

黄土丘陵区边坡开挖对土壤抗蚀性影响

刘思璇¹, 高建恩^{1,2,3}, 李文证¹, 高哲⁴, 周凡凡¹, 王照润¹, 王鹭¹

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 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.水利部 水土保持生态工程技术研究中心, 陕西 杨凌 712100; 4.西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要:针对黄土高原高质量发展过程中为扩展农业等经济用地,大量边坡开挖工程对坡面土壤抗蚀能力影响等问题,以延安市羊圈沟流域内开挖坡面为对象,未开挖坡面为对照,通过野外采样与室内分析,研究了开挖坡面土壤抗蚀能力时空变化特征。结果表明:(1)在开挖率为 7%的坡面,土壤团聚体平均重量直径(MWD)和有机碳含量随坡位的降低,开挖坡面呈先增大后减小趋势,对照坡面为逐渐增大趋势;其中开挖坡面 MWD 在坡下区、开挖区相较于坡中区分别降低 6%~8%和 58%~73%;土壤有机碳含量在坡下区 0—80 cm 土层内显著降低 8%~41%,开挖区 0—40 cm 内显著降低 10%~39%;(2)土壤可蚀性 K_s 值随坡位的降低,开挖坡面呈先减小后增大趋势,对照坡面为逐渐减小趋势,坡下区和开挖区相较于坡中区分别增大 4.8%~5.0%,65.0%~109.7%;(3)坡面土壤可蚀性 K_s 值随开挖率的增大而增大,与有机碳含量相关性随开挖率增加而降低,开挖率为 7%的坡面,坡下区土壤抗蚀能力年变化呈显著降低趋势。因此开挖坡面在后期边坡防护过程中不仅应加强开挖区稳定性的防护,还应注重坡面开挖区上部各坡位土壤侵蚀风险的降低。研究结果为边坡开挖工程设计及安全防护提供了科学指导和理论支撑。

关键词:黄土丘陵区;边坡开挖;土壤抗蚀性;土壤团聚体;土壤有机碳

中图分类号:S157.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)02-0023-08

Effect of Slope Excavation on Anti-Erosion of Soil in Loess Hilly Region

LIU Sixuan¹, GAO Jianen^{1,2,3}, LI Wenzheng¹, GAO Zhe⁴,

ZHOU Fanfan¹, WANG Zhaorun¹, WANG Lu¹

(1.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.Research Center on Soil &

Water Conservation, Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4.College of Water

Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: In order to expand agricultural and other economic land in the process of high-quality development of the Loess Plateau, a large number of slope excavation works affect the erosion resistance of soil on the slope, the excavated slope surface in the Yangjuangou watershed in Yan'an City was used as the object, and the unexcavated slope surface was used as a control, changes in time and space characteristics of soil erosion resistance of excavated slope were examined by field sampling and indoor sample measures. The results show that: (1) on the slope with excavation rate of 7%, as the slope position declines, the average weight diameter (MWD) of the soil aggregates and the organic carbon content of the excavated slope first increase and then decrease, and show the gradual increase trend on the control slope; the MWDs of the excavation slope in the downslope area and the excavation area reduce by 6%~8% and 58%~73%, respectively, compared with that in the middle slope area; the content of soil organic carbon significantly reduces by 8%~41% in the 0—80 cm soil layer in the downslope area, and by 10%~39% in 0—40 cm layer in the excavation area, respectively; (2) the K_s value of soil erodibility decreases with the slope position, first decreases and then increases

收稿日期:2021-03-31

修回日期:2021-06-04

资助项目:国家重点研发计划项目“黄土丘陵沟壑区边坡工程一沟道整治生态安全调控技术”(2017YFC0504703);国家自然科学基金项目(41877078,41371276);陕西省自然科学基金重大基础项目(2016ZDJC-20);陕西省科技统筹创新工程计划重大项目课题(2013KTDZ03-03-01);中国科学院创新工程计划“水土保持工程关键技术研发与集成示范”(A315021615)

第一作者:刘思璇(1997—),女,甘肃白银人,硕士研究生,主要从事水土保持工程研究。E-mail:17863806592@163.com

通信作者:高建恩(1962—),男,山西运城人,博士,研究员,主要从事水土保持工程研究。E-mail:gaojianen@126.com

on the excavated slope, and gradually decreases on the control slope; compared with the middle slope area, the K_s values of the downslope area and the excavation area increases by 4.8%~5% and 65%~109.7%, respectively; (3) the K_s value of slope soil erodibility increases with the increase of the excavation rate, and the correlation of K_s value with the organic carbon content decreases with the increase of the excavation rate; on the slope with an excavation rate of 7%, the annual change of the soil erosion resistance of the downslope area shows the significant decreasing trend. Therefore, in the later slope protection process of the excavated slope, not only should the protection of the stability of the excavation area be strengthened, but also attention to the reduction of soil erosion risk at the upper slope of the excavation area should be paid. These research results can provide scientific guidance and theoretical support for slope excavation engineering design and safety protection.

Keywords: loess hilly region; slope excavation; soil anti-erodibility; soil macroaggregates; soil organic carbon

随着黄土高原地区高质量发展的推进,大规模的边坡开挖在极大程度上满足了当地用地及工程建设需求的同时严重扰动了原始坡面,原有植被及土壤环境遭到破坏,坡面土壤侵蚀现象频发,对该地区的土壤生态环境安全造成了严重的影响^[1-4],其中 2013 年延安地区突发连续性暴雨致使大量边坡冲毁严重^[5],引起社会的高度关注,因此研究边坡开挖对坡面土壤抗蚀能力影响具有现实意义。

目前在开挖坡面对土壤抗蚀环境影响研究方面,多关注开挖坡面的侵蚀变化。Jin 等^[6]研究表明,黄土高原是由结构脆弱、易受水力侵蚀的第四纪黄土性扬尘沉积所得,边坡的开挖有增大流域边坡水土流失危害的风险;高建恩等^[7]通过室内边坡开挖形成的 70°高陡边坡的降雨及放水试验发现,侵蚀受雨滴打击和坡面粗糙度“双紊动”源影响并给出了水力计算模型;汪勇等^[8]认为降雨入渗是影响开挖边坡稳定性的重要指标,且越接近坡脚,越容易发生变形和破坏。王壮壮等^[9]通过研究边坡不同开挖工况下边坡稳定性指出,开挖进尺大于 30 m 时,坡脚开挖角度越大,边坡稳定性越低;陈航等^[10]采用数值计算软件分析了紫穗槐对切削边坡的加固作用,指出土壤含水量为 12%时紫穗槐固坡效应最好。薛强等^[11]在调查开挖型黄土边坡中指出,侵蚀剥落状况是边坡崩塌破坏过程中的先决因素。然而目前开挖坡面的研究多集中于开挖区,边坡开挖对整个坡面土壤抗蚀能力的时空变化影响研究相对较少。

本研究以陕西延安羊圈沟小流域内开挖边坡所在坡面为例,流域内原始坡面为对照,通过野外采样与室内分析相结合,分析研究黄土丘陵区一定边坡开挖率下,对各坡位土壤抗蚀能力影响及其年恢复变化,旨在明确开挖边坡的防护范围及程度,为今后边坡开挖工程的安全与防护提供科学的指导与理论支持。

1 试验材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于陕西省延安市羊圈沟小流域(109°31′—109°71′E,36°42′—36°82′N),距延安市区 14 km,属半干旱大陆性季风气候,多年平均降水量 535 mm,多集中在 7—9 月,占全年降水量的 79%,年际变化较大。属典型的黄土丘陵沟壑区,流域内土壤以黄绵土为主,抗蚀性差,水土流失情况相对严重。植被类型主要有刺槐(*Robinia Pseudoacacia* L.),柠条(*Caragana Korshinskii* Kom),狗尾草(*Setaria viridis* (L.) Beauv),荆条(*Vitex negundo* L.),茅莓(*Rubus parvifolius* L.),白刺花(*Sophora davidii* (Franch) Skeels)。

1.2 土壤样品的采集

通过对沟道土地整治所在流域进行实地勘察,选择 2018 年开挖的无台阶式开挖边坡所在坡面为研究对象,边坡开挖高度在 4~6 m,周边未开挖坡面为对照,坡面类型均为阳面凸坡,土质为黄绵土。于 2019 年 7 月,依据不同高程及开挖面均等划分为 4 个坡段和开挖坡段,分别为坡顶(I 区),坡上(II 区),坡中(III 区),坡下(IV 区),坡脚/开挖区(V 区)(图 1)。并按照“S”形在每个坡段设置 5 个采样点,除去土体表层枯枝落叶,在 0—100 cm 土层深度内,按 0—20 cm,20—40 cm,40—60 cm,60—80 cm,80—100 cm 分层采集土壤样品,并将各样地采样点内,相同土层深度的土样均匀混合,作为分析样品带回实验室自然风干,进行土壤团聚体、含水量、有机碳指标测定。

1.3 样品的测定

土壤团聚体粒级配分布及稳定性状况的测定采用湿筛法,即将所得土样通过四分法称取 50 g,加入蒸馏水浸泡 15 min 后,倒入孔径依次为 5,2,1,0.5,0.25 mm 的套筛中。在 35 r/min 的频率下震荡 15 min 后,将各级筛网上的团聚体冲洗至烧杯内烘干称重^[12]。

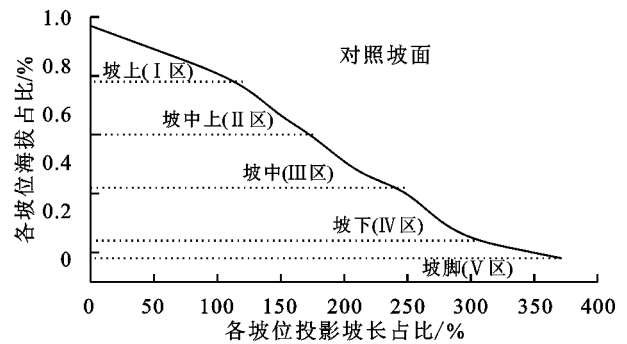
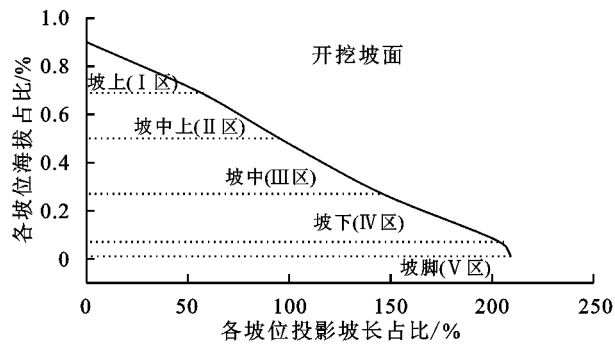


图 1 坡位示意图

土壤含水量的测定采用烘干法;土壤有机碳含量的测定采用重铬酸钾外加热法^[13]。

1.4 数据计算与处理

土壤团聚体平均重量直径(MWD/mm)能够直接反映土壤结构稳定性大小,其计算公式^[14]如下:

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i \cdot W_i)}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (1)$$

式中: W_i 为每个粒级下土壤团聚体的百分百分数; X_i 为各粒级的平均直径。

土壤可蚀性 K_s 能够综合表示土壤抗蚀能力强弱,其的计算公式^[15]如下:

$$K_s = 7.954 \{ 0.0017 + 0.0494 \exp[-0.5 (\frac{\lg(GMD) + 1.675}{0.6986})^2] \} \quad (2)$$

式中: $GMD = \exp[\frac{\sum_{i=1}^n (W_i \cdot \ln X_i)}{\sum_{i=1}^n W_i}]$; W_i 为每个粒级下土壤团聚体的百分百分数; X_i 为各粒级的平均直径。

采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最

小显著差异法(LSD)对各坡位土壤有机碳进行分析;采用 Pearson 法($\alpha=0.05$)对土壤可蚀性 K 值与土壤有机碳和土壤团聚体 MWD 值进行相关性分析;采用 Origin 2018 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 边坡开挖对各坡位土壤团聚体结构影响

土壤团聚体作为土壤基本的结构单元,其大小分布及稳定性能显著影响降雨入渗及土壤可蚀性,是评价土壤抗蚀环境的重要因子^[16]。边坡开挖工程的实施,易造成团聚体结构变差,大团聚体破裂,稳定性降低。通过对开挖及对照坡面各坡位的土壤团聚体组成级配进行分析,结果见图 2。随坡位降低,开挖坡面在 0—40 cm 土层内,大于 5 mm 和大于 0.25 mm 的团聚体含量均呈先增加后减小趋势,其中大于 5 mm 的土壤团聚体在 IV, V 区均呈现降低趋势,大于 0.25 mm 团聚体在 V 区出现降低趋势。而对照坡面,随坡位的降低均呈增加趋势;因此,边坡开挖显著影响 IV, V 区的土壤团聚体团粒结构,且 V 区受影响程度高于 IV 区。

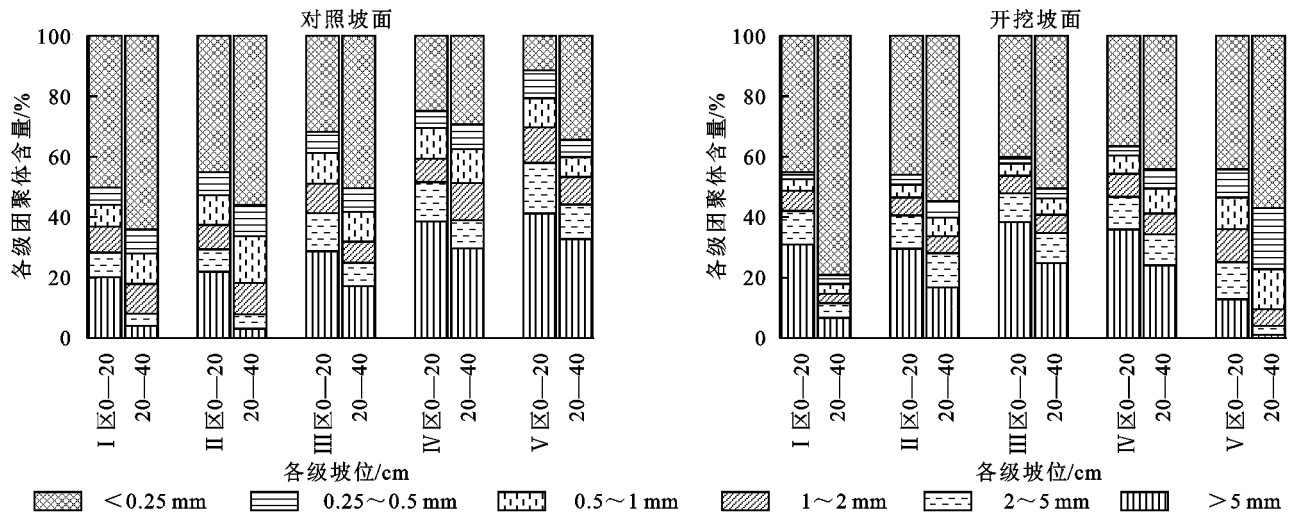


图 2 各坡位土壤团聚体粒级分布

土壤团聚体平均重量直径(MWD)能够直接反映土壤团聚体稳定性大小,较好地评价土壤保水保肥

性能^[17]。通过对土壤团聚体稳定性分析,结果见图 3,开挖坡面在 0—20 cm, 20—40 cm 土层中,土壤

MWD 值随坡位的降低呈先增大后减小趋势,其中 I—III 区 MWD 值为逐渐增加趋势,IV—V 区为逐渐降低趋势,其中 MWD 值在 0—20 cm,20—40 cm 土层中相较于 I 区,IV 区分别增加 12%,145%,V 区分别降低 34%,29%;相较于 III 区,IV 区分别降低 1.5%,6.3%,V 区分别降低 42.2%,73%。而在对照坡面 0—20 cm,20—40 cm 土层中随坡位的降低,

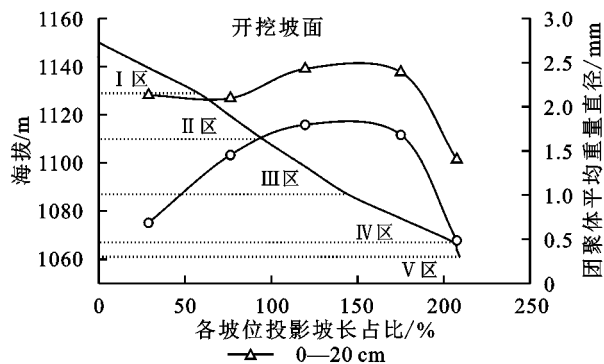


图 3 各坡位 MWD 变化

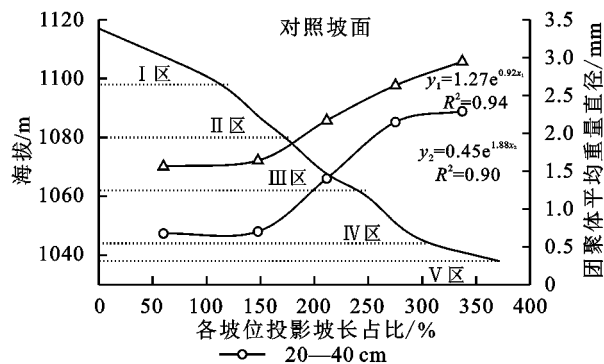
2.2 边坡开挖对各坡位土壤有机碳及含水量影响

土壤有机碳及含水量作为土壤的重要组成部分,能够显著影响土壤质量及环境^[18-19],是评价土壤抗蚀环境的又一重要指标,边坡开挖在破坏坡面原有地形地貌的同时,对坡面土壤有机碳含量也产生显著影响。通过对比边坡开挖下各坡位土壤有机碳空间变化差异,由图 4 可得,开挖坡面土壤有机碳含量随坡位的降低呈先增大后减小趋势,在开挖坡面 0—100 cm 土层中,相较于 I 区,IV 区 0—20 cm 土层内有机碳含量降低 11%,20—100 cm 土层内增加 10%~39%,V 区 0—100 cm 土层内有机碳含量增加 10%~91%;而随坡位的进一步降低,相较 III 区,在 IV 区 0—80 cm 土层深度内土壤有机碳含量显著降低,其中较 III 区,0—40 cm 土层降低 21%~41%,40—80 cm 土层降低 8%~14%;V 区土壤有机碳含量在 0—40 cm 土层内,显著降低 10%~39%。而对照坡面,随坡位的降低各土层土壤有机碳含量均呈逐渐增大趋势,且 IV 区、V 区土壤有机碳含量均显著高于其他坡位,其中相较 I 区 0—100 cm 土层有机碳含量增加 23%~117%,35%~150%,相较于 III 区 0—100 cm 土层有机碳含量增加 6%~56%,16%~62%。

黄土高原坡面含水量随坡位的降低呈增加趋势^[20],而通过对开挖坡面土壤含水量空间变化分析,由图 5 可得,开挖坡面其各坡位下土壤含水量变化趋势与土壤有机碳变化规律相似,相较于 I 区,在 IV 区 0—80 cm 土层,土壤含水量降低 13%~21%;V 区 0—100 cm 土层含水量增加 6%~46%;相较于 III 区,在 IV 区 0—80 cm 土层,土壤含水量降低 22.7%~

MWD 值均呈逐渐增加趋势,且 IV 区、V 区 MWD 值在 0—20 cm,20—40 cm 土层中,相较于 I 区分别增加 69%,218%,89%,239%;相较于 III 区分别增加了 21%,53%,36%,63%。

结果表明,边坡开挖影响坡面土壤团聚体稳定性,其中 IV 区、V 区受影响程度较为显著,且 V 区团聚体稳定性受影响程度高于 IV 区。



35.3%;V 区 0—40 cm 土层含水量降低 10%~11%,在 40—60 cm 土壤含水量显著增大,且均显著高于其他土层。

2.3 边坡开挖对各坡位土壤抗蚀性影响

2.3.1 对各坡位土壤可蚀性 K_s 变化影响

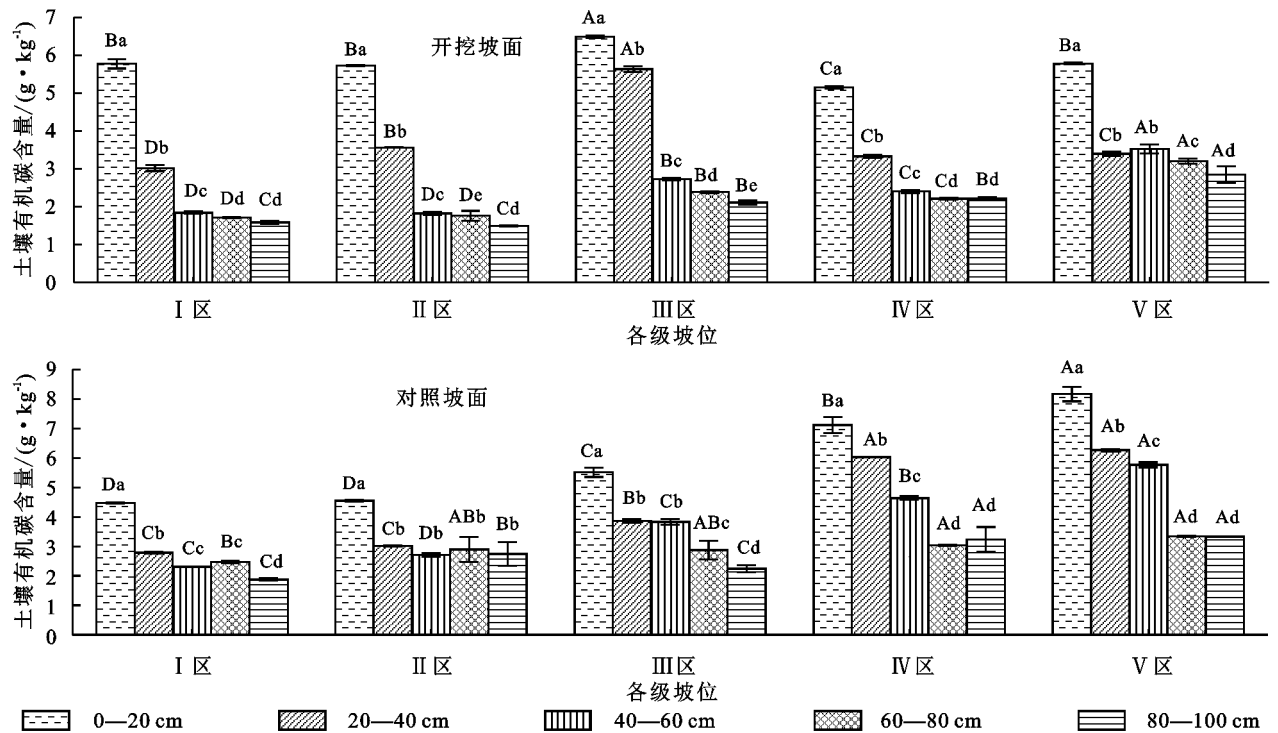
土壤可蚀性 K_s 值能够综合评价土壤抵抗侵蚀能力的大小,其值越小土壤抗侵蚀能力越强^[21]。图 6 为边坡开挖对各坡位下土壤综合抗侵蚀能力影响对比,开挖坡面在 0—20 cm,20—40 cm 土层中,土壤 K_s 值随坡位的降低呈先减小后增大趋势,其中相较于 I 区,IV 区在 0—20 cm,20—40 cm 土层中 K_s 值分别降低 21%,63%,V 区在 0—20 cm 土层中增加 38%,在 20—40 cm 土层中降低 13%;相较于 III 区,IV 区 0—20 cm,20—40 cm 土层中 K_s 值分别降低 5%,12%,V 区分别增加 66%,109%。而在对照坡面 0—20 cm,20—40 cm 土层中,随坡位的降低 K_s 值均呈逐渐增加趋势,且 IV 区、V 区 K_s 值在 0—20 cm,20—40 cm 土层中,相较于 I 区分别增加 57%,69%,67%,69%;相较于 III 区分别增加 24%,48%,42%,48%。由此可得,边坡开挖影响坡面土壤抗蚀性,其中 IV 区、V 区受影响程度较为显著,且 V 区土壤抗蚀性受影响程度高于 IV 区。

2.3.2 边坡开挖对土壤可蚀性与有机碳关系影响

土壤有机碳含量及团聚体是评价土壤抗蚀能力变化的重要指标。开挖率 7% 的边坡条件下,IV 区、V 区土壤团聚体及有机碳含量均受到显著影响,其中土壤团聚体及土壤可蚀性 K_s 呈 IV 区受影响低于 V 区,而 IV 区土壤有机碳含量受影响程度高于 V 区,因此 IV 区土壤抗蚀能力后期可能有降低趋势。为进一步探讨

边坡开挖对坡面土壤抗蚀性影响,分别对开挖率为 0,7%,100%条件下坡面土壤可蚀性 K_s 与有机碳和土壤团聚体 MWD 之间进行相关分析可得,不同开挖率下土壤可蚀性 K_s 与土壤团聚体 MWD 和有机碳含量之间均呈显著负相关,但随坡面开挖率增加,

土壤可蚀性 K_s 与团聚体 MWD 之间相关性变化不大,分别为 -0.96^{**} , -0.94^{**} , -0.99^{**} , 与有机碳之间随开挖率增加,其相关系数呈先减小后增大趋势,其中开挖率为 0,100%时,相关系数为 -0.93^{**} , -0.98^{**} , 而开挖率为 7%时,相关系数为 -0.71^{**} 。



注:不同大写字母表示各级坡位间差异显著,不同小写字母表示各土层间差异显著($p<0.05$)。

图 4 各坡位下土壤有机碳含量随深度变化分布

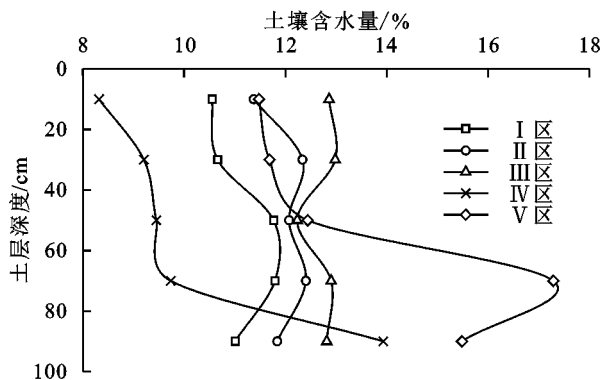


图 5 各坡位下土壤水分随深度变化分布(开挖坡面)

2.3.3 土壤可蚀性 K 公式修正 张科利等^[22]通过研究土壤可蚀性 K 实测值与 K_s 计算值之间关系指出, K_s 计算所得数值显著大于于实测值,但与实测值呈良好的 $K=0.00911+0.55066K_s$ 线型关系。因此为进一步准确探究边坡开挖对土壤抗蚀 K 值计算,将坡面开挖区近似认为开挖率 100%的坡面,对不同开挖率下坡面土壤可蚀性 K 和 K_s 之间比值与有机碳含量之间进行分析,结果由图 7 可得,与有机碳含量呈显著指数负相关,具体公式见式(3);同时随开挖率的增加,其公式参数呈减小趋势见图 8,并将

参数变化与开挖率之间的经验公式带入(3)式,得出坡面土壤可蚀性随开挖率变化公式(4),为今后开挖边坡土壤可蚀性 K 的计算提供方法。

$$K=K_s(-a\ln C+b) \quad (3)$$

$$K=K_s(-0.12e^{-0.114\ln C}+0.57e^{-0.04}) \quad (e>0) \quad (4)$$

式中: K 为土壤可蚀性值; C 为土壤有机碳含量; e 为边坡开挖率。式(3)和式(4)中,土壤可蚀性 K 和土壤有机碳分别与坡面开挖率呈复合函数关系,其中土壤可蚀性 K 值随开挖率的增大而增大,随有机碳含量的增大而减小,该公式为今后边坡开挖工程中,不同开挖率下土壤可蚀性 K 值的变化提供合理的预测。

3 讨论

3.1 边坡不同开挖率对各坡位土壤抗蚀性影响

边坡开挖显著影响土壤侵蚀环境,增加流域边坡土壤侵蚀风险,尤其在极端暴雨条件下更易引起所在流域边坡的冲刷与侵蚀。本研究表明,对照坡面土壤结构和抗蚀能力、土壤含水量及有机碳含量整体随坡位的降低呈逐渐增加趋势,这主要因为坡上部多属于侵蚀区,土层较薄,结构较差,而随坡位的逐渐降低,

被侵蚀的土壤逐渐在坡下部位沉降堆积,土层较厚,结构、养分较好,这与苏正安^[23]、周莉^[24]等研究结果相似;而通过对比发现,本研究开挖坡面随坡位的进一步降低,开挖区、坡下区土壤结构及抗蚀能力均明显变差,土壤含水量及有机碳含量显著降低。其中开挖区团聚体的稳定性及抗蚀能力受影响程度均高于坡下区,而在坡下区土壤含水量及有机碳含量受影响程度及深度却高于开挖区。这主要是因为沟道土地整治实施的过程中,机械及剧烈人为活动主要作用于开挖区,对开挖区植被及土壤的破坏扰动程度较大,

Tisdall 等^[25]指出人为扰动极易使得土壤大团聚体优先被破坏,从而直接导致开挖区土壤团聚体结构及稳定性下降,但由于沟道土地整治在开挖区内作用深度较浅,因此对土壤团聚体、有机碳含量等影响深度相对较浅。而在坡下区,由于对边坡的切削,使得坡下区下部为切削的裸露边坡,其边界效应严重影响了坡下区的土壤环境,从而导致了土壤含水量及有机碳含量均显著降低。由此可以看出边坡开挖率在 7% 条件下不仅显著影响开挖区土壤抗蚀能力,且极大程度增加了坡下区土壤侵蚀环境恶化。

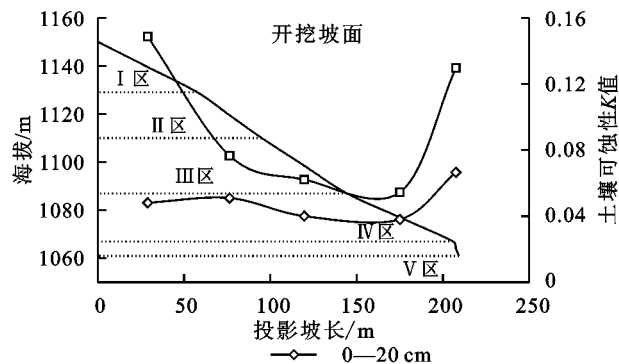
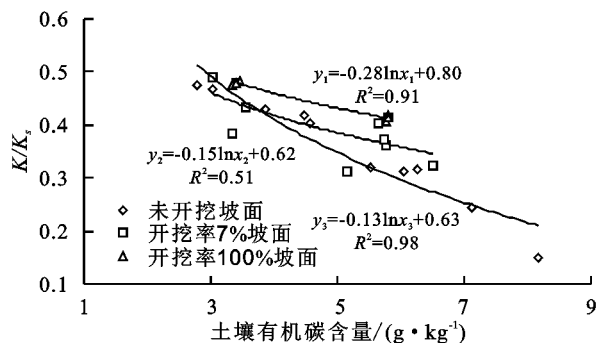
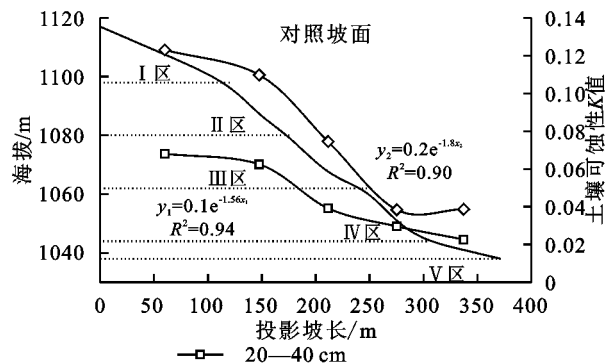


图6 各坡位土壤可蚀性 K_s 值变化



注: y_1 为未开挖坡面; y_2 为开挖率 7% 坡面; y_3 为开挖率 100% 坡面。

图7 土壤可蚀性 K 与有机碳相关关系

3.2 开挖边坡土壤抗蚀环境年恢复变化

边坡开挖显著影响土壤抗蚀能力各评价指标间相关关系,从而导致扰动后土壤的年恢复情况也发生相应的变化。其中开挖坡面及对照坡面土壤可蚀性 K_s 与土壤有机碳含量均呈显著相关。这是因为一方面土壤有机碳通过改善土壤质量及结构,增强土壤的抗侵蚀能力^[26],另一方面有机碳作为土壤中的亲水物质,其吸收水分的容量远大于土壤矿物,能够有效缓解水分湿润速度,减小团聚体的糊化作用^[27],Capriel 等^[28]认为团聚体之间及团聚体内部的空隙都为有机物的残体提供居住场所,称之为有机物填充作用(Infilling),Tisdall 等^[29]提出的黏粒包裹作用(Encrusting),强调是团聚体的形成是黏粒吸附在有机物表面,且团聚体的稳定性随着有机碳的矿化分解而逐渐降低。从而综合作用影响土壤抗侵蚀能力,

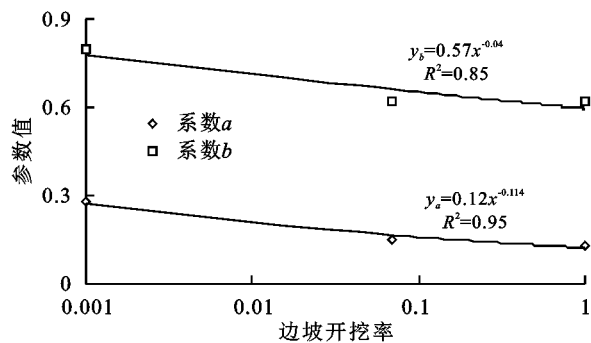
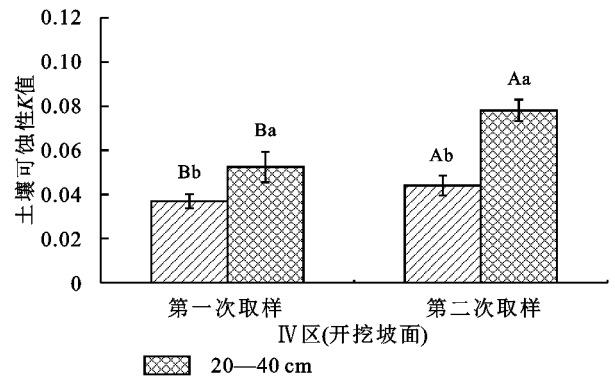
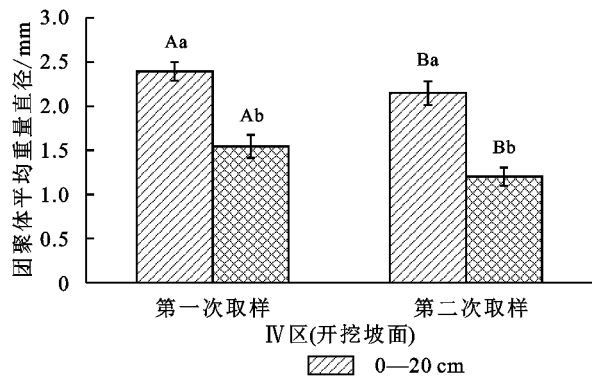


图8 土壤可蚀性 K 参数值与开挖率关系

然而通过相关系数对比发现,开挖坡面尤其是坡下区土壤团聚体稳定性及抗蚀能力受影响降低程度相对较小,而有机碳含量的极显著降低,导致开挖坡面土壤 K_s 与土壤有机碳之间相关性小于对照坡面和 100% 开挖坡面。从而在坡下区土壤可蚀性 K_s 有显著降低的风险。针对这一问题,对开挖坡面 IV 区于 2020 年 7 月进行二次采样验证,对坡下区 MWD 及 K_s 值进行分析,由图 9 可知,第二次采样土壤 MWD 较第一次显著降低 10.2%~22.2%, K_s 值显著增加 19.2%~49.0%。由此可得边坡开挖率为 7% 时,坡下区土壤水、土壤有机碳含量显著降低,极大程度增加了坡下区土壤侵蚀风险,因此在边坡防护过程中不仅应注重开挖区坡面稳定性的防护,还应增加坡下区土壤侵蚀风险的降低。



注:不同大写字母表示两次采样差异显著,不同小写字母表示各土层间差异显著($p < 0.05$)。

图9 二次采样指标对比图

3.3 开挖率对坡面土壤抗蚀性影响

土壤有机碳含量是土壤抗蚀能力的重要指标之一,而上文分析可得,短时间内在开挖率7%条件下,显著影响坡下区坡面的土壤有机碳及含水量,且随开挖率的不断增加,土壤有机碳与土壤抗蚀性之间的相关性先减小后增加,这主要是因为随开挖率越大,所产生的切削裸露面积越大,且多为高陡边坡,坡面植被覆盖较少,蒸发量较大,显著影响开挖面上方土体土壤水、温度等环境,尤其对深层水分补给产生较大影响,且越靠近开挖面受影响程度越高,同时有机碳与土壤结构及质量的关系是长期互相影响积累的过程^[30],因此短时间内开挖率越大,开挖面上方土体土壤有机碳含量与土壤可蚀性相关性越弱,后期土壤抗蚀能力变差,侵蚀风险越高;而在开挖率100%的条件下,其土壤团聚体和有机碳均同时受到显著影响,短时间内土壤有机碳含量与抗蚀能力同时显著降低,增加土壤侵蚀风险。因此在边坡开挖过程中,亟需针对的不同开挖率边坡采用不同范围土壤侵蚀防治措施,不仅在坡面上要考虑加固开挖面稳定性,还应注重坡面开挖区上部各坡位土壤侵蚀风险的降低,且越靠近开挖区,坡面土壤侵蚀风险越大。

4 结论

(1) 开挖率为7%的坡面,MWD在坡下区、开挖区相较于坡中区分别降低6%~8%和58%~73%;土壤有机碳含量在坡下区0—80 cm土层内显著降低8%~41%,开挖区0—40 cm内显著降低10%~39%,坡下区土壤有机碳及含水量受影响程度显著高于坡脚区,而坡脚区土壤结构及团聚体稳定性受影响程度显著高于坡下区。

(2) 土壤可蚀性 K_s 与土壤团聚体MWD和有机碳含量均呈显著负相关,但随坡面开挖率增加,土壤可蚀性 K_s 与团聚体MWD之间相关性变化不大,而与有机碳之间随开挖率增加其相关系数呈先减小

后增大趋势,开挖率为7%的坡面,坡下区土壤抗蚀性存在滞后效应。

(3) 通过增加开挖率及有机碳含量对坡面土壤抗蚀性影响,对土壤可蚀性 K 值的计算公式进行进一步的补充及修订,且开挖率越大,土壤可蚀性 K 值越大。

参考文献:

- [1] 刘彦随,李裕瑞.黄土丘陵沟壑区沟道土地整治工程原理与设计技术[J].农业工程学报,2017,33(10):9-17.
- [2] Li Peiyue, Qian Hui, Wu Jianhua. Environment: Accelerate research on land creation[J]. Nature, 2014, 510(7503):29-31.
- [3] Liu Y, Li Y. Environment: China, s land creation project stands firm[J]. Nature, 2014, 511(7510):410-410.
- [4] 贺春雄.延安治沟造地工程水毁成因及对策[J].陕西水利,2014(1):178-179.
- [5] 陈怡平,骆世明,李凤民,等.对延安黄土沟壑区农业可持续发展的建议[J].地球环境学报,2015,6(5):265-269.
- [6] Jin Zhao. The creation of farmland by gully filling on the Loess Plateau: a double-edged sword[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(2):883-884.
- [7] Li X, Gao J, Guo Z, et al. A Study of Rainfall-Runoff Movement Process on High and Steep Slopes Affected by Double Turbulence Sources. [J]. Scientific Report, 2020, 10(1):1-13.
- [8] 汪勇,刘瑾,张建忙.黄土边坡降雨入渗规律及其对稳定性的影响[J].中国煤炭地质,2017,29(1):48-52.
- [9] 王壮壮,黄强兵,刘悦,徐等.吕梁地区不同地层结构黄土边坡坡下开挖效应[J].科学技术与工程,2020,20(7):2590-2597.
- [10] 陈航,张慧莉,田堪良,等.紫穗槐根系对黄土边坡加固作用的试验研究[J].人民黄河,2017,39(10):84-88.
- [11] 薛强,张茂省,毕俊肇,等.开挖型黄土边坡剥落侵蚀作用及变形破坏研究[J].西北地质,2019,52(2):158-166.
- [12] Cerdà A. Soil aggregate stability under different Mediterranean vegetation types[J]. Catena, 1998, 32(2):73-86.
- [13] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.

- [14] van Bavel C H M. Mean weight-diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation[J]. Soil Science Society of America Journal, 1950, 14(C): 20-23.
- [15] Shirazi M A, Hart J W, Boersma L. A Unifying quantitative analysis of soil texture: improvement of precision and extension of scale[J]. Soil Science Society of America Journal, 1988, 52(1): 181-190.
- [16] 王秀颖, 高晓飞, 刘和平, 等. 土壤水稳性大团聚体测定方法综述[J]. 中国水土保持科学, 2011, 9(3): 106-113.
- [17] 钱婧, 张丽萍, 王文艳. 红壤坡面土壤团聚体特性与侵蚀泥沙的相关性[J]. 生态学报, 2018, 38(5): 1590-1599.
- [18] 赵金花, 张丛志, 张佳宝. 农田生态系统中土壤有机碳与团聚体相互作用机制的研究进展[J]. 中国农学通报, 2015, 31(35): 152-157.
- [19] 夏彬, 朱世硕, 郝旺林, 等. 黄土丘陵区土壤有机碳含量对侵蚀坡面表层土壤含水量时空变化的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(3): 175-181.
- [20] 胡伟, 邵明安, 王全九. 黄土高原退耕坡地土壤水分空间变异性研究[J]. 水科学进展, 2006, 17(1): 74-81.
- [21] 魏慧, 赵文武. 土壤可蚀性 K 值最优估算方法遴选: 以陕北安塞集水区为例[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(6): 52-65.
- [22] 张科利, 彭文英, 杨红丽. 中国土壤可蚀性值及其估算[J]. 土壤学报, 2007(1): 7-13.
- [23] 苏正安, 李艳, 熊东红, 等. 龙门山地震带坡耕地土壤侵蚀对有机碳迁移的影响[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 118-124.
- [24] 周莉, 李保国, 周广胜. 土壤有机碳的主导影响因子及其研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(1): 99-105.
- [25] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. European Journal of Soil Science, 1982, 33(2): 141-163.
- [26] 彭新华, 张斌, 赵其国. 红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响[J]. 生态学报, 2003, 23(10): 2176-2183.
- [27] Caron J, Espindola C R, Angers D A. Soil structural stability during rapid wetting: influence of land use on some aggregate properties[J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(3): 901-908.
- [28] Capriel P, Beck T, Borchert H, et al. Relationship between soil aliphatic fraction extracted with supercritical hexane, soil microbial biomass, and soil aggregate stability[J]. Soil Science Society of America Journal, 1990, 54(2): 415-415.
- [29] Tisdall J M, Smith S E, Rengasamy P. Aggregation of soil by fungal hyphae[J]. Soil Research, 1997, 35(1): 55-60.
- [30] 彭新华, 张斌, 赵其国. 土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 618-623.

(上接第 17 页)

- [22] Breiman L. Random forests[J]. Machine Learning, 2001, 45(1): 5-32.
- [23] 张雷, 王琳琳, 张旭东, 等. 随机森林算法基本思想及其在生态学中的应用: 以云南松分布模拟为例[J]. 生态学报, 2014, 34(3): 650-659.
- [24] 陈龙, 谢高地, 张昌顺, 等. 澜沧江流域土壤侵蚀的空间分布特征[J]. 资源科学, 2012, 34(7): 1240-1247.
- [25] 姚华荣, 崔保山. 澜沧江流域云南段土地利用及其变化对土壤侵蚀的影响[J]. 环境科学学报, 2006, 26(8): 1362-1371.
- [26] 丁杰, 杨新兵, 朱辰光, 等. 崇礼清水河流域土壤侵蚀空间格局及其影响因素研究[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 73-80.
- [27] 李宗勋, 李启艳, 侯晓龙, 等. 不同自然降雨等级下不同郁闭度马尾松林的水土流失特征[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 27-33, 40.
- [28] Ochoa P A, Fries A, Mejía D, et al. Effects of climate, land cover and topography on soil erosion risk in a semiarid basin of the Andes[J]. Catena, 2016, 140: 31-42.

(上接第 22 页)

- [15] 史学建, 王玲玲, 杨吉山, 等. 基于淤地坝沉积信息的流域土壤侵蚀模数估算[J]. 人民黄河, 2019, 41(2): 103-106.
- [16] 水利部黄河水利委员会. 中华人民共和国水文年鉴: 黄河流域水文资料(2017年第4卷)[Z]. 北京: 水利部黄河水利委员会, 2018.
- [17] 方学敏, 万兆惠, 匡尚富. 黄河中游淤地坝拦沙机理及作用[J]. 水利学报, 1998(10): 50-54.
- [18] 刘晓燕, 高云飞, 马三保, 等. 黄土高原淤地坝的减沙作用及其时效性[J]. 水利学报, 2018, 49(2): 145-155.
- [19] 高云飞, 郭玉涛, 刘晓燕, 等. 陕北黄河中游淤地坝拦沙功能失效的判断标准[J]. 地理学报, 2014, 69(1): 73-79.
- [20] 冉大川, 李占斌, 申震洲, 等. 泾河流域淤地坝拦沙对降雨的响应分析[J]. 西安理工大学学报, 2010, 26(3): 249-254.
- [21] 方学敏, 曾茂林. 黄河中游淤地坝坝系相对稳定研究[J]. 泥沙研究, 1996(3): 12-20.