

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0073

LIU Le, SUN Hongyi, CAI Zhonglan, et al. Preliminary study on the soil moisture of slopes of loess in Lanzhou New Area formed by engineering excavation in the early stage of revegetation[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(3):1007-1016. [刘乐, 孙宏义, 蔡忠兰, 等. 兰州新区黄土工程开挖边坡植被重建初期土壤水分初步研究[J]. 冰川冻土, 2020, 42(3):1007-1016.]

兰州新区黄土工程开挖边坡植被重建初期 土壤水分初步研究

刘 乐^{1,2}, 孙宏义¹, 蔡忠兰³, 张建新⁴, 李东泽⁴

(1. 中国科学院 西北生态环境资源研究院, 甘肃 兰州 730000; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 甘肃省气象服务中心, 甘肃 兰州 730020; 4. 甘肃汇丰生态建设有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 兰州新区位于黄土高原西段, 为典型干旱区, 道路修建形成了许多坡度大于 30°的工程开挖边坡。在边坡上重建植被对改善局地景观和防治水土流失具有重要的作用, 而坡面土壤水分状况对植被重建影响重大。选择 3 种整地类型(条形坑、圆形坑和原状坡样地), 研究兰州新区黄土工程开挖边坡植被重建的初期土壤水分状况, 结果表明: 3 种整地类型中条形坑的土壤水分条件最好, 与圆形坑、原状坡样地土壤水分存在显著差异($P < 0.05$)。不同灌溉频率下原状坡样地 0 ~ 20 cm 土层土壤含水量较低, 20 ~ 50 cm 土层土壤含水量较高。土壤含水量的变异系数随土层深度的增加而减小, 随灌溉频率的降低而增加。在边坡植被重建初期, 需把土壤水分维持在 8.4% ~ 10.8%, 即田间持水量的 38% ~ 49%, 才能保证植物正常生育生长。当栽植的植被根系长度大于 10 cm 时, 可考虑将喷灌频率从每天喷灌改为隔天喷灌, 否则植物有死亡的风险。研究结果可为类似的黄土边坡植被恢复和生态建设提供参考。

关键词: 边坡; 植被护坡; 土壤水分; 黄土高原; 整地

中图分类号: Q948.112³ **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2020)03-1007-10

0 引言

植被护坡是利用植被涵养水源保持水土的原理稳定边坡同时美化生态环境的一种技术^[1], 最初主要被应用于河堤护岸和荒山治理, 20 世纪后期被人们重新认识, 并被欧美、日本等发达国家应用于裸露坡面、机场空地、公路边坡、河堤防护^[1-4]。我国植被护坡技术研究较晚, 20 世纪 90 年代才相继引进多种护坡技术并在多地进行试验^[1], 目前植被护坡技术呈现多样化, 如土工格室植草护坡技术, 客土喷播技术, 厚层基材喷播植草护坡技术等。兰州新区 2012 年成为第五个国家级新区后, 2013 年恰逢国家“一带一路”倡议机遇, 成为陆上“丝绸之路”向西发展的国家战略平台。兰州新区在基础设

施的建设过程中, 对大山的开挖和填筑产生了约 $40 \times 10^4 \text{ m}^2$ 的边坡, 这极大地改变了原有的生态环境^[5], 导致边坡不稳定, 易发生水土流失, 给行车安全带来隐患^[6]。植被护坡是解决边坡植被重建这一难题的有效途径^[7], 而影响植被重建的关键因素是边坡土壤水分。土壤水分是植物生存的基本生态因子, 能控制植被分布格局、土壤理化性质^[8]、影响植物生长及生态系统演变^[9]。

目前国内外学者在边坡土壤水分方面取得了大量研究成果, 陈志强等^[10]和姚亚兰等^[11]均认为不同坡位的土壤水分空间分异特征显著; 赵传燕等^[12]认为坡向和土地利用类型是小流域土壤水分变异的重要影响因素; Famiglietti 等^[15]认为在潮湿条件

收稿日期: 2020-05-26; 修订日期: 2020-07-13

基金项目: 兰州市人才创新创业项目(2017-RC-26)资助

作者简介: 刘乐(1993-), 女, 山西临县人, 2016 年在山西财经大学获学士学位, 现为中国科学院西北生态环境资源研究院在读硕士研究生, 从事水土保持研究. E-mail: 857687671@qq.com

通信作者: 孙宏义, 副研究员, 从事干旱地区造林研究. E-mail: sunhy569@lzb.ac.cn.

下,地表水分变化受土壤性质的影响最大,在干燥条件下,地表水分变化受地形和土壤性质的综合影响; Vivoni 等^[16]认为不同类型的植物会使土壤水分产生空间分异; 而 Crave 等^[13]和 Kim^[14]均认为地形变化是影响土壤水分格局的主要因素。然而,干旱黄土区经过人工整地处理的黄土工程开挖边坡植被重建初期的土壤水分研究尚不多见。甘肃黄土高原地区各季土壤水分均处于亏缺状态^[17],工程开挖边坡坡度大,径流量大,土壤水分不易保存^[18],在这种特殊的立地条件下,本试验采用植物固沙混合料机械化种草技术,在兰州新区的一段工程开挖边坡进行植被重建,对坡面植被重建初期土壤水分特征及整地后形成的整地类型对边坡土壤水分的影响进行研究,试图探寻有效保持土壤水分、促进植被生长的边坡整地措施,优化灌溉制度,为黄土高原地区类似的边坡植被恢复和生态建设提供理论依据。

1 研究区概况

研究区位于甘肃省兰州新区(103°29′22″ ~ 103°49′56″ E, 36°17′15″ ~ 36°43′29″ N),兰州新区地处蒙新、青藏和黄土三大高原的交汇地带(图 1),年均气温 6.8 ~ 8.1 ℃,年均降水量 317 mm,降雨多集中在 7 ~ 9 月,冬季严寒,夏季酷暑,雨量

稀少,热量丰富和四季分明等特点。该区域地形多为独立山丘,山丘之间地形较为开阔,平缓处大部分区域已开垦为农田。兰州新区土壤基本都是湿陷性黄土和红砂岩土质,腐殖质匮乏,有机质含量低,土壤保水保肥能力很差,自然植被稀疏。该区域自然植被分布为阴坡植被以短花针茅(*Stipa breviflora*)为主,伴生有蓍状亚菊(*Ajania achilleoides*)、甘蒙锦鸡儿(*Caragana opulens*)、骆驼蓬(*Peganum harmala*)、红砂(*Reaumurta soongorica*)等;阳坡植被以红砂为主,伴生有碱蓬(*Suaeda glauca*)、猪毛菜(*Salsola collina*)、狗尾草(*Setaria viridis*)等^[19],这些乡土植物有利于优化边坡植被重建中的植被布局与配置。

2 研究方法

2.1 试验布置

2.1.1 坡面处理及整地类型分类

试验时间为 2017 年 7 月 9 日 - 10 月 23 日,试验坡面(103°37′7″ E, 36°27′33″ N)位于兰州新区北环路新区火车站南 1 km 处公路西侧,为南北全长 100 m 的黄土边坡(图 1),该坡面坡度为 75°,海拔 1 529 m,表面无原状土植被,土壤贫瘠(表 1)。对照坡面位于试验坡面南侧 3 m 处,坡面状况与试验边坡基本相同。

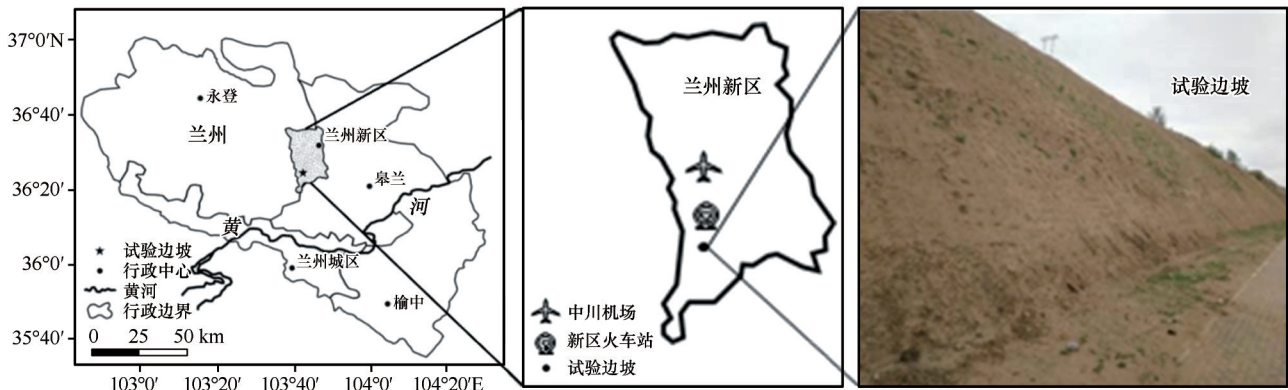


图 1 边坡位置示意图^[20]
Fig. 1 Location map of the slope^[20]

表 1 试验边坡土壤养分特征^[20]
Table 1 Soil nutrient characteristics in the test slope^[20]

有机质/(g·kg ⁻¹)	总氮/(g·kg ⁻¹)	总碳/(g·kg ⁻¹)	全磷/(g·kg ⁻¹)	碱解氮/(mg·kg ⁻¹)	速效磷/(mg·kg ⁻¹)	速效钾/(mg·kg ⁻¹)
1. 742	0. 268	15. 405	1. 28	10. 50	11. 46	120. 00

在人工去除坡面的碎石垃圾等杂物后,用铁锹对试验坡面进行整地处理,由此产生不同形态的坡

面地形共有 3 种类型,分别是圆形坑、条形坑(表 2)以及坡面未产生微地形的原状坡面。整地完成后,

采用植物固沙混合料机械化种草技术, 在2017年7月9日和10日对试验边坡进行喷播种草。种植的种子共有5种: 柠条(*Caragana korshinskii*)3.2 kg, 骆驼蓬2.7 kg, 油蒿(*Artemisia ordosica*)2.2 kg, 冰草(*Agropyron cristatum*)2.0 kg, 苜蓿(*Medicago sativa*)1.0 kg。喷播完毕后在试验坡面覆盖一层无纺布, 用一次性筷子固定。喷播种子最初发芽时期为2017年7月14日, 发芽后撤去无纺布。

表2 试验边坡2种整地类型的形态特征^[20]

Table 2 The characteristics of the two types of soil preparation in the test slope^[20]

整地类型	整地类型形态指标	所占所有整地类型比例
圆形坑	平均长×宽×深=39 cm×20 cm×19 cm	20%
条形坑	平均长×宽×深=45 cm×8 cm×5 cm	80%

2.1.2 样地布置

喷播种草后在坡面中部选取圆形坑、条形坑各3个, 每个整地类型相距0.5 m, 并布设由4个1 m×1 m样方组成的原状坡样地(图2)。试验坡面上下斜面长12 m, 条形坑位于坡面中上部, 距坡顶3 m, 圆形坑位于坡面中部, 原状坡样地位于坡面下部, 距坡底1 m。

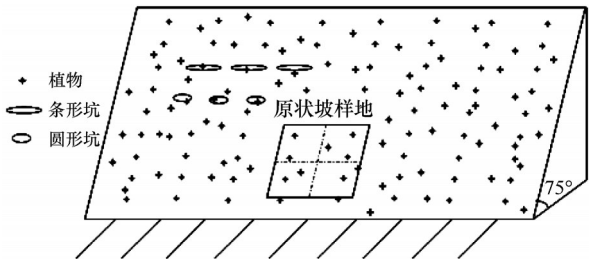


图2 试验边坡样地布置示意图
Fig. 2 The plot layout in the test slope surface

2.1.3 灌溉方式及频率

试验利用罐体容积16 t的洒水车进行喷灌, 发现试验坡面出现大面积干斑即对整个坡面进行一次均匀喷灌, 从早上约09:00开始到下午约17:00将16 t水分次喷完。喷灌均匀度由人为掌握, 每次的喷灌时长和喷灌量都一致, 直至坡面完全没有干斑且不产生径流。

在种草后的前30天(d)每天喷灌, 31~40 d隔天喷灌, 41~104 d无灌溉(天然降水), 在灌溉阶段若出现降水则当天不喷灌。

2.2 数据分析

2.2.1 土壤样品采集方法

在灌溉阶段, 喷灌当天每隔1~2 h对3种整地类型进行多次采样; 在无灌溉(天然降水)阶段, 每隔10 d在早上09:00对3种整地类型进行一次采样。

条形坑和圆形坑在坡面的位置较高, 且坡面坡度较大, 无法利用土钻采集土壤样品, 因此用小铲子在条形坑和圆形坑内采集不同喷灌频率下植物根系最深处的土壤, 取样后回填土坑。取好后土壤样品装入专用土壤含水量样品自封高密度袋密封保存, 通过测定不同喷灌频率下相同土壤深度3种整地类型的土壤含水量来比较各整地类型的土壤水分条件。

利用土钻在原状坡样地内随机选点, 采集不同喷灌频率下0~50 cm土壤测定土壤含水量, 共分为6个土层, 分别为表层土0~2 cm, 2~10 cm, 10~20 cm, 20~30 cm, 30~40 cm, 40~50 cm, 取样后回填土坑, 取好的土壤样品装入自封袋带回实验室。

2.2.2 土壤含水量测定

测定土壤水分的仪器为深圳市后王电子科技有限公司生产的SF-60型电子水分测定仪, 该仪器的测量精度为0.01%, 测量范围为0.01%~100%。第一次测量时采用烘干法进行标定(误差范围为0.5%~1%), 标定后采用上述水分测定仪进行测量, 每个土壤样品在测量3次后取平均值作为最终结果。

按照上述土壤含水量测定方法, 对兰州新区试验坡面南侧3 m处75°对照坡面的原状土土壤含水量进行测定(表3), 对照坡面原状土表层土0~2 cm土壤含水量为(0.52±0.30)%, 表层土以下2~50 cm土层的土壤含水量接近, 平均土壤含水量为(6.20±0.60)%。

表3 种草前对照坡面原状土0~50 cm土层土壤含水量

Table 3 Soil moistures in 0 – 50 cm soil layer of original soil in the experimental slope before planting grass

土层	土壤深度/cm	土壤含水量/%	平均土壤含水量/%
表层土	0 ~ 2	0.52±0.30	0.52±0.30
	2 ~ 10	5.17±0.20	
	10 ~ 20	6.32±0.04	
表层土以下	20 ~ 30	6.75±0.52	6.20±0.60
	30 ~ 40	6.38±0.23	
	40 ~ 50	6.41±0.21	

2.2.3 数据处理

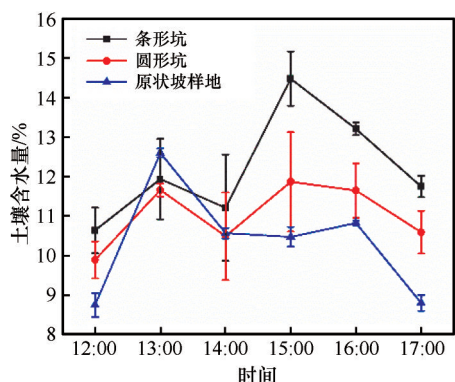
兰州新区降水量数据来源于甘肃省气象服务中心,采用Surfer软件作土壤水分等值线图,Origin软件绘折线图,SPSS软件处理数据。

3 结果与分析

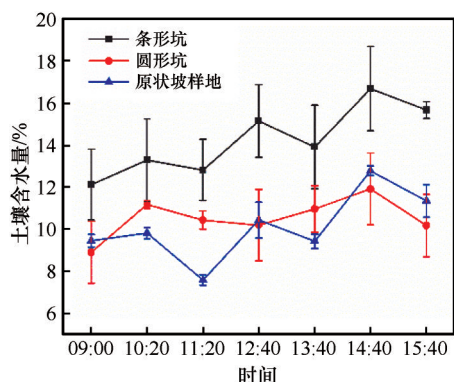
3.1 3种整地方式下根层土壤水分的变化特征

在种草后的前30 d,第14 d的植物根系深度为5 cm,各整地类型在土壤深度5 cm处土壤含水量随一天内多次喷灌起伏变化[图3(a)],条形坑土壤含水量最高($12.20 \pm 1.41\%$),圆形坑土壤含水量次之($10.96 \pm 0.87\%$),比条形坑含水量低1.24%;原状坡样地土壤含水量最低($10.17 \pm 1.48\%$),比条形坑含水量低2.03%,比圆形坑含水量低0.79%,3种整地类型的土壤含水量均远高于原状土2~10 cm

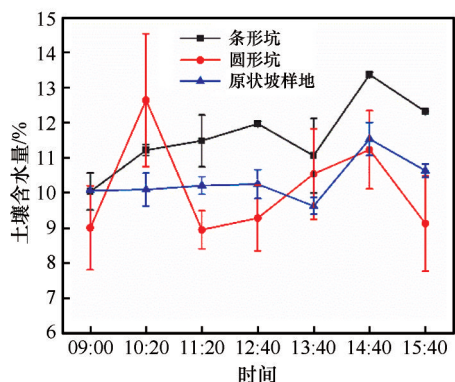
土层土壤含水量($5.17 \pm 0.20\%$)。此时整地类型的土壤水分优于原状坡样地,其中条形坑的土壤水分条件最好。在种草后的第23 d(前一天降水3.3 mm)的植物根系深度为10 cm,各整地类型在土壤深度10 cm处土壤含水量随一天内多次喷灌起伏变化[图3(b)],条形坑土壤含水量最高($14.24 \pm 1.65\%$),圆形坑土壤含水量次之($10.55 \pm 0.95\%$),比条形坑含水量低3.69%;原状坡样地最低($9.56 \pm 2.35\%$),比条形坑含水量低4.68%,比圆形坑含水量低0.99%,3种整地类型的土壤含水量均远高于原状土2~10 cm土层土壤含水量($5.17 \pm 0.20\%$)。此时整地类型的土壤水分优于原状坡样地,其中条形坑的土壤水分条件最好。综上,在每天喷灌阶段,整地类型的土壤水分优于原状坡样地,其中条形坑的土壤水分条件最好。



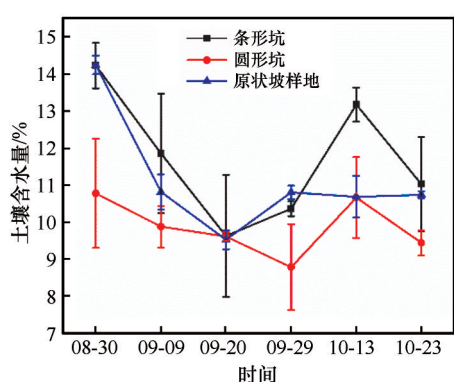
(a) 种草后第14 d, 各样地土壤深度5 cm土壤含水量



(b) 种草后第23 d, 各样地土壤深度10 cm土壤含水量



(c) 种草后第32 d, 各样地土壤深度15 cm土壤含水量



(d) 种草后第41~104 d, 各样地土壤深度20~40 cm土壤含水量

图3 3种整地类型在根层的土壤含水量变化

Fig. 3 The changes of soil moisture in the root layer of the three types of soil preparation, 14 d (a), 23 d (b), 32 d (c) and 41 – 104 d (d) after planting grass

在种草后的31~40 d,第32 d的植物根系深度为15 cm,各整地类型在土壤深度15 cm处土壤含水量随一天内多次喷灌起伏变化[图3(c)],条形坑土壤含水量最高($11.61 \pm 1.05\%$),原状坡样地土壤

含水量次之($10.35 \pm 0.60\%$),比条形坑含水量低1.26%,圆形坑土壤含水量最低($10.11 \pm 1.41\%$),比条形坑含水量低1.50%,比原状坡样地含水量略低0.24%,3种整地类型的土壤含水量均远高于原

状土 10 ~ 20 cm 土层土壤含水量 (6.32 ± 0.04)%。在隔天喷灌阶段,整地类型中条形坑的土壤水分优于原状坡样地,圆形坑由于蒸发面积较大,土壤水分条件略差。

在种草后的 41 ~ 104 d,天然降水是坡面土壤水分的唯一补给,植物根系深度范围为 20 ~ 40 cm,各整地类型在土壤深度范围 20 ~ 40 cm 的土壤含水量随随机天然降水起伏变化[图 3(d)],条形坑土壤含水量最高 (11.70 ± 1.74)%,原状坡样地土壤含水量次之 (11.08 ± 1.58)%,比条形坑含水量低 0.62%,圆形坑土壤含水量最低 (9.85 ± 0.76)%,比条形坑含水量低 1.85%,比原状坡样地含水量略低 1.23%。3 种整地类型的土壤含水量均远高于原状土 20 ~ 40 cm 土层土壤含水量 (6.57 ± 0.26)%。在无灌溉阶段,整地类型中条形坑的土壤水分优于原状坡样地,圆形坑由于蒸发面积较大,土壤水分条件略差。

对不同根层(对应不同灌溉阶段)、不同整地类型的土壤水分进行方差分析,不同根层的土壤水分不存在统计学意义上的差异 ($P > 0.05$),这说明不同的灌溉、降水对不同根层的土壤水分影响差异不大,即本试验灌溉频率的变换是合理的。不同整地类型的土壤水分差异(表 4),圆形坑和原状坡样地不存在统计学意义上的差异 ($P > 0.05$),这可能是由于圆形坑的面积较大,在汇集上方径流的同时存在较大的蒸发。条形坑与圆形坑、原状坡样地均存在统计学意义上的显著差异 ($P < 0.05$),且条形坑的土壤水分优于圆形坑和原状坡样地。根据植物茎叶对地面的投影面积计算得到的 3 种整地类型的植被盖度,条形坑的植被盖度在种草后第 32 d 即为 100%;圆形坑的植被盖度略次于条形坑,在种草后第 51 d 达到最大值 91%;原状坡样地的植被盖度最小,在种草后第 61 d 达到最大 48%^[20]。综合土壤水分条件及植被生长状况,2 种整地类型都有利于植被生长,其中条形坑最有利于植被生长。

表 4 3 种整地类型的土壤水分的差异性检验
Table 4 Significance test of difference of soil moisture in the three types of soil preparation

	条形坑	圆形坑	原状坡样地
条形坑	1	0.021*	0.022*
圆形坑		1	0.001
原状坡样地			1

注: *表示在 0.05 水平上显著相关。

3.2 原状坡样地土壤水分的垂直变化特征

在种草后的前 30 d,第 14 d 的原状坡样地 0 ~ 50 cm 土壤含水量[图 4(a)],各土层土壤含水量随深度增加呈上升趋势,0 ~ 20 cm 土层土壤含水量较低 (10.28 ± 0.10)%,20 ~ 50 cm 土层土壤含水量较高 (10.94 ± 0.61)%,比 0 ~ 20 cm 土层土壤含水量略高 0.66%。在种草后第 23 d(前一天降水 3.3 mm),原状坡样地 0 ~ 50 cm 土壤含水量[图 4(b)],各土层土壤含水量随深度增加呈上升趋势,0 ~ 20 cm 土层土壤含水量较低 (10.06 ± 1.41)%,20 ~ 50 cm 土层土壤含水量较高 (11.55 ± 0.49)%,比 0 ~ 20 cm 土层土壤含水量高 1.49%。相较于第 14 d,第 23 d 的原状坡样地 0 ~ 20 cm 土层土壤水分略低 0.22%,20 ~ 50 cm 土层土壤水分略高 0.61%,这是由于降水期间蒸发较小,且雨水入渗使土壤水分得到有效补给。

在种草后的 31 ~ 40 d,第 32 d 的原状坡样地 0 ~ 50 cm 的土壤含水量[图 4(c)],各土层土壤含水量随深度增加呈上升趋势,0 ~ 20 cm 土层土壤含水量较低 (6.52 ± 3.00)%,20 ~ 50 cm 土层土壤含水量较高 (11.12 ± 0.38)%,比 0 ~ 20 cm 土层土壤含水量高 4.6%。第 32 d 的 0 ~ 20 cm 土层土壤水分比第 14 d、23 d 低 (3 ~ 4)%,20 ~ 50 cm 土层土壤水分比第 14 d 略低 0.61%,比第 23 d 略低 0.43%,这表明 0 ~ 20 cm 土层土壤水分受灌溉及降水的影响较大,20 ~ 50 cm 土层受到的影响较小。

在种草后的 41 ~ 104 d,天然降水是坡面土壤水分的唯一补给,该阶段有 5 次雨量超过 8 mm 的降雨过程,还有 5 次雨量超过 3 mm 的降雨。原状坡样地 0 ~ 50 cm 的土壤含水量[图 4(d)],土壤水分的变化与降水量变化趋势一致,在降水后土壤水分增加,无降水时土壤水分减少。第 10 d、40 d、50 d 之前兰州新区出现持续降水,当天测得的土壤含水量明显高于降水前后的测得的土壤含水量,表明雨水经过下渗后可以有效补充土壤水分。各土层土壤含水量随深度增加呈上升趋势,0 ~ 20 cm 土层土壤含水量较低 (8.52 ± 1.31)%,20 ~ 50 cm 土层土壤含水量较高 (11.13 ± 0.11)%,比 0 ~ 20 cm 土层土壤含水量高 2.61%。相较于第 14 d、23 d 和 32 d,第 41 ~ 104 d 的 0 ~ 20 cm 土层土壤水分比第 14 d、23 d 低 1.5% ~ 2%,比第 32 d 高 2.00%,20 ~ 50 cm 土层土壤水分比第 14 d 略低 0.61%,比第 23 d 略低 0.43%,与第 32 d 接近,这表明无灌溉阶

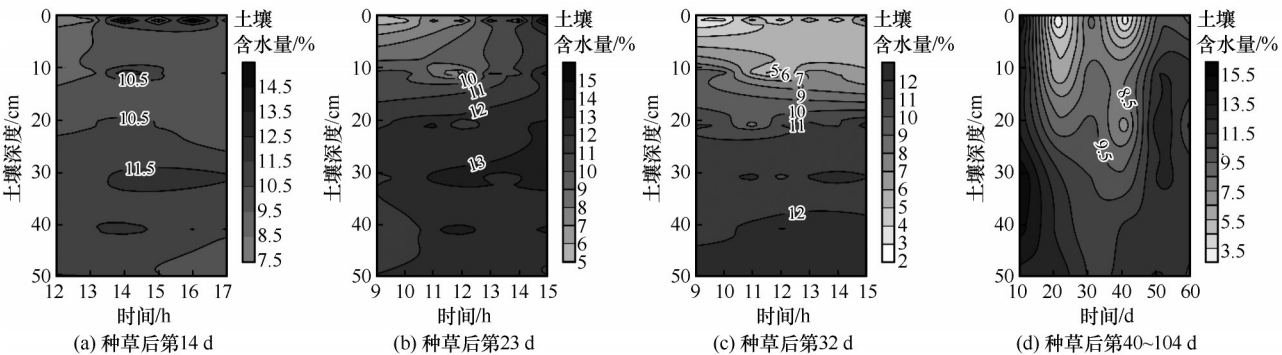


图4 原状坡样地土壤水分的垂直变化

Fig. 4 Vertical variation of soil moisture in sample plot on original slope

段的天然降水可以有效补充土壤水分,达到与隔天喷灌接近,甚至更好的水分条件。

根据土壤水分垂直分层划分原则^[21],我们用变异系数 C_v 值来划分土壤水分的垂直层次,土层内平均变异系数达到30%以上,为速变层;土层内变异系数达到20%~30%,为活跃层;土层内变异系数为10%~20%,为次活跃层;土层内变异系数小于10%,为相对稳定层。变异系数越小,土壤含水量越稳定,变异系数越大,土壤含水量变化越剧烈。从原状坡样地土壤水分垂直分层情况(表5)可知,土壤含水量的变异系数随土层深度的增加而减小,40~50 cm土层在不同灌溉阶段的变异系数都稳定在10%以下。随着灌溉频率从每天喷灌(第14 d、23 d)到隔天喷灌(第32 d),直至无灌溉

(第41~104 d),以及植物根系由5 cm、10 cm、15 cm生长至20~40 cm,土壤含水量的变异系数逐渐增加,活跃的土层从0~10 cm逐渐加厚至0~40 cm。在第14 d,0~10 cm土层土壤含水量的变化均较为活跃,这表明稳定的灌溉补水有利于10~50 cm土层的土壤水分维持稳定;第23 d(前一天降水3.3 mm)相较于第14 d,0~10 cm土层土壤含水量的变化更为活跃,这表明少量降水对0~10 cm土层土壤含水量的影响较大;在第32 d,0~20 cm土层土壤含水量的变化均较为活跃,这表明在灌溉频率的降低对0~20 cm土层土壤含水量的影响较大;在第41~104 d,各土层变异系数达到最大值,0~40 cm土层土壤含水量的变化均较为活跃。

表5 原状坡样地土壤水分垂直分层

Table 5 Vertical stratification of soil moisture in the sample plot on original slope

土层深度/cm	第14 d		第23 d		第32 d		第41~104 d	
	变异系数	活跃等级	变异系数	活跃等级	变异系数	活跃等级	变异系数	活跃等级
0~2	0.278	活跃层	0.408	速变层	0.437	速变层	0.628	速变层
2~10	0.145	次活跃	0.246	活跃层	0.356	速变层	0.327	速变层
10~20	0.087	稳定层	0.080	稳定层	0.141	次活跃	0.265	活跃层
20~30	0.058	稳定层	0.047	稳定层	0.084	稳定层	0.175	次活跃
30~40	0.096	稳定层	0.080	稳定层	0.061	稳定层	0.118	次活跃
40~50	0.052	稳定层	0.063	稳定层	0.046	稳定层	0.081	稳定层

3.3 边坡0~50 cm土壤有效水储量

根据土壤水分对植物生长的有效性原理^[22],当土壤含水量达到田间持水量的82%~100%时,为易效水;当土壤含水量为田间持水量的60%~80%时,为中效水;当土壤含水量在田间持水量的60%和凋萎含水量之间时,为难效水;当土壤含水量低于凋萎含水量时,为无效水。兰州新区的田间持水量为22%,凋萎系数为6%,即兰州新区土壤含水量

达到17.6%~22%为易效水(Y),13.2%~17.6%为中效水(Z),6%~13.2%为难效水(N),低于6%为无效水(W)。由于兰州新区坡面即便在每天喷灌时的大部分土壤水分也在难效水范围,本文将难效水(N)再平均细分为3个等级,土壤含水量达到6%~8.4%定义为“N-”,8.4%~10.8%定义为“N”,10.8%~13.2%定义为“N+”(表6)。从表6可知,在每天喷灌阶段,3种整地类型的土壤水分均达到

表6 试验边坡3种整地类型土壤水分有效性
Table 6 Soil moisture availability in the three types of soil preparation in the test slope

整地类型	土壤深度/ cm	土壤水分有效性			
		每天 喷灌	降水后 喷灌	隔天 喷灌	无灌溉 (天然降水)
圆形坑	5	N	-	-	-
条形坑		N	-	-	-
圆形坑	10	-	N	-	-
条形坑		-	Z	-	-
圆形坑	15	-	-	N	-
条形坑		-	-	N	-
圆形坑	20~40	-	-	-	N
条形坑		-	-	-	N
原状坡样地	0~2	N	N	W	N
	2~10	N	N	W	N
	10~20	N	N+	N	N
	20~30	N	N+	N	N
	30~40	N	N+	N+	N
	40~50	N	N+	N+	N

N; 在降水后喷灌条件下, 原状坡样地 10~50 cm 土层土壤水分达到 N+, 条形坑土壤水分达到 Z; 在隔天喷灌阶段, 原状坡样地 0~10 cm 土层的土壤水分 W, 30~50 cm 土层土壤水分仍保持在 N+; 在停止灌溉后 3 种整地类型土壤水分均达到 N, 这再次表明了天然降水能有效补给各整地类型的土壤水分。

4 讨论

4.1 不同整地方式对边坡土壤水分的影响

在干旱少雨的黄土高原地区, 植被生长会受到水分条件的限制, 不同的地形地貌会直接影响土壤水分的空间分布^[23], 通过人工整地可以有效改变边坡地形。赵荟等^[24]对黄土高原阳坡微地形的土壤含水量进行了研究, 得出微地形能显著影响土壤水分分布。谷丽萍等^[25]对不同整地方式对元谋金沙江干热河谷林地土壤含水量的影响进行了研究, 认为全面整地和带状整地能显著增加土壤含水量, 是提高土壤保水能力的重要措施。Cabangon 等^[26]研究了浅层耕作对土壤水分的影响, 认为浅层耕作可以使浅层土壤保持较好的水分。

本试验在整地过程中产生了 3 种整地类型, 在每天喷灌阶段, 条形坑和圆形坑的土壤水分优于原状坡样地, 其中条形坑的土壤水分条件最好; 在隔天喷灌、无灌溉阶段, 整地类型中条形坑的土壤水

分优于原状坡样地, 圆形坑土壤水分条件略差。不同整地类型的土壤水分, 圆形坑和原状坡样地不存在统计学意义上的差异 ($P>0.05$), 条形坑与圆形坑、原状坡样地均存在统计学意义上的显著差异 ($P<0.05$), 且条形坑的土壤水分优于圆形坑和原状坡样地。综上, 整地过程中产生的 3 种整地类型中, 条形坑的土壤水分条件较好, 而圆形坑由于较大的蒸发面积及高于原状坡样地的植被覆盖度, 导致有更多的水分被蒸发和植物根系吸收。在边坡采取有效的整地措施, 处理出更多条形坑将更有利于边坡植被生长。

4.2 边坡土壤水分的垂直变化规律

本研究中不同灌溉阶段原状坡样地 0~20 cm 浅层土壤含水量较低, 20~50 cm 深层土壤含水量较高, 随土壤深度增加, 各土层土壤含水量呈上升趋势, 而土壤含水量的变异系数减小, 这是因为灌溉、降水和蒸发等因素对深层土壤含水量的影响减弱, 这与 Meerveld 等^[27]的研究结果一致。Famiglietti 等^[15]的研究结果表明土壤水分的变异性随土壤水分的减少而减小, Choi 等^[28]的研究结果认为深层土壤水分的变异性小于浅层。本文的研究结果表明土壤含水量会随着灌溉频率降低而降低, 土壤含水量的变异系数会随着灌溉频率降低而增加, 活跃土层从 0~10 cm 增加至 0~40 cm, 而 40~50 cm 土层在不同灌溉阶段的变异系数都稳定在 10% 以下, 这是由于深层土壤远离地表, 蒸发量较小, 水分的下渗较慢, 水量较大时水分才能得到补充, 且直至整个试验阶段结束植物根系也只达到 40 cm, 水分受根系吸收的影响较小, 这与上述 Famiglietti 等^[15]、Choi 等^[28]的研究结果一致。在第 41~104 d, 各土层变异系数达到最大值, 0~40 cm 土层土壤含水量的变化均较为活跃, 这表明在失去稳定的灌溉补水后, 降水对土壤含水量的变化影响增强, 降水的随机性使该时期 0~40 cm 土层的土壤含水量变化剧烈, 这与 Martinez 等^[29]的研究结果一致。

4.3 边坡 0~50 cm 土壤水分有效性评价

水分胁迫是干旱和半干旱环境中的影响植被恢复的主要限制因子^[30], 水分在植被重建初期的影响更为重大^[31], 水分不足会阻止种子发芽并导致萎蔫。田间持水量的 60% 最适于植物生长, 水分低于该值会导致植物生长异常^[32]。李艳茹等^[33]对锡林浩特市草原矿区排土场边坡植被恢复适宜的灌溉制度进行了研究, 认为土壤水分接近田间持水量的

45%(N)时即需灌溉,此时土壤水分利用效率最高。本试验(表6)条形坑在土壤深度10 cm时,降水后喷灌条件下,土壤水分达到Z,原状坡样地在隔天喷灌条件下,0~10 cm土层的土壤水分分为W,其它情况各整地类型土壤水分都是N、N+。这说明在将喷灌频率改为隔天喷灌之前,应保证植被根系大于10 cm,这样才能保证植物根层的土壤水分达到可被利用的状态;兰州新区坡面植被重建初期,需要把坡面的土壤水分从无效状态增加到植物可利用的状态“N”8.4%~10.8%,即田间持水量的38%~49%,就可以保证植物正常生育生长,这与李艳茹等^[33]得到的结论基本一致。

5 结论

(1) 坡面整地产生的3种整地类型中,综合土壤水分条件及植被生长状况,条形坑与圆形坑均有利于植被生长,其中条形坑的土壤水分条件最好,与圆形坑、原状坡样地均存在统计学意义上的显著差异($P<0.05$)。在边坡采取有效的整地措施,处理出更多条形坑将更有利于边坡植被生长。

(2) 原状坡样地0~20 cm土层土壤含水量较低,20~50 cm土层土壤含水量较高。土壤含水量的变异系数随着土层深度的增加而减小,40~50 cm土层在不同灌溉阶段的变异系数都稳定在10%以下。随着灌溉频率的降低以及植物根系的生长,土壤含水量的变异系数逐渐增加,降水对土壤含水量的影响增强,活跃土层从0~10 cm增加至0~40 cm。

(3) 在将喷灌频率从每天喷灌改为隔天喷灌之前,应保证植被根系长度大于10 cm;兰州新区坡面植被重建初期,需要把坡面的土壤水分从无效状态增加到植物可利用的状态8.4%~10.8%,即田间持水量的38%~49%,才能保证植物正常生育生长。

参考文献(References):

- [1] Zhou Depei, Zhang Junyun. Vegetation slope protection engineering technology[M]. Beijing: China Communications Press, 2003. [周德培, 张俊云. 植被护坡工程技术[M]. 北京: 人民交通出版社, 2003.]
- [2] Burgess J, Harrison C M, Limb M. People, parks and the urban green: a study of popular meanings and values for open spaces in the city[J]. Urban Studies, 1988, 25(6): 455–473.
- [3] Zhou Yunyan. Study on mechanism of soil reinforcement by roots and slope protection technology[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2010. [周云艳. 植物根系固土机理与护坡技术研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2010.]
- [4] Gray D H, Sotir R B. Biotechnical stabilization of highway cut slope[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 118(9): 1395–1409.
- [5] Xiao Honglang. Variation of soil wind erosion and nutrient and salinity in large-scale reclamation of Qinwangchuan in Gansu [J]. Chinese Journal of Soil Science, 1998, 29(4): 148–150. [肖洪浪. 甘肃秦王川大规模农垦中土壤风蚀与养分、盐分变化[J]. 土壤通报, 1998, 29(4): 148–150.]
- [6] Liu Shiqi. Study on bioengineering techniques for slope protection and comprehensive protection system[D]. Wuhan: Graduate School of the Chinese Academy of Sciences (Wuhan Institute of Rock and Soil Mechanics), 2004. [刘世奇. 植被护坡技术及综合防护体系研究[D]. 武汉: 中国科学院研究生院(武汉岩土力学研究所), 2004.]
- [7] Guo Lu. Study on the different grass species growing media for road slope greening in Loess Plateau[D]. Taiyuan: Shanxi University, 2009. [郭陆. 黄土高原道路边坡绿化草种及土壤基质筛选[D]. 太原: 山西大学, 2009.]
- [8] Berndtsson R, Nodomi K, Yasuda H, et al. Soil water and temperature patterns in an arid desert dune sand[J]. Journal of Hydrology, 1996, 185(1/2/3/4): 221–240.
- [9] Zhao Jingbo, Hou Yongjian, Huang Chunzhang. Causes and countermeasures of soil drying under artificial forest on the loess plateau in northern Shaanxi [J]. Journal of Desert Research, 2003, 23(6): 612–615. [赵景波, 侯雨坚, 黄春长. 陕北黄土高原人工林下土壤干化原因与防治[J]. 中国沙漠, 2003, 23(6): 612–615.]
- [10] Chen Zhiqiang, Wang Xuan, Bao Yongxue. Dynamic variations of surface soil moisture contents under different slope protection measures in highway [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(2): 77–83. [陈志强, 王瑄, 鲍永雪. 公路边坡不同护坡措施表层土壤水分动态变化规律[J]. 水土保持研究, 2017, 24(2): 77–83.]
- [11] Yao Yalan, Gao Debin, Zhang Yujie, et al. Spatial distribution characteristics and influencing factors of soil moisture on loess cutting slope [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(6): 118–122. [姚亚兰, 高德彬, 张玉洁, 等. 黄土路堑边坡土壤水分空间分布特征及影响因素[J]. 水土保持通报, 2014, 34(6): 118–122.]
- [12] Zhao Chuanyan, Feng Zhaodong, Nan Zhongren. GIS-assisted modeling spatial and temporal variations of soil water content in anjiapo catchment of the western loess plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(5): 785–794. [赵传燕, 冯兆东, 南忠仁. 黄土高原西部土壤水分时空变化模拟研究: 以安家坡流域为例[J]. 冰川冻土, 2007, 29(5): 785–794.]
- [13] Crave A, Gascuel-Oudoux C. The influence of topography on time and space distribution of soil surface water content[J]. Hydrological Processes, 1997, 11(2): 203–210.
- [14] Kim S. Characterization of annual soil moisture response pattern on a hillslope in Bongsunsa Watershed, South Korea[J]. Journal of Hydrology, 2012, 448/449: 100–111.
- [15] Famiglietti J S, Rudnicki J W, Rodell M. Variability in surface moisture content along a hillslope transect: Rattlesnake Hill, Texas [J]. Journal of Hydrology, 1998, 210(1/2/3/4): 259–281.
- [16] Vivoni E R, Rinehart A J, Méndez-Barroso L A, et al. Vegetation controls on soil moisture distribution in the Valles Caldera, New Mexico, during the North American monsoon[J]. Ecohydrology, 2008, 1(3): 225–238.
- [17] Yao Xiaoying, Pu Jinyong, Wang Chenghai, et al. Variations

- in evapotranspiration of soil moisture in Gansu Loess Plateau in the recent 40 years[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(1): 126 – 130. [姚小英, 蒲金涌, 王澄海, 等. 甘肃黄土高原 40 a 来土壤水分蒸散量变化特征[J]. 冰川冻土, 2007, 29(1): 126 – 130.]
- [18] Zhao Bin. Research on characteristics of water consumption of dominant plant transpiration on the highway artificial slope [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2013. [赵斌. 高速公路人工边坡优势植物蒸腾耗水特征研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.]
- [19] Zhu Gong, Wang Wapeng. A primary study on the mechanism of natural regeneration and artificial restoration of *Reaumuria soongorica* population[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2004, 39(4): 427 – 433. [朱恭, 王万鹏. 红砂种群自然更新与人工辅助恢复机理的初步研究[J]. 甘肃农业大学学报, 2004, 39(4): 427 – 433.]
- [20] Liu Le, Sun Hongyi, Zhang Jianxin, et al. Effect of several engineering measures on vegetation coverage on steep slope in the loess region[J]. *Arid Zone Research*, 2019, 36(4): 1041 – 1048. [刘乐, 孙宏义, 张建新, 等. 几种工程措施对黄土区陡峭边坡植被盖度的影响及其机理[J]. 干旱区研究, 2019, 36(4): 1041 – 1048.]
- [21] Yang Wenzhi, Shao Ming'an. Study on soil moisture in Loess Plateau[M]. Beijing: Science Press, 2000. [杨文治, 邵明安. 黄土高原土壤水分研究[M]. 北京: 科学出版社, 2000.]
- [22] Yang Wenzhi, Yu Cunzu. Drainage area control and value in Loess Plateau[M]. Beijing: Science Press, 1992. [杨文治, 余存祖. 黄土高原区域治理与评价[M]. 北京: 科学出版社, 1992.]
- [23] Wang Yueling, Zhang Yuanrun, Cai Jinjun, et al. A study on variation of soil water during different ecological restoration or reconstruction in loess hilly and gully regions of southern ningxia[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(7): 367-369. [王月玲, 张源润, 蔡进军, 等. 宁南黄土丘陵区不同生态恢复与重建中的土壤水分变化研究[J]. 中国农学通报, 2005, 21(7): 367-369.]
- [24] Zhao Hui, Zhu Qingke, Qin Wei, et al. Soil moisture characteristics on microrelief of dry south-slope on the Loess Plateau[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010, 30(3): 64 – 68. [赵荟, 朱清科, 秦伟, 等. 黄土高原干旱阳坡整地类型土壤水分特征研究[J]. 水土保持通报, 2010, 30(3): 64 – 68.]
- [25] Gu Liping, Pei Yanhui, Zheng Ke, et al. Influence of different site preparation on soil water content in dry-hot valley of Yuanmou County[J]. *Journal of West China Forestry Science*, 2017, 46(6): 71 – 76. [谷丽萍, 裴艳辉, 郑科, 等. 整地方式对元谋干热河谷人工林土壤水分的影响[J]. 西部林业科学, 2017, 46(6): 71 – 76.]
- [26] Cabangon R J, Tuong T. Management of cracked soils for water saving during land preparation for rice cultivation[J]. *Soil and Tillage Research*, 2000, 56(1/2): 105 – 116.
- [27] Tromp-van Meerveld H J, McDonnell J J. On the interrelations between topography, soil depth, soil moisture, transpiration rates and species distribution at the hillslope scale[J]. *Advances in Water Resources*, 2006, 29(2): 293 – 310.
- [28] Choi M, Jacobs J M. Soil moisture variability of root zone profiles within SMEX02 remote sensing footprints[J]. *Advances in Water Resources*, 2007, 30(4): 883 – 896.
- [29] Martinez C, Hancock G R, Kalma J D, et al. Spatio-temporal distribution of near-surface and root zone soil moisture at the catchment scale[J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22(14): 2699 – 2714.
- [30] Le Hou rou H N. Restoration and rehabilitation of arid and semiarid Mediterranean ecosystems in North Africa and West Asia: a review[J]. *Arid soil research and rehabilitation*, 2000, 14(1): 3 – 14.
- [31] Koop A L. Differential seed mortality among habitats limits the distribution of the invasive non-native shrub *Ardisia elliptica* [J]. *Plant Ecology (Formerly Vegetatio)*, 2004, 172(2): 237 – 249.
- [32] Duan Zhenghu, Xiao Honglang, Song Yaoyuan. Soil water deficit and control in planted forest in Lanzhou suburb on western Loess Plateau[J]. *Journal of Desert Research*, 2006, 26(4): 527 – 531. [段争虎, 肖洪浪, 宋耀选. 黄土高原西部兰州市郊人工林地水分亏缺与调控研究[J]. 中国沙漠, 2006, 26(4): 527 – 531.]
- [33] Li Yanru. Simulation on irrigation scheduling and moisture migration of restored slope vegetation in mining waste dump district of different irrigation methods[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2016. [李艳茹. 不同灌溉方式下矿区排土场边坡植被恢复的灌溉制度与水分运移模拟研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2016.]

Preliminary study on the soil moisture of slopes of loess in Lanzhou New Area formed by engineering excavation in the early stage of revegetation

LIU Le^{1,2}, SUN Hongyi¹, CAI Zhonglan³, ZHANG Jianxin⁴, LI Dongze⁴

(1. Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. The Gansu Province Meteorological Service Center, Lanzhou 730020, China; 4. Gansu Huifeng Ecological Construction Co., Ltd., Lanzhou 730000, China)

Abstract: Lanzhou New Area is located in the west of the Loess Plateau, which is a typical arid area. Many engineering slopes with over 30° are formed during road construction. Revegetation on slopes plays an important role in improving local landscape and preventing soil erosion, and soil moisture status on slopes has a great impact on revegetation. Three types of soil preparation (the strip-shaped pit, the round-shaped pit and the original slope) were selected to study on the soil moisture of slopes of loess in Lanzhou New Area formed by engineering excavation in the early stage of revegetation. The results show that: (1) In the three types of soil preparation, the soil moisture condition of the strip-shaped pit is the best, and there is a statistically significant difference between the strip-shaped pit, the the round-shaped pit and the original slope ($P < 0.05$). (2) On the undisturbed slope plots under different irrigation frequency in 0 – 20 cm soil layer soil moisture content is low and in 20 to 50 cm soil layer soil moisture content is higher. With the increase of soil depth, the variation coefficient of soil water content decreases. With the decrease of irrigation frequency, the variation coefficient of soil water content increases, and the active soil layer increases from 0 – 10 cm to 0 – 40 cm, while the variation coefficient of 40 – 50 cm soil layer remains below 10% in different irrigation stages. (3) In the early stage of vegetation reconstruction of the slope, the soil moisture should be maintained at 8.4% ~ 10.8%, that is, the field water capacity 38% – 49%, in order to ensure the normal growth of plants; when the root length of the planted vegetation is more than 10 cm, it can be considered to change the sprinkling irrigation frequency from daily to alternate days, otherwise vegetation will be in danger of death; the results can provide reference for vegetation restoration and ecological construction of similar slopes of loess.

Key words: slopes; slope protection with vegetation; soil moisture; Loess Plateau; soil preparation

(责任编辑: 周成林; 编辑: 庞瑜, 周成林)