渣体Slag with more sand and less stone	雨强Rainfall intensity	10.60	0.035
	坡度Slope	0.004	0.953
弃土体Dune of overbuden	雨强Rainfall intensity	15.67	0.024
	坡度Slope	0.149	0.725
扰动土体Disturbed soil	雨强Rainfall intensity	8.105	0.016
	坡度Slope	3.606	0.094
撂荒地Deserted land	雨强Rainfall intensity	11.54	0.007
	坡度Slope	6.289	0.034

少弃渣体砾石含量相对较高，当砾石置于渣体表面或镶嵌其中时，砾石表面径流及砾石间霍顿流被砾石周围大孔隙吸收，产流随砾石含量增加而减少，且砾石对径流的阻滞作用也显著，从而使径流剥蚀和挟沙能力降低，侵蚀速率随之下降^[25]。

35°和40°弃土体侵蚀速率分别为5.19~12.76 g m⁻² s⁻¹、3.82~12.83 g m⁻² s⁻¹。相同坡度条件下，侵蚀速率均随降雨强度的增大而增大（表2）；相同雨强条件下，40°坡面侵蚀速率是35°坡的0.74倍、0.98倍、1.38倍、1.01倍，雨强≤2.0 mm min⁻¹时，40°坡侵蚀速率小于35°，侵蚀速率峰值也小于35°坡，原因与弃渣体相似，坡度增大的同时坡面径流阻力也随之增大，坡面粗糙度阻滞效应大于坡度效应，当雨强>2.0 mm min⁻¹时坡度对径流的加速效应逐渐大于阻滞作用，径流的剥蚀能力也随之增强。

5°、10°、18°坡度下扰动土体各次降雨平均侵蚀速率分别为0.029~0.44、0.088~0.47、0.11~1.09 g m⁻² s⁻¹，均随降雨强度增大而增大，且呈显著的幂函数关系（*p*<0.01），在3.0 mm min⁻¹降雨强度下，10°坡面侵蚀速率为0.44 g m⁻² s⁻¹，小于5°坡面侵蚀速率0.47 g m⁻² s⁻¹，其余雨强条件下，侵蚀速率随坡度的增大而增大，整体上坡度对侵蚀速率影响不显著（*p*=0.094）。对于撂荒地，5°、10°、18°坡度下次降雨侵蚀速率分别为0.004~0.13、0.017~0.31、0.054~0.44 g m⁻² s⁻¹，各坡度、雨强间侵蚀速率差异显著（表2）。相

同条件下，扰动土体侵蚀速率是撂荒地的1.43倍~6.73倍。

2.3 各下垫面间侵蚀差异性原因分析

与撂荒地相比，扰动土体侵蚀波动性整体上较弱，但次降雨侵蚀速率却增大了0.43倍~5.73倍，两类弃渣体和弃土体不但侵蚀波动性达到剧烈波动程度，而且侵蚀速率增加数倍乃至数百倍。相同降雨和自然堆积条件下的石多砂少弃渣体、砂多石少弃渣体、弃土体及扰动土体侵蚀速率分别是撂荒地的6.51倍~14.25倍、57.91倍~239.15倍、43.60倍~180.13倍、2.27倍~3.06倍。分析表明，雨强对侵蚀速率影响显著（表2），同一降雨强度条件下，对下垫面和坡度间的侵蚀速率进行方差分析结果表明，下垫面及坡度之间侵蚀速率差异显著（表3）。导致各类弃土弃渣体与撂荒地侵蚀差异的原因如下：（1）下垫面物理化学性质的不同是导致侵蚀差异性的根本原因^[20]，物质组成决定下垫面的抗蚀性进而影响侵蚀速率，弃土弃渣体物质组成复杂，颗粒间黏结性差，在降雨条件下坡面上的砾石易失稳发生重力侵蚀^[10]，因此与撂荒地相比弃土弃渣体侵蚀过程更为复杂，波动性更强且侵蚀方式多样。（2）人为堆积产生的各类弃渣体、弃土体及扰动土体达到稳定后的坡度也存在差异，在相同降雨条件下，坡度的增加可以提高坡面物质及径流向下运动的加速度，从而影响侵蚀速率^[23]，且弃土弃渣体中砾石的存在既可以增加径流路径及坡面粗糙度以削弱径流剥蚀和搬运能力，又能通过

表3 同一降雨强度条件下各下垫面侵蚀速率方差分析

Table 3 ANOVA of soil erosion rates on lands different in underlying surfaces under the same rainfall intensity			
降雨强度Rainfall intensity (mm min ⁻¹)	变量Variables	F检验值 F value	显著水平p
1.5	下垫面Underlying surface	9.904	0.025
	坡度Slope	8.838	0.026
2.0	下垫面Underlying surface	44.34	0.002
	坡度Slope	42.82	0.003
2.5	下垫面Underlying surface	18.21	0.013
	坡度Slope	3.972	0.100
3.0	下垫面Underlying surface	8.095	0.036
	坡度Slope	8.638	0.027

影响土壤的物理性质（孔隙度、表土结皮与紧实度）、水文过程（地表径流的产生及其水动力特性）间接支配土壤侵蚀过程^[7, 22]，本研究中石多砂少弃渣体砾石含量为69.33%，砂多石少弃渣体为45.06%，弃土体为7.11%，侵蚀速率随着砾石含量增大而减小，因此砾石对土壤侵蚀过程有着重要的影响^[8-9]。（3）降雨是坡面产生侵蚀的根本动力来源，坡面初期的击溅侵蚀主要动力来自降雨动能，当坡面全面产流后降雨主要体现在坡面径流的补给上，降雨形成的径流对坡面物质进行剥蚀和搬运，随着降雨补充和径流冲刷，坡面物质组成和粗糙度时刻在发生着变化，同时坡度又使径流运动的加速度增大，粗糙度与水力条件的相互作用影响径流剥蚀和搬运能力。由此可知，弃土弃渣体、扰动土体侵蚀状况是由降雨、径流、坡度及物质组成之间的相互作用决定的。

2.4 弃土弃渣体侵蚀速率预测

侵蚀速率是矿区弃土弃渣综合治理措施布设的重要参考依据，因此准确预测弃土弃渣侵蚀速率是非常必要的。根据建模方法，土壤侵蚀模型一般分为经验模型和物理模型两种类型。与物理模型相比较，经验模型结构简单、计算方便、对参数要求低，但模型被移植使用时，模型精度和实用性受到影响，常见的模型有USLE、RUSLE和MMF等，针对生产建设项目水土流失规律及流失量预测方面也取得了一定的成果^[12, 21, 26-27]。程冬兵等^[27]借鉴RUSLE建模思路提出开发建设项目开挖面土壤侵蚀模型，综合考虑了降雨特征参数、土壤参数（粉、黏粒含量和容重）、地形因子（坡度和坡长）、径

流参数（径流量）对土壤流失量的影响，模型预测精度较高，Guy等^[28]认为坡面侵蚀受到4个因素的影响，即土壤因素 S 、降雨因素 R 、地形因素 G 及径流因素 F ，四个因素间相互作用影响着侵蚀过程。本研究采用程冬兵等^[27]建模思路和Guy等^[28]提出的方法提出弃土弃渣体侵蚀模数概化预测模型：

$$T_s=f(S, R, G, F) \tag{9}$$

对于土壤因素 S 的参数选取，中值粒径 d_{50} （m）常被作为土壤参数出现在许多侵蚀模型的研究中^[29-31]，Guy等^[32]认为土壤粒径分布越宽，采用中值粒径 d_{50} 预测侵蚀速率的精度越差，而土壤颗粒质量分形维数 D_f 是表征土壤颗粒分布状况的因子，包含了所有粒径范围特征，被众多研究者用来作为抗蚀性及预测土壤侵蚀的指标^[19, 20]；降雨因素 R 的特征参数一般选择降雨强度 I （m s⁻¹）；地形因素 G 参数选择坡长 L （m）和坡度 θ （°），在本研究中小区的坡长是固定的（3 m），因此地形因素参数选择为坡度 θ （°）；径流因素 F 在进行参数选择时考虑径流的物理参数和水力参数，包括水密度 ρ_w （kg m⁻³），水的粘滞力 η （m² s⁻¹），重力加速度 g （m s⁻²），径流深 h （m），流速 v （m s⁻¹），径流率 q （m³ s⁻¹），含沙量 C_s （kg m⁻³），径流剪切力 τ （N m⁻²），径流功率 W （J m⁻² s⁻¹），单位径流功率 P （m s⁻¹），泥沙沉速 v_s （m s⁻¹）。

试验研究中，石多砂少弃渣体、砂多石少弃渣体、弃土体及扰动土体共计36场模拟降雨数据被获取，将上述土壤因素、降雨因素、地形因素及径流因素的各代表指标与各次降雨侵蚀速率进行偏相关分析结果表明，除泥沙沉速与黏滞力2个指标外，

侵蚀速率与坡度、降雨强度、含沙量、流速、径流剪切力、径流功率、单位径流功率及径流率呈正相关关系，与中值粒径和分形维数呈负相关性（表4），说明这些指标均显著影响着弃土弃渣土体及扰动土体侵蚀过程。表2说明在各雨强条件下不同坡度之间侵蚀速率差异性不显著，对侵蚀速率与坡度进行偏相关分析，结果表明二者关系显著（表4），原因是由于受到其他因素的交互作用的影响，导致坡度对侵蚀速率的影响效应被降雨强度、径流率等指标掩盖^[27]。颗粒分形维数越大，土壤细颗粒越多，结构越好，抗蚀性越强^[19-20]，径流搬运坡面物质所消耗能量就越多，因此侵蚀速率与之呈负相关关系。

在选择预测指标时除与侵蚀速率具有相关性外，还需考虑因子获取的难易程度。对于弃土弃渣体，由于物质组成颗粒粒径分布较广，侵蚀床面粗

糙度较大，测量流深时存在很大的误差，由于径流剪切力和径流功率是流深的函数，因此径流深、剪切力、径流功率不作为有效水力参数，流速采用颜色示踪法测量，此方法已经被广泛应用在坡面侵蚀流速测量中，单位径流功率是流速和坡度的函数，Ali等^[31, 33]、Govers^[24]研究认为单位径流功率 P (m s^{-1})是预测坡面侵蚀最优因子，体现单位重量水沙在侵蚀过程中功率消耗状况，因此将单位径流功率作为径流水力代表因子；土壤中值粒径和分形维数可通过实验室测量及计算得到；径流率反映径流对坡面侵蚀供水情况，含沙量反映径流对下垫面作用的结果^[25]，径流率和含沙量可通过泥沙样精确地确定，因而径流指标选择为单位径流功率 P (m s^{-1})、径流率 q ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)和含沙量 C_s (kg m^{-3})。模型(9)可具体为式(10)。

$$T_s = f(D_i, I, d_{50}, \theta, C_s, q, P) \quad (10)$$

表4 侵蚀速率与各因素偏相关分析结果

Table 4 Partial correlation analysis of soil erosion rate and various factors

	坡度 Slope	雨强 Rainfall intensity	含沙量 Concentration sediment	流速 Flow velocity	剪切力 shear stress	径流功率 Stream power	径流功 率Unit stream power	粘滞力 Kinematic viscosity	泥沙流速 Settling velocity	径流率 Flow rate	中值粒径 Median diameter	分形维 数Fractal dimension
相关指数												
Pearson correlation	0.54**	0.35*	0.89**	0.62**	0.79**	0.81**	0.73**	-0.31	-0.20	0.65**	-0.36*	-0.44**
显著性水平												
Significance level	0.001	0.035	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.063	0.243	0.000	0.034	0.008

注：**表示显著性水平在0.01，*表示显著性水平在0.05 Notes: **. Correlation is significant at the 0.01 level, *. Correlation is significant at the 0.05 level

根据模型参数分析，依据 π 定理，对式(10)进行量纲分析，由于 M_s 量纲为 $\text{M L}^{-2} \text{T}^{-1}$ ，故而将 C_s (M L^{-3})， I (L T^{-1})， d_{50} (L)作为重复变量，坡度 θ 取坡度 θ 余弦值得无量纲值，各变量单位采用国际单位制，量纲分析结果如式(11)所示。

$$\frac{T_s}{C_s I} = f\left(\frac{q}{I d_{50}^2}, \frac{P}{I}, D_i, \theta_c\right) \quad (11)$$

转化为幂函数形式，并令 $\varphi = \frac{T_s}{C_s I}$ ， $\Phi = \frac{q}{I d_{50}^2}$ ， $\Delta = \frac{P}{I}$ ，结果如式(12)

$$\varphi = K \Phi^a \Delta^b D_i^c \theta_c^d \quad (12)$$

将本研究弃渣体、弃土体及扰动土体的36场降雨试验数据按式(12)进行回归分析，确定系数，结果如式(13)。

$$\varphi = 10^{6.16} \Phi^{0.23} \Delta^{0.27} D_i^{-24.98} \theta_c^{-0.50}, R^2 = 0.94, N = 36 \quad (13)$$

利用式(13)估算的侵蚀速率与实测值呈极显著线性关系($p < 0.01$)，相关系数达0.94，模型效率系数 ME 为0.94，侵蚀速率预测值与实测值相对均方根误差 $RRMSE = 0.29$ ，因此全面考虑下垫面性质、地形特性、降雨性质及径流特征对侵蚀速率的影响是可行的。由方程(13)结构可知，侵蚀速

率与含沙量、径流率、单位径流功率、降雨强度和坡度呈正相关关系,与中值粒径和分形维数呈负相关性,结果与表2中分析的侵蚀速率与各因子的相关关系完全一致。因此建议采用式(13)估算弃土弃渣体土壤侵蚀速率。

3 结 论

采用野外模拟降雨试验方法,对神府煤田不同弃土弃渣体侵蚀特征及速率预测进行了研究,主要结论如下:两种弃渣体产流前期侵蚀变化剧烈,15 min后基本稳定,35°弃土体侵蚀呈单峰值变化过程,40°坡侵蚀则属多峰多谷类型,扰动土体侵蚀速率逐渐增大并趋于稳定,撂荒地则呈下降后逐渐稳定的趋势。相同降雨条件下,石多砂少弃渣体、砂多石少弃渣体、弃土体及扰动土体侵蚀速率分别是撂荒地的6.51倍~14.25倍、57.91倍~239.15倍、43.60倍~180.13倍、2.27倍~3.06倍。弃土弃渣体及扰动土体侵蚀速率可用中值粒径、分形维数、降雨强度、坡度、径流率及单位径流功率的幂函数形式预测,对弃土弃渣体侵蚀模型的建立有重要科学意义。但日后的研究有待提升弃土弃渣坡面水流特性测量技术,探索更多土壤、降雨、径流及地形指标对侵蚀的影响,并将研究下垫面涉及到全国范围内弃土弃渣体类型,以提高模型的普适性。

参 考 文 献

- [1] Riley S J. Aspects of the differences in the erodibility of the waste rock dump and natural surfaces, Ranger Uranium Mine, Northern Territory, Australia. *Applied Geography*, 1995, 15 (4) : 309—323
- [2] 王文龙, 李占斌, 李鹏, 等. 神府东胜煤田开发建设弃土弃渣冲刷试验研究. *水土保持学报*, 2004, 18 (5) : 68—71. Wang W L, Li Z B, Li P, et al. Scouring experiment on residues of Shenfu Dongsheng Coalfield during exploitation (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18 (5) : 68—71
- [3] 高旭彪, 黄成志, 刘朝晖. 开发建设项目水土流失防治模式. *中国水土保持科学*, 2007, 5 (6) : 93—97. Gao X B, Huang C Z, Liu C H. Soil and water conservation models of developing and construction projects (In Chinese). *Science of Soil and Water Conservation*, 2007, 5 (6) : 93—97
- [4] 刘菲, 唐红梅. 重庆库区工程弃渣泥石流形成机理. *重庆交通大学学报: 自然科学版*, 2010, 29 (4) : 620—623, 640. Liu F, Tang H M. Formation mechanism of construction spoil debris flow in Chongqing reservoir (In Chinese). *Journal of Chongqing Jiaotong University: Natural Science*, 2010, 29 (4) : 620—623, 640
- [5] Wilcox B P, Wood M K, Tromble J M. Factors influencing infiltrability of semiarid mountain slopes. *Journal of Range Management*, 1988, 41 (3) : 197—206
- [6] 朱元骏, 邵明安. 不同碎石含量的土壤降雨入渗和产沙过程初步研究. *农业工程学报*, 2006, 22 (2) : 64—67. Zhu Y J, Shao M A. Processes of rainfall infiltration and sediment yield in soils containing different rock fragment contents (In Chinese). *Transaction of the CSAE*, 2006, 22 (2) : 64—67
- [7] Poesen J, Lavee H. Rock fragments in top soils: Significance and processes. *Catena*, 1994, 23 (1/2) : 1—28
- [8] Chow T L, Rees H W. Effects of coarse-fragment content and size on soil erosion under simulated rainfall. *Canadian Journal of Soil Science*, 1995, 75 (2) : 227—232
- [9] Descroix L, Viramontes D, Vauclin M, et al. Influence of soil surface features and vegetation on runoff and erosion in the Western Sierra Madre (Durango, Northwest Mexico). *Catena*, 2001, 43 (2) : 115—135
- [10] 蒲玉宏, 王伟. 煤矿废弃堆积物坡面侵蚀研究初报. *中国水土保持*, 1995 (10) : 11—15. Pu Y H, Wang W. Preliminary probe into slope surface erosion of waste accumulation of coal mine (In Chinese). *Soil and Water Conservation in China*, 1995 (10) : 11—15
- [11] 黎建强, 陈奇伯, 王克勤, 等. 水电站建设项目弃渣场岩土侵蚀研究. *水土保持研究*, 2007, 14 (6) : 40—42. Li J Q, Chen Q B, Wang K Q, et al. Study on rock and soil erosion in dumping pile of hydropower station construction project (In Chinese). *Research of Soil and Water Conservation*, 2007, 14 (6) : 40—42
- [12] 赵暄, 谢永生, 王允怡, 等. 模拟降雨条件下弃土堆置体侵蚀产沙试验研究. *水土保持学报*, 2013, 27 (3) : 1—8, 76. Zhao X, Xie Y S, Wang Y Y, et al. Experimental study on soil erosion and sediment yield of spoil bank under simulated rainfall condition (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27 (3) : 1—8, 76
- [13] 马春艳, 王占礼, 寇晓梅, 等. 工程建设弃土弃渣水土流失过程试验研究. *水土保持通报*, 2009, 29 (3) : 78—82. Ma C Y, Wang Z L, Kou X M, et al. Experimental study of soil and water loss processes on waste soil and residue in project construction (In

- Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29 (3): 78—82
- [14] 陈奇伯, 黎建强, 王克勤, 等. 水电站弃渣场岩土侵蚀人工模拟降雨试验研究. *水土保持学报*, 2008, 22 (5): 1—4. Chen Q B, Li J Q, Wang K Q, et al. Artificial rainfall research of rock and soil erosion on dumping pile in the hydropower station (In Chinese). *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22 (5): 1—4
- [15] Rubio-Montoya D, Brown K W. Erodibility of strip-mine spoil. *Soil Science*, 1984, 138: 365—373
- [16] 李宏伟, 王文龙, 黄鹏飞, 等. 土石混合堆积体土质可蚀性K因子研究. *泥沙研究*, 2014 (2): 49—54. Li H W, Wang W L, Huang P F, et al. Experimental study of soil erodibility factor of earth-rock engineering accumulation in loess areas (In Chinese). *Journal of Sediment Research*, 2014 (2): 49—54
- [17] 张光辉, 刘宝元, 李平康. 槽式人工模拟降雨机的工作原理与特性. *水土保持通报*, 2007, 27 (6): 56—60. Zhang G H, Liu B Y, Li P K. Principles and properties of artificial trough rainfall simulator (In Chinese). *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2007, 27 (6): 56—60
- [18] 倪含斌, 张丽萍, 张登荣. 模拟降雨试验研究神东矿区不同阶段堆积弃土的水土流失. *环境科学学报*, 2006, 26 (12): 2065—2071. Ni H B, Zhang L P, Zhang D R. Simulated rainfall experiments on soil and water erosion in different phases of resources exploitation in Shendong Mine Region (In Chinese). *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26 (12): 2065—2071
- [19] 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. *科学通报*, 1993, 38 (20): 1896—1899. Yang P L, Luo Y P, Shi Y C. Characterized by particle size distribution of the weight of the soil fractal (In Chinese). *Chinese Science Bulletin*, 1993, 38 (20): 1896—1899
- [20] 郭明明, 王文龙, 李建明, 等. 神府煤田土壤颗粒分形及降雨对径流产沙的影响. *土壤学报*, 2014, 51 (5): 983—992. Guo M M, Wang W L, Li J M, et al. The influence of soil particles fractal and rainfall on runoff and sediment yield in Shenfu Coalfield (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51 (5): 983—992
- [21] 李建明, 王文龙, 王贞, 等. 神府东胜煤田弃土弃渣体径流产沙过程的野外试验. *应用生态学报*, 2013, 24 (12): 3537—3545. Li J M, Wang W L, Wang Z, et al. A field experiment of runoff and sediment yielding processes from residues in Shenfu-Dongsheng Coalfield (In Chinese). *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24 (12): 3537—3545
- [22] 张乐涛, 高照良, 李永红, 等. 模拟径流条件下工程堆积体陡坡土壤侵蚀过程. *农业工程学报*, 2013, 29 (8): 145—153. Zhang L T, Gao Z L, Li Y H, et al. Soil erosion process of engineering accumulation in steep slope under simulated runoff conditions (In Chinese). *Transaction of the CSAE*, 2013, 29 (8): 145—153
- [23] 李君兰, 蔡强国, 孙莉英, 等. 坡面水流速度与坡面含砂量的关系. *农业工程学报*, 2011, 27 (3): 73—78. Li J L, Cai Q G, Sun L Y, et al. Relationship between the spatial distribution of flow velocity and sediment concentration (In Chinese). *Transactions of the CSAE*, 2011, 27 (3): 73—78
- [24] Govers G, Rauws G. Transporting capacity of overland flow on plane and on irregular beds. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1986, 11 (5): 515—524
- [25] 王小燕, 李朝霞, 徐勤学, 等. 砾石覆盖对土壤水蚀过程影响的研究进展. *中国水土保持科学*, 2011, 9 (1): 115—120. Wang X Y, Li Z X, Xu Q X, et al. Review of effects of rock fragment cover on soil water erosion processes (In Chinese). *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9 (1): 115—120
- [26] 李璐, 袁建平, 刘宝元. 开发建设项目水蚀量预测方法研究. *水土保持研究*, 2004, 11 (2): 81—84. Li L, Yuan J P, Liu B Y. Review on soil erosion prediction in construction projects (In Chinese). *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11 (2): 81—84
- [27] 程冬兵, 张平仓, 张长伟, 等. 工程开挖面土壤侵蚀模型的构建. *农业工程学报*, 2014, 30 (10): 106—112. Cheng D B, Zhang P C, Zhang C W, et al. Construction of soil erosion model of engineering excavated slope (In Chinese). *Transactions of the CSAE*, 2014, 30 (10): 106—112
- [28] Guy B T, Rudra R P, Dickenson W T, et al. Empirical model for calculating sediment-transport capacity in shallow overland flows: Model development. *Biosystems Engineering*, 2009, 103 (1): 105—115
- [29] Mahmoodabadi M, Ghadiri H, Rose C, et al. Evaluation of GUEST and WEPP with a new approach for the determination of sediment transport capacity. *Journal of Hydrology*, 2014, 513: 413—421
- [30] Li W J, Li D X, Wang X K. An approach to estimating sediment transport capacity of overland flow. *Science China, Technological Sciences*, 2011, 54 (10): 2649—2656
- [31] Ali M, Sterk G, Seeger M, et al. Effect of hydraulic parameters on sediment transport capacity in overland

- flow over erodible beds. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2011, 8 (4) : 6939—6965
- [32] Guy B T, Sohrabi T M, Rudra R P, et al. An empirical model development for the sediment transport capacity of shallow overland flows: model validation. *Biosystems Engineering*, 2009, 103 (4) : 518—526
- [33] Ali M, Seeger M, Sterk G, et al. A unit stream power based sediment transport function for overland flow. *Catena*, 2013, 101: 197—204

EROSION ON DUNES OF OVERBURDEN AND WASTE SLAG IN SHENFU COALFIELD AND PREDICTION

Guo Mingming¹ Wang Wenlong^{1, 2†} Li Jianming³ Huang Pengfei⁴ Bai Yun⁵ Shi Qianhua¹
Kang Hongliang¹ Li Yanfu⁶

(1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Agriculture on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(2 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

(3 Department of Soil and Water Conservation, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

(4 Key Laboratory of Soil Erosion and Control, Institute of Soil and Water Conservation in Jiangxi, Nanchang 330029, China)

(5 Yulin University, College of Life Sciences, Yulin, Shaanxi 719000, China)

(6 Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract During the development and construction of the Shenfu coalfield, generated were large tracts of disturbed land, and large volumes of overburden and waste slag, which, unique in soil composition, complex in underlying surface layer and significantly different from deserted land, have become a major source of serious man-made soil and water loss. An artificially simulated rainfall experiment was carried out to explore characteristics of the erosion on the huge dunes of disturbed soil, overburden and/or waste slag, and methods to predict its occurrence, with a tract of deserted land as CK. Detailed field investigations found that the dunes of overburden and waste slag ranged from 33° to 40° in natural angle of repose and the tracts of disturbed soil and deserted lands ranged from 4° to 18° in slope, so in the experiment 35° and 40° were set for dunes and 5°, 10°, and 18° for slope of land. Plots in the experiment field were laid out to be 3m x 1m, each, and each had two sections set up for monitoring of water flow. Rainfall intensity in the experiment was designed to vary from 1.5 ~ 3.0 mm min⁻¹, forming four levels with an interval of 0.5 mm min⁻¹ between every two levels. Before the experiment, the rainfall intensity was calibrated repeatedly until uniformity coefficient of the rainfalls reached 85% or higher. Soil particle compositions of the plots were determined with the pipette method. And then fractal dimension was figured out from soil particle composition to be 2.160, 2.164, 2.256, 2.379, and 2.566, respectively, for the dune of waste slag with less sand and more stone, the dune of waste slag with more sand and less stone, the dune of overburden, the tract of disturbed soil, and the tract of deserted land. Bulk density, porosity and moisture content of the soils were measured with the oven-drying method. During every rainfall, flow velocity was measured with the dye tracing method and width and depth of the flow with a thin steel rule. For the first 3 minutes of runoff, samples of runoff and sediment were gathered once a minute, and after that once every 3 minutes. Results show that (1) on the deserted land, erosion rate followed the process of declining-fluctuating-leveling off with the rainfall going on; on the land of disturbed soil, it did the process of rising-fluctuating-leveling off; on the dune of overburden 35° in slope,

it rose to peak and then declined and gradually leveled off; on the dune, 40° in slope it fluctuated all the time; and on the dunes of waste slag of either texture it fluctuated drastically in the earlier runoff generation stage with occasional mud-rock flows and then leveled off about 15 min after runoff initiation. In general, in terms of erosion fluctuation, the five types of underlying followed an order of the dune of waste slag with less sand and more stone > the dune of waste slag with more sand and less stone > the dune of overburden > the tract of deserted > soil, and the tract of disturbed land; (2) erosion rate was closely related to rainfall intensity and underlying surface ($p < 0.05$), but slope was not so much related ($p > 0.05$). Complex soil composition is the main cause, making overburden and waste slag and disturbed soil different from deserted land. The erosion rate on the dune of slag with less sand and more stone, the dune of slag with more sand and less stone, the dune of overburden and the tract of disturbed soil was 6.51 ~ 14.25, 57.91 ~ 239.15, 43.60 ~ 180.13 and 2.27 ~ 3.06 times that on the tract of deserted land, respectively under rainfalls the same in intensity; and (3) erosion rates on the dunes of slag or overburden and the tract of disturbed soil could be predicted using the equation of power function of median soil particle size, fractal dimension, rainfall intensity, and slope and runoff parameters. The study demonstrates some important scientific significance to the establishment of soil erosion models and the construction of ecological environment for mining areas.

Key words Shenfu coalfield; Dunes of overburden and slag; Disturbed soil; Deserted land; Erosion rate

(责任编辑：汪枳生)

CONTENTS

Reviews and Comments

- The historical venation of soil science in the past 30 years—Based on the bibliometric analysis Song Changqing, Tan Wenfeng (968)
 Soil ecosystem services: Concept, quantification and response to urbanization Wu Shaohua, Yu Yanna, Zhu Jiang, et al. (977)

Research Articles

- Analysis on spatial-temporal variability of soil organic matter in Henan Province based on Soil Taxonomy Li Ling, Zhang Shaokai, Wu Kening, et al. (989)
 Relationship between illite crystallinity (IC) value and weathering degree of Quaternary Red Clay in southern Anhui Province, Southeast China Liu Lihong, Hu Xuefeng, Ye Wei, et al. (1000)
 Micromorphology of ancient plow layer of paleosol in the Lajia Ruins in the Guanting Basin, Minhe County, Qinghai Province Zhang Yuzhu, Huang Chunchang, Pang Jiangli, et al. (1013)
 Prediction of vertical distribution of soil nitrogen content in soil profile using spectral imaging technique Li Shuo, Wang Shanqin, Shi Zhou (1022)
 Estimation of thickness of soil layer on typical karst hillslopes using a ground penetrating radar Wang Sheng, Chen Hongsong, Fu Zhiyong, et al. (1030)
 Spatio-temporal distribution of dry-wet alteration in surface soil layer of the Huaihe River Basin Cao Yongqiang, Xu Dan, Cao Yang (1042)
 Erosion on dunes of overburden and waste slag in Shenfu coalfield and prediction Guo Mingming, Wang Wenlong, Li Jianming, et al. (1056)
 Dynamics of soil water evaporation from soil mulched with sand-gravels in stripe Zhao Dan, Li Yi, Feng Hao (1067)
 Effect of pH and three kinds of anions on selenium absorption and desorption in purple soil Zhou Xinbin, Yu Shuhui, Xie Deti (1076)
 Release kinetics and bioavailability of nonexchangeable potassium in soil Li Ting, Wang Huoyan, Chen Xiaoqin, et al. (1086)
 Effects of bio-ash ameliorating red soil in acidity Shi Renyong, Li Jiuyu, Xu Renkou, et al. (1095)
 Effect of wheat straw biochar on high chlorinated benzene sorption process and mechanism Li Yang, Song Yang, Wang Fang, et al. (1104)
 Sorption kinetics and mechanism of naphthalene on corn-stalk-derived biochar with different pyrolysis temperature Zhang Mo, Jia Mingyun, Bian Yongrong, et al. (1114)
 Toxicity of deca-brominated diphenyl ether to *Caenorhabditis elegans* Wang Yingli, Chen Jiansong, Yang Yuxiang, et al. (1122)
 Effects of clover and straw decomposition on soil microfaunal community Wang Hui, Gui Juan, Liu Manqiang, et al. (1133)
 Response of soil nematodes to soil salinization induced by seawater intrusion in coastal areas Wang Chengnan, Zhang Weidong, Wang Xuefeng, et al. (1142)
 Relationships of N₂O emission with abundance and composition of denitrifying microorganisms in soil aggregates Zhou Hanchang, Zhang Wenzhao, Liu Yi, et al. (1151)
 Optimizing blending ratio of controlled release N fertilizer for spring maize based on grain yield, N efficiency, and economic benefit Wang Yin, Feng Guozhong, Zhang Tianshan, et al. (1164)

Communications and Comments

- Status quo and problems in setting-up and naming of basic taxon-Soil family in Chinese Soil Taxonomy Yi Chen, Ma Yuxin, Yang Jinling, et al. (1172)

Research Notes

- Effects of drought and rehydration on photosynthetic characteristics of artificial algal crusts Wu Li, Yang Hong, Lan Shubin, et al. (1179)
 Effect of irrigation with saline water on plant root distribution and evolution of aeolian sandy soil in shelterbelts along desert highways Li Congjuan, Tang Junyan, Gao Pei, et al. (1186)
 Distribution of Cu (II) desorption rate in variable charge soils relative to concentrations of NaNO₃ and its affecting factors Zhang Zhengqin, Luo Wenjian, Chen Yong, et al. (1194)

Cover Picture: Toxicity of deca-brominated diphenyl ether (BDE-209) to *Caenorhabditis elegans*
 (by Wang Yingli)

《土壤学报》编辑委员会

主 编：史学正

执行编委：(按姓氏笔画为序)

丁维新	巨晓棠	王敬国	王朝辉	史 舟	宇万太	朱永官
李永涛	李芳柏	李保国	李 航	吴金水	沈其荣	张玉龙
张甘霖	张福锁	陈德明	邵明安	杨劲松	杨明义	杨林章
林先贵	依艳丽	周东美	周健民	金继运	逢焕成	胡 锋
施卫明	骆永明	赵小敏	贾仲君	徐国华	徐明岗	徐建明
崔中利	常志州	黄巧云	章明奎	蒋 新	彭新华	雷 梅
窦 森	廖宗文	蔡祖聪	蔡崇法	潘根兴	魏朝富	

编辑部主任：陈德明

责任编辑：汪枳生 卢 萍 檀满枝

土 壤 学 报

Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第 52 卷 第 5 期 2015 年 9 月

ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 52 No. 5 Sep., 2015

编 辑 《土 壤 学 报》编 辑 委 员 会
地址:南京市北京东路 71 号 邮政编码:210008
电话:025-86881237
E-mail:actapedo@issas.ac.cn

主 编 史 学 正
主 管 中 国 科 学 院
主 办 中 国 土 壤 学 会
承 办 中国科学院南京土壤研究所

出 版 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717

印刷装订 北京中科印刷有限公司
总 发 行 科 学 出 版 社
地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717
电话:010-64017032
E-mail:journal@mail.sciencep.com

国 外 发 行 中国国际图书贸易总公司
地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044

Edited by Editorial Board of Acta Pedologica Sinica
Add: 71 East Beijing Road, Nanjing 210008, China
Tel: 025-86881237
E-mail:actapedo@issas.ac.cn

Editor-in-Chief Shi Xuezheng
Superintended by Chinese Academy of Sciences
Sponsored by Soil Science Society of China
Undertaken by Institute of Soil Science,
Chinese Academy of Sciences

Published by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China

Printed by Beijing Zhongke Printing Limited Company
Distributed by Science Press
Add: 16 Donghuangchenggen North Street,
Beijing 100717, China
Tel: 010-64017032
E-mail:journal@mail.sciencep.com

Foreign China International Book Trading Corporation
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一刊号:CN 32-1119/P

国内邮发代号:2-560

国外发行代号:BM45

定价:60.00 元

国 内 外 公 开 发 行



ISSN 0564-3929



9 770564 392156