

降雨强度与微地形塑造对露天煤矿排土场边坡土壤水分的影响

王悦¹,王金满^{1,2},时文婷¹,李紫晴¹,徐启胜¹

(1.中国地质大学土地科学技术学院,北京 100083;2.自然资源部土地整治重点实验室,北京 100035)

摘要: 土壤水分是制约黄土高原地区生态恢复与重建的关键性因子,探究土壤水分的增加和储存是排土场边坡土地复垦和生态系统重建的重要内容。通过塑造水平阶(阶宽1 m,阶长2 m,每个水平阶间距1 m)、鱼鳞坑(长60 cm,宽40 cm,深30 cm,每个鱼鳞坑横排间距1 m,行间距1 m)工程措施,并以未塑造地形作为对照组进行人工模拟降雨试验,选择山西平朔安太堡露天煤矿南排土场边坡为研究区,在模拟降雨期间对土壤剖面不同土层深度(0—10,10—20,20—40 cm)的水分进行动态监测,采用描述性统计分析和方差分析方法,讨论提供降雨强度和微地形塑造方式的土壤水分动态变化和垂直变化特征,并将降雨强度、微地形塑造方式和土层深度对土壤水分的影响大小进行多因素方差分析研究。结果表明:(1)相同微地形塑造下,降雨强度越大,导致土壤含水率的变化量越大,但变化幅度随雨强增大而逐渐减小;高强度降雨使表层土壤含水率变化明显,低强度降雨使深层土壤含水率变化明显。(2)相同降雨强度下,不同微地形塑造能够有效增加土壤水分,且水平阶对土壤水分的增加效果优于鱼鳞坑。(3)随着土层深度的增加,土壤含水率的变异系数逐渐减小,且都属于中等变异。(4)降雨强度、微地形塑造及土层深度对土壤水分的影响极显著($p<0.01$),且对土壤水分的影响大小为微地形塑造>降雨强度>土层深度。研究结果表明,在露天煤矿排土场进行微地形塑造有利于土壤水分的补给和存储,对排土场土地整治与生态修复具有积极意义。

关键词: 土地复垦; 土壤水分; 排土场边坡; 降雨强度; 微地形塑造

中图分类号:S152.7

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)06-0241-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.06.030

The Influence of Rainfall Intensity and Micro-topography Shaping on Soil Moisture of Dump Slope in Opencast Coalmine

WANG Yue¹, WANG Jinman^{1,2}, SHI Wenting¹, LI Ziqing¹, XU Qisheng¹

(1.School of Land Science and Technology, China University of Geosciences, Beijing 100083;

2.Key Laboratory of Consolidation and Rehabilitation, Ministry of Natural Resources, Beijing 100035)

Abstract: Soil moisture is a key factor restricting ecological restoration and reconstruction in the Loess Plateau, and exploring the increase and storage of soil moisture is an important part of land reclamation and ecosystem reconstruction on the slope of the dump. In this paper, the slope of the southern dump of ATB Opencast Coal Mine was selected as the study area through micro-topography shaping and artificial rainfall simulation experiments. For the design of level benches, the step width was 1 m, the step length was 2 m, and the spacing between each level bench was 1 m. For the design of fish-scale pits, the length was 60 cm, the width was 40 cm, and the depth was 30 cm. The horizontal and row spacing of each fish-scale pit was 1 m, and the unshaped terrain was used as the control. Dynamic monitoring of soil moisture was carried out, and descriptive statistical analysis and variance analysis were used to discuss the dynamic changes and vertical changes of soil moisture under different rainfall intensities and different micro-topography. In addition, the effects of rainfall intensity, micro-topography shaping mode and soil depth on soil moisture were studied by multivariate analysis of variance. The results showed that: (1) Under the same micro-topography, soil moisture content increased with the increase of rainfall intensities, and the variation range gradually decreased. High-intensity rainfall caused significant changes in surface soil moisture content, while

收稿日期:2022-04-20

资助项目:国家自然科学基金项目(4187071470)

第一作者:王悦(1997—),女,硕士研究生,主要从事土地整治与生态修复研究。E-mail: wy15511280953613@163.com

通信作者:王金满(1979—),男,教授,博士生导师,主要从事土地整治与生态修复研究。E-mail: wangjinman2002@163.com

low-intensity rainfall caused significant changes in deep soil moisture content. (2) Under the same rainfall intensity, different micro-topography could effectively increase soil moisture, and compared with fish-scale pits, level benches could better increase soil moisture. (3) With the increase of soil depth, the coefficient of variation of soil water content gradually decreased, and all belonged to medium variation. Under different rainfall conditions, the vertical variability of soil moisture caused by micro-topography was greater than that of the control. (4) The effects of rainfall intensity, micro-topography and soil depth on soil moisture were extremely significant, and the magnitude of the impact on soil moisture was: micro-topography > rainfall intensity > soil depth. These findings indicate that micro-topography shaping in open-pit coal mine dumps is beneficial to the replenishment and storage of soil moisture, and has positive significance for land remediation and ecological restoration of dumps.

Keywords: land reclamation; soil moisture; dump slope; rainfall intensity; microtopography

近年来,人们对自然资源和社会资源的需求随着社会经济的快速发展而增加,煤炭开采强度不断加大,导致土地资源占用和破坏严重,生态环境不断恶化^[1-2]。露天煤矿开采是一种大规模的生产建设活动,形成的损毁土地主要为排土场^[3]。排土场是平台一边坡相间的阶梯宝塔状巨型人工松散堆积体,排土场边坡陡而松散为岩土混排,稳定性较差,水土流失严重,是矿区水土保持的重点^[4-5]。降雨一方面能增加土壤水分,改善土壤质量,促进植被生长发育^[6];另一方面,降雨影响边坡稳定性^[7],通过采取生物措施、耕作措施和工程措施进行治理,使土壤含水量增加的同时减少边坡失稳和水土流失的发生^[8-9]。长期以来,制约黄土高原地区生态恢复与重建的关键性因子是水分,降雨为该区土壤水分补给的主要来源。谷裕等^[10]测量安太堡露天煤矿排土场 0—40 cm 土层土壤水分的平均值为 6.7%~7.5%;王洪丹等^[11]测量山西省平朔安太堡露天煤矿南排土场土壤含水量均值为 6.37 g/g;姚敏娟^[12]研究不同植被配置下土壤水分的平均值为 5.83%~9.17%;郭建英等^[13]研究露天煤矿排土场不同治理措施对坡面入渗的影响表明,研究区裸地的年平均入渗率最小;杨政等^[14]研究发现,草灌混播的土壤初始入渗速率高,可以增加土壤含水量和表层土壤储水量。相关研究表明,露天煤矿排土场土壤水分含量和土壤入渗率较低,土壤水分成为限制矿区土地复垦和生态恢复的关键。因此,研究土壤水分的补给和存储是排土场边坡土地复垦、植被生长和生态系统重建的基础和重点工作。

土壤水分是一个综合的动态指标,与气候、水文、生态、和地质学过程紧密相关,如蒸发散发、地表径流、能量流动和溶质运移等过程^[15-17]。土壤水分在土壤—植被—大气系统中发挥重要的纽带作用,并且土壤水分的时空分异将进一步影响区域植物群落分布、结构和生态功能^[18]。众多学者对土壤水分变化特征及其影响因素展开大量研究。李小英等^[19]基于

SMOS(soil moisture and ocean salinity)对黄土高原区域尺度表层土壤水分时空变化进行研究表明,在不同降水条件下,降水量与土壤水分含量相关性呈显著差异;Baroni 等^[20]研究发现,在潮湿条件下,土壤水分的空间分布与土壤质地的相关性较大;Wang 等^[21]通过试验研究发现,相同降雨强度下,土柱容重越高,土壤水分入渗量越少,土壤体积含水率变化越小;王尚义等^[22]研究表明,晋西北矿区和非矿区不同植被类型的土壤水分存在显著差异,且表现为柠条最大,小叶杨次之,沙棘最小;王国梁等^[23]研究黄土丘陵区典型流域不同土地利用方式对土壤含水率的影响表明,农田平均土壤含水率显著高于林地、灌木地和草地,而林地、灌木地和草地土壤含水率之间无显著差异。

综上所述,国内外学者针对土壤水分展开一系列的研究,并取得大量的成果:排土场土壤水分含量和土壤入渗率较低,且土壤水分受降雨、地形、土壤物理性质、植被类型和不同土地利用方式等影响。但对坡面尺度的土壤水分研究较少,且较少关注地形与降雨强度对土壤水分时空变化的影响。另外,露天煤矿开采造成区域水土流失严重,仅通过植被恢复很难达到较好的治理效果,应适当采取工程措施来恢复矿区的生态系统。微地形塑造是通过对地表下垫面原有形态结构进行的二次改造和整理,从而形成大小不等、形状各异的微地形和集水单元,其空间尺度大多在 1 m 范围内^[24]。微地形塑造是一种很好的水土保持工程措施,可以有效增加土壤水分,减少地表径流和土壤侵蚀,控制水土流失,起到合理利用水土资源的作用^[25-26]。学者们对微地形塑造的研究取得大量成果,较为有效的微地形塑造方法有梯田、水平阶、鱼鳞坑和水平沟等,但缺少对排土场边坡不同微地形塑造的治理效果比较,因此本文选择在露天煤矿排土场塑造水平阶和鱼鳞坑等微地形改造方式,深入研究降雨强度与微地形塑造对露天煤矿排土场边坡土壤水分的影响,可为露天煤矿区排土场水土资源的高效利

用与生态修复提供科学支撑和重要参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区选在山西省朔州市平朔矿区安太堡露天煤矿南排土场(112°19′20″—112°20′35″E,39°27′10″—39°28′05″N),海拔为 1 329~1 454 m,平朔矿区地跨平鲁区与朔城区,地处黄土高原晋、陕、蒙接壤地带,黄土丘陵沟壑地貌,地势北高南低,属于典型的干旱、半干旱大陆性温带季风气候。研究区降水年内年际变化大,分配不均匀,年均降水量 436 mm,其中 75%降水量集中在 7—9 月,年均蒸发量 2 160 mm,年均气温 6.2 ℃;植被覆盖度低,呈零星分布;地带性土壤为栗钙土,母质为黄土性物质。安太堡露天煤矿南排土场是 1 个巨型松散岩土堆积体,相对高度为 100~140 m;平台宽为 10 m 至百余米;台阶高 20~30 m,边坡初始坡度大多在 36°~38°,平台存在严重压实现象,压实平台是堆积体主要的产流区,平台汇流对边坡土壤侵蚀产

生影响,边坡陡峭而松散,容易发生侵蚀滑塌,平台一边坡整体非均匀沉降,稳定性较差,水土流失治理难度较大,是矿区水土保持的重点。

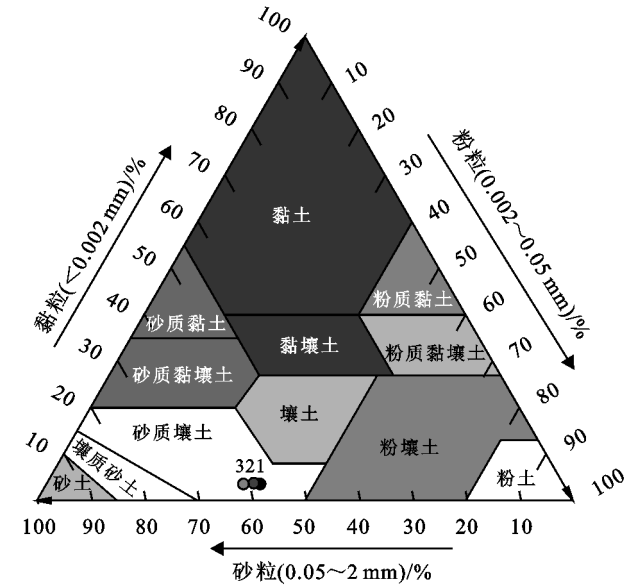
1.2 野外试验设计

1.2.1 微地形塑造 2021 年 5 月在研究区选择地形地貌相同、植被类型和盖度相当的边坡塑造水平阶、鱼鳞坑工程措施,并以未塑造地形作为对照组,地形之间设有 2 m 宽的间隔缓冲带以避免样地间相互干扰,共建成 3 个试验小区,每个试验小区的规格为 4 m×2 m,水平面积为 6.3 m²,坡度为 38°,长边顺坡垂直于等高线,短边与等高线平行。对于水平阶的设计,阶宽 1 m,阶长 2 m,每个水平阶间距 1 m;对于鱼鳞坑的设计,长 60 cm,宽 40 cm,深 30 cm,每个鱼鳞坑横排间距 1 m,行间距 1 m。同时,在水平阶、鱼鳞坑和对照组用 GPS 进行定位,测定样地经纬度和海拔;然后用罗盘测定每个样地的坡度和坡向,并记录坡位(表 1)。各试验小区的土壤质地见图 1。

表 1 试验样地基本情况

样地	经纬度/(°)	海拔/m	坡度/(°)	坡向	坡位	土壤容重/(g·cm ⁻³)		
						0—10 cm	10—20 cm	20—40 cm
水平阶	112.33586E,39.46055N	1415	38	半阴坡	中坡	1.26±0.03	1.29±0.02	1.36±0.01
鱼鳞坑	112.33579E,39.46058N	1412	38	半阴坡	中坡	1.27±0.02	1.30±0.01	1.34±0.02
对照组	112.33577E,39.46064N	1414	38	半阴坡	中坡	1.27±0.01	1.31±0.01	1.38±0.02

注:土壤容重数据为平均值±标准差。



注:1 为水平阶的土壤质地;2 为鱼鳞坑的土壤质地;3 为对照组的土壤质地。

图 1 试验小区土壤质地三角图

1.2.2 模拟降雨试验 本试验采用的降雨装置由降雨喷头、降雨支架、动力系统、供水系统 4 部分组成(图 2)。根据试验小区面积和降雨强度计算每次降雨的需水量,通过调节阀和流量计可以有效控制降雨强度,流量计可以计量瞬时流量和累计流量,降雨强

度参考值见表 2。降雨装置的主要目的是通过降雨强度达到模拟自然降雨效果的方式。2021 年 7 月对试验小区进行野外人工模拟降雨试验,根据研究区降雨特征和雨量等级划分确定降雨强度为 20, 50, 80 mm/h,降雨历时 30 min,有效降雨高度为 4 m,每次模拟降雨时间间隔为 24 h 以上^[27-29],每场降雨重复 2 次试验,共模拟 18 场降雨。每场降雨进行前,需要进行降雨强度为 10 mm/h、历时 5 min 的预降雨^[30-32],使用 Uni1000 土壤水分速测仪测定此时的土壤含水率,以确保各试验条件下初始土壤含水率基本一致,其值达到 12.88%~13.34%,标准差为 0.16。在径流小区按照 5 点法均匀布设 5 个雨量筒,降雨结束后读取雨量筒的降雨量,计算降雨均匀度,并保证降雨均匀度在 80%以上。

1.3 样品采集测定与数据分析

(1)土壤容重:2021 年 7 月对每个样地在相同坡位(上、中、下)随机选择取样点,用环刀法对试验区不同微地形塑造不同土层深度(0—10, 10—20, 20—40 cm)的原状土壤进行采集,每层 3 次重复,共采集 81 个环刀,采用烘干法测定土壤容重。

(2)土壤颗粒组成:用 MicrotracS3500 激光粒度分析仪对所取环刀内的土壤进行颗粒粒径体积百分

含量的测定(图 1),测量范围为 0.02~2 000 μm,土壤颗粒粒径按美国制分级标准,分为黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.05 mm)、砂粒(0.05~2 mm)。

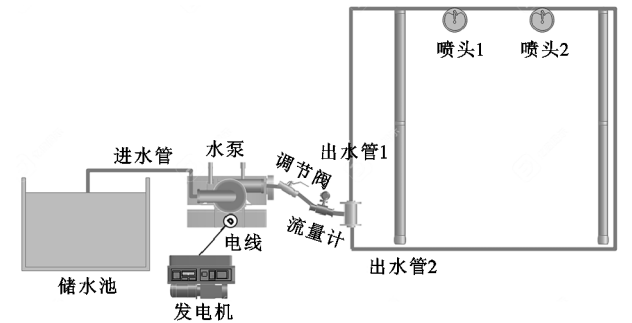


图 2 模拟降雨试验装置示意

表 2 降雨强度参考值

降雨强度/ (mm·h ⁻¹)	瞬时流量/ (L·min ⁻¹)	30 min 累计流量/L
20	2.67	80
50	6.67	200
80	10.67	320

(3)土壤含水率:在模拟降雨期间,采用 Uni1000 土壤水分速测仪每 5 min 测定样地上、中、下坡位 0—40 cm 土壤水分的动态变化,测定时以 0—10, 10—20, 20—40 cm 分层测定土壤体积含水率,每层重复测定 3 次。其中,为了减小降雨对测量仪器的影响,同时测量微地形塑造下的土壤水分含量,分别在水平阶和鱼鳞坑同侧挖掘土壤剖面,插入 Uni1000 土壤水分速测仪后遮盖 PVC 石塑板,各样地土壤水分含量为上、中、下坡位土壤水分含量的平均值。

(4)数据校正:水分速测仪测定的土壤含水率需要对其进行校正。采用传统的烘干法测定降雨结束时的土壤含水率,将每个样地每层降雨结束时土壤含水率的传统测量值与仪器测量值进行拟合,得出函数关系式,用以校正 Uni1000 土壤水分速测仪测量的土壤含水率的动态变化值,拟合结果见图 3。拟合方程 R^2 接近于 1,表明方程拟合效果较好,拟合方程可用于土壤体积含水率的校正。

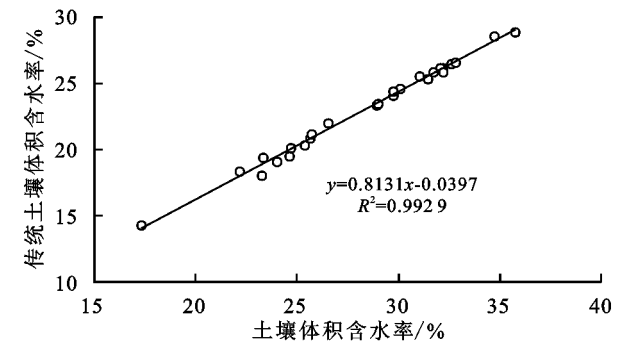


图 3 土壤体积含水率校正拟合结果

(5)数据分析:本研究使用 Excel 2019 进行数据整理与计算,使用 SPSS 26.0 软件进行数据分析,采

用方差分析和变异系数进行分析,用 Excel 2019 和 Origin 2019b 软件进行制图。

方差分析主要用于研究外界因素(如环境因子)对观测结果(如土壤水分)影响的显著性。将试验因子通过 F 检验讨论在总变异中组间变异的作用大小,以对各组的平均数进行差异显著性检验。

变异系数(C_v)表示土壤水分的变异性,当变异系数 $C_v < 0.1$ 时,土壤水分为弱变异性;当 $0.1 < C_v < 1$ 时,土壤水分为中等变异性;当 $C_v > 1$ 时,土壤水分为强变异性。

变异系数计算公式为:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \tag{1}$$

$$C_v = \frac{s}{\bar{x}} \tag{2}$$

式中: $\bar{x}$ 为观测数据平均土壤含水率(%); x_i 为第 i 个观测数据值(%); s 为数据标准差; C_v 为变异系数。

2 结果与分析

2.1 不同降雨强度对土壤水分的影响

2.1.1 土壤水分动态变化特征 相同微地形塑造下,不同降雨强度对 0—40 cm 土层土壤体积含水率的动态变化特征存在影响(图 4)。降雨强度为 20, 50, 80 mm/h 的情况下,水平阶 0—40 cm 土层土壤体积含水率的增量分别为 10.70%, 12.73%, 13.74%, 鱼鳞坑的增量分别为 9.77%, 11.93%, 12.78%, 对照组的增量分别为 4.38%, 6.32%, 7.30%。同时,在水平阶措施下,降雨强度为 50 mm/h 的 0—40 cm 土层土壤体积含水率增量比降雨强度为 20 mm/h 的增量 大 2.03%,降雨强度为 80 mm/h 的增量比降雨强度 为 50 mm/h 的增量 大 1.01%;在鱼鳞坑措施下,降雨 强度为 50 mm/h 的 0—40 cm 土层土壤体积含水率 增量比降雨强度为 20 mm/h 的增量 大 2.16%,降雨 强度为 80 mm/h 的增量比降雨强度为 50 mm/h 的 增量 大 0.85%;在对照组下,降雨强度为 50 mm/h 的 0—40 cm 土层土壤体积含水率增量比降雨强度为 20 mm/h 的增量 大 1.94%,降雨强度为 80 mm/h 的增 量比降雨强度为 50 mm/h 的增量 大 0.98%。可以看 出,相同微地形塑造下,0—40 cm 土层土壤体积含水 率随着降雨强度的增加而增加,但增量的变化幅度 随雨强增大而逐渐减小。同时,从图 4 可知,降雨强 度为 20, 50, 80 mm/h 时,水平阶的土壤水分分别在 30, 30, 25 min 时对降雨的响应趋于稳定;鱼鳞坑的 稳定时间在 30, 25, 20 min;对照组的稳定时间在 25, 20, 15 min。可知,随着降雨强度的不断增加,0—

40 cm 土层土壤水分变化趋于稳定所需的响应时间 在不断缩短。

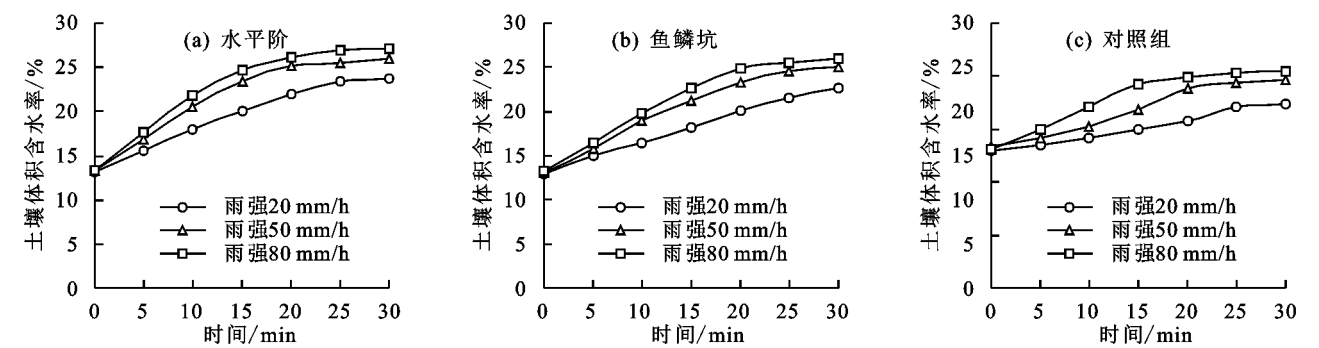


图 4 降雨强度对 0—40 cm 土层土壤水分的动态变化特征

2.1.2 土壤水分垂直变化特征 不同降雨强度下，对降雨过程中不同土层土壤含水率的变化进行描述性统计分析(表 3)。在降雨强度为 20,50,80 mm/h 时,0—20 cm 土层土壤体积含水率的变异系数由大到小的顺序为 80 mm/h($C_v=0.27\pm0.08$)>50 mm/h($C_v=0.25\pm0.07$)>20 mm/h($C_v=0.20\pm0.06$)，20—40 cm 土层土壤体积含水率的变异系数由大到小的顺序为 20 mm/h($C_v=0.14\pm0.05$)>50 mm/h

($C_v=0.12\pm0.05$)>80 mm/h($C_v=0.11\pm0.05$)。表明高强度降雨使表层土壤含水率变化明显,低强度降雨使深层土壤含水率变化明显。同时,0—10 cm 土层土壤体积含水率变异系数的平均值为 0.29,10—20 cm 土层土壤体积含水率变异系数的平均值为 0.19,20—40 cm 土层土壤体积含水率变异系数的平均值为 0.12,表明随着土层深度的增加,土壤含水率的变异性逐渐减小,但都属于中等变异。

表 3 降雨强度对不同土层土壤含水率的描述性统计

微地形 塑造	土层 深度/cm	20 mm/h		50 mm/h		80 mm/h	
		$(\bar{x}\pm s)/\%$	C_v	$(\bar{x}\pm s)/\%$	C_v	$(\bar{x}\pm s)/\%$	C_v
水平阶	0—10	16.28±4.51	0.28	20.07±6.41	0.32	22.08±7.60	0.34
	10—20	20.08±3.95	0.20	21.67±4.64	0.21	22.70±4.84	0.21
	20—40	21.80±3.76	0.17	22.80±3.63	0.16	22.89±3.41	0.15
鱼鳞坑	0—10	14.86±3.91	0.26	18.55±6.30	0.34	20.70±7.60	0.37
	10—20	19.01±3.57	0.19	20.93±4.54	0.22	21.67±4.71	0.22
	20—40	20.44±3.19	0.16	21.35±2.92	0.14	21.30±2.64	0.12
对照组	0—10	11.74±1.97	0.17	14.44±3.87	0.27	16.68±4.59	0.28
	10—20	15.87±1.71	0.11	17.60±2.71	0.15	18.71±3.23	0.17
	20—40	17.74±1.49	0.08	18.29±1.24	0.07	18.20±0.84	0.05

注: $\bar{x}$ 为土壤体积含水率的平均值; s 为土壤体积含水率的标准差; C_v 为变异系数。

2.2 不同微地形塑造对土壤水分的影响

2.2.1 土壤水分动态变化特征 相同降雨强度下，不同微地形塑造对 0—40 cm 土层土壤体积含水率的动态变化特征存在影响(图 5)。降雨强度为 20 mm/h 时,雨后 0—40 cm 土层土壤体积含水率的增量由小到大的排序为对照组(4.38%)<鱼鳞坑(9.77%)<水平阶(10.70%)。降雨强度为 50 mm/h 时,雨后 0—40 cm 土层土壤体积含水率的增量由小到大的排序为对照组(6.32%)<鱼鳞坑(11.93%)<水平阶(12.73%)。降雨强度为 80 mm/h 时,雨后 0—40 cm 土层土壤体积含水率的增量由小到大的排序为对照组(7.30%)<鱼鳞坑(12.78%)<水平阶(13.74%)。可知,相同降雨强度下,微地形塑造可以有效增加土壤水分,提高降雨转化为土壤水分的效率,并且水平阶拦蓄降雨,增加水分入渗的效果比鱼鳞坑效果好。由图 5 可知,降雨强度为 20 mm/h 时,

水平阶、鱼鳞坑、对照组的土壤水分在 30,30,25 min 时趋于稳定;降雨强度为 50 mm/h 时,水平阶、鱼鳞坑、对照组的土壤水分在 30,25,20 min 时趋于稳定;降雨强度为 80 mm/h 时,水平阶、鱼鳞坑、对照组的土壤水分在 25,20,15 min 时趋于稳定,表明微地形塑造均比对照组对增加土壤水分的影响时间较长,趋于稳定所需的时间较晚。

2.2.2 土壤水分垂直变化特征 降雨结束后,不同微地形塑造和不同土层深度的土壤体积含水率具有不同的差异(图 6)。在不同土层深度(0—10,10—20,20—40 cm)下,雨后土壤体积含水率的大小均表现为水平阶>鱼鳞坑>对照组,并且在土壤表层(0—10,10—20 cm)时,水平阶和鱼鳞坑工程措施对土壤体积含水率的影响不存在显著差异,但均与对照组存在显著差异;在土壤深层(20—40 cm)时,水平阶、鱼鳞坑、对照组对土壤体积含水率的影响均存在显著差

异。在水平阶工程措施下,随着土层深度的增加,土壤体积含水率在不断增加,且不同土层深度土壤体积含水率不存在显著差异;在鱼鳞坑工程措施下,不同土层深度土壤体积含水率的大小顺序为 10—20 cm>0—10 cm>20—40 cm,且 10—20 cm 土层土壤体积含水率与 20—40 cm 土层土壤体积含水率存在显著差异,0—10 cm 土层土壤体积含水率与 10—20 cm 土层土壤体积含水率、20—40 cm 土层土壤体积含水率均不存在显著差异;在对照组下,不同土层深度土壤体积含水率的大小顺序为 10—20 cm>20—40 cm>

0—10 cm,且 10—20 cm 土层土壤体积含水率与 20—40 cm 土层土壤体积含水率不存在显著差异,0—10 cm 土层土壤体积含水率与 10—20 cm 土层土壤体积含水率、20—40 cm 土层土壤体积含水率均存在显著差异。与对照组相比,不同微地形塑造措施对不同土层深度土壤体积含水率的影响作用不同,水平阶能够明显补给深层土壤水分,有利于拦蓄降雨,增加土壤水分的入渗;鱼鳞坑能够较好地保持表层土壤水分,减少表层土壤水分的蒸发,使得表层土壤水分与深层土壤水分的差异较小。

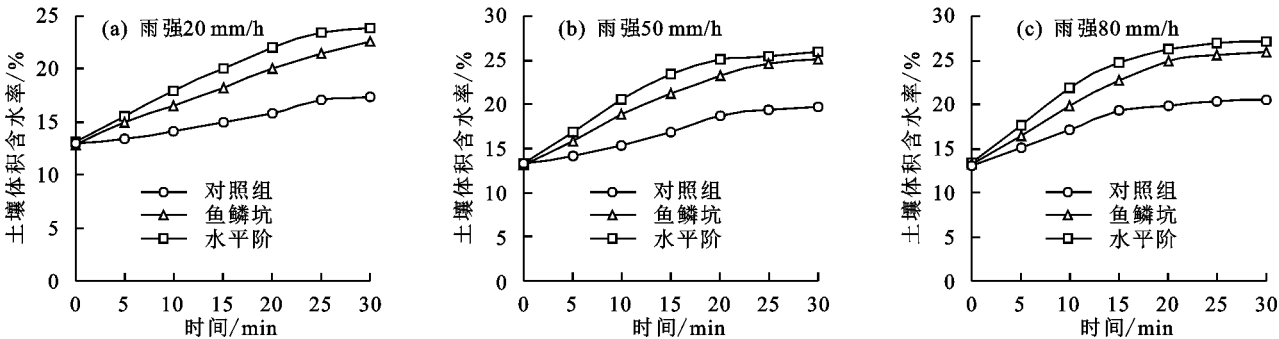
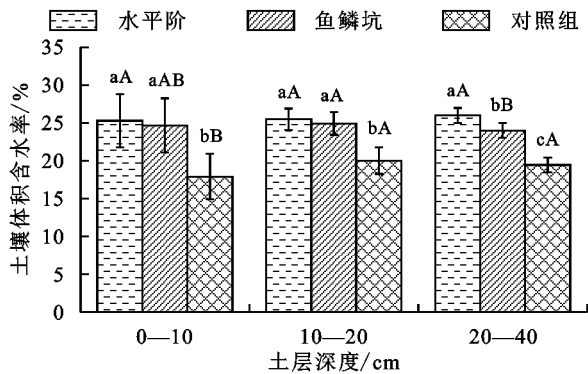


图 5 微地形塑造对 0—40 cm 土层土壤水分的动态变化特征



注:不同小写字母表示同一深度不同微地形塑造之间差异显著 ($p<0.05$);不同大写字母表示同一微地形塑造不同深度之间差异显著 ($p<0.05$)。

图 6 不同微地形塑造对不同土层土壤体积含水率的影响

从图 7 可知,不同微地形塑造下不同土层土壤水分对降雨的响应规律一致,均随着土层深度的加深,土壤含水率的变异性减小。低强度降雨下,水平阶塑造的土壤水分对降雨的响应最大,其次是鱼鳞坑,对照组对降雨响应最小;高强度降雨下,水平阶塑造下深层的土壤水分对降雨响应最大,鱼鳞坑塑造下表层的土壤水分对降雨响应最大,且微地形塑造下各土层土壤水分对降雨的响应均大于对照组各土层土壤水分对降雨的响应,工程措施改变边坡径流流通路径,有利于地表径流就地拦蓄,有利于土壤水分的增加。

2.3 土壤水分影响因素分析

根据上述分析,土壤水分与降雨强度、微地形塑造及土层深度有密切关系。通过多因素方差分析(表 4), F 值(即各效应项与误差项的均方之比值的大小)

及其显著性可知,降雨强度、微地形塑造和土层深度对土壤水分均存在极显著影响 ($p<0.01$),并且通过 F 值的大小比较可知,微地形塑造对土壤水分的影响最大,降雨强度对土壤水分的影响居中,土层深度对土壤水分的影响最小。同时降雨强度与土层深度、微地形塑造与土层深度耦合对土壤水分的影响也极显著,降雨强度与微地形塑造耦合对土壤水分的影响不显著,降雨强度、微地形塑造、土层深度之间耦合对土壤水分存在显著影响。降雨强度的变化影响土壤水分的补给量和土壤水分的下渗情况,微地形塑造改变边坡的地形,拦蓄降雨增加土壤水分,同时土壤水分下渗和消耗对不同土层深度土壤水分产生影响,导致表层土壤水分的大小影响深层土壤水分的大小。

3 讨论

3.1 降雨强度对土壤水分的影响机理

土壤水分的变化很大程度上受降雨的影响,其对降雨的响应过程是土壤水文循环的核心组成部分之一。降雨对土壤水分的影响过程分为 2 个阶段:第 1 阶段降雨强度小于土壤的入渗能力;第 2 阶段降雨强度大于土壤的入渗能力,土壤表面积水和地表径流主要发生在第 2 阶段^[33]。本研究发现,随着降雨强度的增加,相同微地形塑造下 0—40 cm 土层土壤体积含水率在不断增加,但变化幅度随雨强增大而逐渐减小,这主要是因为降雨时间相同时,降雨强度越大,降雨量越大,对土壤水分的补给越大,但随着降雨量

的相对增大,地表产生积水,土壤水分下渗缓慢,因此0—40 cm 土层土壤体积含水率增量的变化幅度逐渐变缓^[34-35]。试验中不同降雨条件对土壤水分的影响均存在一定的规律性,这与李馨欣等^[36]和徐冉等^[37]研究结果一致,即随着降雨强度的增加,土壤水分的稳定时间在缩短,随着土层深度的增加,土壤水分对降雨响应的滞后时间在增加,且含水率变化越小,响应越不明显。

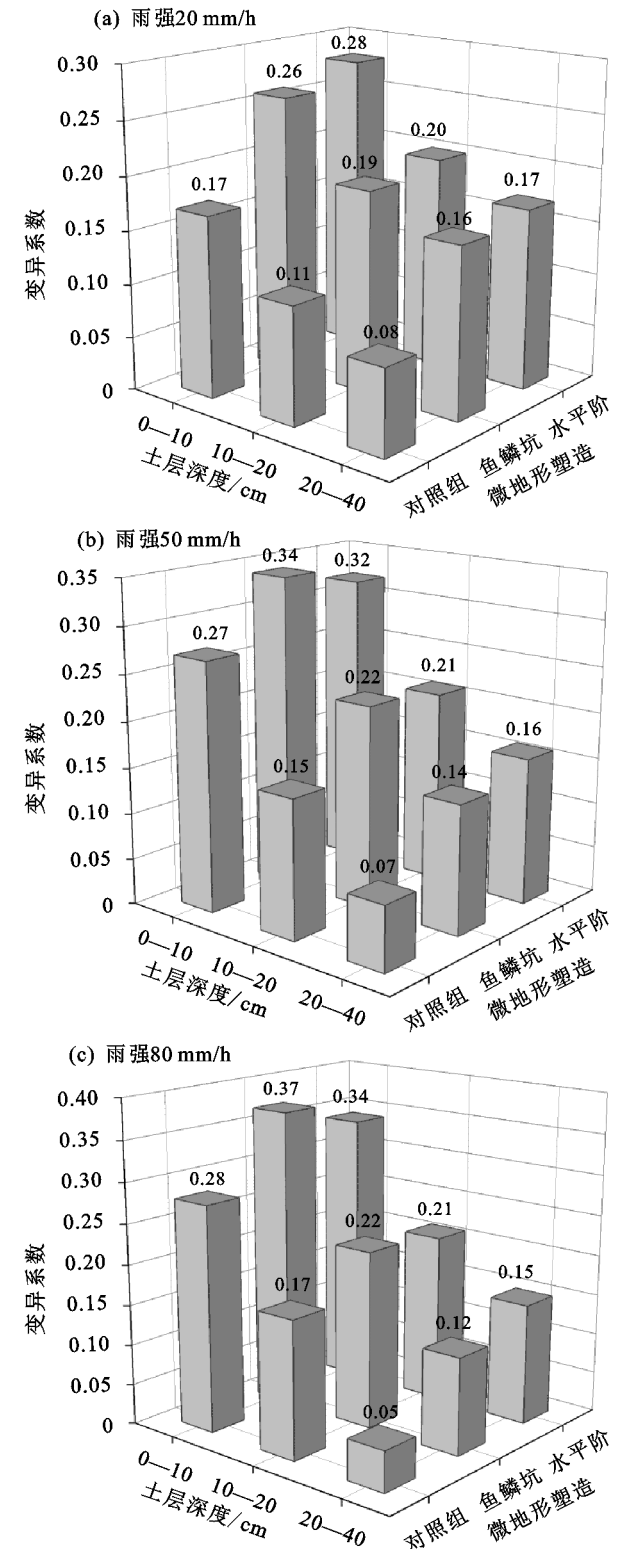


图7 不同微地形塑造对不同土层土壤水分的变异性

表4 土壤水分影响因素的三因素方差分析

因素	Ⅲ类平方和	自由度	均方	F 值	显著性
降雨强度(RI)	893.32	2	446.66	531.13	0
微地形塑造(M)	3908.84	2	1954.42	2324.01	0
土层深度(D)	60.17	2	30.08	35.77	0
RI×M	2.03	4	0.51	0.60	0.66
RI×D	1057.40	4	264.35	314.34	0
M×D	107.61	4	26.90	31.99	0
RI×M×D	16.94	8	2.12	2.52	0.01
误差	386.00	459	0.84		
总计	265874.43	486			
修正后总计	6432.31	485			

注: $R^2=0.940$,调整后 $R^2=0.937$ 。

这可能是因为当降雨强度<入渗能力时,土壤含水率对降雨的响应明显,随着降雨时间增加而不断增加;当降雨强度>入渗能力时,土壤水分对降雨的响应较小,随着降雨时间的增加而趋于稳定^[38],还可能是因为不同土层水文过程的差异性不仅受到土壤剖面土体结构的影响,还受到降雨条件与土体结构综合作用的影响。另外,Zhao 等^[39]研究表明,高强度降雨使表层土壤含水率变化明显,低强度降雨使深层土壤含水率变化明显。本研究也得出相似结论,究其原因:表层土壤含水率受外部环境条件(降雨、蒸发、地形)影响较大,深层土壤含水率主要受上层土壤水分下渗的影响,受降雨和蒸发的影响较小^[40-42],并且高强度降雨使水快速渗透,土壤气体不能及时排出,从而形成孔隙气压,使得水分向深层土壤迁移较难^[43-45]。因此,降雨强度是土壤水分的重要影响因素,不同雨强对不同土层土壤水分的作用不同,同时随着降雨的持续增加,产生地表径流,减少降雨入渗,从而影响土壤水分的变化。

3.2 微地形塑造对土壤水分的影响机理

微地形塑造能够对边坡土壤水分进行保留,有利于改善干旱半干旱区植物的生长环境,对黄土高原区地质地貌、水文和生态系统的共同演化具有重大作用^[25,46]。本研究发现,微地形塑造能有效增加排土场边坡不同土层的土壤水分,且水平阶拦蓄降雨,增加土壤水分的效果比鱼鳞坑效果好。这主要是因为微地形塑造改变地面粗糙度,缩短坡长,对落到地表的降雨进行再分配,提高降雨的利用效率,并且与水平阶相比,鱼鳞坑工程措施拦蓄降雨的作用存在一定的阈值,当超过阈值,鱼鳞坑的拦蓄效果减弱^[47-48]。可见,在排土场边坡进行地形改造时,应考虑合理的微地形设计规格,使其能够有效拦蓄地表径流,增加土壤水分,从而发挥更好的水土保持作用^[49-50]。本研

究还发现,微地形塑造对土壤水分的影响时间不同,可能是因为微地形塑造对边坡进行二次整理和改造,改变地形结构,且微地形塑造设计不同,对边坡土壤物理性质的影响不同,从而对土壤水分的影响时间不同^[24,51]。同时,张继光等^[52]研究表明,在雨季土壤含水量较高时,土壤水分与地势呈显著负相关,即土壤水分含量较高的区域一般是地势较低的区域。本研究中微地形塑造形成起伏的地形,适当降低区域的高程,有利于土壤水分的积累,从而提高土壤水分的含量和空间相关性。另外,微地形塑造能够有效增加土壤水分,这可能与微地形塑造改善土壤质地、降低土壤容重有关。黄土高原区土壤颗粒较粗,且结构较差,同时矿区大型机械压实加大土壤容重,导致其持水能力和保水能力较弱,而工程措施能够使土壤颗粒细化,改变土壤颗粒组成,从而对土壤质地和土壤容重有所改变,增加土壤有效水分,这与于洋等^[53]和苏丽等^[54]研究结果一致。因此,微地形塑造又能够对土壤质地结构改良和土壤容重的减小具有重要作用,进而改变不同土层土壤水分的含量,有利于今后植被的生长。

4 结论

(1)降雨强度与微地形塑造对排土场边坡土壤水分的变化存在不同程度的影响。相同微地形塑造下,土壤含水率的变化量随着降雨强度的增大而增加,且增量的变化幅度逐渐减小。相同降雨强度下,土壤水分的变化受到微地形塑造的影响,且水平阶比鱼鳞坑对土壤水分的增加效果更好。

(2)降雨强度与微地形塑造对不同土层深度(0—10,10—20,20—40 cm)土壤含水率的变化存在不同程度的影响。随着土层深度的不断增加,土壤含水率的平均变异系数不断减小,且都属于中等变异($0.12 < C_v < 0.29$)。相同微地形塑造下,表层土壤含水率对高强度降雨变化明显,深层土壤含水率对低强度降雨变化明显。相同降雨强度下,微地形塑造对土壤水分的垂直变异性均大于对照组对土壤水分的垂直变异性。

(3)降雨强度、微地形塑造及土层深度对土壤水分的影响极显著($p < 0.01$),且对土壤水分的影响由大到小的排序为微地形塑造>降雨强度>土层深度。因此,在排土场边坡进行微地形塑造后更有利于土壤水分的补给和存储,实现黄土高原生态脆弱区水土保持与生态修复的目的。

参考文献:

[1] 卞正富.国内外煤矿区土地复垦研究综述[J].中国土地科学,2000,14(1):6-11.
[2] 李玉婷,曹银贵,王舒菲,等.黄土露天矿区排土场重构土壤典型物理性质空间差异分析[J].生态环境学报,

2020,29(3):615-623.

[3] 王金满,张萌,白中科,等.黄土区露天煤矿排土场重构土壤颗粒组成的多重分形特征[J].农业工程学报,2014,30(4):230-238.
[4] 白中科,王治国,赵景逵,等.安太堡露天煤矿水土流失特征与控制[J].煤炭学报,1997,22(5):96-101.
[5] 王金满,郭凌俐,白中科,等.黄土区露天煤矿排土场复垦后土壤与植被的演变规律[J].农业工程学报,2013,29(21):223-232.
[6] 张燕乐,甄庆,张兴昌,等.露天煤矿排土场不同植被土壤水分特征及其时间稳定性[J].水土保持学报,2020,34(3):212-218.
[7] 林鸿州,于玉贞,李广信,等.降雨特性对土质边坡失稳的影响[J].岩石力学与工程学报,2009,28(1):198-204.
[8] 王治国,白中科,赵景逵,等.黄土区大型露天矿排土场岩土侵蚀及其控制技术的研究[J].水土保持学报,1994,8(2):10-17.
[9] 吕春娟,白中科,秦俊梅,等.黄土区大型排土场岩土侵蚀特征研究:以平朔矿区排土场为例[J].水土保持研究,2006,13(4):233-236.
[10] 谷裕,王金满,王洪丹,等.黄土区露天煤矿排土场植被恢复的水肥响应[J].生态学杂志,2016,35(12):3233-3241.
[11] 王洪丹,王金满,曹银贵,等.黄土区露天煤矿排土场土壤与地形因子对植被恢复的影响[J].生态学报,2016,36(16):5098-5108.
[12] 姚敏娟.黑岱沟露天矿排土场不同植被配置对土壤养分和土壤水分影响研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2007.
[13] 郭建英,何京丽,李锦荣,等.典型草原大型露天煤矿排土场边坡水蚀控制效果[J].农业工程学报,2015,31(3):296-303.
[14] 杨政,王冬,刘玉,等.矿区排土场人工草地土壤水分及入渗特征效应[J].草业学报,2015,24(12):29-37.
[15] 蔺鹏飞,朱喜,何志斌,等.土壤水分时间稳定性研究进展[J].生态学报,2018,38(10):3403-3413.
[16] Yihe L, Bojie F, Wei W, et al. Major ecosystems in China: Dynamics and challenges for sustainable management[J]. Environmental Management,2011,48(1):13-27.
[17] Wang L, Odorico P D, Evans J P, et al. Dryland ecohydrology and climate change: Critical issues and technical advances[J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions,2012,9:4777-4825.
[18] 张钦弟,卫伟,陈利顶,等.黄土高原草地土壤水分和物种多样性沿降水梯度的分布格局[J].自然资源学报,2018,33(8):1351-1362.
[19] 李小英,段争虎.基于 SMOS 的黄土高原区域尺度表层土壤水分时空变化[J].中国沙漠,2014,34(1):133-139.
[20] Baroni G, Oryuani B, Facchi A, et al. The role of vegetation and soil properties on the spatio-temporal variability of the surface soil moisture in a maize-cropped field[J].Journal of Hydrology,2013,489:148-159.

- [21] Wang F, Wang J. Effects of rainfall intensity and compaction on water transport from opencast coal mine soils: An experimental study[J]. *Hydrological Processes*, 2020, 34(2): 258-269.
- [22] 王尚义, 牛俊杰, 朱炜歆, 等. 晋西北矿区、非矿区不同植被下土壤水分特征[J]. *干旱区研究*, 2013, 30(6): 986-991.
- [23] 王国梁, 刘国彬, 党小虎. 黄土丘陵区不同土地利用方式对土壤含水率的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(2): 31-35.
- [24] 卫伟, 余韵, 贾福岩, 等. 微地形改造的生态环境效应研究进展[J]. *生态学报*, 2013, 33(20): 6462-6469.
- [25] Thompson S E, Katul G G, Porporato A. Role of microtopography in rainfall-runoff partitioning: An analysis using idealized geometry[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(7): 1-11.
- [26] 杨娅双, 王金满, 万德鹏. 人工堆垫地貌微地形改造及其水土保持效果研究进展[J]. *生态学杂志*, 2018, 37(2): 569-579.
- [27] 朱高立, 文博, 李静, 等. 不同雨强和覆盖度条件下崩积体侵蚀泥沙颗粒特征[J]. *土壤学报*, 2016, 53(6): 1371-1379.
- [28] 刘俊体, 孙莉英, 张学培, 等. 2次降雨条件下不同土壤细沟侵蚀分析[J]. *中国水土保持科学*, 2013, 11(4): 22-29.
- [29] 宁婷婷, 刘文兆, 林文, 等. 近56年来内蒙古东胜矿区潜在蒸散发的时程变化[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(3): 62-66, 82.
- [30] 王林华. 黄土坡耕地地表粗糙度对入渗、产流及养分流失的影响研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2017.
- [31] 张海涛, 王永会, 张爱军. 模拟降雨下雨强对石灰岩坡地土壤径流及泥沙含量的影响[J]. *江苏农业科学*, 2014, 42(5): 287-289.
- [32] 薛孟君, 马岚, 张栋, 等. 雨强对华北土石山区坡面侵蚀及其颗粒富集过程的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(4): 11-17.
- [33] Tan J Q, Song H Q, Zhang H L, et al. Numerical investigation on infiltration and runoff in unsaturated soils with unsteady rainfall intensity[J]. *Water*, 2018, 10(7): 914-929.
- [34] 高露, 张圣微, 朱仲元, 等. 干旱半干旱区退化草地土壤水分变化及其对降雨时间格局的响应[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(1): 195-201.
- [35] 杜好田, 焦峰, 姚静, 等. 黄土丘陵区降水变化对退耕草地土壤水分特征的影响[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(5): 81-88.
- [36] 李馨欣, 王小燕, 蔡崇法, 等. 紫色土水分和壤中流对降雨强度的响应[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(5): 25-31.
- [37] 徐冉, 张圣微, 朱仲元, 等. 典型草原禁牧条件下土壤水分对降雨模式的响应[J]. *干旱区研究*, 2019, 36(6): 1359-1367.
- [38] 李裕元, 邵明安. 降雨条件下坡地水分转化特征实验研究[J]. *水利学报*, 2004, 49(4): 48-53.
- [39] Zhao L S, Hou R, Wu F Q, et al. Effect of soil surface roughness on infiltration water, ponding and runoff on tilled soils under rainfall simulation experiments[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 179(1): 47-53.
- [40] 余冬立, 邵明安, 俞双恩. 黄土区农草混合利用坡面土壤水分空间变异性[J]. *农业机械学报*, 2010, 41(7): 57-63.
- [41] 韩芳芳, 刘秀花, 马成玉. 不同降雨历时梯田和坡耕地的土壤水分入渗特征[J]. *干旱地区农业研究*, 2012, 30(4): 14-19, 31.
- [42] 王正安, 邸利, 王彦辉, 等. 六盘山半干旱区华北落叶松林土壤水分对降雨的响应[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(4): 144-151.
- [43] 王凤娇. 露天煤矿区土壤压实与降雨强度对水分运移影响的模拟实验研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2019.
- [44] Prunty L, Bell J. Infiltration rate vs. gas composition and pressure in soil columns[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2007, 71(5): 1473-1475.
- [45] Ibrahim A, Mukhlisin M, Jaafar O. Effect of rainfall infiltration into unsaturated soil using soil column[J]. *AIP Conference Proceedings*, 2018, 1930(1): e020022.
- [46] 晏清洪, 原翠萍, 雷廷武, 等. 降雨类型和水土保持对黄土区小流域水土流失的影响[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(2): 169-175.
- [47] 侯雷, 谢欣利, 姚冲, 等. 不同规格鱼鳞坑坡面侵蚀过程及特征研究[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(8): 62-68.
- [48] 孙浩峰, 陈天林. 半干旱黄土丘陵区水平阶整地规格与降雨量的关系[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(6): 28-31.
- [49] 任柯蒙, 卫伟, 赵西宁, 等. 基于水蚀预报模型的黄土高原水平阶减流阻蚀效应模拟[J]. *生态学报*, 2018, 38(14): 5067-5077.
- [50] 李艳梅, 王克勤, 刘芝芹, 等. 云南干热河谷不同坡面整地方式对土壤水分环境的影响[J]. *水土保持学报*, 2006, 20(1): 15-19, 49.
- [51] 景维杰, 韩蕊莲, 侯庆春, 等. 不同间距水平阶集水及造林效果的研究[J]. *西北林学院学报*, 2004, 19(3): 38-40, 45.
- [52] 张继光, 苏以荣, 陈洪松, 等. 典型岩溶洼地土壤水分的空间分布及影响因素[J]. *生态学报*, 2014, 34(12): 3405-3413.
- [53] 于洋, 卫伟, 陈利顶, 等. 黄土丘陵区小流域典型造林整地工程土壤水分特征曲线模拟[J]. *生态学报*, 2018, 38(18): 6511-6520.
- [54] 苏丽, 葛磊, 夏江宝, 等. 黄河三角洲滨海滩涂不同微地形改造的盐地碱蓬恢复效应评价[J]. *农业工程学报*, 2021, 37(10): 82-90.