

不同工程堆积体坡面治理措施对土壤抗冲刷侵蚀能力的影响

牛耀彬¹, 高照良^{1,2*}, 齐星圆¹, 李玉婷婷¹, 李永红^{1,2}

(1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100)

摘要: 为量化不同区域堆积体坡面水流分离土壤能力, 评价植被恢复模式、恢复年限和削坡分级治理对堆积体土壤抗冲刷侵蚀的调控作用。选取秦巴山区、关中平原、黄土丘陵沟壑区(陕西省境内)高速公路不同工程堆积体, 通过在堆积体坡面原位采集土壤样品, 室内水槽冲刷试验进行系统研究土壤分离能力大小。结果表明, 秦巴山区、关中平原、黄土丘陵沟壑区典型堆积体土壤分离能力变化范围分别为 0.034~1.659、0.311~0.816、0.346~1.042 kg/(m²·s)。相比冰草, 堆积体坡面自然恢复植被为小冠花可以显著降低土壤分离能力, 其降低幅度高达 94.97%。相比未复垦, 在石渣土堆积体坡面短期人为复垦种植玉米和黄豆对土壤分离能力均无显著调控效益。相比恢复 1 a, 恢复 2 a 未能显著降低堆积体土壤分离能力, 恢复 5 a 可以显著降低堆积体土壤分离能力, 其降低幅度为 57.35%, 相比耕地, 恢复 5 a 土壤分离能力降低 60.41%。黑垆土堆积体短坡长(<60 m)坡面土壤分离能力空间变异不显著。相比未治理坡面, 削坡分级治理可以显著降低堆积体坡面土壤分离能力, 治理后堆积体平台和坡面土壤分离能力显著降低 66.79%和 49.04%。根重密度、粘结力、含水量、中值粒径、黏粒含量与土壤分离能力之间存在极显著负相关关系, 可用指数函数关系表达, 并建立了基于根重密度和水流剪切力土壤分离能力预测模型。该研究不仅可为堆积体水土流失预测提供基础数据支撑, 也可为堆积体坡面治理措施配置提供指导。

关键词: 土壤; 侵蚀; 径流; 泥沙输移; 措施调控; 植被恢复; 工程堆积体

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.02.018

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-02-0134-10

牛耀彬, 高照良, 齐星圆, 李玉婷婷, 李永红. 不同工程堆积体坡面治理措施对土壤抗冲刷侵蚀能力的影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2): 134-143. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.02.018 http://www.tcsae.org

Niu Yaobin, Gao Zhaoliang, Qi Xingyuan, Li Yutingting, Li Yonghong. Effects of treatment measures on soil anti-scour erodibility in engineering accumulation slope[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(2): 134-143. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.02.018 http://www.tcsae.org

0 引言

工程堆积体已成为生产建设项目新增水土流失的主要来源之一^[1]。工程堆积体作为开发建设项目形成的人为堆积地貌, 具有独特性, 堆积体主要由平台和坡面构成, 其坡面坡度较陡, 在暴雨条件下堆积体坡面极易引发滑坡、崩塌、泥石流等严重的环境灾害^[2]。土壤侵蚀包括土壤分离、泥沙输移和沉积三大过程, 准确预报土壤分离过程是揭示土壤侵蚀机理、建立土壤侵蚀预报模型的前提条件^[3-4]。在径流冲刷作用下, 土壤颗粒或团聚体脱离土体, 离开原始位置的过程称为土壤分离过程^[5]。土壤分离是土壤侵蚀发生的初始阶段, 是泥沙产生的必然途径。土壤分离能力是指含沙量为零时坡面径流的最大分离速率, 它是确定细沟可蚀性和土壤临界剪切力的基础^[6-7]。因此, 深入研究堆积体土壤分离过程具有重要的实践和理论意义。

国内外学者围绕堆积体坡面土壤侵蚀开展了大量研究, 取得了丰硕研究成果, 主要包括堆积体基本特性概化、堆积体侵蚀过程描述^[8-9]、堆积体侵蚀过程影响因素评价^[10-11]、堆积体坡面细沟侵蚀量化^[12]、堆积体侵蚀水动力学参数选择^[13-15]。但是缺乏对土壤分离过程的单独研究。此外, 随着开发建设项目水土保持方案的编制, 工程堆积体后续治理被重视, 主要治理措施涉及工程拦挡^[16]、削坡分级、植被恢复和临时苦盖等, 但缺乏对措施实施以后防护效果的定量评价, 另外, 随着恢复年限的延长, 措施防治效果的变化过程不清楚。目前堆积体土壤侵蚀主要研究手段包括野外径流小区观测、室内人工模拟降雨试验, 由于径流小区修筑费用昂贵, 加上工程堆积体数量众多, 因此径流小区观测法定量评价措施实施以后的防护效果很难推广, 而室内人工模拟降雨试验下垫面条件与野外真实情况存在较大差异, 很难准确模拟。

鉴于此, 本文运用土壤分离理论^[17], 通过在堆积体坡面原位采集土壤样品, 室内水槽冲刷试验进行量化研究堆积体坡面土壤分离能力大小, 评价植被恢复模式、恢复年限、削坡分级治理对堆积体土壤抗冲刷侵蚀的调控作用。为堆积体坡面土壤侵蚀研究试验设计和方法选择提供技术支持。也为揭示堆积体土壤侵蚀机理, 建立堆积体土壤侵蚀预报模型提供理论基础。

收稿日期: 2018-05-02 修订日期: 2018-10-12

基金项目: 国家自然科学基金(41671283); 十三五国家重点研发计划(2016YFC0501706-02)

作者简介: 牛耀彬, 博士生, 主要从事工程建设区人为侵蚀过程研究。

Email: 15529021275@163.com

*通信作者: 高照良, 博士, 博士生导师, 主要研究方向为农业水土工程和荒漠化防治。Email: gzl@ms.iswc.ac.cn

1 材料与方法

1.1 研究区概况

陕西省境内含有陕北黄土高原、中部关中平原和陕南秦巴山区 3 个主要自然区构成，几乎涵盖了所有的基本地貌类型，可以作为地貌研究的典型区域^[18]。本研究对象分别位于秦巴山区汉中市、关中平原宝鸡市、黄土高原延安市。试验选择研究区内近 5 年高速公路建设形成的堆积体地貌，分别涉及宝鸡至汉中高速公路堆积体、西安至宝鸡高速公路堆积体、黄陵至延安延高速公路堆积体。

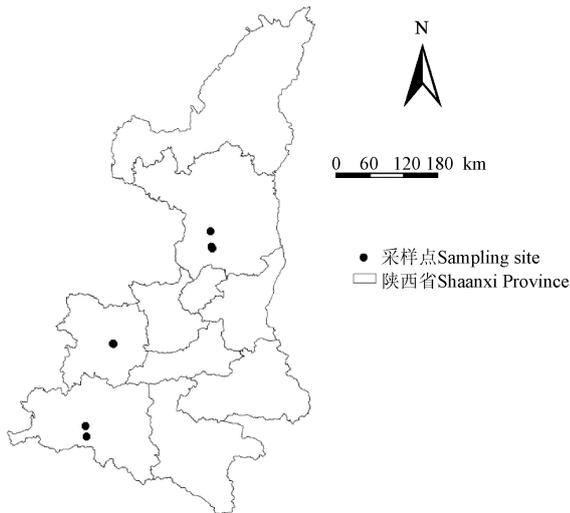


图 1 研究区示意图

Fig.1 Schematic diagram of experimental area

3 个区域基本情况如下：

宝鸡至汉中高速公路地处长江流域汉江水系，位于陕南秦巴山区。地处北亚热带湿润季风气候区，海拔 800~1350 m，多年平均降雨量 800~1500 mm。土壤类型有水稻土、黄棕壤、棕壤、黄泥土、山地石渣土、淤泥土等六大类。植物以典型的针叶和阔叶落叶为主；西安至宝鸡高速公路位于关中平原渭河走廊带，路线所经区域为关中盆地。塬面高程 540~880 m，地处暖温带半湿润大陆性季风气候区，多年平均降雨量为 545~

700 mm。土壤以垆土、褐土为主。植被属暖温带落叶、阔叶林植被类型；黄延至延安高速公路地处陕北黄土高原南部，属黄土丘陵沟壑区，地貌类型包括黄土残塬地貌、黄土梁峁沟壑地貌。属暖温带半湿润大陆性气候，多年平均降雨量 547~592 mm。土壤主要有黑垆土、黑塘土、黄塘土、黄绵土等类型。植被分区属暖温带落叶阔叶林及森林草原地带。

1.2 不同工程堆积体选择

2017 年 7 月 11 日—8 月 15 日对陕西省全境近 5 年公路建设项目形成的堆积体进行了全面、详细的调查。按地貌区域、植被恢复模式、构成要素进行分类调查。堆积体形成的原因众多，其中秦巴山区水稻土没有利用而变成了弃渣，是因为高速公路弃土数量巨大，相比原来耕地（水稻田）水平面抬高数米，导致原有灌溉渠系供水失效，无法进行耕作。而陕北黄绵土堆积体大多堆积在远离村庄的荒沟之中，加上交通不便，即使有路，短期内堆积体难以恢复到耕地水平，大多数没被利用。

调查发现，秦巴山区宝鸡至汉中高速公路堆积体边坡植被恢复模式主要有 2 种，自然恢复和人为复垦，其中，自然恢复主要植被有白三叶 (*Trifolium repens*)、小冠花 (*Coronilla varia*) 和冰草 (*Agropyron cristatum*)，而人工复垦主要种植玉米 (*Zea mays*) 和大豆 (*Glycine max.*)。关中平原西安至宝鸡高速公路堆积体边坡植被恢复模式基本一致，为人为种植侧柏 (*Platyclusus orientalis*)，伴生植被为蒿草 (*Artemisia argyi*)，但由于工程建设分段施工，形成了不同恢复年限的堆积体，主要有 5 a、2 a 和 1 a 堆积体。黄土高原黄陵至延安高速公路堆积体边坡植被恢复模式基本一致，为人为种植刺槐 (*Robinia pseudoacacia*)，伴生植被为蒿草，由于人为分级削坡整治，形成了以平台、坡面为构成要素的治理堆积体，另一种是未治理全坡面堆积体。因不同地貌区域公路建设项目数量不同，形成的堆积存在差异，综合野外采样交通便利情况，本研究选择不同工程堆积体采样点如下：秦巴山区 2 个采样点，关中平原 3 个采样点，黄土高原 3 个采样点，共布设 8 个采样点，采样点的地理位置、海拔、坡度、盖度等基本信息见表 1。

表 1 不同工程堆积体基本情况

Table 1 Basic information of different engineering accumulation

堆积体名称 Name of accumulation	地理位置 Position	土壤 Soil	恢复年限 Year	主要植被 Vegetation	盖度 Cover/%	纬度 Latitude/N	经度 Longitude/E	海拔 Elevation/m	坡度 Gradient/(°)	坡长 Length/m
宝汉高速南郑县星光村弃渣场	汉中	水稻土	5	小冠花、白三叶、冰草	80	33°02'38.84"	106°54'38.26"	521	37	8
宝汉高速红庙镇上二里山弃渣场	汉中	石渣土	5	黄豆、玉米	70	32°52'35.08"	106°55'48.68"	695	36	80
西宝高速唐家塬南沟弃渣场	宝鸡	黑垆土	1	侧柏、蒿草	10	34°19'52.37"	107°22'41.63"	595	35	30
西宝高速宝娘娘沟大桥弃渣场	宝鸡	黑垆土	2	侧柏、蒿草	50	34°19'46.74"	107°22'76.95"	597	36	30
西宝高速西沟弃渣场	宝鸡	黑垆土	5	侧柏、蒿草	60	34°19'59.57"	107°22'51.60"	596	38	60
黄延高速董家沟弃渣场	延安	黄绵土	4	刺槐、蒿草	50	35°50'01.74"	109°13'09.95"	1020	40	40
黄延高速葫芦河大桥弃渣场	延安	黄绵土	4	刺槐、蒿草	40	35°51'30.20"	109°12'03.11"	1120	36	40
黄延高速高富县西收费站弃渣场	延安	黄绵土	4	蒿草	40	36°05'58.30"	109°11'13.33"	1143	32	45

1.3 试验设计与观测

选取陕西省不同区域高速公路典型堆积体, 通过在堆积体坡面原位采集土壤样品, 系统研究秦巴山区、关中平原、黄土丘陵沟壑区不同工程堆积体在不同植被恢复模式(自然恢复和人为复垦), 不同恢复年限(5 a、2 a 和 1 a), 不同坡位(坡上、坡中和坡下), 削坡分级治理(平台和坡面)条件下土壤分离能力大小, 量化堆积体土壤分离能力变化范围, 评价植被恢复模式、恢复年限、削坡分级治理对堆积体土壤分离过程的调控作用。

1.3.1 样品采集

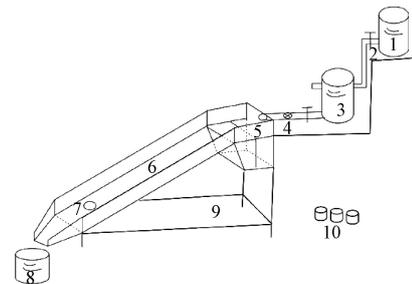
在堆积体坡面选择较为平整区域采集土壤样品。本研究采用内径 10 cm、高 6.37 cm 的圆形环刀取样。取样前清除地表杂物, 然后将环刀套在环刀托上取样, 当确认环刀装满土样时, 取出并将底部削平, 放上纱布, 盖上底盖, 最后用胶带密封。试验设计 20 个不同处理(见表 3), 每个处理设计 6 个放水流量(见表 2), 重复 5 次, 总计 600 个土壤样品。其中, 1) 自然恢复 3 种处理, 小冠花, 白三叶, 以冰草为对照, 在宝汉高速南郑县星光村弃渣场采样 90 个。2) 人为复垦 2 种处理, 玉米和黄豆, 以未复垦为对照, 在宝汉高速红庙镇上二里山弃渣场采样 90 个。3) 恢复年限 3 种处理, 恢复 1 a, 恢复 2 a, 恢复 5 a, 以耕地为对照, 分别在西宝高速唐家塬南沟弃渣场, 西宝高速宝娘娘沟大桥弃渣场, 西宝高速西沟弃渣场, 西沟耕地各采样 30 个。4) 不同坡位 3 种处理, 坡上、坡中、坡下, 均在西宝高速西沟弃渣场采样各 30 个。5) 削坡分级治理 2 种处理, 治理后平台和治理后坡面, 以未治理全坡面为对照, 在黄延高速董家沟弃渣场, 葫芦河大桥弃渣场, 黄延高速高富县西收费站弃渣场均采样 30 个。采样选择 7 m×6 m 的区域, 然后按照行距和间距各 1 m 进行随机取 30 个样品。在每个分离样品采样点周围均用环刀取样测定土壤水分、容重、植被根系, 重复 3 次; 在每个分离样品采样点周围用塑封袋取 1~2 kg 土样测定水稳定团聚体、颗粒组成采用 MS2000 马尔文激光粒度仪测定, 重复 3 次; 在现场采用荷兰的微型粘聚力仪对土壤采样点周围的粘聚力进行测定, 重复 10 次。

1.3.2 试验方法

本研究采用试验水槽长 2 m、宽 0.15 m。试验装置示意图见图 2。水槽底部粘有一层试验用土壤, 使水槽底部粗糙度与试验土样粗糙度保持一致, 同时还可保持底部粗糙度在试验过程中的稳定。在距水槽下端 0.10 m 处设置土壤分离样品放置室, 直径约为 10.7 cm。其中坡度的调节利用水槽顶端的插销, 调整水槽高度使水槽坡度在 0°~40°变化, 而通过稳流桶水表和阀门调节流量, 流量变化范围为 0.01~0.60 L/s。

根据野外调查结果, 堆积体坡度大多集中在 36°, 因此水槽坡度设为 36°。根据堆积体径流小区监测结果, 堆积体坡面单宽流量介于 80~170 L/min, 结合前期预试验和已有冲刷试验剪切力范围, 本试验设计 6 个梯度放水流量(0.20、0.25、0.30、0.35、0.40、0.45 L/s), 对应

水动力学参数见表 2, 其中水流剪切力变化范围为 12.79~18.35 Pa, 满足试验分离土壤所需最小剪切力。待水流稳定后测定流速, 表面流速用北京九州空间科贸有限公司生产的 JZ-NB1710 电解质薄层水流测定仪和传统染色法同时测定, 2 种方法水流速度测定均重复 10 次, 2 种方法求平均值获得该流量下水流表面最大速度, 将水流表面最大速度乘以相应的校正系数(层流和过渡流为 0.67), 获得水流平均流速^[19], 水深使用精度为 0.01 mm 的重庆水文仪器制造厂生产的 SX40-1 型水位测针测定。



1. 储水桶 2. 开关 3. 恒压桶 4. 水表 5. 稳流槽 6. 水槽 7. 放水池 8. 集流桶 9. 支架 10. 样品
1. Water tank 2. Valve 3. Constant barrel 4. Water meter 5. Steady flow groove 6. Flume 7. Sample pool 8. Collecting trough 9. Shelf 10. Samples

图 2 试验装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of experimental device

表 2 水动力学参数汇总

Table 2 Hydrodynamic parameter summarizing

放水流量 Flow discharge/ (L·s ⁻¹)	平均流速 Mean flow velocity/(m·s ⁻¹)	水深 Flow depth/mm	水流剪切力 Flow shear stress/Pa
0.20	0.60	2.22	12.79
0.25	0.68	2.44	14.07
0.30	0.74	2.71	15.60
0.35	0.83	2.81	16.21
0.40	0.88	3.04	17.48
0.45	0.94	3.19	18.35

为保证试验土样的含水率相对一致, 将试验土样静置于水中, 维持水面在土壤表面 1 cm 以下, 8 h 后取出土样, 于阴凉处放置 12 h 后用于冲刷试验。开始试验前调整好水槽的坡度和流量, 土样连同环刀一起移到水槽底部的圆形土样放置室, 尽量使土样表面与水槽底部保持同样高度。现有土壤抗冲性研究或土壤抗蚀性研究都没有切实有效的办法使土样表面与水槽底部始终保持同样高度, 只能是最大限度的降低影响。待土样冲刷掉 2~3 cm 厚度(或总量的 30%~50%)时取出, 记录冲刷时间。本研究采用 2~3 cm 厚度的冲刷量(最大限度的实现土样表面和水槽底部相差不是过大), 就是为了规避水流与土壤接触面不平而造成的影响。将冲刷完毕的土样放于烘箱中, 于 105 °C 下烘干至恒后称质量。土样冲刷前的干质量用前期土壤含水量标定。

1.3.3 数据处理与分析

土壤分离能力的计算公式为^[20]

$$D_c = \frac{W_a - W_b}{1000 \cdot A \cdot T} \quad (1)$$

式中 D_c 为土壤分离能力, $\text{kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$; W_a 冲刷前土样干质量, g ; W_b 冲刷后土样干质量, g ; T 冲刷时间, s ; A 土样环面积, m^2 。

水流剪切应力 (τ)。表示产生土壤颗粒分离和输移泥沙的径流冲刷动力, 计算公式为^[21]

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

式中 τ 水流剪切应力, Pa ; ρ 水密度, kg/m^3 ; g 为重力加速度, $9.8 \text{ m}/\text{s}^2$; R 为水力半径, m , 由于坡面水流为薄层水流, 水力半径 R 可以用水深 h 代替; J 为水力坡度, 可用坡度的正弦值近似代替。

试验共涉及 8 个堆积体, 一个耕地, 总共 20 个不同处理。试验结果按照不同地貌区域分小结分析。为了验证试验拟合模型的可靠性, 文章采用纳什系数 (NSE) 进行判定^[20]。试验在同一堆积体坡面的不同处理间采用 LSD 法进行比较。

2 结果与分析

2.1 不同工程堆积体土壤物理属性

将不同区域所有试验处理条件下典型堆积体土壤基

本物理指标包括质量含水量、容重、粘结力、根重密度、颗粒组成进行汇总制得表 3。

2.1.1 秦巴山区

秦巴山区星光村弃渣场坡面以自然恢复为主, 在堆积体坡面形成多种植物斑块, 主要以小冠花和白三叶为主, 冰草零星分布。由表 3 可知, 星光村弃渣场坡面植被为小冠花、白三叶、冰草对应土壤含水量分别为 15.92%、12.49%、7.84%, 对应根重密度分别为 3.29、2.26、2.02 kg/m^3 , 由此可以得出, 与冰草相比, 堆积体坡面自然恢复小冠花和白三叶均有利于保持土壤水分, 增加土壤根系。

上二里山弃渣场坡面进行了人为复垦, 在同一坡面种植有玉米和黄豆, 部分未复垦。由表 3 可知, 上二里山弃渣场坡面种植黄豆、玉米、未复垦对应土壤含水量分别为 5.28%、7.54%、4.87%, 对应根重密度分别为 0.20、0.83、0.21 kg/m^3 , 由此可以得出, 与未复垦相比, 种植玉米有利于提高土壤含水量, 增加土壤根系, 而种植黄豆与未复垦相差不明显。种植黄豆和玉米对土壤容重和粘结力影响较小, 此外, 土壤质地和颗粒组成在不同处理间基本一致。

表 3 不同工程堆积体土壤物理属性

Table 3 Soil physical properties of different engineering accumulation

区域 Region	堆积体名称 Name of accumulation	处理 Treatment	含水量 Water content/%	容重 Bulk density/ ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	粘结力 Soil cohesion/ kPa	根重密度 Root mass density/ ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	黏粒 Clay/%	粉粒 Silt/%	砂粒 Sand/%	中值粒径 Median soil grain size/ μm
秦巴山区	宝汉高速南郑县星光村弃渣场	小冠花	15.92±0.94	1.36±0.09	19.67±6.18	3.29±0.32	30.07	52.06	17.87	21.90
		白三叶	12.49±0.80	1.40±0.14	19.83±3.62	2.26±0.25	26.27	54.86	18.87	23.46
		冰草	7.84±0.95	1.24±0.06	19.55±5.32	2.02±0.24	29.35	53.42	17.23	21.54
	宝汉高速红庙镇上二里山弃渣场	黄豆	5.28±0.82	1.46±0.08	14.28±2.24	0.2±0.04	16.70	56.95	26.34	12.49
		玉米	7.54±2.11	1.42±0.10	13.78±3.33	0.83±0.11	13.88	49.73	36.39	15.17
		未复垦	4.87±1.60	1.43±0.10	13.25±2.95	0.21±0.03	15.87	52.85	31.28	7.24
关中平原	西宝高速扩建唐家塬南沟弃渣场	恢复 1a	21.75±1.50	1.32±0.05	25.44±4.31	1.04±0.11	18.41	44.44	37.15	16.21
	西宝高速扩建宝娘娘沟大桥弃渣场	恢复 2a	24.55±2.15	1.18±0.10	28.18±3.89	1.47±0.24	24.04	36.14	39.82	23.43
	西宝高速扩建西沟弃渣场	恢复 5a	24.85±1.27	1.17±0.07	31.22±4.60	1.67±0.22	31.07	53.44	15.49	20.33
	宝鸡市西沟	耕地	15.31±1.30	1.02±0.10	15.14±2.31	1.21±0.12	20.13	52.11	27.76	22.54
	西宝高速扩建西沟弃渣场	坡上	24.85±1.27	1.17±0.07	31.22±4.60	1.24±0.18	22.03	38.45	39.52	25.63
		坡中	23.52±1.29	1.22±0.05	29.41±3.07	1.75±0.22	24.04	36.11	39.85	26.44
坡下		24.48±1.14	1.23±0.07	30.13±2.20	2.03±0.16	27.01	39.65	33.34	29.01	
黄土高原	黄延高速董家沟弃渣场	平台	17.45±0.74	1.41±0.01	23.80±5.04	1.65±0.20	18.41	59.21	22.38	28.98
		坡面	19.25±1.60	1.41±0.07	24.61±1.20	1.32±0.19	13.57	58.11	28.32	24.36
		全坡面	16.41±1.95	1.25±0.05	13.80±1.72	0.87±0.11	16.70	56.37	26.93	11.21
	黄延高速葫芦河大桥弃渣场	平台	16.45±0.37	1.43±0.05	29.40±4.18	1.97±0.16	14.36	54.36	31.28	12.03
		坡面	17.21±1.03	1.25±0.02	23.60±6.83	1.65±0.21	13.55	57.49	28.96	10.54
		全坡面	11.31±1.07	1.04±0.03	14.05±1.10	0.35±0.06	13.01	56.30	30.69	9.63
黄延高速高富县西收费站弃渣场	全坡面	10.83±1.45	1.19±0.03	13.00±0.63	0.24±0.03	12.61	57.46	29.93	10.54	

2.1.2 关中平原

关中平原不同工程堆积体选择南沟弃渣场、娘娘沟大桥弃渣场和西沟弃渣场, 并以西沟耕地为对照。由表 3 可知, 恢复 1 a、2 a、5 a 对应根重密度分别为 1.04、1.47、1.67 kg/m^3 , 对应土壤粘结力分别为 25.44、28.18、31.22 kPa , 由此可以得出, 随着堆积体恢复年限的延长, 堆积体坡面根重密度、粘结力均增大。而土壤容重随恢复年限的延长而变小, 恢复 1 a、2 a、5 a 对应土壤容重分别

为 1.32、1.18、1.17 g/cm^3 。此外, 土壤黏粒和粉粒含量均随恢复年限延长而增加。耕地土壤含水量为 15.31%, 土壤容重为 1.02 g/cm^3 , 土壤粘结力为 15.14 kPa , 相比之下, 堆积体坡面土壤含水量、容重、粘结力均高于耕地。

由表 3 可知, 西沟弃渣场坡上、坡中、坡下对应土壤容重分别为 1.17、1.22、1.23 g/cm^3 , 对应根重密度分别为 1.24、1.75、2.03 kg/m^3 , 由此可知, 堆积体坡面从

上到下土壤容重和土壤根系密度变大。而西沟弃渣场坡上、坡中、坡下对应土壤含水量分别为24.83%、23.52%、24.48%，对应土壤粘结力分别为31.22、29.41、30.13 kPa。由此可知，堆积体坡面土壤含水量和粘结力坡上最大。

2.1.3 黄土高原

黄土高原不同工程堆积选择董家沟弃渣场、葫芦河大桥弃渣场和高富县西收费站弃渣场，其中董家沟弃渣场和葫芦河大桥弃渣场分别进行削坡分级治理，形成以坡面和平台为构成要素的堆积体，在其周围选取未治理的全坡面作为对照，而高富县西收费站弃渣场未治理。由表3可知，董家沟弃渣场平台、坡面、全坡面对应土壤含水量分别为17.45%、19.25%、16.41%，对应土壤容重分别为1.41、1.41、1.25 g/cm³，对应土壤粘结力分别为23.80、24.61、13.80 kPa，对应根重密度分别为1.65、1.32、0.87 kg/m³，由此可以得出，削坡分级治理堆积体可以使堆积体土壤含水量、容重、粘结力、根系密度均增大。其中与全坡面相比，土壤含水量和粘结力坡面增加幅度大于平台，而根重密度平台大于坡面。

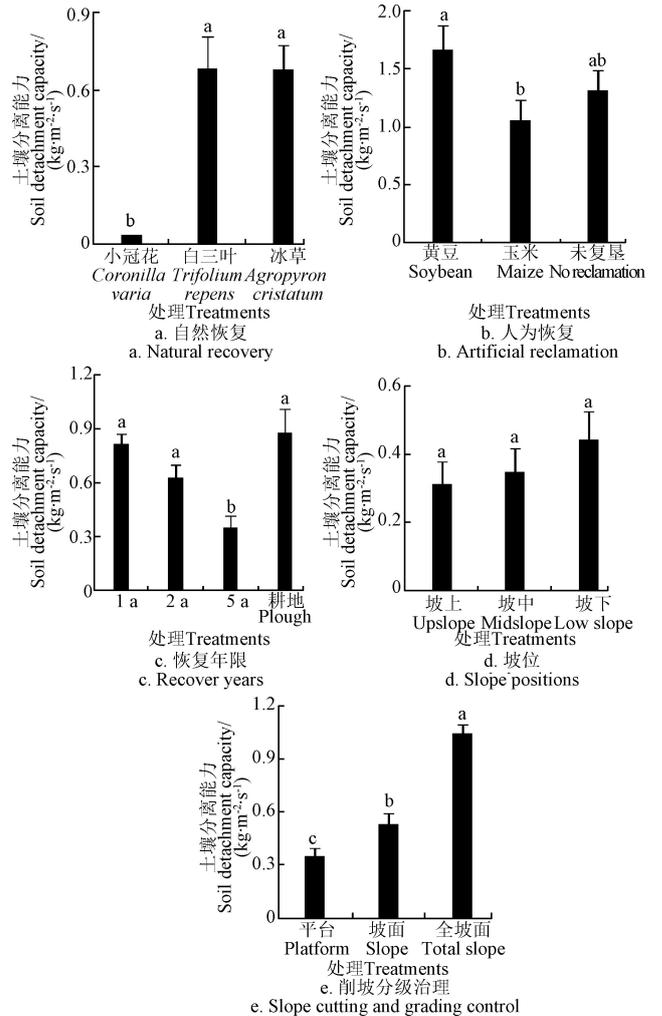
葫芦河大桥弃渣场平台、坡面、全坡面对应土壤含水量分别为16.45%、17.21%、11.31%，对应土壤容重分别为1.43、1.25、1.04 g/cm³，对应土壤粘结力分别为29.40、23.60、14.05 kPa，对应根重密度分别为1.97、1.65、0.35 kg/m³，由此可以得出，削坡分级治理堆积体可以使堆积体土壤含水量、容重、粘结力、根系密度均增大。其中与全坡面相比，土壤容重、粘结力和根重密度平台增加幅度大于坡面，而土壤含水量坡面大于平台。

2.2 不同工程堆积体土壤分离能力大小

根据冲刷试验前后样品质量变化，按照公式(1)计算得到每个样品土壤分离能力值，为比较不同处理之间的差异，试验采用每个处理条件下所有分离样品的均值进行比较，不同处理间土壤分离能力大小比较见图3。

由图3a可知，堆积体坡面自然恢复植被为小冠花时土壤分离能力0.034 kg/(m²·s)相比冰草0.676 kg/(m²·s)显著降低，其降低幅度高达94.97%。而坡面自然恢复植被为白三叶时土壤分离能力0.679 kg/(m²·s)与冰草无显著差异。这是因为小冠花根系发达，根系质量密度最大(3.29 kg/m³)，远高出其他植物，能够很好地缠绕和固持土壤，提高了堆积体土壤的抗蚀性。而白三叶根系不发达，且入土较浅，很难有效固持土壤。这表明，堆积体坡面自然恢复植被为小冠花可以显著降低其土壤分离能力。

由图3b可知，堆积体坡面种植黄豆1.659 kg/(m²·s)和玉米1.050 kg/(m²·s)时土壤分离能力相比未复垦1.313 kg/(m²·s)均无显著差异。这是因为采样堆积体坡面玉米和黄豆为第1年种植。加上堆积体下垫面为石渣土，本身遇水极易分离，植被种植年限较短，土壤中植被根系匮乏。此外人为种植犁地和松土破坏土壤结构，在水流作用下更易被搬运，因此，人为在堆积体陡坡坡面复垦种植玉米和黄豆的水土保持作用短期内甚微。这表明，在石渣土堆积体坡面人为复垦种植玉米和黄豆对土壤分离能力均短期内无显著调控效益。



注：不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)，下同。
Note: Different small letters mean significant difference ($P<0.05$), the same below.

图3 不同工程堆积体坡面治理措施土壤分离能力大小
Fig.3 Soil detachment capacity of different engineering accumulation slope with treatment measures

由图3c可知，堆积体恢复5 a时土壤分离能力相比恢复2 a和恢复1 a均显著降低，相比恢复1 a，恢复5 a土壤分离能力降低57.35%。其中恢复2 a与恢复1 a土壤分离能力之间无显著差异，此外，跟耕地0.879 kg/(m²·s)相比，堆积体恢复1 a和2 a土壤分离能力均无显著差异，而恢复5 a则存在显著差异。恢复2 a土壤容重变小，而植物根系尚不足，随着恢复年限的延长，土壤容重变化放缓，但土壤中植被根系却显著增多，从而使恢复较长时间的堆积体土壤抗蚀性显著增强，而耕地在农作种植和作物收割过程中进行耕作和中耕，土壤疏松，极易产生侵蚀。因此，恢复1 a和2 a均未能显著降低堆积体土壤分离能力，其大小跟耕地相当，恢复5 a可以显著降低堆积体土壤分离能力，相比耕地，恢复5 a土壤分离能力降低60.41%。

由图3d可知，堆积体坡面坡上0.311 kg/(m²·s)和坡中0.348 kg/(m²·s)土壤分离能力相比坡下0.442 kg/(m²·s)均无显著差异。其中坡上与坡中之间也无显著差异。试验堆积体坡长60 m，按照生产建设项目弃渣场堆置及治理规范应当“先拦后弃，分层碾压”，这样形成的堆积

体边坡重力分选作用不明显（除非依坡倾倒型），此外试验研究堆积体为关中黑垆土，本身结构疏松，没有较大土块，堆积体边坡土块大小相对均匀。因此，黑垆土堆积体短坡长 (<60 m) 坡面土壤分离能力空间分布均匀，空间变异不显著。

由图 3e 可知，削坡分级治理堆积体平台 0.346 kg/(m²·s) 和坡面 0.531 kg/(m²·s) 土壤分离能力相比未治理全坡面 1.042 kg/(m²·s) 均显著降低，相比全坡面，治理后堆积体平台和坡面土壤分离能力显著降低 66.79% 和 49.04%。其中平台与坡面之间也存在显著差异。这是因为削坡分级治理以后改变了全坡面原有的微地貌格局，自然降水在分级后的平台上大量入渗，加上自然沉降等作用，分级后平台土壤容重和含水量大于全坡面。而分级以后的坡面坡长相比全坡面短很多，很难在分级后坡面形成并汇集径流，分级后坡面土壤固结，土壤容重增大。因此，削坡分级治理可以显著降低堆积体坡面

土壤分离能力，其中平台效果最佳。

对不同区域之间堆积体土壤分离能力只进行了变化范围的量化，至于区域间的土壤分离能力，由于区域本身存在差异，没有进行比较分析。秦巴山区、关中平原、黄土丘陵沟壑区典型堆积体土壤分离能力变化范围分别为 0.034~1.659、0.311~0.816、0.346~1.042 kg/(m²·s)。

2.3 影响土壤分离能力因素

为了探究影响堆积体土壤分离能力的关键参数，对试验条件下所测土壤物理参数均与土壤分离能力进行皮尔森相关性分析，由此得表 4。从表 4 可得，堆积体土壤分离能力与根重密度 (-0.86)、粘结力 (-0.77)、含水量 (-0.70)、中值粒径 (-0.70)、黏粒含量 (-0.58) 之间均存在极显著负相关。此外，通过相关性分析发现，土壤容重与分离能力之间没有显著的相关关系，本试验研究对象的土壤容重变化梯度不明显，因在后续模型分析中没有考虑土壤容重的影响。

表 4 土壤分离能力与土壤物理参数皮尔森相关系数

Table 4 Pearson correlation coefficients of soil physical properties and soil detachment capacity

皮尔森相关性系数 Pearson correlation coefficients	含水量 Water content	容重 Bulk density	粘结力 Soil cohesion	根重密度 Root mass density	黏粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand	中值粒径 Median soil grain size
土壤分离能力 Soil detachment capacity	-0.70**	-0.01	-0.77**	-0.86**	-0.58**	0.35	0.13	-0.70**

注：**表示在 0.01 水平下极显著相关。

Note: ** indicates significant correlation at 0.01 level.

根据堆积体土壤分离能力与土壤物理参数相关性分析结果，对土壤分离能力和显著相关参数之间进行曲线拟合，并分别绘制曲线拟合关系，得图 4，由图 4a-4e 可知，根重密度、粘结力、含水量、中值粒径、黏粒含量与土壤分离能力之间存在极显著负相关关系，可用指数

函数关系表达。其中根重密度 ($R^2=0.8366$) 拟合参数决定系数最好，粘结力 ($R^2=0.6701$)、含水量 ($R^2=0.5273$)、中值粒径 ($R^2=0.5031$) 次之，黏粒含量 ($R^2=0.3372$) 最差。这表明，土壤分离能力随着根系含量、粘结力、含水量、中值粒径和黏粒含量的增大而减小。

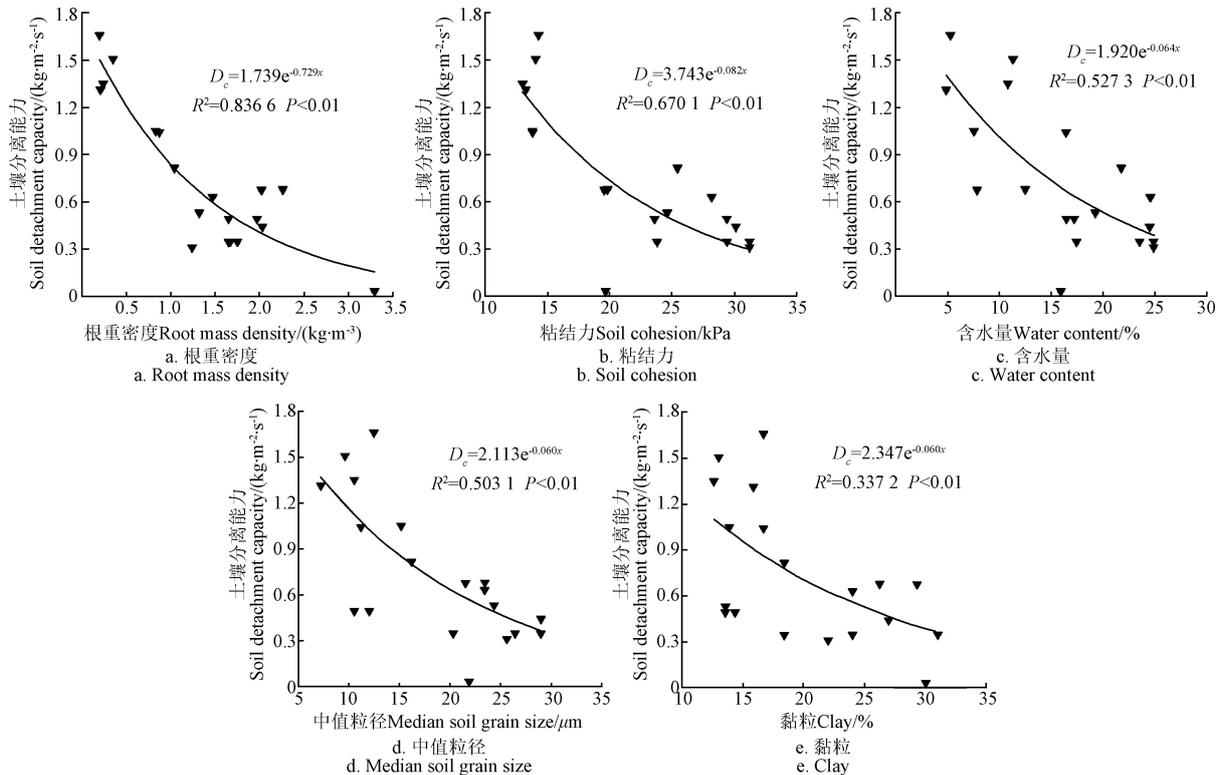


图 4 土壤物理参数与土壤分离能力拟合关系

Fig.4 Fitting relationship of soil detachment capacity and soil physical properties

2.4 土壤分离能力预测模型

冲刷试验测定土壤分离能力极为耗时,且原位采集分离样品需要耗费大量人力和财力,但是土壤分离能力参数的获取对于土壤侵蚀过程模型的建立,特别是预测土壤分离过程具有重要意义,因而通过测定影响土壤分离能力参数,如水流剪切力参数、土壤容重和根系质量指标等对其进行预测显得十分必要。为了预测堆积体土壤分离能力大小,对影响土壤分离能力的相关物理参数进行非线性拟合,根据已有研究^[22],建立经验预测模型,结果发现,根重密度、容重、土壤含水量和剪切力可以很好的预测土壤分离能力,拟合关系预测值与实际测量值比较见图5,散点均匀分布在1:1线两侧,模拟精度相对较高,得到经验模型为

$$D_c = (0.44e^{-0.23RMD} - 0.08BD - 0.005WC)(\tau - 10.29)$$

$$R^2 = 0.91 \quad NSE = 0.94 \quad n = 19$$

式中 D_c 为土壤分离能力, $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, RMD 为根重密度, kg/m^3 , BD 为土壤容重 g/cm^3 , WC 为土壤含水量, %, τ 水流剪切应力, Pa ; 为了验证拟合模型的可靠性,采用纳什系数 (NSE) 进行检验,结果表明 NSE 为 0.94,表明模型可靠。

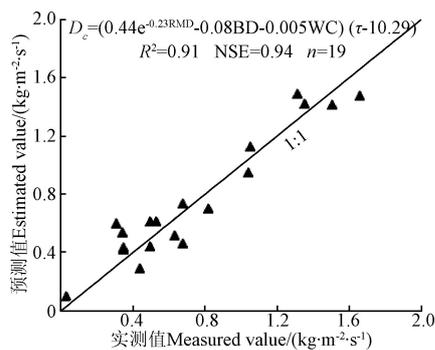


图5 土壤分离能力预测值和实测值比较

Fig.5 Comparison with estimated value and measured value of soil detachment capacity

为了简化预测模型,基于根重密度和水流剪切力建立土壤分离能力预测模型^[23],拟合关系预测值与实际测量值比较见图6,散点均匀分布在1:1线两侧,模拟精度相对较高,结果表明 NSE 为 0.91,表明模型可靠。

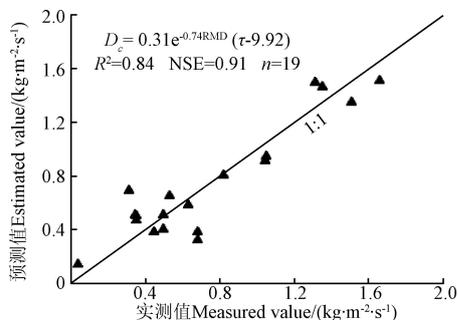


图6 简化模型土壤分离能力预测值和实测值比较

Fig.6 Comparison with estimated value and measured value of soil detachment capacity by simplified model

3 讨论

堆积体坡面土壤颗粒的剥蚀过程既受到传统影响因

素的作用,还受到堆积体独有的堆积过程、形态构造、砾石含量和堆积年限的影响。从而导致堆积体土壤侵蚀临界值或初始值的量化研究更加复杂。不同工程堆积体土壤分离能力的量化研究表明,堆积体坡面土壤颗粒剥蚀与传统研究对象(裸地、耕地、林地和草地等)存在明显不同,唐科明等^[24]研究表明不同植被条件下草地平均土壤分离能力变化范围为 $0.023 \sim 0.498 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$,相比堆积体土壤分离能力的变化范围要小。在坡面尺度上,传统研究表明浅沟发育导致土壤性质及植被生长特性的空间差异,引起黄土高原浅沟发育坡面上部、中部和下部土壤分离能力差异显著^[25],而堆积体坡面由于受堆积过程的影响,坡面土壤分离能力空间变异不显著,加上后续削坡分级治理,从而使堆积体形成独特的“平台-坡面”构造,不同构造部位土壤分离过程差异显著。此外,堆积体形态构造和下垫面状况的异质性导致侵蚀泥沙的搬运和沉积随时相互转化,侵蚀泥沙的波动性增强,从而导致堆积体侵蚀模型的开发和预测相对滞后。

影响堆积体土壤分离过程的关键参数是土壤根系,已有研究表明^[26-27],丰富的植被根系能增加土壤中有机质、水稳性团粒结构的数量,改善土壤物理性质,增加入渗,减小径流,从而提高土壤抗蚀能力。并通过根系网络串联、根系黏结及根系生物化学等作用,能有效固结土壤,减小土壤分离能力。因此,堆积体坡面防护植物的选择可以考虑植被根系状况。此外,土壤分离能力存在时空变异性^[28],在不同区域,受季节变化^[29]和冻融过程^[30]等因素的影响,土壤物理属性、根系、枯落物和生物结皮呈现动态变化,土壤属性的动态变化能够影响土壤可蚀性的季节变化^[31-32],有待后续研究。

人为活动对生态环境的扰动越来越剧烈,生产建设活动可导致原地形地貌、土壤和植被在短时间内迅速改变,形成数量众多的人为堆积地貌。现阶段对堆积体防治效果的评价指标单一,仅仅停留在植被盖度水平,缺乏对土壤质量恢复水平的定量评价,该研究可以为生产建设项目水土保持效果评价体系的提升提供技术支持。本研究表明,在堆积体坡面不宜进行人为复垦种植,堆积体平台可以进行人为覆土种植,但堆积体坡面一般坡度较大,不宜进行耕作,适宜撒播草籽进行植被恢复,起到固持土壤和防止水土流失的作用。短期自然恢复 (<5 a) 对堆积体侵蚀调控效益不显著,现阶段对于堆积体防护的评价时间一般是工程投产或项目竣工的次年,未能满足堆积体恢复稳定状态所需要的时间,土壤抗蚀性尚未恢复到稳定状态。

准确预报土壤分离过程是揭示土壤侵蚀机理、建立土壤侵蚀预报模型的前提条件^[33],现阶段堆积体土壤侵蚀预报模型研究停留在借鉴耕地已有预报模型的基础上进行参数修定,修订版模型参数众多,很难在实践中推广应用,未能为生产建设项目水土流失预测提供理论指导,因此,研究堆积体土壤分离过程,可以为生产建设项目水土流失预测模型的建立提供新思路。

4 结 论

1) 秦巴山区、关中平原、黄土丘陵沟壑区典型堆积体土壤分离能力变化范围分别为 0.034~1.659、0.311~0.816、0.346~1.042 kg/(m²·s)。

2) 相比冰草, 堆积体坡面自然恢复植被为小冠花可以显著降低其土壤分离能力, 其降低幅度高达 94.97%。相比未复垦, 在石渣土堆积体坡面短期人为复垦种植玉米和黄豆对土壤分离能力均无显著调控效益。相比恢复 1 a, 恢复 2 a 未能显著降低堆积体土壤分离能力, 恢复 5 a 可以显著降低堆积体土壤分离能力, 恢复 5 a 土壤分离能力降低 57.35%, 相比耕地, 恢复 5 a 土壤分离能力降低 60.41%。黑垆土堆积体短坡长 (<60 m) 坡面土壤分离能力空间分布均匀, 空间变异不显著。相比未治理全坡面, 削坡分级治理可以显著降低堆积体坡面土壤分离能力, 治理后堆积体平台和坡面土壤分离能力显著降低 66.79%和 49.04%。

3) 根重密度、粘结力、含水量、中值粒径、黏粒含量与土壤分离能力之间存在极显著负相关关系, 可用指数函数关系表达。建立了基于根重密度 RMD 和水流剪切力 τ 土壤分离能力预测模型 $D_c=0.31e^{-0.74RMD} (\tau-9.92)$ 。

[参 考 文 献]

- [1] Peng X D, Shi D M, Jiang D, et al. Runoff erosion process on different underlying surfaces from disturbed soils in the Three Gorges Reservoir Area, China[J]. *Catena*, 2014, 123: 215—224.
- [2] Zhang L T, Gao Z L, Li Z B, et al. Downslope runoff and erosion response of typical engineered landform to variable inflow rate patterns from upslope[J]. *Natural Hazards*, 2016, 80(2): 775—796.
- [3] Li Z W, Zhang G H, Geng R, et al. Spatial heterogeneity of soil detachment capacity by overland flow at a hillslope with ephemeral gullies on the Loess Plateau[J]. *Geomorphology*, 2015, 248: 264—272.
- [4] 王瑄, 李占斌, 李雯, 等. 土壤剥蚀率与水流功率关系室内模拟实验[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(2): 185—187. Wang Xuan, Li Zhanbin, Li Wen, et al. Indoor simulation experiment of the relationship between soil detachment rate and stream power[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2006, 22(2): 185—187. (in Chinese with English abstract)
- [5] 何小武, 张光辉, 刘宝元. 坡面薄层水流的土壤分离试验研究[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(6): 52—55. He Xiaowu, Zhang Guanghui, Liu Baoyuan. Soil detachment by shallow flow on slopes[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2003, 19(6): 52—55. (in Chinese with English abstract)
- [6] Li Z W, Zhang G H, Geng R, et al. Land use impacts on soil detachment capacity by overland flow in the Loess Plateau, China[J]. *Catena*, 2015, 124: 9—17.
- [7] Malam Issa O, Le Bissonnais Y, Planchon O, et al. Soil detachment and transport on field- and laboratory-scale interrill areas: Erosion processes and the size-selectivity of eroded sediment[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2006, 31(8): 929—939.
- [8] Zhang L T, Gao Z L, Yang S W, 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.
- [9] 罗榕婷, 张光辉, 曹颖. 坡面含沙水流水动力学特性研究进展[J]. *地理科学进展*, 2009, 28(4): 567—574. Luo Rongting, Zang Guanghui, Cao Ying. Progress in the research of hydrodynamic characteristics of sediment-laden overland flow[J]. *Progress in Geography*, 2009, 28(4): 567—574. (in Chinese with English abstract)
- [10] Shi D, Wang W, Jiang G, et al. Effects of disturbed landforms on the soil water retention function during urbanization process in the three gorges reservoir region, China[J]. *Catena*, 2016, 144: 84—93.
- [11] 王瑄, 李占斌, 尚佰晓, 等. 坡面土壤蚀率与水蚀因子关系室内模拟试验[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(9): 22—26. Wang Xuan, Li Zhanbin, Shang Baixiao, et al. Indoor simulation experiment of the relationship between soil detachment rate and water erosion factor[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2008, 24(9): 22—26. (in Chinese with English abstract)
- [12] 牛耀彬, 高照良, 李永红, 等. 工程堆积体坡面细沟形态发育及其与产流产沙量的关系[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(19): 154—161. Niu Yaobin, Gao Zhaoliang, Li Yonghong, et al. Rill morphology development of engineering accumulation and its relationship with runoff and sediment[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2016, 32(19): 154—161. (in Chinese with English abstract)
- [13] 李永红, 牛耀彬, 王正中, 等. 工程堆积体坡面径流水动力学参数及其相互关系[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(22): 83—88. Li Yonghong, Niu Yaobin, Wang Zhengzhong, et al. Hydrodynamic parameters and their relationships of runoff over engineering accumulation slope[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2015, 31(22): 83—88. (in Chinese with English abstract)
- [14] 张乐涛, 高照良, 田红卫. 工程堆积体陡坡坡面土壤侵蚀水动力学过程[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(24): 94—102. Zhang Letao, Gao Zhaoliang, Tian Hongwei. Hydrodynamic process of soil erosion in steep slope of engineering accumulation[J]. *Transactions of the Chinese Society of*

- Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(24): 94—102. (in Chinese with English abstract)
- [15] 管新建, 李占斌, 王民, 等. 坡面径流水蚀动力参数室内试验及模糊贴近度分析[J]. 农业工程学报, 2007, 23(6): 1—6.
- Guan Xinjian, Li Zhanbin, Wang Min, et al. Laboratory experiment and fuzzy nearness degree analysis of runoff hydrodynamic erosion factors on slope land surface[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(6): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [16] 牛耀彬, 高照良, 刘子壮, 等. 工程措施条件下堆积体坡面土壤侵蚀水动力学特性[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(6): 105—111.
- Niu Yaobin, Gao Zhaoliang, Liu Zizhuang, et al. Hydrodynamic characteristics of soil erosion on deposit slope under engineering measures[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(6): 105—111. (in Chinese with English abstract)
- [17] Beuselinck L, Govers G, Steegen A, et al. Evaluation of the simple settling theory for predicting sediment deposition by overland flow[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 1999, 24(11): 993—1007.
- [18] 张少伟, 郭勇, 权红花. 陕西省地理国情监测中的基本地貌类型及划分指标[J]. 测绘标准化, 2012, 28(4): 13—16.
- Zhang Shaowei, Guo Yong, Quan Honghua. Fundamental relief types and their classification index used in provincial geographic conditions monitoring in Shaanxi[J]. Standardization of Surveying and Mapping, 2012, 28(4): 13—16. (in Chinese with English abstract)
- [19] Luk S H, Merz W. Use of the salt tracing technique to determine the velocity of overland-flow[J]. Soil Technology, 1992, 5: 289—301.
- [20] Wang B, Zhang G H, Shi Y Y, et al. Soil detachment by overland flow under different vegetation restoration models in the Loess Plateau of China[J]. Catena, 2014, 116: 51—59.
- [21] Govers G, Gimenez R, Oost K V. Rill erosion: Exploring the relationship between experiments, modelling and field observations[J]. Earth-Science Reviews, 2007, 84(3): 87—102.
- [22] Baets S D, Poesen J. Empirical models for predicting the erosion-reducing effects of plant roots during concentrated flow erosion[J]. Geomorphology, 2010, 118(3/4): 425—432.
- [23] Zhang G H, Tang K, Ren Z, et al. Impact of grass root mass density on soil detachment capacity by concentrated flow on steep slopes[J]. Transactions of the ASABE, 2013, 56(3): 927—934.
- [24] 唐科明, 张光辉, 孙珍玲. 草地土壤分离能力季节变化特征及其影响因素[J]. 中国水土保持科学, 2016, 14(6): 18—25.
- Tang Keming, Zhang Guanghui, Sun Zhenling. Seasonal variation in soil detachment capacity of grasslands and its influencing factors[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2016, 14(6): 18—25. (in Chinese with English abstract)
- [25] 王长燕, 郁耀闯. 黄土丘陵区退耕草地土壤分离能力季节变化研究[J]. 土壤学报, 2016, 53(4): 1047—1055.
- Wang Changyan, Yu Yaochuang. Seasonal variation of soil detachment in fields under “Grain for Green” in hilly regions of Loess Plateau of China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2016, 53(4): 1047—1055. (in Chinese with English abstract)
- [26] 李阳芳, 宋维峰, 彭永刚, 等. 元阳梯田不同土地利用类型表层土壤的抗冲性[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(5): 31—35.
- Li Yangfang, Song Weifeng, Peng Yonggang, et al. Antiscourability of surface soil of different land use types in area of Yuanyang terrace[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012, 10(5): 31—35. (in Chinese with English abstract)
- [27] 刘国彬. 黄土高原草地土壤抗冲性及其机理研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(1): 93—96.
- Liu Guobin. Study on soil anti-scourability and its mechanism of grassland on Loess Plateau[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1998, 4(1): 93—96. (in Chinese with English abstract)
- [28] 张光辉. 土壤分离能力测定的不确定性分析[J]. 水土保持学报, 2017, 31(2): 1—6.
- Zhang Guanghui. Uncertainty analysis of soil detachment capacity measurement[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(2): 1—6. (in Chinese with English abstract)
- [29] 王长燕, 郁耀闯. 黄土丘陵区不同草被类型土壤细沟可蚀性季节变化研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(8): 101—108.
- Wang Changyan, Yu Yaochuang. Seasonal variations of soil rill erodibility under different types of grass in loess hilly region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(8): 101—108. (in Chinese with English abstract)
- [30] 孙宝洋, 肖俊波, 刘晨光, 等. 季节性冻融区解冻期土壤分离能力影响因素研究[J]. 泥沙研究, 2018, 43(1): 51—57.
- Sun Baoyang, Xiao Junbo, Liu Chenguang, et al. Study on factors affecting soil detachment capacity of thawing period in the region of seasonal freeze-thaw[J]. Journal of Sediment Research, 2018, 43(1): 51—57. (in Chinese with English abstract)
- [31] Knapen A, Poesen J, Govers G, et al. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review[J]. Earth Science Reviews, 2007, 80(1): 75—109.
- [32] Knapen A, Poesen J, Baets S D. Seasonal variations in soil erosion resistance during concentrated flow for a

- loess-derived soil under two contrasting tillage practices[J]. Soil & Tillage Research, 2007, 94(2): 425–440.
- [33] 柳玉梅, 张光辉, 李丽娟, 等. 坡面流水动力学参数对土壤分离能力的定量影响[J]. 农业工程学报, 2009, 25(6): 96–99.

Liu Yumei, Zhang Guanghui, Li Lijuan, et al. Quantitative effects of hydrodynamic parameters on soil detachment capacity of overland flow[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(6): 96–99. (in Chinese with English abstract)

Effects of treatment measures on soil anti-scour erodibility in engineering accumulation slope

Niu Yaobin¹, Gao Zhaoliang^{1,2*}, Qi Xingyuan¹, Li Yutingting¹, Li Yonghong^{1,2}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China)

Abstract: Accumulation has become the main source of soil erosion in the production and construction projects. Soil detachment is a key process affecting soil erosion since it determines the amount of sediment that is potentially transferred to surface water bodies. Soil detachment capacity is a key parameter in many process based erosion models such as the Water Erosion Prediction Project model. Therefore, quantifying detachment capacity of the engineering accumulation under different conditions is pivotal to calibrate and validate the process based on the erosion models. In the study, we used the soil detachment capacity to quantify the variation ranges of the engineering accumulation in the different area, and evaluate the regulation of vegetation restoration patterns, years of recovery and the slope cutting and grading control on the soil anti-scour erodibility. Different engineering accumulations of the expressways in the Qin-ba mountain area, Guanzhong Plain and Hilly region of Loess Plateau (in Shaanxi Province) were selected. Undisturbed soil samples were collected from the surface soil using the cutting rings with a diameter of 10 cm and a height of 6.37 cm for the measurement of soil detachment capacity. The soil detachment capacity was measured in a 2.0 m long and 0.15 m wide hydraulic flume indoors. Flow discharge was controlled by six valves and measured 5 times with plastic buckets and a volumetric cylinder. After the flow became stable, the flow surface velocity was measured using a fluorescent dye technique for 10 times. The velocity was multiplied by a reduction factor of 0.67 to obtain the mean flow velocity. The results indicated that the variation ranges of the soil detachment capacity on typical accumulation in the Qinba mountainous area, Guanzhong Plain and Hilly area of Loess Plateau were 0.034-1.659, 0.311-0.816 and 0.346-1.042 kg/(m²·s), respectively. Compared with *agropyron cristatum*, the natural restoration of vegetation on the slope of the engineering accumulation with *coronilla varia* can significantly reduce the soil detachment capacity, and the reduction was 94.97%. Compared with no-reclamation, there was no significant effect on soil detachment capacity of the corn and beans on the slope of accumulation which was constituted with rock fragments and soil in the short term. Compared with recovering in one year, there were no significant ($P>0.05$) differences in recovering two years, but the soil detachment capacity was remarkably decreased by recovering five years, and the reduction was 57.35%. Furthermore, compared with the cultivated land, the reduction of soil detachment capacity was 60.41% in recovering five years. There was no significant difference in the spatial variation of soil detachment capacity for accumulation with Heilu soil in the short slope (the length of slope was less than 60 m). Compared with untreated slope, the soil detachment capacity was remarkably decreased by the slope cutting and grading control on the engineering accumulation. And compared with the untreated slope, the reduction of soil detachment capacity in the platform and slope by the regulated measures were 66.79% and 49.04%, respectively. There was significant negative ($P<0.05$) correlation between root mass density, soil cohesion, soil water content, median soil grain size, the clay content and the soil detachment capacity, using an exponential function. The prediction model of soil detachment capacity was well fitted with on root mass density and flow shear stress. This research can not only provide the basic data for the prediction soil detachment capacity of accumulation, but also provide guidance for the treatment measures in the slope of engineering accumulation.

Keywords: soils; erosion; runoff; sediment transport; measures regulation; vegetation restoration; engineering accumulation