

公路石质边坡喷播绿化植被的降雨、灌溉水分分配特征

王英宇

(北京市首发天人生态景观有限公司,北京 102600)

摘要: 为提高边坡水分利用效率,通过客土喷播的方式人工模拟公路石质边坡,观测坡体表面土壤裂隙发育情况及地表径流、底层渗漏及土壤储存等水分分配过程,分析灌溉及降雨条件下的坡面水分分配特征。结果表明:坡体表面形成的土壤裂隙分布不均匀,呈现由坡顶至坡底逐渐减少的趋势,且阳坡不同坡位的裂隙总面积均大于阴坡;不同坡向坡体灌溉水分分配特征存在一定差异,阳坡 0.02% 的水分通过坡上植被蒸散消耗,7.00% 的灌溉用水沿着坡面运动形成地表径流,10.00% 的灌溉水分转化为底层渗漏量,53.00% 的灌溉水分被土壤储存;阴坡植物蒸散、地表径流、底层渗漏及土壤储存水分的比例分别为 0.01%,35.00%,0.25% 和 39.00%;随着植被覆盖度的增加,灌溉产生的地表径流减少,土壤储存水分增大;降雨强度对坡面水分分配特征具有显著影响,在小雨强条件下,约 95.00% 的降雨被土壤储存,底层渗漏量、地表径流分别在中雨强及大雨强条件下达到最大值;在不同雨强下,阴坡的地表径流是阳坡的 1.1~3.0 倍,阳坡的底层渗漏量大于阴坡且阳坡较阴坡具有更高的水分利用效率。该结果可为公路边坡植被恢复过程中水分的有效利用提供依据。

关键词: 公路边坡;水分分配特征;微喷灌;降雨

中图分类号: U418.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2018)04-0128-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcb.2018.04.020

Water Distribution Characteristics of Highway Slope Greening Under Irrigation and Rainfall Conditions

WANG Yingyu

(Beijing Shoufa Tianren Ecological Landscape Co., Ltd., Beijing 102600)

Abstract: To improve the water use efficiency of slope, cracks on slope, surface runoff, bottom leakage and soil storage were measured by the method of soil spraying, and the water distribution on slope was analyzed under irrigation and rainfall conditions. The results showed that the distribution of soil cracks on slope was not uniform, and the soil cracks tended to decrease from the top slope to the bottom. The total area of cracks on sunny slope was greater than that on the shady slope. Water distribution characteristics under irrigation condition varied from different slope directions. On the sunny slope, 0.02% of the water was dissipated through evapotranspiration, 7.00% of the irrigation water moved along the slope forming surface runoff, 10.00% of water turned into the bottom leakage and 53.00% of the irrigation water was stored in soil. The ratios of evapotranspiration, surface runoff, bottom leakage and soil moisture were 0.01%, 35.00%, 0.25% and 39.00% on the shady slope respectively. With the growth of vegetation coverage, the surface runoff formed by irrigation decreased and the soil water storage increased. Rainfall intensity had a significant effect on water distribution characteristics. About 95.00% of the rainfall was stored in the soil under the light rain, and the amount of bottom leakage and surface runoff reached the maximum under moderate and heavy rain conditions respectively. With various rainfall intensities, surface runoff on shady slopes was 1.1~3.0 times higher than sunny slopes. The sunny slopes had a higher water use efficiency with greater amount of bottom leakage than the shady slopes. These results could provide a scientific reference for the effective use of water in the highway slope greening.

Keywords: highway slope; water distribution characteristics; micro-sprinkler irrigation; rainfall

公路边坡日常养护具有工程量大、成本高等特点,因此多采用粗放管理。目前,公路边坡一般采用水车灌溉的方式,利用喷灌机器将水压到需要灌溉的区域,并且在端头安放喷嘴,将水均匀的分布在灌溉区域内。由于公路边坡坡度较大且土层较薄,灌溉至坡面上的水分很难被土壤储存,最终导致植物生长效果差。且过量的灌溉造成严重的水资源浪费,加剧了坡面的水土流失^[1-3]。因此,探明边坡灌溉水分分配特征对节约养护用水、优化灌溉制度、提高边坡植被恢复效果具有极其重要的意义。目前关于农业灌溉用水的有效利用的研究已有诸多报道^[4-7],但基于边坡绿化灌水有效利用的研究则较为少见。李艳茹^[8]分析了草原矿区排土场边坡不同灌溉方式下的水分运移规律,明确了苜蓿生长过程中的耗水规律及优化灌溉制度。张琼瑛等^[9]通过水量平衡原理提供了对公路岩质边坡绿化灌溉需水量进行估算的方法。相较于地面灌溉,坡面灌溉更容易导致水分的不均匀分布。Conzález等^[10]通过软件模拟研究了流域坡度与灌溉均匀性的关系。关于坡地喷灌的研究主要集中于微喷灌立管倾角、喷射仰角以及喷头的组合布置优化等因素对坡地水量分布的影响^[11-15]。公路边坡喷灌及水量分布试验受自然条件及测量条件制约难以进行。本文通过客土喷播的方式人工模拟公路石质边坡,分析灌溉及降雨条件下的坡面水分分配特征,以为公路边坡水分的有效利用提供依据。

1 试验区概况

试验区位于北京市门头沟区军庄镇,北京市首发天人生态景观有限公司西北项目中心,地理位置为 $39^{\circ}59'27.79''N, 116^{\circ}05'3.74''E$,海拔120 m。属于大陆性季风气候,年平均气温为 $11.7^{\circ}C$,全年日照时间2470 h,多年平均降水量528.7 mm,降雨多集中在7—9月,约占全年降水量的60%,年蒸发量1632 mm。试验所用土壤为公路边坡填方用土,土壤质地为砂壤土,与草炭、珍珠岩、保水剂、黏结剂等材料混合成喷播基质。试验所用植物种为华北地区边坡绿化常用植物种紫穗槐(*Amorpha fruticosa*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)和细叶苔草(*Carex rigescens*)。

2 材料与方法

2.1 试验设计

试验通过客土喷播的方式人工模拟公路石质边坡,所用容器长2 m,宽1 m,坡度 45° ,试验坡断面设计见图1。斜坡由上到下依次是无纺布覆盖、3 cm种子层及14 cm基质层,底部不透水层模拟石质边坡。试验共设置10个阳坡,4个阴坡共14个斜坡,于2017年7月27日施工完毕。客土喷播工程完成之后,坡面植被通过微喷灌进行日常养护。微喷立管垂直于坡面布置,微喷

头射程1 m,强度为60 L/H,根据微喷射程布设坡面,保证灌溉的均匀性,布置方式见图2。2017年7月27日至8月7日为植物出苗期,早晚各灌溉1次。植被生长期灌溉频率为1~2次/d,2017年10—11月逐渐减少水分供给,灌溉频率为两周1次,入冬前浇冻水。灌水定额为 $0.5\text{ mm}/(\text{次}\cdot\text{m}^2)$ 。降雨较充足的日期不进行养护灌水。

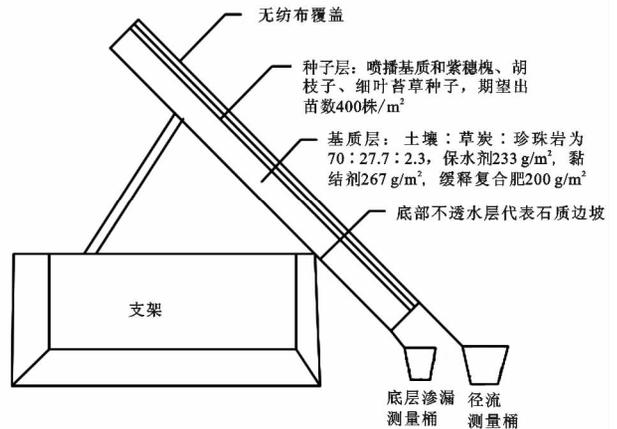


图1 试验坡断面设计

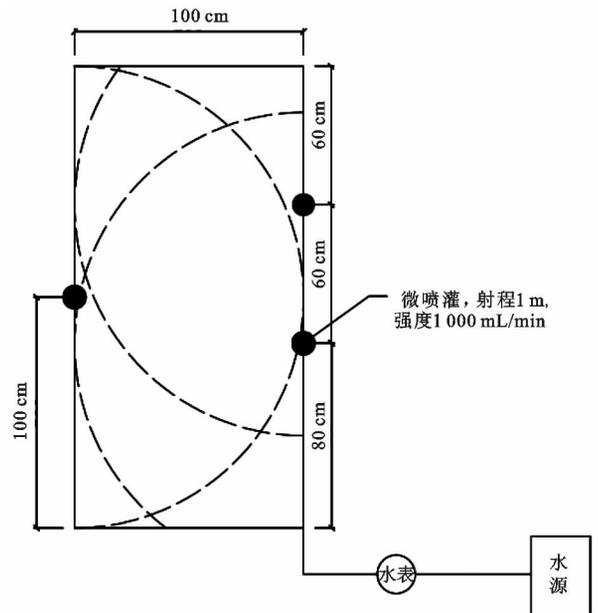


图2 微喷灌布设方式

2.2 气象数据采集

利用 Vantage pro2 型自动气象站对试验区气象资料进行采集,统计2017年8—9月的日降雨量和日最高气温及日最低气温的平均值,气象数据统计见图3。

2.3 坡体表面性质提取

分别在坡顶、坡中及坡底布设6个面积为 $50\text{ cm}\times 60\text{ cm}$ 的小样方,样方布设见图4。每周垂直于坡面拍摄各小样方情况,通过 Photoshop 软件像素提取功能计算各小样方植被覆盖度以及坡面裂隙总面积。

2.4 水分分配测定

2.4.1 灌溉量(I) 灌溉量为坡面水分来源,每次灌溉结束后读取各坡面水表读数,记录各坡面灌溉量 $I(\text{mm})$ 。

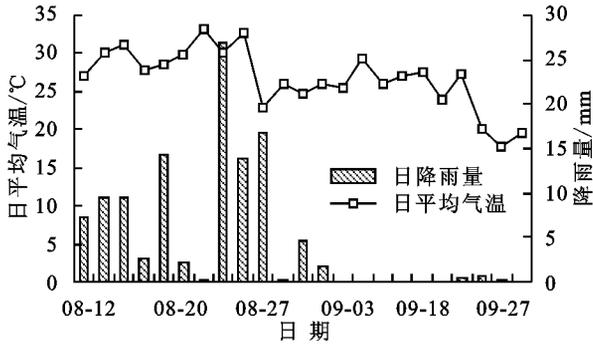


图 3 试验期的日降雨量和日平均气温

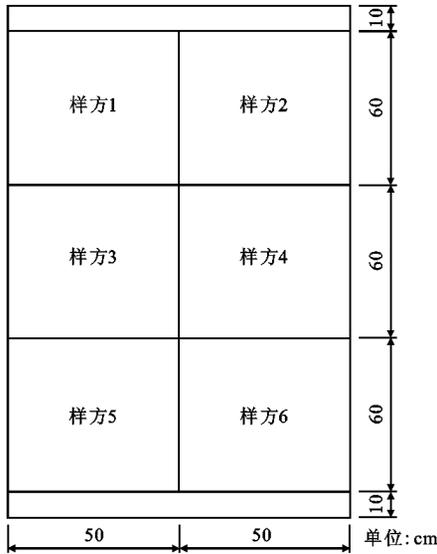


图 4 样方布设

2.4.2 降雨量(P) 降雨量为坡面水分来源,利用 Vantage pro2 型自动气象站采集试验区 2017 年 8—9 月的日降雨量 P (mm)。

2.4.3 地表径流(R) 每次灌溉及降雨结束,使坡面静置 10 min,用量筒测量外接径流桶内水量,测量结果除以坡面面积即为地表径流 R (mm)。

2.4.4 底层渗漏(L) 每次灌溉及降雨结束后,使坡面静置 10 min,用量筒测量外接底层渗漏桶内水量,测量结果除以坡面面积即为底层渗漏 L (mm)。

2.4.5 植物蒸散量(ET) 植物蒸散量反映植物的蒸发蒸腾作用,植物蒸散量的估算采用张琼瑛等^[9]在估算公路岩质边坡绿化灌溉需水量的方法,计算公式为:

$$ET = K_s K_d K_m K_y ET_0 \quad (1)$$

式中: K_s 为植物种类因子,取值 0.5; K_d 为密度因子,取值 0.6~1.3; K_m 为小气候因子,取值 0.5~1.4; K_y 为生物量因子,取值 0.5~1.3; ET_0 为参考作物蒸散量,使用孙璐^[16]北京市常用园林地被植物蒸散研究的计算结果, ET_0 取 2 mm/d。

2.4.6 蒸发及漂移损失(D) 喷灌水的利用主要取决于蒸发漂移损失的大小^[17]。使用秋华等^[18]在大田试验中对蒸发漂移损失的比例估算,认为有

20.00%的喷灌用水经过蒸发及漂移损失。

2.4.7 土壤储存水分(S) 根据水量平衡原理计算土壤储存水分 S ,计算方法为:

$$S = I + P - R - L - ET - D$$

式中: S 为土壤储存水分(mm); I 为灌溉量(mm); P 为降雨量(mm); R 为地表径流(mm); L 为底层渗漏(mm); ET 为植物蒸散量(mm); D 为灌溉水在空气中的蒸发及漂移损失(mm)。

2.5 数据处理与统计

运用 SPSS 25 软件,对数据进行相关性分析及显著性差异检验;采用 Excel 软件进行数据统计及图表绘制。

3 结果与分析

3.1 坡面裂隙发育特征

坡体表面土壤裂隙可作为灌溉时的优先流途径,降低了坡面的水肥利用率,并影响坡面的水分分配过程^[19]。不同坡向及坡位的裂隙发育情况见表 1。由表 1 可知,各斜坡坡面裂隙总面积由坡顶至坡底逐渐减少,原因是坡顶土壤水分全部来自灌溉水分,坡中及坡底的水分来源于灌溉用水及坡顶未入渗的水分补给,导致坡面不同坡位土壤水分的不均匀分布,最终加剧了坡面裂隙的不均匀分布。从整体平均值来看,阳坡不同坡位的裂隙面积均大于阴坡。在坡顶,阳坡的裂隙面积是阴坡的 1.7 倍,阳坡坡中的裂隙面积是阴坡的 1.7 倍,阳坡坡底 100 cm²/m² 裂隙面积大于阴坡的 54 cm²/m²,说明坡向对坡体表面裂隙的发育有着一定的影响,原因可能是不同坡向坡体表面接受的太阳净辐射不同,坡体表面水热状况存在一定差异,导致不同坡向坡体表面裂隙发育的差异。

表 1 坡面裂隙总面积 单位:cm²/m²

| 坡向 | 斜坡 | 坡位 | | |
|----|-----|-----|-----|-----|
| | | 坡顶 | 坡中 | 坡底 |
| 阳坡 | 1 | 163 | 115 | 108 |
| | 2 | 196 | 143 | 50 |
| | 3 | 122 | 66 | 38 |
| | 4 | 178 | 165 | 102 |
| | 5 | 261 | 121 | 74 |
| | 6 | 197 | 130 | 54 |
| | 7 | 223 | 180 | 76 |
| | 8 | 210 | 184 | 101 |
| | 9 | 371 | 242 | 218 |
| | 10 | 167 | 254 | 180 |
| | 平均值 | 209 | 160 | 100 |
| 阴坡 | 11 | 139 | 127 | 83 |
| | 12 | 248 | 170 | 89 |
| | 13 | 59 | 23 | 22 |
| | 14 | 59 | 53 | 22 |
| | 平均值 | 126 | 94 | 54 |

3.2 灌溉条件下坡面水分分配特征

灌溉水分经过漂移蒸发、土壤入渗等过程,可转化

为植物蒸散(ET)、地表径流(R)、底层渗漏(D)、土壤储存水分(S)、漂移及蒸发损失(D)5个部分。试验共观测15次灌溉,每次灌溉14个坡面,共得到210组灌溉水分分配数据。灌溉水分在45°坡面上的分配情况见图5。中位数可以反映水分分配的大致趋势,由图5(a)可知,在阳坡水分分配过程中,0.02%的水分通过坡上植被蒸散消耗,7.00%的灌溉用水未通过土壤入渗过程,沿着坡面运动形成地表径流。这是因为坡体坡度较陡,土壤入渗速率小于坡面流速,最终产生地表径流。此外,10.00%的灌溉水分转化为底层渗漏量,这一部分水分入渗至底层不透水层或通过坡体表面裂隙向底层渗漏,不能被浅层根系有效利用。53.00%的灌溉水分被土壤储存,从而进一步被根系利用,这一结果与González等^[10]通过灌溉及排水系统计算得出的水分利用效率在50%~80%的研究结果一致。

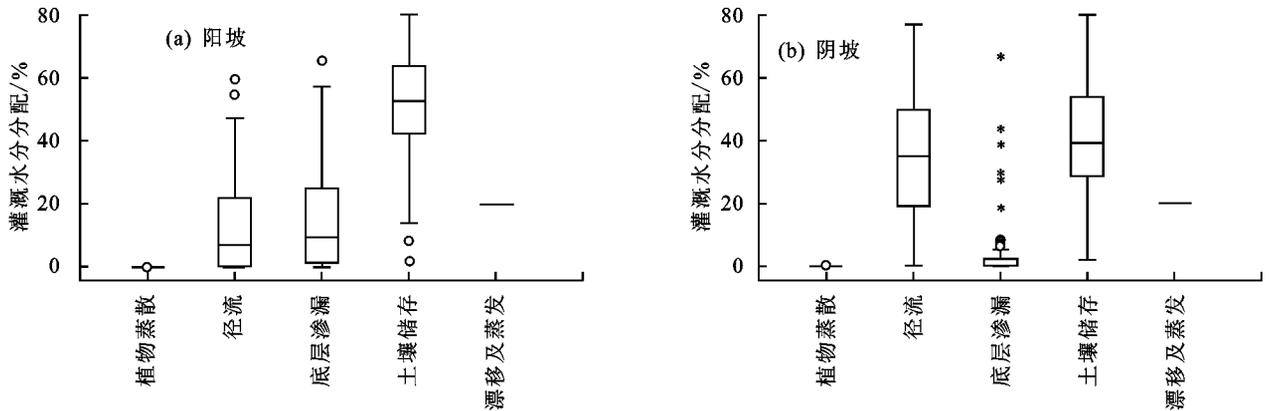


图5 灌溉条件下坡面水分分配

3.3 植被对坡面水分分配的影响

坡面植被地上部分及地下根系影响土壤水分入渗及地表径流形成等过程,对灌溉水分分配必然存在一定影响。坡度为45°时,不同植被覆盖度下灌溉水分分配特征见表2。

不同坡向植被覆盖度对地表径流及土壤储存水分均有显著影响,呈现随着植被覆盖度的增加径流减少、土壤储存水分增大的趋势。阳坡植被覆盖度0~10%与植被覆盖度50%~60%条件下的地表径流在0.05水平上差异显著,阴坡植被覆盖度10%~20%与植被覆盖度40%~50%条件下的地表径流存在显著差异。此外,阴坡40%~50%植被覆盖条件下的土壤储存水分与0~20%植被覆盖条件下的观测结果有显著差异。说明植被对减小地表径流、增大土壤储存水分有明显的的作用。原因是植被地上部分降低了坡面流速,增加了水分的入渗比例,更多的水分被储存在土壤中,进而被根系有效利用。阴坡和阳坡植被覆盖度的变化与底层渗漏无明显关系,这可能与植被建植初期根系不发达,以及设计灌水量偏大存在一定的关系。

由图5(b)可知,阴坡植物蒸散(ET)、地表径流(R)、底层渗漏(D)、土壤储存水分(S)、漂移及蒸发损失(D)的比例分别为0.01%,35.00%,0.25%,39.00%及20.00%。坡向不同,坡体表面水热情况不同,灌溉水分分配特征存在一定差异。阴坡地表径流是阳坡的5倍,原因是阴坡各坡位坡面土壤裂隙均少于阳坡,土壤裂隙的减少降低了底层渗漏量,更多的水分以地表径流的方式流出。阳坡的土壤储存水分大于阴坡,说明在相同灌水频次及灌溉量的条件下,阳坡的水分利用效率高于阴坡,这可能是由于阳坡的太阳净辐射大于阴坡,不同坡向土壤水分存在一定差异,导致阴阳坡水分利用效率存在一定差异。上下线相对于中位数的跨度,以及地表径流、底层渗漏产生的一些极端值点表明水分分配存在不够集中的现象,可能是因为坡面土壤裂隙的不均匀分布导致。

表2 不同植被覆盖度下的水分分配特征

| 坡向 | 植被覆盖度 | 水分分配 | | |
|----|-------|---------------|--------------|---------------|
| | | 地表径流 | 底层渗漏 | 土壤储存 |
| 阳坡 | 0~10 | 15.37±15.03a | 15.18±16.47a | 49.43±17.04a |
| | 10~20 | 10.35±13.55ab | 15.08±13.99a | 54.56±19.17a |
| | 20~30 | 5.21±8.24ab | 11.07±8.48a | 63.71±9.30a |
| | 30~40 | 9.76±10.05ab | 17.90±15.13a | 52.32±14.68a |
| | 40~50 | 4.22±9.00ab | 9.12±10.24a | 66.63±17.33a |
| | 50~60 | 0.91±0.99b | 14.83±6.51a | 64.22±6.73a |
| | 显著性 | 0.05 | 0.89 | 0.03 |
| 阴坡 | 0~10 | 37.43±17.95ab | 10.74±23.10a | 31.83±19.30b |
| | 10~20 | 41.06±20.62a | 4.69±12.84a | 34.24±17.74b |
| | 20~30 | 34.04±12.07ab | 0.14±0.00a | 45.81±12.08ab |
| | 30~40 | 35.54±14.14ab | 3.26±3.99a | 41.18±12.53ab |
| | 40~50 | 16.20±6.35b | 2.48±3.46a | 61.29±4.98a |
| | 50~60 | 15.61±18.42ab | 10.67±11.79a | 53.70±14.41ab |
| | 显著性 | 0.02 | 0.71 | 0.01 |

注:表中数据为平均值±标准差;同一坡向中同列相同字母表示差异不显著($P<0.05$)。下同。

3.4 降雨条件下坡面水分分配特征

降雨作为边坡水分补给的一条重要途径,对边坡植被恢复具有重要影响。从表3可以看出,不同降雨强度条件下坡面水分分配特征存在显著差异。在小

雨强条件下降雨强度小于土壤入渗速率,绝大部分降雨被土壤储存从而进一步被植物有效利用,这一比例在阳坡及阴坡分别为 97.23%,94.84%。随着降雨强度的逐渐增大,底层渗漏呈现先增加后减小的趋势,在中雨强条件下,阳坡及阴坡底层渗漏量均达到最大值,分别占降雨的 48.45%和 43.49%。阳坡及阴坡在大雨强条件下,地表径流量达到最大值,分别占降雨的 30.05%,53.10%。相较于大雨强,暴雨条件下的地表径流有所减少,底层渗漏量增加。

从不同坡向来看,降雨条件下阴坡及阳坡的水分分配特征存在一定差异。在不同雨强下,阴坡的地表径流量是阳坡的 1.1~3.0 倍。阳坡的底层渗漏量在各个雨强条件下均大于阴坡,这可能与不同坡向坡体表面裂隙分布的差异有关。相较于阴坡,阳坡土壤储存水分更高,说明阳坡具有更高的水分利用效率,能够更为有效的利用降雨。

表 3 降雨条件下坡面水分分配

| 坡向 | 12 小时内 雨量/mm | 地表 径流/% | 底层 渗漏/% | 土壤 储存/% |
|----|-----------------|--------------|--------------|--------------|
| 阳坡 | 小雨(<5) | 2.24±1.61b | 0.53±0.62c | 97.23±1.58a |
| | 中雨(5~14.9) | 7.57±6.26b | 48.45±7.66a | 43.98±10.42c |
| | 大雨(15~29.9) | 30.05±19.02a | 14.89±13.79b | 55.06±21.35b |
| | 暴雨(30~69.9) | 21.51±15.31a | 17.96±14.03b | 60.53±13.11b |
| | 显著性 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 阴坡 | 小雨(<5) | 2.45±0.98b | 2.71±1.53bc | 94.84±2.07 |
| | 中雨(5~14.9) | 22.17±25.65b | 43.49±2.48a | 34.35±23.36 |
| | 大雨(15~29.9) | 53.10±29.70a | 0.36±0.57c | 46.54±29.52 |
| | 暴雨(30~69.9) | 50.01±11.31a | 8.72±8.74b | 41.26±18.83 |
| | 显著性 | 0.002 | 0.000 | 0.002 |

4 结论

(1)不同坡向及坡位的裂隙发育情况存在差异。各斜坡坡面裂隙分布不均匀,由坡顶至坡底逐渐减少,且阳坡不同坡位的裂隙总面积均大于阴坡。

(2)不同坡向坡体灌溉水分分配特征存在一定差异。在阳坡水分分配过程中,0.02%的水分通过坡上植被蒸散消耗,7.00%的灌溉用水沿着坡面运动形成地表径流,10.00%的灌溉水分转化为底层渗漏量,53.00%的灌溉水分被土壤储存,从而进一步被根系利用。阴坡植物蒸散(ET)、地表径流(R)、底层渗漏(D)、土壤储存水分(S)、漂移及蒸发损失(D)的比例分别为 0.01%,35.00%,0.25%,39.00%和 20.00%。

(3)植被对减小地表径流、增大土壤储存水分有明显的作用。随着植被覆盖度的增加,地表径流减少,土壤储存水分增大。此外,在植被建植初期植被覆盖度的变化与底层渗漏无明显关系。

(4)不同降雨强度对坡面水分分配影响显著。小雨强时,绝大部分降雨被土壤储存,这一比例约占降

雨量的 95.00%。随着降雨强度的逐渐增大,底层渗漏呈现先增加后减小的趋势,并在中雨强条件下达到最大值。在大雨强条件下,地表径流量达到最大值。相较于大雨强,暴雨条件下的地表径流有所减少,底层渗漏量增加。

(5)降雨条件下,阴坡及阳坡的水分分配特征存在一定差异。在不同雨强下,阴坡的地表径流量是阳坡的 1.1~3.0 倍。阳坡的底层渗漏量在各个雨强条件下均大于阴坡,且阳坡具有更高的水分利用效率,能够更为有效的利用降雨。

5 建议

在公路边坡植被建设初期,坡体表面常发育出大面积的土壤裂隙,造成大量的灌溉水分损失。通过合理选择喷播用土、合理配置喷播基质中保水剂及黏结剂比例、无纺布覆盖坡面等措施,可减少坡面裂隙的发育。在植被建植过程中,坡顶植被的生长情况通常差于坡中及坡底,为解决坡面水分不均匀分布导致植被恢复效果不理想的问题,日常灌溉养护应按照坡面由上到下的灌溉顺序依次进行灌溉,并可根据植被的生长状况增加坡顶灌溉的频次。植被对增大土壤水分利用效率有明显的作用,在植被建植初期边坡土壤储存水分的能力较弱,应采取高频次、高灌溉量的灌溉方式。随着坡体植被覆盖度的增加可逐渐减少灌溉频次及灌溉量。阴坡、阳坡因坡体表面水热状况不同应采用不同的灌溉方式。阳坡坡体表面土壤裂隙较多造成大量的底层渗漏损失,应采取单次灌溉时间短、高频次的灌溉制度增大水分利用效率。阴坡坡体表面土壤裂隙较少,且土壤中储存水分较为充足,应采取单次灌溉时间短、低频次的灌溉制度节约用水。且中雨强到暴雨情况下,阴坡常产生大量的地表径流,应加大阴坡安全防护的力度。

参考文献:

- [1] 李娅,姚传勤. 边坡节水灌溉生态护坡施工技术[J]. 低温建筑技术,2017,39(6):147-149,152.
- [2] 王海星,吴文佑,蒋红,等. 西南地区高陡边坡植被修复灌溉技术[J]. 四川水泥,2016(12):307.
- [3] 范明涛,白建平,王岚,等. 满足公路边坡坡面灌溉均匀度的技术研究[J]. 公路交通科技(应用技术版),2011(3):237-240.
- [4] 谢春燕,倪九派,魏朝富. 节水灌溉方式下作物需水量和灌溉需水量研究综述[J]. 中国农学通报,2004,20(5):143-147.
- [5] 王志强,朝伦巴根,高瑞忠,等. 多年生人工牧草高效用水灌溉制度的研究[J]. 农业工程学报,2006,22(12):49-55.
- [6] 吴兴荣,华根福,莫树志. 新疆北部苜蓿耗水规律及灌溉制度研究[J]. 节水灌溉,2012(2):38-40.

- [5] 杨海龙,朱金兆,毕利东. 三峡库区森林流域生态系统土壤渗透性能的研究[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 63-65, 69.
- [6] 刘道平,陈三雄,张金池,等. 浙江安吉主要林地类型土壤渗透性[J]. 应用生态学报, 2007, 18(3): 493-498.
- [7] 安韶山,黄懿梅,李壁成,等. 黄土丘陵区植被恢复中土壤团聚体演变及其与土壤性质的关系[J]. 土壤通报, 2006, 37(1): 45-50.
- [8] 郑芳,张建军. 晋西黄土区不同植被覆盖流域的水文响应[J]. 生态学报, 2010, 30(20): 5475-5484.
- [9] 吴钦孝,杨文治. 黄土高原植被建设与可持续发展[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [10] 邹厚远,程积民,周麟. 黄土高原草原植被的自然恢复演替及调节[J]. 水土保持研究, 1998, 5(1): 126-138.
- [11] 王国梁,刘国彬,刘芳,等. 黄土沟壑区植被恢复过程中植物群落组成及结构变化[J]. 生态学报, 2003, 23(12): 2550-2557.
- [12] 杜峰,山仑,梁宗锁. 陕北黄土丘陵区撂荒演替研究[J]. 草地学报, 2005, 13(4): 328-333.
- [13] 白文娟,焦菊英,马祥华,等. 黄土丘陵沟壑区退耕地自然恢复植物群落的分类与排序[J]. 西北植物学报, 2005, 25(7): 1317-1322.
- [14] 李志,刘文兆,王秋贤. 黄土塬区不同地形部位和土地利用方式对土壤物理性质的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1303-1308.
- [15] 张希彪,上官周平. 人为干扰对黄土高原子午岭油松人工林土壤物理性质的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(11): 3685-3695.
- [16] 包志刚. 大青山不同植被类型下土壤物理特性和水分动态研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2010.
- [17] 侯扶江,肖金玉,南志标. 黄土高原退耕地的生态恢复[J]. 应用生态学报, 2002, 13(8): 923-929.
- [18] 许明祥,刘国彬. 黄土丘陵区刺槐人工林土壤养分特征及演变[J]. 植物营养与肥料学报, 2004, 10(1): 40-46.
- [19] 张笑培. 黄土高原丘陵沟壑区植被恢复生态效应研究[D]. 陕西 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- [20] 张万儒,许本彤. 森林土壤定位研究方法[M]. 北京: 中国林业出版社, 1986.
- [21] 马维伟,王辉,王修华,等. 甘南尕斯湖不同湿地类型土壤物理特性及其水源涵养功能[J]. 水土保持学报, 2012, 26(4): 194-198, 220.
- [22] 李民义. 晋西黄土区不同植被类型植物多样性及土壤水文物理特征研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.
- [23] 王纪杰,俞元春,陈容,等. 不同栽培代次、林龄的桉树人工林土壤渗透性研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(2): 78-82, 103.
- (上接第 132 页)
- [7] 杨秀英,杜太生,潘英华,等. 沙漠绿洲区不同灌水方式条件下玉米灌溉制度研究[J]. 灌溉排水学报, 2003, 22(3): 22-23.
- [8] 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.
- [9] 张琼瑛,李绍才,龙凤,等. 公路岩质边坡绿化灌溉需水量研究[J]. 节水灌溉, 2013(2): 10-13, 16.
- [10] González C, Cervera L, Moret-Fernández D. Basin irrigation design with longitudinal slope[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(10): 1516-1522.
- [11] 陈学敏. 由平地喷头水量分布向坡地转化的数学模型[J]. 喷灌技术, 1991(3): 44-48.
- [12] 崔天怀. 地面坡度对喷灌均匀度的影响[J]. 灌溉排水学报, 1993, 12(1): 52-55.
- [13] 向清江,陈超,魏洋洋. 球形接头调角度应用于坡地喷灌[J]. 中国农村水利水电, 2011(2): 69-71, 78.
- [14] 黄修桥,仵峰,范永申. 喷头仰角调节机构的研制及其对喷头性能的影响[J]. 排灌机械, 2006, 24(5): 29-32.
- [15] 向清江,陈超,魏洋洋. 变射程喷头在坡地喷灌中的应用[J]. 农业工程学报, 2011, 27(8): 115-119.
- [16] 孙璐. 北京常用园林地被植物蒸散与节水灌溉研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2007: 9-10.
- [17] 余根坚,高占义,赵元忠. 干旱风沙区喷灌蒸发漂移损失试验研究[J]. 中国农村水利水电, 2002(11): 67-69.
- [18] 秋华,王文焰. 喷灌系统不同工作条件下的蒸发及漂移损失[J]. 喷灌技术, 1985(3): 46.
- [19] 朱磊,尤今,陈泓泓. 裂隙网络对坡面流及土壤水分入渗影响[J]. 灌溉排水学报, 2017, 36(12): 95-100.