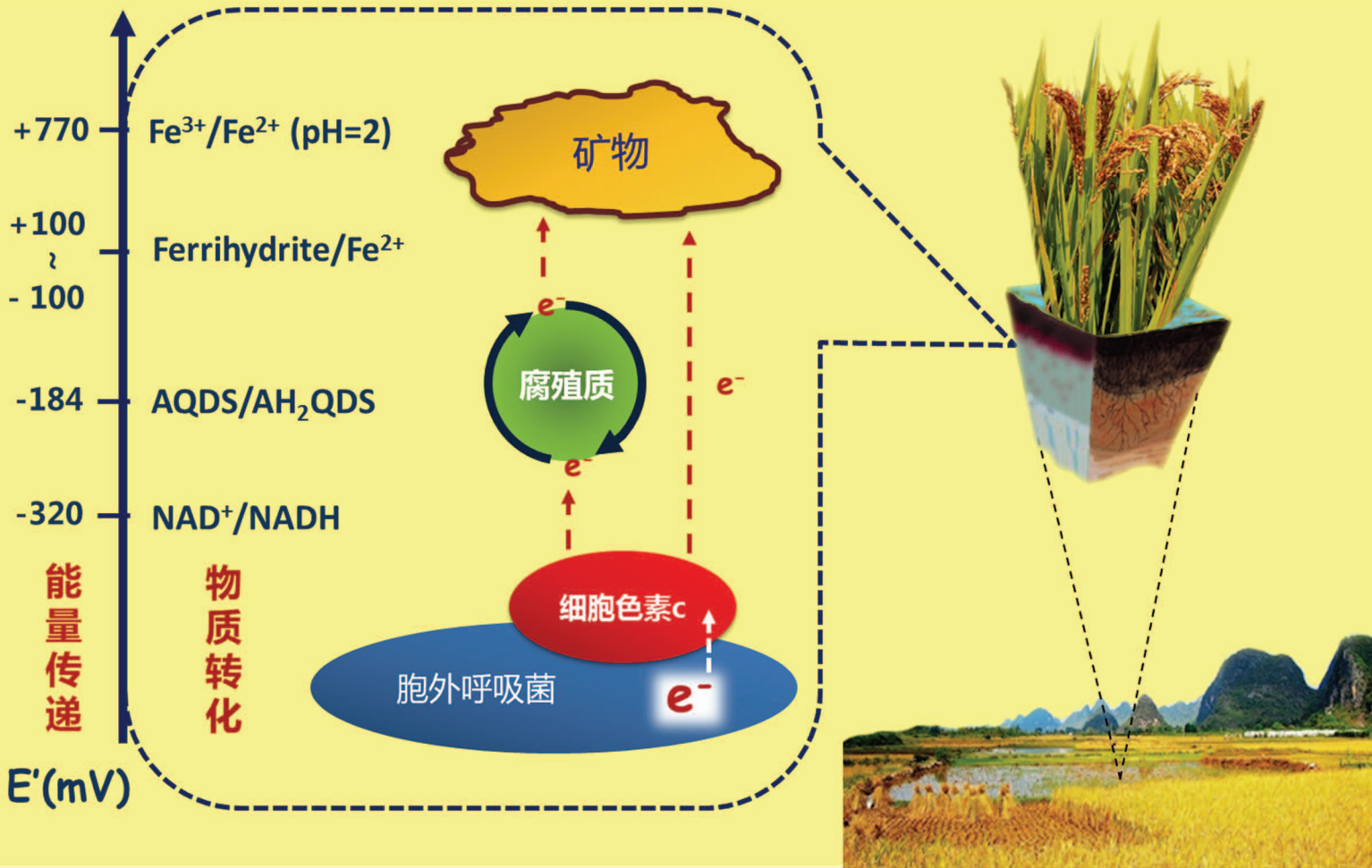


Acta Pedologica Sinica 土壤学报

Turang Xuebao



中国土壤学会 主办
科学出版社 出版

2016

第53卷 第2期

Vol.53 No.2



土壤学报

(Turang Xuebao)



第 53 卷 第 2 期 2016 年 3 月

目 次

综述与评论

- 土壤微生物—腐殖质—矿物间的胞外电子传递机制研究进展····· 吴云当 李芳柏 刘同旭 (277)
长期施肥对农田土壤氮素关键转化过程的影响····· 王 敬 程 谊 蔡祖聪等 (292)

新视角与前沿

- 土壤学不应忽视对作物土传病原微生物的研究····· 蔡祖聪 黄新琦 (305)

研究论文

- 西安少陵塬黄土—古土壤序列 S_3 剖面元素迁移及古气候意义····· 楚纯洁 赵景波 (311)
基于盲源分离的稀疏植被区土壤含盐量反演····· 刘 娅 潘贤章 石荣杰等 (322)
基于地类分层的土壤有机质光谱反演校正样本集的构建····· 刘艳芳 卢延年 郭 龙等 (332)
基于多分辨率遥感数据与随机森林算法的土壤有机质预测研究····· 王茵茵 齐雁冰 陈 洋等 (342)
鄂东南崩岗剖面土壤水分特征曲线及模拟····· 邓羽松 丁树文 蔡崇法等 (355)
放水冲刷对红壤坡面侵蚀过程及溶质迁移特征的影响····· 马美景 王军光 郭忠录等 (365)
汶川震区滑坡堆积体坡面土壤侵蚀率及水动力学参数研究····· 王仁新 何丙辉 李天阳等 (375)
咸水冻融灌溉对重度盐渍土壤水盐分布的影响····· 张 越 杨劲松 姚荣江 (388)
基于不同估算方法的贵州省土壤温度状况····· 陆晓辉 董宇博 涂成龙 (401)
拉萨灌丛草甸区土壤温度变化特征····· 巩玉玲 王兆锋 张德锂等 (411)
砂土和黏土的颗粒差异对土壤斥水性的影响····· 杨 松 吴珺华 董红艳等 (421)
AQDS加速红壤性水稻土中DDT厌氧脱氯效应研究····· 刘翠英 王 壮 徐向华等 (427)
激发式秸秆深还对土壤养分和冬小麦产量的影响····· 赵金花 张丛志 张佳宝 (438)
臭氧污染对麦田土壤不同活性有机碳库的影响····· 寇太记 程相涵 张东亮等 (450)
黑土区水稻土有机氮组分及其对可矿化氮的贡献····· 丛耀辉 张玉玲 张玉龙等 (457)
水土保持措施对红壤缓坡地土壤活性有机碳及酶活性的影响····· 黄尚书 成艳红 钟义军等 (468)
祁连山青海云杉林叶片—枯落物—土壤的碳氮磷生态化学计量特征····· 赵维俊 刘贤德 金 铭等 (477)
基于核酸DNA/RNA同位素示踪技术的水稻土甲烷氧化微生物研究····· 郑 燕 贾仲君 (490)
适应玉米的溶磷细菌筛选及其对玉米生长的影响····· 梅新兰 闪安琪 蒋 益等 (502)
旱地红壤线虫群落对不同耕作年限的响应及指示意义····· 王明伟 刘雨迪 陈小云等 (510)
西藏“玉米田养鹅”模式下养分吸收与养分平衡特征····· 沙志鹏 张宇阳 王 超等 (523)
加工番茄连作对土壤理化性状及微生物量的影响····· 康亚龙 景 峰 孙文庆等 (533)

研究简报

- CTMAB对BS-12修饰膨润土的复配修饰模式····· 余 璐 孟昭福 李文斌等 (543)
不同机械改土方式对白浆土物理特性及酶活性的影响····· 孟庆英 张春峰 贾会彬等 (552)

信息

- 《土壤学报》2015年度审稿专家名录····· (560)

封面图片: 微生物胞外电子传递: 能量传递与物质转化 (由吴云当、李芳柏、刘同旭提供)

汶川震区滑坡堆积体坡面 土壤侵蚀率及水动力学参数研究*

王仁新¹ 何丙辉^{1†} 李天阳² 陈展鹏¹ 张劲松³

(1 西南大学资源环境学院, 三峡库区生态环境教育部重点实验室, 重庆 400715)

(2 四川大学水利水电学院, 成都 610065)

(3 西南科技大学土木工程与建筑学院, 四川绵阳 621010)

摘要 汶川震区滑坡堆积体土石结构松散, 在降雨径流作用下易产生剧烈沟蚀, 导致严重的水土流失, 研究堆积体水流泥沙输移运动规律具有重要意义。根据野外调查结果, 采用 4 种石土比 (质量比分别为 0:1、1:3、1:2 和 1:1), 3 级流量 (4、8、12 L min⁻¹), 在近临界休止角 34° 和 36° 条件下进行放水冲刷试验, 研究汶川震区滑坡堆积体土壤侵蚀率和水动力学参数的变化特征及其关系。结果表明: 随着冲刷时间的推延, 土壤侵蚀率、水流功率和单位水流功率逐渐减小, 水流剪切力先增加后减小, 过水断面单位能量先减后增再减小。全土以及石土比分别为 1:3 和 1:1 条件下, 土壤侵蚀率、水流剪切力、水流功率和过水断面单位能量随流量的增加而增大; 在石土比 1:2 条件下, 土壤侵蚀率随流量的增加而增大, 水流剪切力、水流功率和过水断面单位能量随流量的增加, 变化规律不稳定。水流剪切力、水流功率和过水断面单位能量对土壤侵蚀率的影响均可用幂函数方程描述, 而单位水流功率的影响不显著。该结果可为汶川震区滑坡堆积体坡面土壤侵蚀模型的建立奠定基础。

关键词 汶川震区; 土石混合; 土壤侵蚀率; 水动力学参数

中图分类号 S157.2 **文献标识码** A

汶川震区沿主河及支流河谷分布着大量的滑坡堆积体^[1]。这些堆积体主要由土壤和碎石混合组成, 结构松散, 碎石的存在使得原本均质的土壤物理特性发生了改变^[2]。在降雨作用下, 堆积体坡面沟蚀剧烈, 发生严重的水土流失。目前有关汶川震区滑坡堆积体坡面水流泥沙输移过程及机理的研究鲜有报道, 深入其研究对认识震区滑坡堆积体土壤侵蚀机理具有重要意义。

土壤侵蚀率为单位时间单位面积上被径流分离剥蚀输移的泥沙量, 是土壤侵蚀模型考虑的重要因子。目前对土壤侵蚀率的研究主要集中于与水动力学参数的关系方面。1965 年, Lyle 和 Smerdon^[3]首次采用水槽试验阐述了土壤侵蚀率与径流剪切

力之间的关系, 其后 Bagnold^[4]定义了水流功率, Elliot 和 Laflen^[5]认为水流功率能够更准确预测土壤剥离能力。此后 Nearing 等^[6]的野外试验也表明水流功率能够更准确地模拟分离过程。Yang 和 Song^[7]定义了单位水流功率, Govers^[8]在室内模拟条件下, 认为径流剥离能力是单位水流功率的函数。在前人研究的基础上, 张科利和唐克丽^[9]得出土壤分离能力与水流剪切力呈线性关系。Zhang 等^[10]认为水流功率更适合预报土壤分离过程。此外, 张新和^[11]、张冠华^[12]也考虑了土壤侵蚀率与过水断面单位能量之间的关系。

目前有关土壤侵蚀率与水动力学参数关系的研究多集中于黄土区^[2, 9, 11]和工矿堆积体^[13-14],

* 国家自然科学基金项目 (41271291) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41271291)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: hebinghui@swu.edu.cn

作者简介: 王仁新 (1991—), 女, 四川仁寿人, 硕士研究生, 主要从事城市水土保持研究。E-mail: wangrenxinhyb@126.com

收稿日期: 2015-07-24; 收到修改稿日期: 2015-09-04

黄土区土壤侵蚀历来受到众多学者关注, 工矿堆积体在人为条件下形成, 具有下垫面复杂、土壤结构体缺失和土质松散等特点^[15], 汶川震区滑坡堆积体形成于人为力量不可抗拒的自然灾害, 形态结构复杂多变, 在强降雨条件下侵蚀剧烈, 存在着巨大的安全隐患。

根据野外调查结果, 汶川震区滑坡堆积体土石分布在自然条件下具有较强随机性, 为将其简化, 本研究采用室内放水冲刷试验, 模拟研究不同土石质量比条件下, 堆积体坡面土壤侵蚀率和水动力学参数随冲刷历时的变化规律及其关系, 以期预测震区土壤侵蚀和建立土壤侵蚀模型提供依据, 为进一步做好震区水土流失防治措施打下基础。

1 材料与方法

1.1 野外调查区域概况

野外调查路线沿国道213线汶川映秀至威州段, 全长约56 km, 由南向北依次为汶川的映秀、银杏、草坡、绵虬和威州5个乡镇。调查区内地势呈西北高东南低, 最大高差超过2 000 m, 为典型的高山峡谷地貌; 气候垂直分带明显, 差异显著, 山体坡度以 $25^{\circ} \sim 55^{\circ}$ 为主^[16]。区内河谷深切, 水流湍急, 岷江最大流量 $1\,980\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$, 最小流量 $49.3\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$, 年平均流量 $168 \sim 268\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$, 河床平均坡降8‰, 河面宽度一般在80~100 m, 汛期主要补给为降水, 枯季为融雪和地下水^[17]。调查区年均气温 $13.5 \sim 14.1^{\circ}\text{C}$, 雨量 $528.7 \sim 1\,332.2\text{ mm}$, 岩性以花岗岩为主, 间有砂岩、石灰岩和灰岩等, 土壤以山地黄棕壤为主。

1.2 堆积体性质调查

野外现场调查分别开展于2012年和2013年11月, 调查对象为汶川县草坡乡国道213沿线的滑坡堆积体, 结合地震前后卫星影像对比发现, 这段产生了大量崩塌和滑坡堆积体, 是受崩塌和滑坡影响极为严重的区域, 通过对该区域滑坡堆积体进行整体比较, 选取了12组典型滑坡堆积体, 采用GPS及坡度仪, 测定其所处高程及坡度(休止角), 并沿坡面采集各堆积体表层0~30 cm土石混合样, 测定其容重及土石含量(表1), 滑坡堆积体坡度在 $32^{\circ} \sim 40^{\circ}$ 之间, 多集中于 36° , 平均容重 $1.43 \sim 1.80\text{ g cm}^{-3}$, 其中, 碎石含量为 $20.33\% \sim 68.50\%$, 密度 2.86 g cm^{-3} , 饱和含

水率为3.29%, 以棱角形碎石为主, 土壤($< 2\text{ mm}$)含量为 $31.50\% \sim 79.67\%$, 土壤粒径 $2 \sim 1$ 、 $1 \sim 0.25$ 、 $0.25 \sim 0.05$ 、 $0.05 \sim 0.01$ 、 $0.01 \sim 0.005$ 、 $0.005 \sim 0.001$ 及 $< 0.001\text{ mm}$ 质量百分比分别为12.88%、48.85%、14.64%、6.29%、3.21%、1.98%和12.14%。植被覆盖率3%~60%。

1.3 放水冲刷试验

室内放水冲刷试验在西南大学人工降雨大厅进行。将采自汶川滑坡堆积体的混合土石样分别过2 mm和7 mm筛, 留取粒径 $< 2\text{ mm}$ 的土壤和 $2 \sim 7\text{ mm}$ 的碎石。试验前将长5.0 m、宽1.0 m、高0.5 m的可变坡钢制土槽用PVC板沿其长边方向分隔成长3.5 m、宽0.1 m、高0.5 m的沟槽。沟槽底部开有小孔, 以便重力水能自由流出(图1)。沟槽内先装填厚度为20 cm运自汶川震区滑坡堆积体上未过筛的混合土石, 以模拟天然土石混合层, 保证试验中透水状况接近野外坡面。将筛分出的碎石与土壤按0:1、1:3、1:2和1:1的质量比均匀混合。装填土石混合体时采取边填边压实的方式, 装填总厚度为20 cm, 土石混合体容重约 1.83 g cm^{-3} 。试验前将装填好的土石混合体均匀洒水, 直至土槽底部小孔匀速渗水, 此时土石混合体接近饱和, 放置18~24 h后进行放水冲刷试验。

从沟槽上端按设计流量放水, 通过水箱和0.1

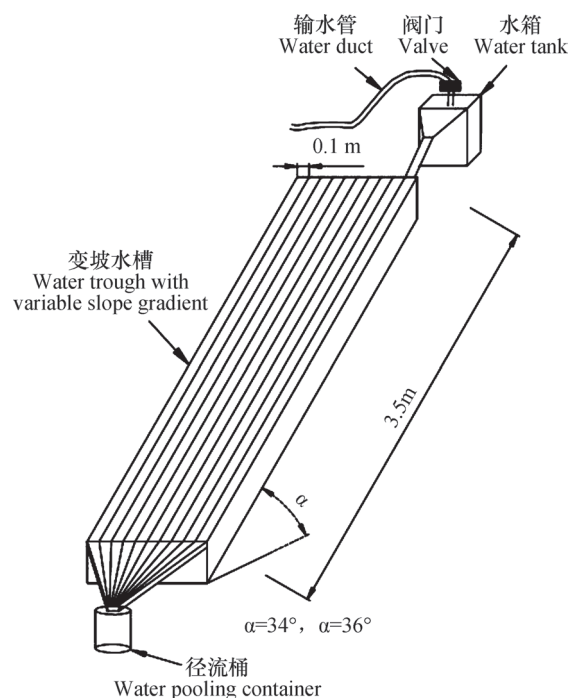


图1 试验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the device used in the experiment

表1 堆积体相关参数

Table 1 Parameters of the landslide accumulations

编号 Serial number	地理位置 Location	经纬度 Coordinates	高程 Height (m)	堆积体坡度 Gradient (°)	堆积体样容重 Bulk density (g cm ⁻³)	碎石含量 Rock fragments content (%)	土壤含量 Soil content (%)	植被覆盖率 Vegetation coverage (%)
1	草坡乡两河村红庙子 Red temple, Lianghe Village, Caopo Township	103°25'47"E, 31°15'15"N	1 382	38	1.43	27.26	72.74	45
2	草坡乡小索桥风包 Xiaosuoqiao Fenbao, Caopo Township	103°27'40"E, 31°16'41"N	1 138	38	1.51	20.33	79.67	60
3	草坡乡小学对面 Opposite the Caopo primary school	103°26'05"E, 31°15'34"N	1 358	35	1.80	30.42	69.58	40
4	草坡乡派出所对面 Opposite the Caopo local police station	103°26'09"E, 31°15'43"N	1 339	39	1.61	34.78	65.22	10
5	5.12地震断桥遗址 The site of the bridge destroyed in 5.12 earthquake	103°29'37"E, 31°12'5"N	1 105	36	1.68	68.50	31.50	50
6	绵虬镇中石油加油站对 面 Opposite the PetroChina gas station in Miansi Town	103°29'28"E, 31°21'50"N	1 237	34	1.64	34.04	65.96	8
7	绵虬镇小学对面 Opposite the Miansi primary school	103°29'29"E, 31°21'31"N	1 215	32	1.55	51.36	48.64	5
8	绵虬镇羌锋村 Qiangfeng Village, Miansi Town	103°29'26"E, 31°20'48"N	1 199	34	1.73	58.13	41.87	3
9	草坡乡大邑坪118 No.118 Da Yiping, Caopo Township	103°27'40"E, 31°17'42"N	1 186	37	-	-	-	40
10	草坡乡2号大桥 No.2 Bridge, Caopo Township	103°27'36"E, 31°17'21"N	1 152	40	-	-	-	5
11	银杏乡桃关村 TaoguanVillage, Yinxing Township	103°29'25"E, 31°14'27"N	1 135	39	-	-	-	5
12	绵虬镇板子沟村 Ban Zigou Village, Miansi Town	103°31'29"E, 31°24'17"N	1 285	37	-	-	-	30

m宽的出水口。试验设计流量是根据研究区暴雨发生频率在堆积体坡面建立的标准径流小区上产生的单宽流量换算并结合前期的预实验得到的,分别为4 Lmin⁻¹、8 Lmin⁻¹、12 Lmin⁻¹。由野外现场调查可知(表1),典型滑坡堆积体坡度主要集中于36°,又因坡度在本研究中不作为主要研究对象,考虑其对比及重复性,试验坡度设置34°和36°两级。采用石土比、流量、坡度完全组合的方法进行试验,每一个组合重复2次。每次试验中,以可变坡钢制土槽长边为基准,分别在距底端0、1、2、3 m处设置测定断面,每间隔20 s测定流速、水深及水宽。其中流速的测定,采用染色法,染色剂为紫色KMnO₄溶液,表层流速的测量标准差变化于0.001~0.150;水深及水宽则用薄钢尺测量,水深的测量标准差变化于0.05~0.36。由于试验坡度较陡,流量较大,又根据预试验得知冲刷过程变化迅速,冲刷持续时间较短,由此设定放水冲刷总时间为5 min。以放水冲刷开始后沟槽出水口产生径流为计时起点,前2 min内间隔20 s收集一次径流泥沙样,后3 min间隔1 min收集一次。收集的径流泥沙样用量筒测定径流量,用烘干法测定含沙量。

1.4 坡面水动力学指标计算方法

用染色法测得的流速为水流表面流速,乘以修正系数0.75^[18-19]得到水流的平均流速。土壤侵蚀率为单位时间单位面积上被径流剥蚀输移的泥沙量,其值等于单位时间内被剥蚀的泥沙量与相应径流宽度及试验坡长的比值^[20],采用式(1)计算:

$$E = \frac{M}{tbL} \quad (1)$$

式中, E 为土壤侵蚀率,kg m⁻² s⁻¹; M 为冲刷时间内的泥沙质量,kg; t 为冲刷时间,s; b 为径流宽,m; L 为试验坡长,m。

水流剪切力是沿着坡面梯度方向的坡面流在其运动方向上产生的作用力,这种作用力就是径流冲刷动力^[21],其计算公式由Foster等^[22]提出,如式(2); Bagnold^[4]定义了水流功率,即单位面积水体势能随时间的变化率,如式(3); Yang和Song^[7]将单位水流功率定义为作用于泥沙床面的单位重量水体所消耗的功率,如式(4); 李占斌等^[23]通过分析黄土坡面径流侵蚀的能量,提出了过水断面单位能量的概念,如式(5):

$$\tau = \rho g R S \quad (2)$$

$$\omega = \tau V = \rho g R S V \quad (3)$$

$$U_p = V S \quad (4)$$

$$\varepsilon = h + \frac{V^2}{2g} \quad (5)$$

式中, τ 为水流剪切力,kg m⁻¹ s⁻²; ω 为水流功率,kg s⁻³; U_p 为单位水流功率,m s⁻¹; ε 为过水断面单位能量,m; ρ 为水的质量密度,1 000 kg m⁻³; g 为重力加速度,9.8 m s⁻²; R 为水力半径,m; $R = A/P$, A 为过水断面面积,m²; P 为湿周,m; $P = 2h+b$, h 为径流深度,m; b 为径流宽度,m; S 为水力坡降, $S = \sin\theta$, θ 为试验坡度,°; V 为水流平均流速,m s⁻¹。

2 结果与讨论

2.1 堆积体坡面土壤侵蚀率的变化特征

由图2可知,堆积体土石混合坡面土壤侵蚀率随放水冲刷历时而减小,这与Poesen等^[24]研究结果一致,这是由于径流首先剥蚀松散的土石,然后是对土石颗粒的分散及机械破坏^[15],而随着水流入渗和侵蚀细沟的形成,水流能量损失,径流剥蚀能力减弱,因此土壤侵蚀率减小。全土以及石土比分别为1:3、1:2和1:1条件下,土壤侵蚀率分别为0.38~5.62、0.88~7.98、0.43~6.33和0.47~3.96 kg m⁻² s⁻¹,其平均值分别为2.92、3.33、3.07和1.56 kg m⁻² s⁻¹,土壤侵蚀率大小顺序为:1:3 > 1:2 > 全土 > 1:1。这说明在一定碎石的存在下可能加剧土壤侵蚀,这是因为碎石改变了水流在地表的流动形态,使其更容易形成流速较大的集中水流,水流贯通能力增强,从而加剧土壤侵蚀^[25]。此外,碎石与土壤之间的黏结作用比单一土壤结构弱^[26],这也是导致土壤侵蚀率更大的原因。当碎石含量达到一定比例时,地表碎石面积增大,即水流与土壤直接作用的面积减少,用于剥蚀、输送泥沙的水流量比例减小,所以土壤侵蚀率减小。在相同坡度及石土比条件下,土壤侵蚀率随流量的增加而显著增加,流量的增加使得水流能量增大,其剥蚀能力相应增强,这与王瑄等^[27]所得相同坡度下土壤剥蚀率随流量的增加而增加的结果一致。相同坡度及流量条件下,石土比1:1土壤侵蚀率最小,而最大土壤侵蚀率并不在某一特定石土

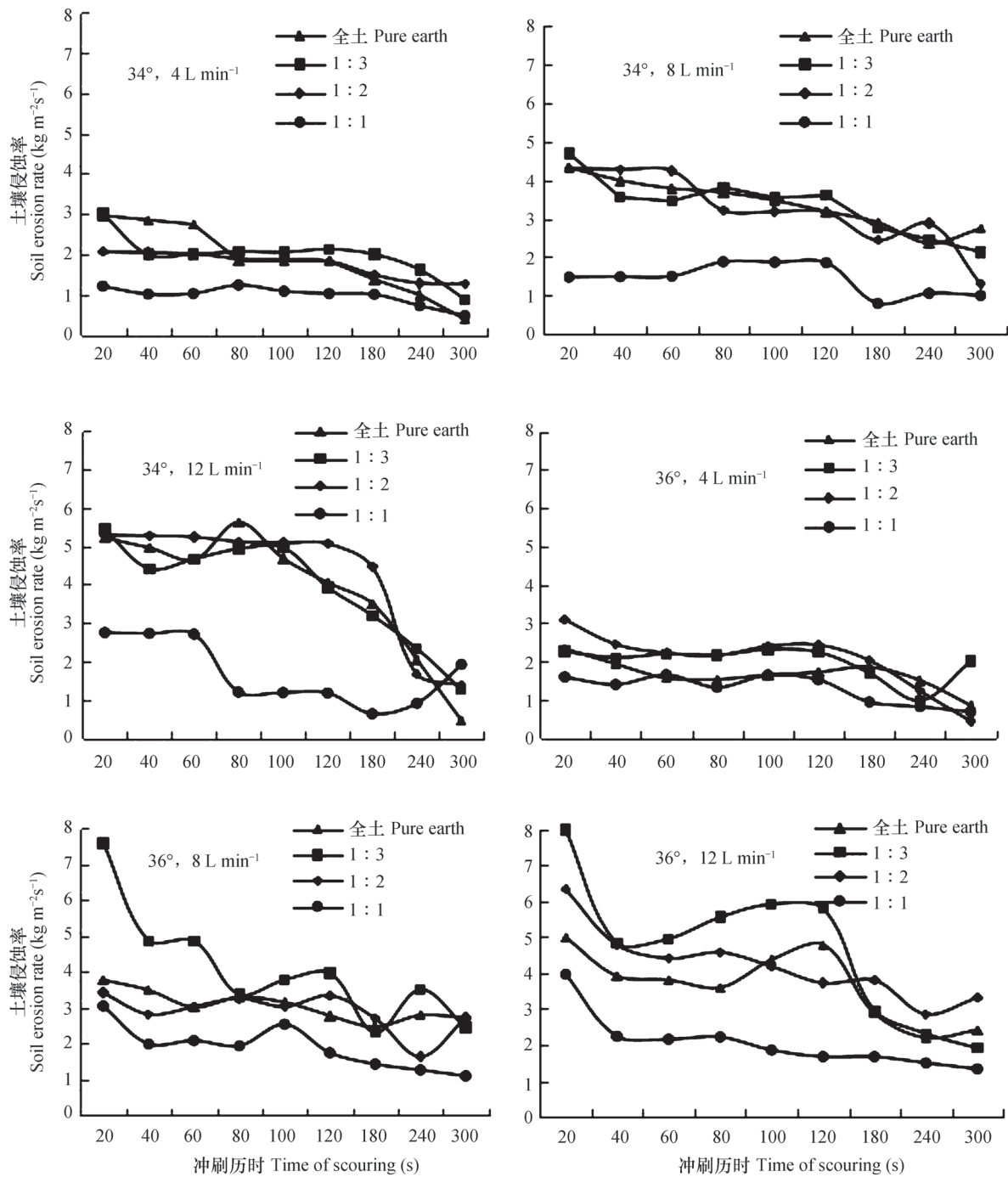


图2 土壤侵蚀率随冲刷历时的变化

Fig. 2 Variation of soil erosion with the scouring experiment going on

比条件下出现，这可能是由于在本试验条件下，石土比1：1的混合体结构较其他结构抗蚀性和抗冲性更强。

2.2 水流剪切力变化特征及其与土壤侵蚀率的关系

由图3可知，堆积体土石混合坡面水流剪切力随冲刷历时呈先增加后减小的趋势，其转折点在240 s左右。坡面侵蚀沟水流剪切力取决于水力

半径和坡度，水力半径的变化又决定于水深。在冲刷过程中坡面逐渐形成侵蚀细沟，细沟在水流作用下不断加深，因此水深增加，水流剪切力增大^[28]，而当冲刷进行一段时间后，侵蚀沟已较深，其后逐渐下切至天然层，即未过筛的土石混合层，侵蚀介质发生变化，水流剪切力减小。全土以及石土比分别为1：3、1：2和1：1条件下，水

流剪切力分别为：19.57 ~ 56.53、26.73 ~ 57.90、13.85 ~ 48.81和8.76 ~ 56.69 kg m⁻¹s⁻²，其平均值分别为33.81、41.23、33.73和32.98 kg m⁻¹s⁻²，水流剪切力大小顺序为：1 : 3 > 全土 > 1 : 2 > 1 : 1，这表明石土比 1 : 3 可能为临界石土比例，石土比大于该比例时，水流剪切力随碎石含量的增加而减小，小于该比例时，水流剪切力随碎石含量的增加而增加。

总体上，相同坡度，全土及石土比 1 : 3、1 : 1 条件下的水流剪切力随流量的增加而增大，这说明

流量是水流剪切力的影响因素。王龙生等^[29]通过人工模拟降雨得出流量是水流剪切力的影响因素，陆绍娟等^[28]在细沟侵蚀研究中得出水流剪切力随降雨强度增大而增大。

相关研究表明，水流剪切力是影响土壤剥蚀率的主要水蚀动力因子^[30]。利用本试验实测数据对土壤侵蚀率与水流剪切力进行函数拟合，得到二者的关系式为：

$$E=0.024 7\tau^{1.300 5} \quad R^2=0.3582 \quad (6)$$

经回归检验，Sig=0.02 < 0.05，表明在本研究

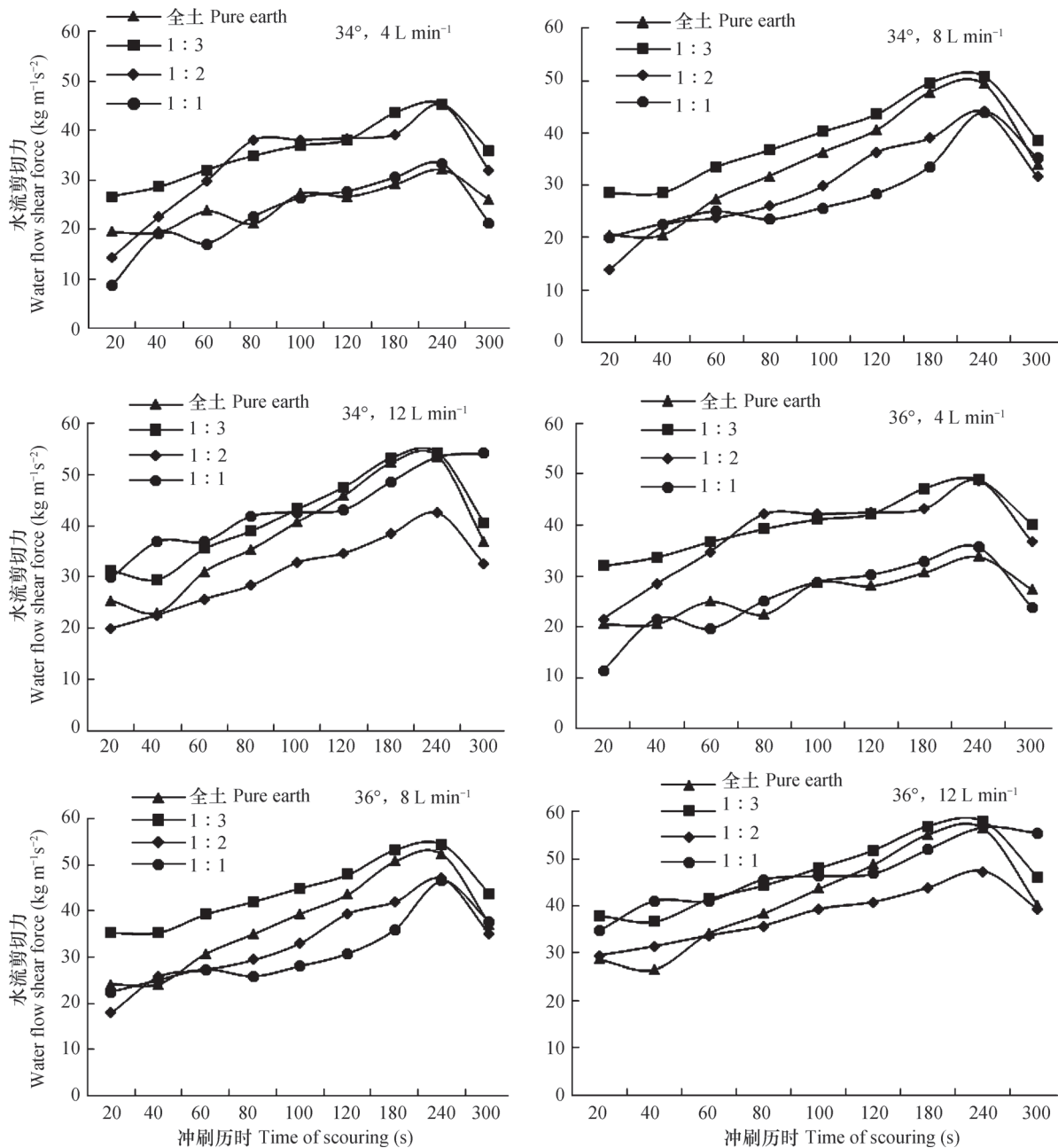


图3 水流剪切力随冲刷历时的变化特征

Fig. 3 Variation of hydraulic shear stress with the scouring experiment going on

中，土壤侵蚀率与水流剪切力的拟合公式在0.05水平上呈显著的幂函数正相关关系，这与王瑄等^[20]在黄土区室内模拟冲刷所得研究结果相同，不同于陆绍娟等^[28]在室内模拟降雨得出二者呈线性正相关的结论，也不同于丁文峰^[31]在紫色土和红壤耕作土壤坡面模拟冲刷得出二者呈线性相关的结论，这可能是由于各试验针对的研究对象不同，在试验设计上存在差异且径流在各试验条件下的形态不同造成的。

2.3 水流功率特征及其与土壤侵蚀率的关系

由表2可知，堆积体土石混合坡面水流功率随冲刷历时大体呈波动性减小趋势，这可能是由于随着径流携带泥沙量的增加，用于输沙的能量增加，而相应分离土壤的能量减小造成的^[32]。全土以及石土比分别为1:3、1:2和1:1条件下，水流功

率分别为：8.52~24.1、3.61~74.43、5.12~22.38和3.34~27.54 kg s⁻³，其平均值分别为：16.56、16.86、11.34和11.87 kg s⁻³，水流功率大小顺序为：1:3>全土>1:1>1:2。相同石土比及34°条件下，水流功率随流量的增加而增大，36°时，仅石土比1:3条件下呈现此规律。这可能是由于坡度临近休止角，对水流功率产生了一定不稳定因素。

利用本试验实测数据对土壤侵蚀率与水流功率进行函数拟合，得到二者关系式为：

$$E=0.5234\omega^{0.6039} \quad R^2=0.2414 \quad (7)$$

经回归检验，Sig=0.015<0.05，这表明水流功率与土壤侵蚀率的拟合公式在0.05水平下呈显著的幂函数正相关，与王瑄等^[27]在9°~24°坡度上所得二者之间呈极显著线性正相关的结论不同，这可

表2 水流功率随冲刷历时的变化特征

Table 2 Variation of water flow power with the scouring experiment going on (kg s⁻³)

坡度 Gradient (°)	流量Flow rate (L min ⁻¹)	石土比例 Rock/Soil ratio	冲刷历时Time of scouring (s)								
			20	40	60	80	100	120	180	240	300
34	4	全土Pure earth	17.07	12.88	14.83	11.33	21.30	14.96	15.82	15.14	9.59
		1:3	7.30	10.07	9.03	9.97	7.30	7.91	9.20	7.99	9.00
		1:2	5.12	8.26	9.49	19.48	-	22.38	18.04	20.48	5.91
		1:1	3.34	8.65	7.80	11.24	4.40	3.22	8.69	5.82	-
	8	全土Pure earth	20.64	12.39	18.05	14.70	15.08	21.59	21.37	16.96	11.83
		1:3	13.84	14.34	13.24	12.36	10.52	11.97	10.58	8.34	4.64
		1:2	7.53	12.25	5.45	5.40	5.88	9.98	9.37	13.09	10.69
		1:1	12.09	11.44	7.67	5.94	8.51	7.55	-	-	-
	12	全土Pure earth	21.36	15.48	14.32	15.52	16.46	18.46	23.28	21.29	15.28
		1:3	9.25	9.69	10.26	11.11	9.43	10.46	12.66	13.21	3.61
		1:2	13.38	9.24	14.10	15.31	10.81	8.51	12.90	7.65	9.17
		1:1	15.40	15.19	17.74	8.85	12.26	-	-	-	-
36	4	全土Pure earth	19.72	19.71	17.54	13.69	13.22	11.19	13.93	12.97	13.67
		1:3	16.72	13.50	14.00	18.02	13.99	19.13	16.05	15.31	11.78
		1:2	5.57	10.96	11.90	13.50	12.90	12.36	10.09	9.22	8.33
		1:1	6.07	11.76	9.99	12.00	16.28	11.67	13.23	6.17	6.73
	8	全土Pure earth	19.21	17.13	18.88	10.54	12.09	17.29	12.77	20.89	17.69
		1:3	33.34	16.51	17.12	18.29	16.20	19.73	20.18	20.80	12.45
		1:2	8.47	18.73	14.40	8.80	10.66	13.75	12.08	5.13	11.09
		1:1	11.31	14.11	11.97	12.22	11.16	10.47	11.20	9.50	9.80
	12	全土Pure earth	24.10	14.80	16.89	14.69	32.15	17.04	20.25	8.52	-
		1:3	52.06	19.67	28.06	43.04	40.06	74.43	27.30	26.00	19.25
		1:2	14.14	11.47	8.47	14.64	14.10	13.28	14.48	14.36	8.47
		1:1	18.87	18.37	14.49	21.98	18.08	15.76	15.60	23.85	27.54

注：表中“-”表示缺失值，下同 Note: the “-” means the missing values in the table, the same below

能与本试验所设置的试验坡度较大有关,也间接反映出水流功率在临近休止角的条件下会受到不稳定因素的影响。

2.4 单位水流功率特征及其与土壤侵蚀率的关系

由表3可知,堆积体土石混合坡面单位水流功率随冲刷历时呈波动性减小的趋势。在一定坡度下,单位水流功率只与流速呈正相关,水流冲刷过程中会产生入渗,在受到土壤与碎石阻碍的同时将其携带,这就导致了水流流速的减小;与此同时,放水冲刷中会形成侵蚀沟,坡度在此过程中会有一些的变化。因此单位水流功率表现出波动性减小的趋势。全土、石土比1:3、1:2、1:1条件下,单位水流功率分别为:0.08~0.56、0.04~0.8、0.06~0.33和0.06~0.34 m s^{-1} ,其平均值分别为:0.30、0.23、0.20和0.22 m s^{-1} ,单位水流功率大小

顺序为:全土>1:3>1:1>1:2。34°及全土条件下,单位水流功率随流量的增加而增大,而其他石土比条件下,单位水流功率随流量的增加变化大小不一。

王瑄等^[27]在坡度9°~24°,5种不同流量条件下进行室内冲刷全土(<1 mm)试验,得出土壤侵蚀率与单位水流功率呈显著相关关系,张乐涛等^[13]在工程堆积体细沟侵蚀的研究中得出二者呈显著的幂函数关系,丁文峰^[31]在紫色土和红壤坡面模拟冲刷研究中得出二者呈显著的线性正相关关系,而利用本试验实测数据对土壤侵蚀率与单位水流功率进行回归分析,结果显示二者关系不显著,这表明在本试验条件下,土壤侵蚀率与单位水流功率的关系并不密切,单位水流功率不适于描述堆积体坡面土壤侵蚀率的变化。

表3 单位水流功率随冲刷历时的变化特征

Table 3 Variation of specific water flow power with the scouring experiment going on (m s^{-1})

坡度 Gradient (°)	流量 Flow rate (L min^{-1})	石土比例 Rock/Soil ratio	冲刷历时Time of scouring (s)								
			20	40	60	80	100	120	180	240	300
34	4	全土Pure earth	0.49	0.37	0.35	0.30	0.43	0.31	0.30	0.26	0.21
		1:3	0.15	0.20	0.16	0.16	0.11	0.12	0.12	0.10	0.13
		1:2	0.20	0.20	0.18	0.29	-	0.33	0.26	0.26	0.11
		1:1	0.21	0.25	0.25	0.28	0.09	0.07	0.16	0.10	-
	8	全土Pure earth	0.56	0.34	0.37	0.26	0.23	0.30	0.25	0.19	0.19
		1:3	0.27	0.28	0.22	0.19	0.15	0.15	0.12	0.09	0.07
		1:2	0.30	0.31	0.13	0.12	0.11	0.15	0.13	0.17	0.15
		1:1	0.34	0.28	0.17	0.14	0.19	0.15	-	-	-
	12	全土Pure earth	0.47	0.38	0.26	0.25	0.23	0.22	0.25	0.22	0.18
		1:3	0.17	0.18	0.16	0.16	0.12	0.12	0.13	0.14	0.04
		1:2	0.37	0.23	0.31	0.30	0.18	0.14	0.19	0.10	0.15
		1:1	0.29	0.23	0.27	0.12	0.16	-	-	-	-
36	4	全土Pure earth	0.56	0.56	0.41	0.36	0.27	0.23	0.27	0.22	0.29
		1:3	0.31	0.24	0.22	0.27	0.20	0.27	0.20	0.18	0.17
		1:2	0.15	0.23	0.20	0.19	0.18	0.17	0.14	0.11	0.10
		1:1	0.31	0.32	0.30	0.28	0.33	0.23	0.24	0.10	0.17
	8	全土Pure earth	0.47	0.42	0.36	0.18	0.18	0.23	0.15	0.23	0.30
		1:3	0.56	0.28	0.26	0.26	0.21	0.24	0.22	0.22	0.16
		1:2	0.28	0.43	0.31	0.18	0.19	0.20	0.17	0.06	0.17
		1:1	0.30	0.33	0.26	0.28	0.23	0.20	0.19	0.12	0.14
	12	全土Pure earth	0.49	0.33	0.29	0.22	0.43	0.21	0.21	0.09	-
		1:3	0.80	0.31	0.40	0.57	0.49	0.84	0.28	0.26	0.24
		1:2	0.28	0.21	0.15	0.24	0.21	0.19	0.19	0.18	0.12
		1:1	0.32	0.26	0.21	0.28	0.23	0.20	0.18	0.25	0.28

2.5 过水断面单位能量特征及其与土壤侵蚀率的关系

由图4可知，堆积体坡面过水断面单位能量随冲刷历时呈先减后增再减小的趋势。全土、石土比1:3、1:2和1:1条件下，过水断面单位能量大小分别为：0.015~0.058、0.011~0.068、0.009~0.034和0.006~0.056 m，平均值分别为：0.031、0.029、0.020和0.021 m，过水断面单位能

量大小顺序为：全土 > 1:3 > 1:1 > 1:2。相同坡度及石土比条件下，过水断面单位能量随流量的增加而增大，这表明流量是过水断面单位能量的重要影响因素。

一般而言，过水断面单位能量越大，水流能量越大，侵蚀能力越强^[34]。利用本试验实测数据对土壤侵蚀率与过水断面单位能量进行函数拟合，二者之间的关系式为：

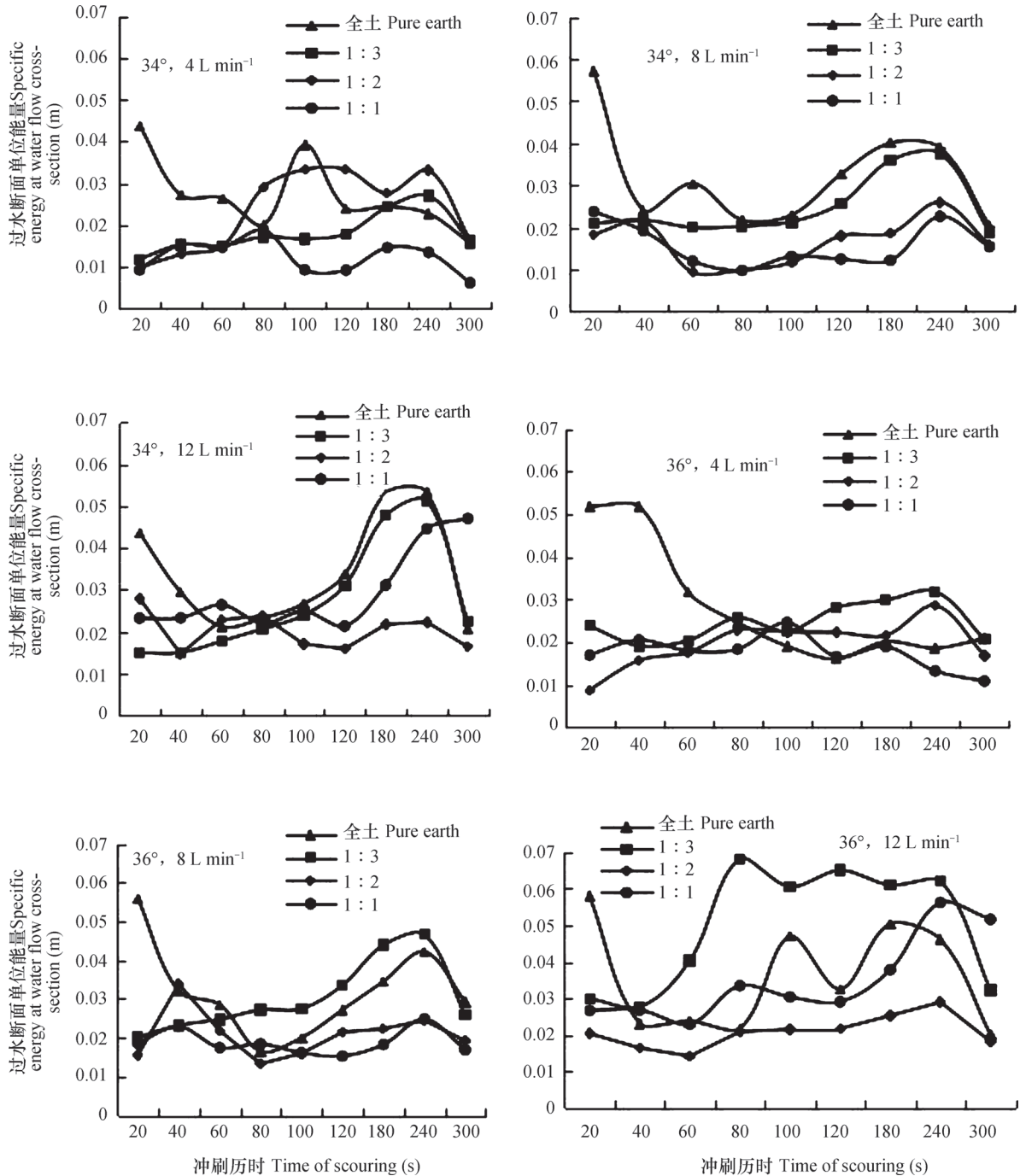


图4 过水断面单位能量随冲刷历时的变化特征

Fig. 4 Change characteristics of unit energy of water-carrying section with the scouring time delaying

$$E=41.93\epsilon^{0.7599} \quad R^2=0.3069 \quad (8)$$

经回归检验, Sig=0.05, 表明在本试验条件下, 土壤侵蚀率与过水断面单位能量的拟合公式在0.05水平下呈显著的幂函数正相关关系。丁文峰^[31]在紫色土和红壤农耕地条件下得出二者呈线性正相关, 张乐涛等^[13]在工程堆积体细沟侵蚀研究中得到与其相同的试验结论。

3 结 论

本试验在34°和36°两级坡度, 4、8和12 L min⁻¹三级流量, 全土以及石土质量比1:3、1:2和1:1条件下进行了室内放水冲刷模拟研究, 得出以下结论: 随着冲刷时间的推延, 土壤侵蚀率逐渐减小, 水流剪切力先增加后减小, 转折点在240 s左右, 水流功率和单位水流功率波动性减小, 过水断面单位能量先减后增再减小。不同石土比坡面土壤侵蚀率大小顺序为: 1:3、1:2、全土、1:1; 水流剪切力大小顺序为: 1:3、全土、1:2、1:1; 水流功率大小顺序为: 1:3、全土、1:1、1:2; 单位水流功率及过水断面单位能量大小顺序均为: 全土、1:3、1:1、1:2。相同坡度条件下, 全土、石土比1:3、1:1的土壤侵蚀率、水流剪切力、水流功率和过水断面单位能量基本随流量的增加而增大, 石土比1:2的土壤侵蚀率随流量的增加而增大, 水流剪切力、水流功率和过水断面单位能量随流量的增加规律性均不稳定。单位水流功率随流量增加的变化较为复杂。经回归分析表明, 堆积体坡面土壤侵蚀率与水流剪切力呈极显著幂函数正相关关系, 关系式为 $E=0.0247\tau^{1.3005}$ ($R^2=0.3582$), 与水流功率和过水断面单位能量均呈显著的幂函数正相关关系, 关系式分别为 $E=0.5234\omega^{0.6039}$ ($R^2=0.2414$), $E=41.93\epsilon^{0.7599}$ ($R^2=0.3069$), 与单位水流功率关系不显著。在本试验条件下, 水流剪切力、水流功率和过水断面单位能量均能较好地预测土壤侵蚀率, 而单位水流功率不适于描述土壤侵蚀率。

参 考 文 献

[1] 许冲, 戴福初, 姚鑫. 汶川地震诱发滑坡灾害的数量与面积. 科技导报, 2009, 27(11): 79—81
Xu C, Dai F C, Yao X. Incidence number and affected area of Wenchuan earthquake-induced landslides (In

Chinese). Science and Technology Review, 2009, 27(11): 79—81

[2] 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 soil containing different rock fragment contents (In Chinese). Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22(2): 64—67

[3] Lyle W M, Smerdon E T. Relation of compaction and other soil properties to erosion resistance of soils. Transactions of ASAE, 1965, 8(3): 419—422

[4] Bagnold R. An approach to the sediment transport problem from general physics. Government Geological Survey, Professional Paper 1966, 442—1

[5] Elliot W J, Laflen J M. A process-based rill erosion model. Transactions of ASAE, 1993, 36(1): 65—72

[6] Nearing M A, Simanton J R, Norton L D, et al. Soil erosion by surface water flow on a stony, semiarid hillslope. Earth Surface Process Landforms, 1999, 24: 677—686

[7] Yang C T, Song C C S. Theory of minimum rate of energy dissipation. Journal of the Hydraulics Division, 1979, 105(7): 769—784

[8] Govers G. Empirical relationships for the transport capacity of overland flow. LAHS Publication, 1990, 189: 45—63

[9] 张科利, 唐克丽. 黄土坡面细沟侵蚀能力的水动力学试验研究. 土壤学报, 2000, 37(1): 9—15
Zhang K L, Tang K L. A study on hydraulic characteristics of flow for prediction of rill detachment capacity on loess slope (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2000, 37(1): 9—15

[10] Zhang G H, Liu B Y, Nearing M A, et al. Soil detachment by shallow flow. Transactions of the ASAE, 2002, 45(2): 351—357

[11] 张新和. 黄土坡面片蚀—细沟侵蚀—切沟侵蚀演变与侵蚀产沙过程研究. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007: 114—128
Zhang X H. Experimental study on evolution process of sheet erosion-rill erosion-gully (In Chinese). Yangling: Northwest A&F University, 2007: 114—128

[12] 张冠华. 茵陈蒿群落分布格局对坡面侵蚀及坡面流体力学特性的影响. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012: 80—85
Zhuang G H. Influence of patterned *Artemisia Capillaris* slope erosion and overland flow hydrodynamic characteristics (In Chinese). Yangling: Northwest A & F University, 2012: 80—85

- [13] 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. 农业工程学报, 2013, 29 (24) : 94—102
Zhang L T, Gao Z L, Tian H W. Hydrodynamic process of soil erosion in steep slope of engineering accumulation (In Chinese) . Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29 (24) : 94—102
- [14] 李宏伟, 牛俊文, 宋立旺, 等. 工程堆积体水动力学参数及其产沙效应. 水土保持学报, 2013, 27 (5) : 63—67
Li H W, Niu J W, Song L W, et al. Study on characteristic of hydrodynamic parameters and its sediment yield for engineering accumulation (In Chinese) . Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27 (5) : 63—67
- [15] 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 undersimulated runoff conditions (In Chinese) . Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29 (8) : 145—153
- [16] 庄建琦, 崔鹏, 葛永刚, 等. 5.12汶川地震崩塌滑坡分布特征及影响因子评价: 以都江堰至汶川公路沿线为例. 地质科技情报, 2009, 28 (2) : 16—21
Zhuang J Q, Cui P, Ge Y G, et al. Distribution characteristics and impact factors assessment of collapses and landslides caused by 5.12 Wenchuan earthquake: Taking Dujiangyan-Wenchuan highway as a sample (In Chinese) . Geological Science and Technology Information, 2009, 28 (2) : 16—21
- [17] 陈展鹏, 雷廷武, 晏清洪, 等. 汶川震区滑坡堆积体体积三维激光扫描仪测量与计算方法. 农业工程学报, 2013, 29 (8) : 135—144
Chen Z P, Lei T W, Yan Q H, et al. Measuring and calculation methods for landslide volume with 3-D laser scanner in Wenchuan earthquake area (In Chinese) . Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29 (8) : 135—144
- [18] Abrahams A D, Parsons A J, Luk S H. Resistance to overland flow on desert hill slopes. Journal of Hydrology 1986, 88: 343—363
- [19] 雷廷武, 张晴雯, 闫丽娟, 等. 细沟侵蚀物理模型. 北京: 科学出版社, 2009
Lei T W, Zhang Q W, Yan L J, et al. Physical model of rill erosion (In Chinese) . Beijing: Science Press, 2009
- [20] 王瑄, 李占斌, 尚佰晓, 等. 坡面土壤剥蚀率与水蚀因子关系室内模拟试验. 农业工程学报, 2008, 24 (9) : 22—26
Wang X, Li Z B, Shang B X, et al. Indoor simulation experiment of the relationship between soil detachment rate and water erosion factor (In Chinese) . Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24 (9) : 22—26
- [21] 王瑄, 李占斌, 郑良勇. 土壤剥蚀率与水流剪切力关系室内模拟试验. 沈阳农业大学学报, 2007, 38 (4) : 577—580
Wang X, Li Z B, Zheng L Y. An indoor simulation experiment of the relationship between soil detachment rate and shear stress (In Chinese) . Journal of Shenyang Agricultural University, 2007, 38 (4) : 577—580
- [22] Foster G R, Huggins L F, Meyer L D. A laboratory study of rill hydraulics, II. Shear stress relationships. Transactions of the ASAE, 1984, 27 (3) : 797—804
- [23] 李占斌, 鲁克新, 丁文峰. 黄土坡面土壤侵蚀动力过程实验研究. 水土保持学报, 2002, 16 (2) : 5—7, 49
Li Z B, Lu K X, Ding W F. Experimental study on dynamic processes of soil erosion on loess slope (In Chinese) . Journal of Soil and Water Conservation, 2002, 16 (2) : 5—7, 49
- [24] Poesen J, De Luna E, Franca A, et al. Concentrated flow erosion rates as affected by rock fragment cover and initial soil moisture content. Catena, 1999, 36: 315—329
- [25] Poesen J, Lavee H. Rock fragments in topsoil: significance and processes. Catena, 1994, 23: 1—28
- [26] van Wesemael B, Poesen J, de Figueiredo T. Effects of rock fragments on physical degradation of cultivated soils by rainfall. Soil and Till Research, 1995, 33: 229—250
- [27] 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. 农业工程学报, 2006, 22 (2) : 185—187
Wang X, Li Z B, Li W, et al. Indoor simulation experiment of the relationship between soil detachment rate and stream power (In Chinese) . Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2006, 22 (2) : 185—187
- [28] 陆绍娟, 王占礼, 谭贞学. 黄土坡面细沟水流剪切力及其侵蚀效应研究. 水土保持通报, 2013, 33 (6) : 46—50
Lu S J, Wang Z L, Tan Z X. Shear stress of rill flow and surface erosion effect on loess hillslope (In Chinese) . Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013, 33 (6) : 46—50
- [29] 王龙生, 蔡强国, 蔡崇法, 等. 黄土坡面发育平稳的细

- 沟流水动力学特性. 地理科学进展, 2014, 33 (8): 1117—1124
- Wang L S, Cai Q G, Cai C F, et al. Hydrodynamic characteristics of stable growth-rill flow on loess slopes (In Chinese). *Progress in Geography*, 2014, 33 (8): 1117—1124
- [30] 王瑄, 李占斌, 鲁克新, 等. 坡面水蚀动力因子与土壤剥蚀率灰色关联分析. *水利学报*, 2005, 36 (5): 525—530
- Wang X, Li Z B, Lu K X, et al. Grey correlation analysis on relationship between soil detachment rate and hydrodynamic erosion factors (In Chinese). *Journal of Hydraulic Engineering*, 2005, 36 (5): 525—530
- [31] 丁文峰. 紫色土和红壤坡面径流分离速度与水动力学参数关系研究. *泥沙研究*, 2010, 12 (6): 16—22
- Ding W F. Relationships between soil detachment rate and runoff hydrodynamic indexes of purple soil slope and red soil slope (In Chinese). *Journal of Sediment Research*, 2010, 12 (6): 16—22
- [32] Moore I D, Burch G J. Sediment transport capacity of sheet and rill flow: Application of unit stream power theory. *Water Resources Research*, 1986, 22: 1350—1360.
- [33] 何小武, 张光辉, 刘宝元. 坡面薄层水流的土壤分离试验研究. *农业工程学报*, 2003, 19 (6): 52—55
- He X W, Zhang G H, Liu B Y. Soil detachment by shallowflow on slopes (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2003, 19 (6): 52—55
- [34] 张强, 郑世清, 田凤霞, 等. 黄土区土质道路人工降雨及放水试验条件下产流产沙特征. *农业工程学报*, 2010, 26 (5): 83—87
- Zhang Q, Zheng S Q, Tian F X, et al. Runoff and sediment yield characteristics of earth road under artificial rainfall and simulated overland flow tests conditions in Loess Plateau (In Chinese). *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26 (5): 83—87

Research on Soil Erosion Rate and Hydrodynamic Parameters of Landslide Accumulation Slope in Wenchuan Earthquake Area

WANG Renxin¹ HE Binghui^{1†} LI Tianyang² CHEN Zhanpeng¹ ZHANG Jinsong³

(1 College of Resources and Environment, Southwest University, Key Laboratory of Eco-environments in Three Gorges Reservoir Region, Chongqing 400715, China)

(2 College of Water Resources and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

(3 College of Civil Engineering & Architecture, Southwest University of Science & Technology, Mianyang, Sichuan 621010, China)

Abstract Landslide accumulations in the earthquake area of Wenchuan are formed typically of mixtures of rock fragments and soil, loose in structure. Drastic rill or gully erosion tends to occur with rainfall runoff, thus leading to grave soil and water loss. Therefore it is of great importance to launch a study on rules of water and sediment transport with runoff on landslide accumulation slopes. Based on field investigation, an indoor scouring experiment, designed to have 4 treatments in rock fragment and soil ratio (0 : 1, 1 : 3, 1 : 2 and 1 : 1), 3 treatments in water flow rate (4, 8 and 12 L min⁻¹) and 2 treatments in nearest dwell angle (34° and 36°) was carried out to study variations of soil erosion rate and hydrodynamic parameters and their relationships on landslide accumulation slopes in the Wenchuan earthquake area. Results show that with the scouring experiment going on, the soil erosion rate, flowing power and specific flowing power gradually decreased, while water flow shear force increased at first then decreased, and specific energy at water flow cross-section decreased at first, then increased and decreased at last. On slopes, 0 : 1, 1 : 3 and 1 : 1 in rock/soil ratio, soil erosion rate, water flow shear force, flowing power, and specific energy at water flow cross-section, increased with increasing water flow rate, but on slopes, 1 : 2 in rock/soil ratio, only soil erosion rate increased with increasing water flow rate and the other indices varied irregularly. In this study, the effects of water flow shear force, flowing power and specific energy at water flow cross-section on soil

erosion rate could all be described with power function equations, and the effect of specific flowing power was not so obvious. All the findings in this study may help lay down a foundation for establishment of a model for predicting soil erosion on landslide accumulation slopes in the earthquake areas of Wenchuan.

Key words Wenchuan earthquake; Earth-rock mixture; Soil erosion rate; Hydrodynamic parameters

(责任编辑: 汪枫生)

CONTENTS

Reviews and Comments

- Mechanism of Extracellular Electron Transfer among Microbe-Humic-Mineral in Soils: A Review WU Yundang, LI Fangbai, LIU Tongxu (290)
 Effects of Long-term Fertilization on Key Processes of Soil Nitrogen Cycling in Agricultural Soil: A Review WANG Jing, CHENG Yi, CAI Zucong, et al. (303)

Insights and Perspectives

- Soil-borne Pathogens Should not Be Ignored by Soil Science CAI Zucong, HUANG Xinqi (310)

Research Articles

- Element Migration in S₃ Profile of the Shaolingyuan Loess-Paleosol Sequence in Xi'an and Its Paleoclimatic Implication CHU Chunjie, ZHAO Jingbo (320)
 Estimation of Soil Salt Content over Partially Vegetated Areas Based on Blind Source Separation LIU Ya, PAN Xianzhang, SHI Rongjie, et al. (330)
 Construction of Calibration Set based on the Land Use Types in Visible and Near-Infrared (VIS-NIR) Model for Soil Organic Matter Estimation LIU Yanfang, LU Yannian, GUO Long, et al. (340)
 Prediction of Soil Organic Matter based on Multi-resolution Remote Sensing Data and Random Forest Algorithm WANG Yinyin, QI Yanbing, CHEN Yang, et al. (353)
 Characteristic Curves and Model Analysis of Soil Moisture in Collapse Mound Profiles in Southeast Hubei DENG Yusong, DING Shuwen, CAI Chongfa, et al. (363)
 Research on Sediment and Solute Transport on Red Soil Slope under Simultaneous Influence of Scouring Flow MA Meijing, WANG Junguang, GUO Zhonglu, et al. (373)
 Research on Soil Erosion Rate and Hydrodynamic Parameters of Landslide Accumulation Slope in Wenchuan Earthquake Area WANG Renxin, HE Binghui, LI Tianyang, et al. (386)
 Effects of Saline Ice Water Irrigation on Distribution of Moisture and Salt Content in Coastal Saline Soil ZHANG Yue, YANG Jingsong, YAO Rongjiang (399)
 Soil Temperature Regime in Guizhou Province Relative to Assessment Method LU Xiaohui, DONG Yubo, TU Chenglong (409)
 Characteristics of Variation of Soil Temperature in Shrub Meadow Area of Lhasa GONG Yuling, WANG Zhaofeng, ZHANG Yili, et al. (419)
 Soil Water Repellency of Sands and Clay as Affected by Particle Size YANG Song, WU Junhua, DONG Hongyan, et al. (426)
 Effect of AQDS Accelerating Anaerobic Dechlorination of DDT in Hydragric Acrisols LIU Cuiying, WANG Zhuang, XU Xianghua, et al. (436)
 Effect of Straw Returning via Deep Burial Coupled with Application of Fertilizer as Primer on Soil Nutrients and Winter Wheat Yield ZHAO Jinhua, ZHANG Congzhi, ZHANG Jiabao (448)
 Effects of Ozone Pollution on Different Active Organic Carbon Stocks in Wheat Farmland Soil KOU Taiji, CHENG Xianghan, ZHANG Dongliang, et al. (455)
 Soil Organic Nitrogen Components and Their Contributions to Mineralizable Nitrogen in Paddy Soil of the Black Soil Region CONG Yaohui, ZHANG Yuling, ZHANG Yulong, et al. (466)
 Effects of Soil and Water Conservation Measures on Soil Labile Organic Carbon and Soil Enzyme Activity in Gentle Slope Land of Red Soil HUANG Shangshu, CHENG Yanhong, ZHONG Yijun, et al. (475)
 Ecological Stoichiometric Characteristics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus in Leaf-Litter-Soil System of *Picea Crassifolia* Forest in the Qilian Mountains ZHAO Weijun, LIU Xiande, JIN Ming, et al. (488)
 The Application of Biomarker Genes for DNA/RNA-Stable Isotope Probing of Active Methanotrophs Responsible for Aerobic Methane Oxidation in Six Paddy Soils ZHENG Yan, JIA Zhongjun (500)
 Screening of Phosphate-solubilizing Bacteria Adaptable to Corn and Effects of the Bacteria on the Growth of Corn MEI Xinlan, SHAN Anqi, JIANG Yi, et al. (508)
 Response of Soil Nematode Community to Cultivation in Upland Red Soil Relative to Cultivation History and Its Significance as Indicator WANG Mingwei, LIU Yudi, CHEN Xiaoyun, et al. (521)
 Nutrient Absorption and Nutrient Balance in an Agro-pastoral Compound Production Pattern of "Raising Geese in Corn Fields" in Tibet SHA Zhipeng, ZHANG Yuyang, WANG Chao, et al. (531)
 Effects of Continuous Cropping of Processing Tomato on Physical-chemical Properties of and Microbial Biomass in the Soil KANG Yalong, JING Feng, SUN Wenqing, et al. (542)

Research Notes

- Mechanism of CTMAB Modifying BS-12 Modified Bentonite YU Lu, MENG Zhaofu, LI Wenbin, et al. (550)
 Effects of Mechanical Soil Amelioration Method on Physical Properties of and Enzyme Activity in Planosol MENG Qingying, ZHANG Chunfeng, JIA Huibin, et al. (559)

Cover Picture: Microbial Extracellular Electron Transfer: Energy Transfer and Substance Transformation (by WU Yundang, LI Fangbai, LIU Tongxu)

《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: 卢 萍 檀满枝 陈荣府

土 壤 学 报

Turang Xuebao

(双月刊, 1948年创刊)

第 53 卷 第 2 期 2016 年 3 月

ACTA PEDOLOGICA SINICA

(Bimonthly, Started in 1948)

Vol. 53 No. 2 Mar., 2016

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Oversea distributed by China International Book Trading Corporation
Add: P. O. Box 399, Beijing 100044, China

国内统一连续出版物号: 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

