

## 工程扰动对黄土抗蚀性与抗冲性的影响

王 龙<sup>1,2</sup>, 张连科<sup>3</sup>, 马伊明<sup>3</sup>, 杜 峰<sup>1,2,4</sup>, 徐学选<sup>1,2,4</sup>

(1.中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院大学, 北京 100049;  
3.甘肃省科学院地质自然灾害防治研究所, 兰州 730000; 4.西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:** 为研究工程扰动对黄土抗蚀性和抗冲性的影响, 以兰州市城关区北山为研究区, 选取1年填方样地(T1a)、5年填方样地(T5a)、7年挖方样地(W7a)和天然草地(C)4个样地采集原状土样, 在室内使用干筛—湿筛法测定土壤团聚体相关指标研究土壤抗蚀性, 用抗冲槽研究土壤抗冲性, 并分析了影响土壤抗蚀性和抗冲性的因素。结果表明, 各样地表层(0—10 cm)土壤水稳性团聚体的平均质量直径( $MWD_w$ )和 $>0.25$  mm 团聚体占比( $w_{(\delta>0.25)w}$ )表现为  $C>W7a>T5a>T1a$ , 土壤团聚体破坏率(PAD)表现为  $T1a>T5a>W7a>C$ , 挖填方样地表层土壤水稳性团聚体颗粒分形维数( $D_w$ )均值为2.82, C样地  $D_w$  为2.74, C样地表层土壤的抗蚀性显著强于挖填方样地; T5a和W7a样地中下层土壤(10—20, 20—30 cm)  $MWD_w$  和  $w_{(\delta>0.25)w}$  显著低于表层土壤; 各样地表层土壤抗冲系数为  $W7a>C>T5a>T1a$ , W7a和C样地的值较为接近。影响土壤抗蚀性与抗冲性的主要因素有土壤电导率、有机质和根系, 土壤生物结皮也会影响土壤抗冲性。这些影响因素与挖填方样地搁置年限密切相关, 即随着挖填方样地搁置年限增长, 这些因素逐渐发生变化, 有益于受扰动土壤  $MWD_w$  和  $w_{(\delta>0.25)w}$  的增加以及 PAD 的降低, 其表层土壤的冲刷强度慢慢接近草地。工程扰动显著降低黄土的抗蚀性和抗冲性, 应当做好必要的水土保持措施以降低土壤侵蚀风险。

**关键词:** 挖填方场地; 天然草地; 抗蚀性; 抗冲性; 兰州

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)04-0014-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2021.04.003

## Influence of Engineering Disturbance on Soil Anti-Erodibility and Anti-Scourability of Loess

WANG Long<sup>1,2</sup>, ZHANG Lianke<sup>3</sup>, MA Yiming<sup>3</sup>, DU Feng<sup>1,2,4</sup>, XU Xuexuan<sup>1,2,4</sup>

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049;  
3. Geological Hazards Prevention Research Institute, Gansu Academy of Sciences, Lanzhou 730000;  
4. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100)

**Abstract:** In order to study the influence of engineering disturbance on the soil anti-erodibility and anti-scourability of loess, taking Beishan, Chengguan District, Lanzhou City as the study area, the undisturbed soils were sampled from four plots: 1-year filled plot (T1a), 5-year filled plot (T5a), 7-year dug plot (W7a) and natural grassland plot (C). In the laboratory, the dry-wet sieve method was used to determine the soil aggregate related indicators to study the soil anti-erodibility, and the anti-scour trough was used to study the soil anti-scourability, and the factors affecting the soil anti-erodibility and anti-scourability were analyzed. The results showed that the mean weight diameter of soil water-stable aggregates ( $MWD_w$ ) and the proportion of aggregates  $>0.25$  mm ( $w_{(\delta>0.25)w}$ ) of the surface layer (0—10 cm) of each sample surface showed  $C>W7a>T5a>T1a$ . The soil percentage of aggregates destruction (PAD) showed  $T1a>T5a>W7a>C$ . The average of soil water stable aggregates fractal dimension ( $D_w$ ) in the surface layer of dug and filled plots was 2.82, the  $D_w$  of C plot was 2.74. The anti-erodibility of the surface layer soil of the C was significantly stronger than those of the dug and filled sites. The  $MWD_w$  and  $w_{(\delta>0.25)w}$  of the middle and lower soil (10—20 cm and

收稿日期: 2021-01-13

资助项目: 甘肃省科学院应用研究与开发项目(2019-JK-07); 国家自然科学基金项目(41977426, 41771322)

第一作者: 王龙(1995—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤水分运移与生态修复研究。E-mail: wanglong18@mailsucas.ac.cn

通信作者: 张连科(1980—), 男, 副研究员, 主要从事地质灾害和水土保持研究。E-mail: lk.zhang@gsas.ac.cn

徐学选(1966—), 男, 博士, 研究员, 主要从事土壤水分生态研究。E-mail: xuxuexuan@nwsuaf.edu.cn

20—30 cm) of the T5a and W7a plots were significantly lower than those of the surface layer soil. The surface soil anti-erosion coefficients of each sample showed  $W7a > C > T5a > T1a$ , and the values of W7a and C sample plots were relatively close. Soil electrical conductivity, organic matter and root system were the main factors affecting soil anti-erodibility and soil anti-scourability. In addition, soil biological crusts could also affect soil anti-scourability. These factors are closely related to the shelving years of dug and filled plots. This means, these factors gradually change as the shelving time of dug and filled plots increases, which is beneficial to the increase of  $MWD_w$  and  $w_{(\theta > 0.25)w}$ , and the decrease of PAD of disturbed soil, and the scouring intensity of surface soil is close to that of natural grassland. Engineering disturbance would significantly reduce the soil anti-erodibility and soil anti-scourability of loess, and necessary water and soil conservation measures should be taken to reduce the risk of soil erosion.

**Keywords:** dug and filled site; natural grassland; anti-erodibility; anti-scourability; Lanzhou

黄土土质疏松,养分差,黄土分布区地表植被覆盖度低,土壤易侵蚀,生态脆弱。近年来我国城市化进程加剧,大面积的工程扰动使黄土分布区面临更多挑战。尤其黄土高原一些条带状河谷城市的扩张受其地形影响严重,早已开始了削山造地,这种极大面积的工程扰动可能会加大土壤侵蚀风险。甘肃兰州削山造地工程略晚于陕西延安,诸多研究者<sup>[1-2]</sup>认为,削山造地工程的可行性已经得到科学的论证,分层碾压的填方工艺可以有效解决黄土沉降问题。2013年7月延安发生罕见强降雨后,削山造地工程有21%的面积受损严重,贺春雄<sup>[3]</sup>认为,削山造地工程提高了抵抗自然灾害的能力;张明泉等<sup>[4]</sup>关于兰州削山造地做出预测认为,水土流失量将比原地貌增加10%;杨小威<sup>[5]</sup>研究认为,削山造地工程使地表结皮遭受破坏,易造成土壤侵蚀。可见,对于削山造地这种大型工程扰动是否会加大土壤侵蚀风险并不能达成一致。

影响土壤侵蚀的因素中,土壤因素是最直接、直观的因素,土壤抗蚀性和抗冲性又是土壤因素的重要方面。有研究<sup>[6-7]</sup>发现,植物根系和土层深度显著影响土壤的抗蚀性;多数研究<sup>[8-12]</sup>表明, $>0.25$  mm水稳性团聚体含量、水稳性团聚体平均质量直径、团聚体破坏率和水稳性团聚体颗粒分形维数是体现土壤抗蚀性的重要指标。土壤抗冲性的评价指标主要有抗冲系数<sup>[13]</sup>和冲刷耗能<sup>[14]</sup>,目前绝大多数研究都在使用抗冲系数这一指标。李强等<sup>[15]</sup>的研究显示,土壤水稳性团聚体含量和根系是影响土壤抗冲性的主要因素,表层土壤还受到土壤容重的影响;也有研究<sup>[16-18]</sup>表明,土壤结皮的形成也能有效提高土壤抗冲性。

目前,国内外关于不同土地利用类型土壤抗蚀性和抗冲性的研究较多,但关于工程扰动对土壤抗蚀性和抗冲性的研究较少。为探究工程扰动对黄土抗蚀性和抗冲性的影响,本研究以兰州北山削山造地工程

区为研究区,对挖填方样地和天然草地的土壤抗蚀性和抗冲性进行研究。黄土高原地区在面临城市发展和生态保护重大挑战的今天,研究结果可为黄土高原的城市扩展可行性评估提供一定的理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省兰州市城关区北山直岔沟至石沟村一带,为兰州新城项目典型的挖填方区域( $103^{\circ}53'—103^{\circ}57'E, 36^{\circ}04'—36^{\circ}08'N$ ),总面积约33 km<sup>2</sup>(图1)。该研究区地貌类型为黄土丘陵沟壑区,海拔1 600~2 000 m,属于温带半干旱大陆性季风气候,降水少,蒸发强,年均降水量330 mm,最大小时雨强51.9 mm,年均蒸发量1 600 mm,年均气温7.7℃,全年日照时间约2 490 h,无霜期190天左右,平均冻土0.8 m,年平均风速0.94 m/s,盛行风向为偏东风。土壤为马兰黄土母质发育成的灰钙土,pH为8~9,偏盐碱性土。平均年径流深18.3 mm,土壤侵蚀模数1 500 t/(km<sup>2</sup>·a),黄河兰州段多年平均输沙率 $0.86 \times 10^8$  t。

### 1.2 样地概况

在研究区内共选择4个样地,分别为1年填方场地(T1a)、5年填方场地(T5a)、7年挖方场地(W7a)和天然草地(C),分布位置见图1。挖方场地和填方场地指在挖填方工程后未经任何人为生态修复措施的场地,挖方时多采用1 m<sup>3</sup>反铲挖机开挖,填方时每30 cm用5~7 t羊足碾分层碾压。天然草地指原始地貌下未经人为破坏和干扰自然生长的草地。所有样地均位于山顶平处或宽阔平地。样地概况见表1。各样地基本物理化学和生物指标见表2。

### 1.3 试验方法

土壤样品采集于2020年8月5—25日,分析试验安排于2020年9月10日至10月9日。

土壤抗蚀性通过土壤团聚体相关指标来反映。土壤团聚体样品采集使用分层采样法,分别采集表层

(0—10 cm)、中层(10—20 cm)和下层(20—30 cm)土壤样品,为 3 个重复,每个样品取约 500 g 土。采用干筛—湿筛法把土样筛分为 $>5, 2\sim 5, 1\sim 2, 0.25\sim 1, <0.25$  mm 的各粒级土壤团聚体,称重并计算各粒级质量百分比。

土壤抗冲性采用室内抗冲槽放水冲刷法测定。在每个样地按网格采样法使用 200 cm<sup>3</sup> 环刀( $\Phi 70$  mm $\times$ 52 mm)采集表层原状土样 30~50 个备用,把样品带回后打开环刀上盖让其自然风干,在冲刷试验前 1 天放入水中浸泡 4 h 使其饱和,注意水面不要淹过环刀上口,然后将浸泡好的样品静置在篮子上 12 h 使其排出重力水待测。抗冲槽坡度设置在 20°,单宽流量设置为 4 800 L/(h $\cdot$ m),为 4 mm/min 雨强在 20 m $\times$ 5 m 的标准小区上全部产流的单宽流量,冲刷时间设置为 3 min。冲下来的泥沙需过滤烘干称重。W7a 和 C 2 个样地样品中各选取 16 个表面结

皮完整并无明显根系的样品,去除中央 2 cm<sup>2</sup> 的结皮进行冲刷,用于研究土壤结皮对土壤冲刷量的影响。

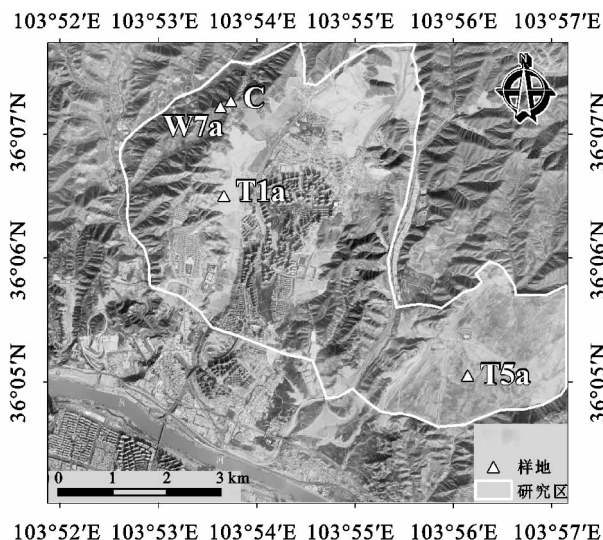


图 1 研究区概况及样地分布

表 1 样地概况

样地名称	样地编号	海拔/m	植被密度/(株 $\cdot$ m <sup>-2</sup> )	群落结构
1 年填方场地	T1a	1660	0.8	白茎盐生草
5 年填方场地	T5a	1620	4.7	白茎盐生草+狗尾草+冰草
7 年挖方场地	W7a	1750	6.2	红砂+多裂骆驼蓬+锦鸡儿
天然草地	C	1780	9.5	长芒草+多裂骆驼蓬

注:白茎盐生草(*Halogeton arachnoideus* Moq.),狗尾草(*Setaria viridis* (L.) P. Beauv.),冰草(*Agropyron cristatum* (L.) Gaertn.),红砂(*Reaumuria soongarica* (Pall.) Maxim.),多裂骆驼蓬(*Peganum multiseptum* (Maxim.) Bobrov),锦鸡儿(*Caragana sinica* (Buc'hoz) Rehd.),长芒草(*Stipa bungeana* Trin.).

表 2 各样地土壤物理化学与生物指标

样地	土层深度/cm	砂粒/%	粉粒/%	黏粒/%	土壤质地	容重/(g $\cdot$ cm <sup>-3</sup> )	电导率/( $\mu$ S $\cdot$ cm <sup>-1</sup> )	有机质/(g $\cdot$ kg <sup>-1</sup> )	根系生物量/(g $\cdot$ m <sup>-3</sup> )
T1a	0—10	41.93	35.84	22.23	L	1.29Bb	1145Ca	4.08Ac	33b
	10—20	44.11	35.35	20.53	L	1.34ABb	1731Aa	4.30Ac	—
	20—30	46.47	33.88	19.66	L	1.39Ab	1584Bb	4.62Ab	—
T5a	0—10	38.41	38.10	23.50	L	1.44Aa	651Cbc	5.46Ac	577b
	10—20	49.32	32.16	18.52	L	1.49Aa	1126Bb	4.68Bc	—
	20—30	42.68	36.09	21.23	L	1.53Aa	1827Aa	3.49Cc	—
W7a	0—10	54.65	28.70	16.64	SL	1.39Aa	733Bb	10.01Bb	384b
	10—20	47.75	32.80	19.45	L	1.42Aab	781Ad	10.88Ab	—
	20—30	53.22	28.42	18.36	SL	1.39Ab	707Bc	3.50Cc	—
C	0—10	46.13	33.72	20.15	L	1.14Ac	628Bc	13.90Aa	2611a
	10—20	44.09	35.38	20.53	L	1.21Ac	864Ac	14.56Aa	—
	20—30	45.43	34.03	20.54	L	1.13Ac	478Cd	13.33Aa	—

注:土壤质地分类采用美国土壤质地分类法,砂粒粒径为 0.02~2 mm,粉粒粒径为 0.002~0.02 mm,黏粒粒径为 $<0.002$  mm,L 指壤土(loam),SL 指砂壤土(sandy loam);数据后大写字母表示同一样地不同土层深度间差异显著( $P<0.05$ ),小写字母表示同一土层深度不同样地间差异显著( $P<0.05$ )。下同。

#### 1.4 土壤抗蚀性与抗冲性相关指标计算方法

土壤抗蚀性指标中土壤团聚体平均质量直径(mean weight diameter)用 MWD 表示,单位 mm,团聚体颗粒分形维数(fractal dimension)用  $D$  表示,团聚体破坏率(percentage of aggregates destruction)

用 PAD 表示,单位%。各指标计算方法为:

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n (\bar{d}_i w_i) \quad (1)$$

$$D = 3 - \left[ \lg \frac{w_{(\delta \leq \bar{d}_i)}}{w_0} / \lg \frac{\bar{d}_i}{d_{\max}} \right] \quad (2)$$

$$\text{PAD} = \frac{M_d - M_w}{M_d} \times 100\% \quad (3)$$

式中:  $\bar{d}_i$  为第  $i$  粒级平均直径(mm);  $w_i$  为第  $i$  粒级颗粒质量百分比(%);  $w_{(\leq \bar{d}_i)}$  为粒径  $\leq \bar{d}_i$  的颗粒质量百分比(%);  $w_0$  为所有粒级颗粒质量百分比, 即为 100(%);  $d_{\max}$  为最大粒径, 即 10 mm;  $M_d$  为样品干筛后颗粒直径  $\geq 0.25$  mm 的质量百分比(%);  $M_w$  为样品湿筛后颗粒直径  $\geq 0.25$  mm 的质量百分比(%)。

土壤抗冲性指标抗冲系数(anti-scourability)用 AS 表示, 即冲刷掉 1 g 土壤所用的水量(L/g), 计算方法为:

$$\text{AS} = \frac{Q}{M_s} \quad (4)$$

式中:  $Q$  为冲刷水量(L);  $M_s$  为冲刷掉的土壤质量(g)。

## 1.5 数据分析

数据分析与处理采用 Microsoft Office 2019 Excel 以及 IBM SPSS Statistics 21 软件, 绘图采用 Origin 2021 软件。差异显著性分析使用 Duncan 法, 相关性分析采用 Pearson 相关性方法。

## 2 结果与分析

### 2.1 挖填工程引起的土壤抗蚀性差异

图 2(a) 为干筛后土壤团聚体平均质量直径( $\text{MWD}_d$ ), 挖填方样地(T1a、T5a 和 W7a)的值为 4~6 mm, 天然草地(C)的值为 2~3 mm, 挖填方样地的值明显高于样地 C; 中层(10—20 cm)土壤  $\text{MWD}_d$  大小顺序为 W7a>T5a>T1a>C; W7a 样地表层(0—10 cm)土壤  $\text{MWD}_d$  显著小于中层土壤和下层(20—30 cm)土壤。图 2(b) 为湿筛后水稳性团聚体平均质量直径( $\text{MWD}_w$ ), 挖填方样地中下层土壤  $\text{MWD}_w$  的值均在 0.4 mm 以下, 远小于  $\text{MWD}_d$ , C 的值在 2 mm 左右, 小于其  $\text{MWD}_d$  的值, 但相差较小; T5a 和 W7a 样地表层土壤  $\text{MWD}_w$  显著大于中下层土壤; 表层土壤  $\text{MWD}_w$  大小顺序为 C>W7a>T5a>T1a, 挖填方样地随着搁置时间的增长, 表层土壤  $\text{MWD}_w$  呈逐渐增加趋势, 与天然草地的差异逐渐减小, 但中下层土壤  $\text{MWD}_w$  皆远低于天然草地。图 2(c) 为干筛后土壤团聚体颗粒分形维数( $D_d$ ), 挖填方样地  $D_d$  的值约为 2.6, 样地 C 的  $D_d$  约为 2.7, 其中样地 C 中下层土壤的  $D_d$  显著高于挖填方样地。图 2(d) 为湿筛后水稳性团聚体颗粒分形维数( $D_w$ ), 挖填方样地  $D_w$  的值为 2.8~2.9, C 样地  $D_w$  的值为 2.7~2.8, C 样地显著小于挖填方样地; T5a 和 W7a 样地表层土壤  $D_w$  的值显著小于中下层土壤; 随着搁置年限的增加, 挖填方样地表层土壤  $D_w$  的值有减小的趋势, 并逐渐趋近于 C 样地。 $\text{MWD}_w$  和  $D_w$  是土壤抗蚀性的指标,  $\text{MWD}_w$  越

大,  $D_w$  越小, 则抗蚀性越强。就各样地表层土壤而言,  $\text{MWD}_w$  和  $D_w$  反映的抗蚀性为 C>W7a>T5a>T1a。T5a 和 W7a 样地表层土壤抗蚀性显著高于中下层土壤, 挖填方样地中下层土壤抗蚀性均较差, 远不及 C 样地。 $\text{MWD}_d$  的值比  $\text{MWD}_w$  偏大,  $D_d$  的值比  $D_w$  偏小, 尤其挖填方样地的干筛和湿筛结果相差较大, 这也从另一方面表明挖填方样地土壤抗蚀性差。

图 3 中挖填方样地团聚体破坏率(PAD)较高, 除表层土壤外, 均>90%, C 样地 PAD 较低, 约为 40%, 不及挖填方场地的 1/2; T5a 和 W7a 样地土壤 PAD 最低值均在表层, 与中下层土壤的差异显著, T1a 和 C 样地各土层 PAD 无显著差异; 不同样地表层土壤 PAD 的大小排序为 T1a>T5a>W7a>C; 挖填方样地随着搁置时间的增长, 表层土壤 PAD 值逐步变小, 而中下层土壤 PAD 值几乎没有发生任何改变; C 样地 PAD 值整体上显著小于挖填方样地。PAD 能直观反映土壤抗蚀性, PAD 越小, 表明土壤抗蚀性越强, 对表层土壤而言, PAD 反映的土壤抗蚀性为 C>W7a>T5a>T1a。挖填方样地中下层土壤抗蚀性均较差, 远弱于 C 样地, 说明挖填方场地在试验观测年限内随着搁置年限的增长, 只有表层土壤能得到一定程度的恢复, 但与天然草地的差异始终较大。

本研究结果均显示, 中下层土壤抗蚀性指标在挖填方样地间没有显著差异, 只有表层土壤差异明显。图 4 为各样地表层土壤分别在干筛和湿筛后不同粒级团聚体含量的占比情况。干筛后挖填方样地 >0.25 mm 团聚体占比 [ $w_{(\geq 0.25)d}$ ] 为 70%~80%, 但湿筛后其占比 [ $w_{(\geq 0.25)w}$ ] 均不及 20%; C 样地  $w_{(\geq 0.25)d}$  不及挖填方样地, 但  $w_{(\geq 0.25)w}$  远高于挖填方样地; 随着搁置年限的增加, 挖填方样地表层土壤  $w_{(\geq 0.25)w}$  有明显增加的趋势, 即使 W7a 样地的值不及 C 样地的 1/2。 $w_{(\geq 0.25)w}$  通常作为土壤抗蚀性的指标之一, 其值越大代表抗蚀性越强, 各样地表层土壤  $w_{(\geq 0.25)w}$  的大小顺序为 C>W7a>T5a>T1a。

表 3 为各样地表层土壤抗蚀性指标差异。挖填方样地  $\text{MWD}_w$  与  $w_{(\geq 0.25)w}$  显著低于 C 样地,  $D_w$  与 PAD 显著高于 C 样地, 所以其抗蚀性显著弱于 C 样地。从  $\text{MWD}_w$  来看, C 样地的值是 T1a 的 7.2 倍, 是 T5a 的 3 倍, 是 W7a 的 1.7 倍。从  $w_{(\geq 0.25)w}$  来看, 挖填方样地的值均小于 20%, 不及 C 样地的 1/2, T1a 样地的值甚至不及 C 样地的 1/10。挖填方样地  $D_w$  的均值为 2.82, C 样地  $D_w$  的值为 2.74, 差异显著。从 PAD 来看, 挖填方样地 PAD 值极大, 为 70%~90%, 为 C 样地的 2~3 倍。综合来看, 4 个样地表层土壤抗蚀性为 C>W7a>T5a>T1a, 挖填方样地土壤抗蚀性显著低于天然草地, 可见工程扰动会显著降低黄土的抗蚀性。

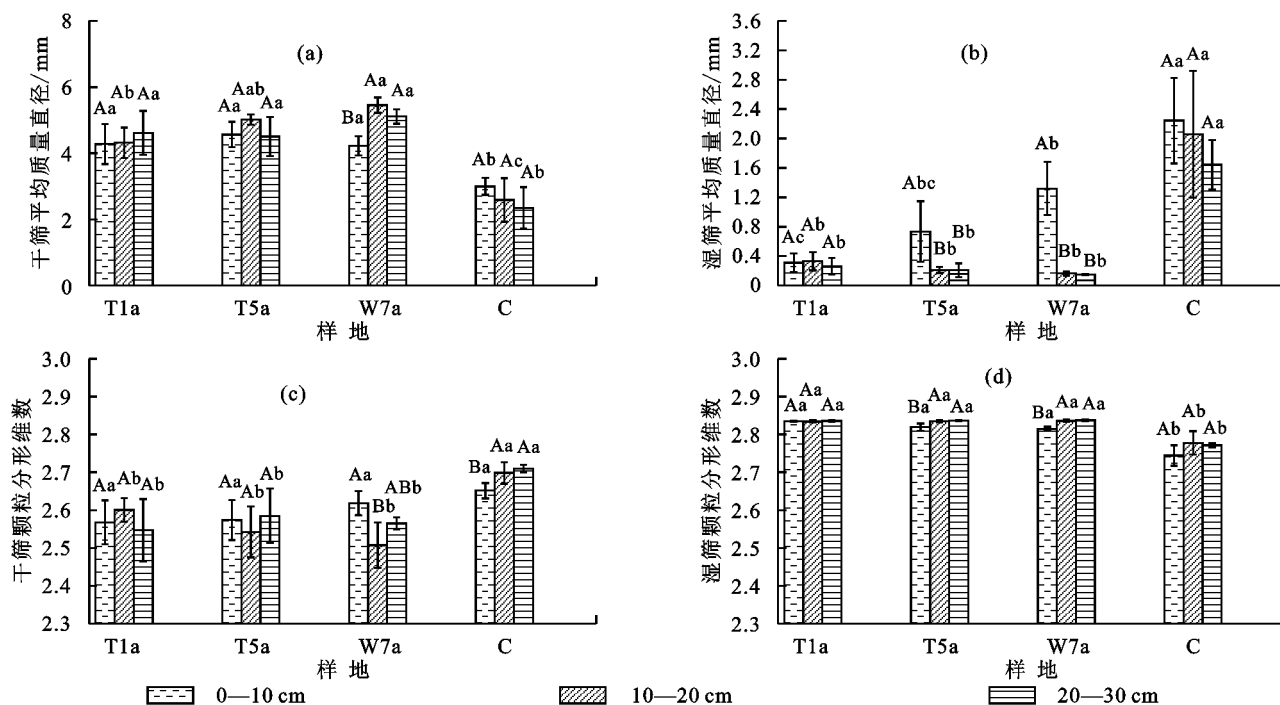


图 2 不同样地不同土层土壤团聚体平均质量直径与团聚体颗粒分形维数

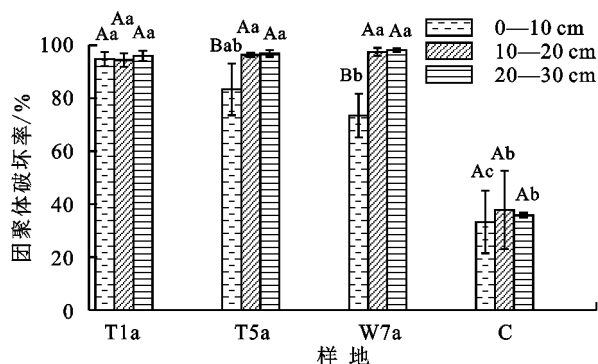


图 3 团聚体破坏率

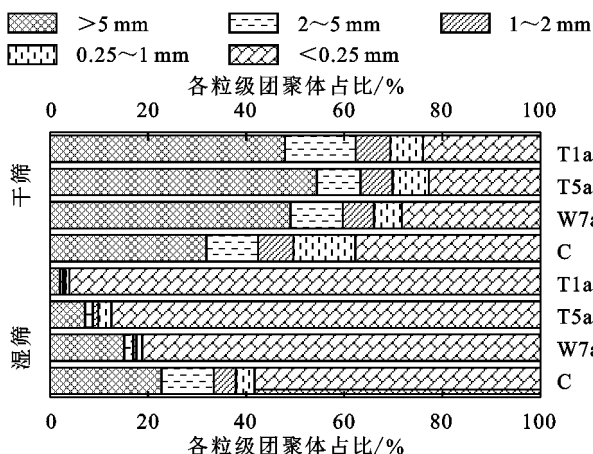


图 4 表层土壤各粒级团聚体占比

表 3 4 个样地表层土壤抗蚀性指标差异

样地	$MWD_w/mm$	$w_{(\delta>0.25)w}/\%$	$D_w$	$PAD/\%$
T1a	$0.31 \pm 0.13c$	$3.92 \pm 1.68c$	$2.83 \pm 0.0a$	$94.70 \pm 2.68a$
T5a	$0.74 \pm 0.41bc$	$12.52 \pm 6.31bc$	$2.82 \pm 0.01a$	$83.32 \pm 9.78ab$
W7a	$1.32 \pm 0.36b$	$18.83 \pm 4.67b$	$2.82 \pm 0.01a$	$73.42 \pm 8.26b$
C	$2.24 \pm 0.58a$	$41.72 \pm 8.90a$	$2.74 \pm 0.03b$	$33.29 \pm 11.80c$

## 2.2 挖填工程引起的土壤抗冲性差异及其影响因素

图 5(a)为不同样地表层土壤的冲刷量, T1a 的冲刷量显著高于其他样地, 达到 176.43 g, T5a、W7a 和 C 的土壤冲刷量差异不显著, 依次为 9.22, 0.34, 0.35 g。图 5(b)为各样地的抗冲系数(AS), 即冲刷量数据均值的倒数与冲刷水量的乘积, 可以看出, 4 个样地 AS 的大小次序为  $W7a > C > T5a > T1a$ , W7a 和 C 样地的 AS 接近。

T5a、W7a 和 C 3 个样地地表有明显的生物结皮, 冲刷试验中仅对 W7a 和 C 样地分析了地表结皮对土壤抗冲性的影响。结果显示, W7a 和 C 样地结皮被破坏样品的冲刷量显著大于表面完整样品(图 6)。T1a 样地没有生物结皮, 生长的植被种类较为单一, 多为 1 年生植物, 用这样的样地研究植物根系对土壤冲刷量的影响可以很好地规避其他因素的影响。结果显示, T1a 样地无根系样品的冲刷量为 206.04 g, 显著大于有根系的样品(142.91 g)(图 7)。可见, 生物结皮和植物根系可显著影响土壤的抗冲性。综合来看, 工程扰动降低原始地貌表土层土壤的抗冲性, 但随着工程扰动后地块搁置时间的增长, 土壤的抗冲性在植物根系和生物结皮的影响下逐渐增强。

表 4 对 4 个样地表层土壤抗蚀性相关指标、抗冲性相关指标、基本理化指标和根系生物量进行相关性分析。结果显示, 5 个土壤抗蚀性与抗冲性指标之间,  $MWD_w$  与  $w_{(\delta>0.25)w}$  呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),  $D_w$  与  $PAD$  呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),  $MWD_w$  与  $PAD$  呈极显著负相关( $P < 0.01$ ), 以上相关系数绝对

值均大于 0.90;  $M_s$  与 PAD 呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 相关系数为 0.59, 与  $MWD_w$  和  $w_{(\delta > 0.25)w}$  均呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ), 相关系数分别为  $-0.64$ ,  $-0.63$ 。  $MWD_w$  与  $MWD_d$  呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ ), 与  $D_d$  呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 与土壤容重呈负相关但

未达到显著性, 与土壤电导率呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ), 与土壤有机质和根系生物量呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 相关系数达到 0.80。 土壤冲刷量与土壤电导率呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 相关系数高达 0.96, 与土壤有机质呈显著负相关 ( $P < 0.05$ )。

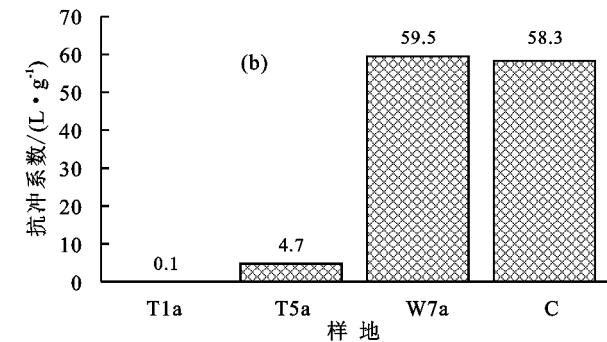
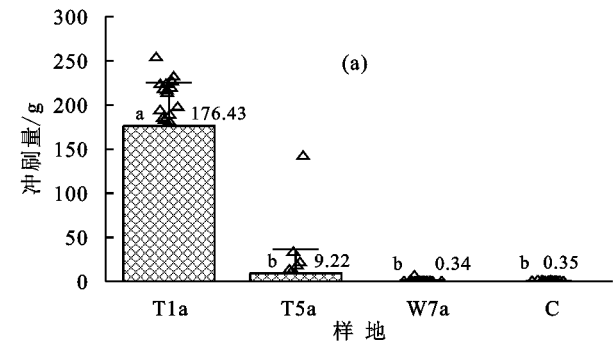


图 5 不同样地土壤冲刷量与抗冲系数

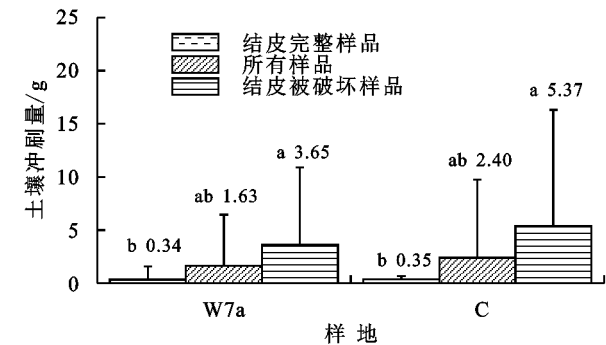


图 6 W7a 和 C 不同样品土壤冲刷量

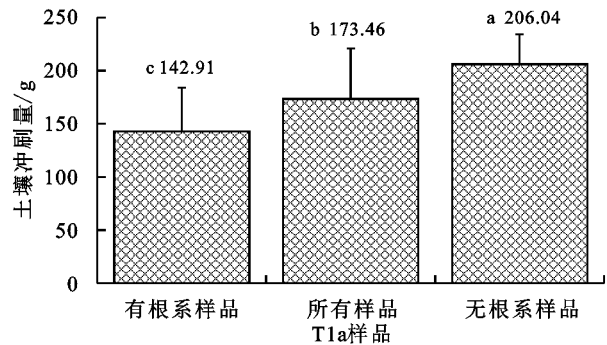


图 7 T1a 样地不同样品土壤冲刷量

表 4 相关性分析

项目	$D_w$	PAD	$w_{(\delta > 0.25)w}$	$M_s$	$MWD_d$	$D_d$	$\rho_b$	EC	SOM	$Rb$
$MWD_w$	$-0.91^{**}$	$-0.97^{**}$	$0.98^{**}$	$-0.64^*$	$-0.79^{**}$	$0.72^{**}$	$-0.46$	$-0.66^*$	$0.80^{**}$	$0.84^{**}$
$D_w$	1	$0.98^{**}$	$-0.97^{**}$	0.52	$0.85^{**}$	$-0.59^*$	0.52	$0.59^*$	$-0.83^{**}$	$-0.96^{**}$
PAD		1	$-0.99^{**}$	$0.59^*$	$0.86^{**}$	$-0.70^*$	0.55	$0.64^*$	$-0.85^{**}$	$-0.93^{**}$
$w_{(\delta > 0.25)w}$			1	$-0.63^*$	$-0.83^{**}$	$0.69^*$	$-0.50$	$-0.67^*$	$0.84^{**}$	$0.92^{**}$
$M_s$				1	0.25	$-0.44$	$-0.02$	$0.96^{**}$	$-0.63^*$	$-0.50$

注:  $MWD_w$  为水稳性团聚体平均质量直径;  $D_w$  为水稳性团聚体颗粒分形维数; PAD 为团聚体破坏率;  $w_{(\delta > 0.25)w}$  为  $>0.25$  mm 水稳性团聚体占比;  $M_s$  为土壤冲刷量;  $MWD_d$  为干筛团聚体平均质量直径;  $D_d$  为干筛团聚体颗粒分形维数;  $\rho_b$  为土壤容重; EC 为土壤电导率; SOM 为土壤有机质;  $Rb$  为根系生物量; \* 表示  $P < 0.05$  水平显著; \*\* 表示  $P < 0.01$  水平显著。

3 讨论

工程扰动使原地貌土壤抗蚀性减弱,其主要原因是工程扰动使原地貌地表长期发育成的土壤变成不适合植物生长的生土,生土的熟化在没有人干预的情况下是一个缓慢的过程,需要植被的恢复和有机质的积累。土壤有机质与根系生物量对土壤抗蚀性起促进作用,这在陈文媛等<sup>[19]</sup>、吴彦等<sup>[20]</sup>和白秀梅等<sup>[6]</sup>的研究中已分别得到证实,  $\leq 1$  mm 的须根和腐殖质在其中起主要作用,能使土壤中的大团聚体增加。除此之外,较高的土壤电导率对土壤抗蚀性起抑制作用,这在以往的研究中涉及较少。土壤电导率能代表土壤盐分<sup>[21]</sup>,土壤盐含量高于正常水平会限制植物的生长,从而限制土壤中有机质的形成,进而影响土

壤抗蚀性的提高<sup>[22-23]</sup>。兰州降水少而集中,降水过程极易让表层土壤盐分发生淋溶而降低,气候长期干旱,土壤毛管水容易断裂,底层盐分较难再次富集在土壤表层,地表径流和植物吸收作用也能使土壤盐分降低。挖填方样地随着搁置年限的增长,高盐分胁迫作用逐渐减弱,有利于植被的生长,土壤抗蚀性不断提升。干筛的土壤团聚体平均质量直径、分形维数和  $>0.25$  mm 团聚体占比与湿筛结果的差异较大,尤其是挖填方样地,这可能是有机质含量低和盐分含量高引起的土壤板结以及工程碾压形成的结果,而且干筛过程没有水的参与,团聚体机械稳定性强并不能代表抗蚀性强。干筛和湿筛结果的差异能更直观地反映出工程扰动可明显降低原地貌黄土的抗蚀性。挖填

方样地表土层土壤的抗蚀性强于中下层土壤,这与马西军等<sup>[7]</sup>的研究结果一致,但原地貌天然草地并不能得出此结论,这可能是由于取样深度不同所致。

本研究中土壤冲刷量与土壤根系生物量呈负相关,但未达显著水平,在 T1a 样地有无根系对土壤冲刷量的影响试验中,有根系的样品土壤冲刷量显著小于无根系的样品。土壤有机质的增加有利于土壤抗冲性的提升,土壤根系同样能增强土壤抗冲性,这在李强等<sup>[15]</sup>、郭明明等<sup>[24]</sup>和吕刚等<sup>[25]</sup>的研究中已得到证实,根系的固结网络作用和生物化学作用能使土壤的抗冲性大大增强,随着植物的生长,土壤有机质的累积也促进根系更好地发育。T1a 样地的土壤冲刷量显著大于 T5a、W7a 和 C 样地,这可能是因为只有 T1a 样地未形成生物结皮。W7a 和 C 样地生物结皮完整的样品土壤冲刷量显著小于生物结皮被破坏的样品,这说明生物结皮确实能增强土壤的抗冲性,在一些研究中也得出相同结论<sup>[16,26-27]</sup>。土壤冲刷量与土壤电导率呈显著正相关,其中的机理可能也是高盐分抑制了植物生长。研究中仅对表层土壤抗冲性开展了试验,未涉及到中下层土壤,土壤冲刷量与抗蚀性 4 个指标相关性好,以中下层土壤抗蚀性来看,挖填方场地中下层土壤抗冲性可能也会较差。挖填方样地土壤冲刷量均值随着搁置年限的增长呈减小的趋势,W7a 样地的土壤冲刷量与 C 样地极为接近,这可能是因为挖填方场地长期搁置时在植物恢复的作用下土壤生物结皮逐渐发育完善,且土壤盐分含量逐渐降低,有利于植物根系生长而提升土壤抗冲性,但在搁置前期土壤抗蚀性与抗冲性差,应当做好排水工程并采取生物修复措施或物理苫盖措施以降低土壤侵蚀风险。

## 4 结论

(1)原始地貌天然草地在经过工程扰动后土壤抗蚀性和抗冲性显著降低。各样地表层土壤抗蚀性表现为  $C > W7a > T5a > T1a$ , 土壤抗冲性表现为  $W7a > C > T5a > T1a$ 。

(2)4 个样地表层土壤抗蚀性和抗冲性均受到土壤有机质、植物根系和土壤电导率的影响,土壤抗冲性还受到生物结皮的影响。电导率太高,有机质不足,植物根系生物量太低导致土壤抗蚀性和抗冲性差,发育较好的生物结皮能显著提高土壤抗冲性。工程扰动地表层土壤抗蚀性和抗冲性随着搁置年限的增长而增强,但中下层土壤的变化不大。

(3)新的工程扰动地土壤抗蚀性和抗冲性最差,应当要做好水土保持措施以降低土壤侵蚀风险。

### 参考文献:

[1] 孟西安.奇迹托起延安梦:延安“削山填沟、上山建城”纪

实[N].人民日报(海外版),2014-06-09(05).

- [2] 杜光利.延安削山造城[J].大经贸,2012,290(11):52-55.
- [3] 贺春雄.延安治沟造地工程的现状、特点及作用[J].地球环境学报,2015,6(4):255-260.
- [4] 张明泉,纪淑娜,孙年祥.兰州削山填沟整地工程主要环境影响及防治对策[J].干旱区资源与环境,2009,23(3):77-82.
- [5] 杨小威.西北某湿陷性黄土地区房地产开发相关风险研究和对策分析[D].广州:华南理工大学,2015.
- [6] 白秀梅,韩有志,郭汉清.关帝山不同植被恢复类型土壤抗蚀性研究[J].水土保持学报,2014,28(2):79-84.
- [7] 马西军,程金花,张洪江,等.山西中阳 5 种人工林地土壤的抗蚀性研究[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2012,40(7):113-119.
- [8] 郭培才,张振中,杨开宝.黄土区土壤抗蚀性预报及评价方法研究[J].水土保持学报,1992,6(3):48-51,58.
- [9] 王佩将,戴全厚,丁贵杰,等.退化喀斯特植被恢复过程中的土壤抗蚀性变化[J].土壤学报,2014,51(4):806-815.
- [10] 蒲玉琳,谢德体,林超文,等.植物篱—农作模式坡耕地土壤综合抗蚀性特征[J].农业工程学报,2013,29(18):125-135.
- [11] 薛莲,刘国彬,张超,等.黄土丘陵区人工灌木林土壤抗蚀性演变特征[J].中国农业科学,2010,43(15):3143-3150.
- [12] 朱冰冰,李占斌,李鹏,等.黄丘区植被恢复过程中土壤团粒分形特征及抗蚀性演变[J].西安理工大学学报,2009,25(4):377-382.
- [13] 李智广.水土流失测验与调查[M].北京:中国水利水电出版社,2005.
- [14] 汪有科,吴钦孝,赵鸿雁,等.林地枯落物抗冲机理研究[J].水土保持学报,1993,7(1):75-80.
- [15] 李强,刘国彬,许明祥,等.黄土丘陵区撂荒地土壤抗冲性及相关理化性质[J].农业工程学报,2013,29(10):153-159.
- [16] 冉茂勇,赵允格,陈彦芹.黄土丘陵水蚀区生物结皮土壤抗冲性试验研究[J].西北林学院学报,2009,24(3):37-40,62.
- [17] 李超.黄土丘陵沟壑区坡面覆被格局的土壤侵蚀效应研究[D].西安:陕西师范大学,2018.
- [18] 卜楠,朱清科,王蕊,等.陕北黄土区生物土壤结皮抗冲性研究[J].北京林业大学学报,2009,31(5):96-101.
- [19] 陈文媛,徐学选,华瑞,等.黄土丘陵区林草退耕年限对土壤团聚体特征的影响[J].环境科学学报,2017,37(4):1486-1492.
- [20] 吴彦,刘世全,付秀琴,等.植物根系提高土壤水稳性团粒含量的研究[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1997,3(1):45-49.
- [21] 李相,丁建丽,侯艳军,等.干旱半干旱区土壤含盐量和电导率高光谱估算[J].冰川冻土,2015,37(4):1050-1058.
- [22] 何建军,姚立蓉,汪军成,等.干旱和盐胁迫对盐生植物盐生草种子萌发特性的影响[J].草业学报,2020,29(11):129-140.

(下转第 26 页)

前主要以波动下降趋势为主,之后总体以上升趋势为主。年降雨侵蚀力在 2015 年发生突变,并超过显著性水平 0.05 临界线,上升趋势达到显著。

#### 参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部.2019 年中国水土保持公报[R].北京:中华人民共和国水利部,2020-09-24.
- [2] 章文波,谢云,刘宝元.降雨侵蚀力研究进展[J].水土保持学报,2002,16(5):43-46.
- [3] Wei W, Chen L D, Fu B J, et al. The effect of land uses and rainfall regimes on runoff and soil erosion in the semi-arid loess hilly area, China[J].Journal of Hydrology,2007,335(3/4):247-258.
- [4] 章文波,谢云,刘宝元.利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究[J].地理科学,2002,22(6):705-711.
- [5] Richardson C W, Forster G R, Wright D A. Estimation of erosion index from daily rainfall amount[J].Transaction of the ASAE,1983,26(1):153-156.
- [6] 赖成光,陈晓宏,王兆礼,等.珠江流域 1960—2012 年降雨侵蚀力时空变化特征[J].农业工程学报,2015,31(8):159-167.
- [7] 戴金梅,查轩,黄少燕,等.1980—2013 年闽西地区降雨侵蚀力时空变化特征[J].中国水土保持科学,2017,15(4):1-7.
- [8] 鲁向晖,张海娜,白桦,等.赣江流域 1986—2015 年降雨侵蚀力时空变化特征[J].长江科学院院报,2020,37(10):51-58.
- [9] 郑哲,邹进,潘锋,等.1961—2010 年怒江流域降雨侵蚀力的时空变化特征[J].中国水土保持科学,2018,16(5):16-22.
- [10] 周琳,许武成,尹义星.近 61 年四川省降雨侵蚀力的时空变化趋势[J].水土保持研究,2018,25(4):8-14.
- [11] 陈国清,赵银军,莫德丽,等.广西南流江流域降雨侵蚀力时空变化特征[J].广西科学,2020,27(3):303-310.
- [12] 阮欧,刘绥华,杨广斌,等.1966—2017 年贵州省降雨侵蚀力的时空分布特征[J].水土保持通报,2020,40(3):35-42.
- [13] 姬志军,张连明.鄱阳湖流域降雨量及降雨侵蚀力时空分布特征[J].人民黄河,2019,41(6):81-84.
- [14] 芦鑫,殷淑燕,高涛涛.1960—2017 年秦岭南北地区降雨侵蚀力的时空变化特征研究[J].浙江大学学报(理学版),2019,46(3):380-390.
- [15] 赵平伟,郭萍,李成武,等.云南不同量级降雨下的降雨侵蚀力特征分析的[J].长江流域资源与环境,2015,24(12):2135-2142.
- [16] 赵平伟,郭萍.1980—2013 年滇西北地区降雨侵蚀力变化特征[J].地理科学,2015,35(10):1306-1312.
- [17] 章文波,付金生.不同类型雨量资料估算降雨侵蚀力[J].资源科学,2003,25(1):35-41.
- [18] 章文波,谢云,刘宝元.中国降雨侵蚀力空间变化特征[J].山地学报,2003,21(1):33-40.
- [19] 曹洁萍,迟道才,武立强,等. Mann-kendall 检验方法在降水趋势分析中的应用研究[J].农业科技与装备,2008(5):35-37,40.
- [20] 简虹,骆云中,谢德体.基于 Mann-Kendall 法和小波分析的降水变化特征研究:以重庆市沙坪坝区为例[J].西南师范大学学报(自然科学版),2011,36(4):217-222.
- [21] 雷璐,孙春敏. Mann-Kendall 检验方法在增江径流趋势分析中的应用[J].中国科技信息,2012(19):39,73.
- [22] 李春晖,郑小康,杨志峰,等.黄河天然径流量变化趋势及其影响分析[J].北京师范大学学报(自然科学版),2009,45(1):80-85.
- [23] 殷兵,吴健平,章文波.基于 GIS 的降雨侵蚀力计算器实现研究[J].水土保持研究,2014,21(4):123-126.
- [24] 冯若昂,刘加珍,陈永金,等.山东省多年均降雨侵蚀力及其增长率变化分析[J].自然灾害学报,2017,26(5):83-93.
- [25] 陈世发. ENSO 对韶关市 1951—2013 年均降雨侵蚀力影响研究[J].地理科学,2016,36(10):1573-1581.
- [26] 高涛,谢立安.近 50 年来中国极端降水趋势与物理成因研究综述[J].地球科学进展,2014,29(5):577-589.
- [27] 何绍浪,郭小君,李凤英,等.中国南方地区近 60 a 来降雨量与降雨侵蚀力时空变化研究[J].长江流域资源与环境,2017,26(9):1406-1416.
- [28] 壤抗冲性的影响[J].土壤通报,2014,45(3):711-715.
- [26] Knapen A, Poesen J, Galindo-Morales P, et al. Effects of microbiotic crusts under cropland in temperate environments on soil erodibility during concentrated flow[J].Earth Surface Processes and Landforms,2007,32(12):1884-1901.
- [27] Seitz S, Nebel M, Goebes P, et al. Bryophyte-dominated biological soil crusts mitigate soil erosion in an early successional Chinese subtropical forest[J].Biogeosciences,2017,14(24):5775-5788.

(上接第 20 页)

- [23] Wang Y, Chen J, Gu W, et al. Earthworm activities increase the leaching of salt and water from salt-affected agricultural soil during the wet-dry process under simulated rainfall conditions[J].Biology and Fertility of Soils,2016,52(3):323-330.
- [24] 郭明明,王文龙,史倩华,等.黄土高塬沟壑区退耕地土壤抗冲性及其与影响因素的关系[J].农业工程学报,2016,32(10):129-136.
- [25] 吕刚,刘红民,高英旭,等.排土场边坡根系分布及其对土