[文章编号] 1003－4684(2025)04-0076-08

# 自然降雨条件下生态防护边坡土壤水分动态分析

肖衡林[1,2]，杨宇天[1]，白玉霞[1]

(1 湖北工业大学土木建筑与环境学院，湖北 武汉 430068；
2 河湖健康智慧感知与生态修复教育部重点实验室，湖北 武汉 430068)

[摘 要] 土壤水分变化对边坡稳定具有重要影响。为研究自然降雨条件下，植物防护边坡中土壤水分的时空变化规律，开展了大型模型生态边坡试验，建造了三个坡比为 1∶1.75、高为 2 m 的边坡，分别采用狗牙根和多花木兰护坡，并将裸土边坡作为对照组。以代表性的一场自然短时中等降雨为背景，分析了不同护坡植被覆盖下边坡不同深度(20 cm、40 cm、60 cm 和 100 cm)、不同坡面位置(坡上、坡中和坡底)情况下，三个试验边坡的土壤水分湿润锋运移速率、含水率时程曲线以及水分再分布规律。试验结果表明：1)在降雨过程中狗牙根边坡湿润锋运移速率最大，裸土边坡次之，多花木兰防护边坡的最慢，三者湿润锋的深度分别为 40 cm、28 cm 和 12 cm，降雨结束后，三个试验边坡的湿润锋运移速率均随之降低；2)在降雨入渗过程中，狗牙根防护边坡整体入渗速率和入渗量最大，多花木兰防护边坡最小；此外，植被生态边坡表面不同位置入渗速率均沿坡底向坡中、坡上依次降低；3)降雨结束后，三个试验边坡水分再分布规律差异明显，相比裸土边坡，狗牙根防护边坡表面 0～40 cm 土壤含水率有明显降低，但更深层土壤含水率稳定基本不变，而多花木兰防护边坡各深度含水率几乎没有变化；4)降雨结束后，三个试验边坡表层土壤含水率变化差值随时间呈现逐渐降低的规律，并且生态边坡不同的坡面位置对土壤含水率变化差值大小的影响随时间逐渐降低。

[关键词] 生态护坡；植被种类；生态基材；降雨入渗；水分再分布

[中图分类号] S157.1 [文献标识码] A

## 1 研究背景

国家“十四五”规划和二〇三五年远景目标进一步提出了坚持“自然恢复为主，守住自然生态安全边界”的绿色发展理念[1]。在此背景下，如何对数量庞大的裸露工程边坡进行科学的生态防护，是当前岩土工程重要的研究课题。

生态护坡是综合土力学、土壤学和植物学等相关理论知识对边坡进行支护，形成由植物为主体的综合边坡治理系统的护坡技术[2]，既能防治工程灾害，又满足生态环境保护需求，是当前边坡工程领域的研究热点。大量的实践和研究表明，降雨是影响边坡生态防护效果与长期稳定性的主要因素，而降雨条件下生态边坡土壤水分时空演化规律是开展边坡系统水文过程及长期稳定性研究的基础[3]。目前，已经有大量学者围绕这一主题开展相关研究，并取得一批重要的研究成果。在植物对边坡稳定性影响方面，吴宏伟[4]系统研究了植被和土体的相互作用关系，认为植被可以有效减少土体含水量、增加土体基质吸力，进而提高边坡稳定性。Zhu 等[5]研究了根系形态及深度对土壤蒸腾诱导吸力增强的影响，研究表明，在根系总数量相同的条件下，浅层根系吸力明显高于深层根系。李毅等[6]通过研究发现：植被的覆盖能够增加土壤的初始含水率和稳定入渗率。在不同植物覆盖对边坡土壤水分动态变化的影响方面，Yu 等[7]研究发现不同植被覆盖下土壤储水量存在较大差异。曾辰[8]对四种不同类型植物覆盖坡面的土壤水循环进行研究，发现降雨条件下荒草地的稳定入渗速率最大，其次是苜蓿，柠条，裸地。黄俊等[9]认为种植植物的边坡土壤入渗率大于裸土边坡，且差异极显著；但植被边坡之间的差异并不明显，其中黑麦草坡面稳定入渗率最大，春小麦及苜蓿坡面次之。在边坡不同位置对边坡土壤入渗的影响方面，李文政等[10]在大老岭林区研究发现，坡上土壤入渗能力最好，坡中和坡底的贮水能力更强。李平等[11]研究发现：青海云杉林地、祁连圆柏林地

[收稿日期] 2023－03－31
[基金项目] 国家自然科学基金联合基金重点项目(U22A20232)；国家自然科学基金面上项目(52078195)；湖北省自然科学基金创新群体项目(2020CFA046)
[第一作者] 肖衡林(1977－)，男，湖南衡阳人，湖北工业大学教授，研究方向为环境岩土工程、生态脆弱区生态修复。
[通信作者] 白玉霞(1991－)，女，宁夏彭阳人，湖北工业大学讲师，研究方向为土体改良与边坡生态修复。

和华北落叶松林地在不同坡位间的土壤渗透速率不存在显著差异；而吴钦孝等[12]通过研究发现：由于水土流失，顶部细土在边坡下部堆积，使水分入渗通道堵塞导致植被边坡沿坡面向下土壤渗透率减小。在水分再分布方面，Kargas 等[13]使用 HYDRUS-1D 软件模拟土壤水分再分布过程发现再分布速率在早期更快，随时间逐渐减缓。包含等[14]在室内开展模型试验中发现：随着降雨结束土壤水分再分布主要受到土水势影响，伴随着水分入渗的结束，蒸发作用逐渐成为主要影响因子。

纵观已有的研究，针对降雨条件下边坡水分演化规律研究多以天然植被边坡或无基材植被边坡为主。为进一步提高坡面抗冲刷能力，减少水土与种子流失、护育植物初期发芽生长，现代生态护坡技术联合植物与生态基材进行生态护坡，在坡面形成较为坚固的防渗结构，并对土壤水分的入渗、蒸发产生影响[15-16]。目前，关于植物与生态基材联合作用下生态边坡土壤水分时空演化规律的研究尚不深入，不同植物覆盖的影响尚不清楚，在一定程度上限制了生态护坡技术理论的进一步发展与推广。

因此，本研究聚焦武汉地区常见的狗牙根与多花木兰生态防护边坡类型[17-18]，通过建造坡比为 1∶1.75的植物-生态基材生态防护边坡模型（下文简称生态边坡），以裸土边坡作为参考对象，待护坡植物在自然条件下成坪后，监测多次自然降雨条件下三个边坡坡内不同深度和不同坡位的土壤体积含水率变化，并选取一场典型的自然降雨条件（持续 8 h 总降雨量为 26 mm 的天然短时中雨）进行研究，分析狗牙根和多花木兰生态防护边坡在降雨过程中的水分入渗特性，以及降雨结束后植物蒸腾作用下边坡水分再分布规律。

## 2　试验材料与方法

### 2.1　试验场地气候条件

试验场地位于武汉市某生态护坡中试基地，北纬 30°29′12″，东经 114°18′14″，属亚热带季风性湿润气候，年平均气温 17.5℃，最热月（7 月）平均气温 30℃，最冷月（1 月）平均气温 4.5℃，年平均降雨量 1284 mm，年平均相对湿度 81%，年平均蒸发量 1494 mm。

### 2.2　生态边坡模型建设

本研究建设的生态边坡模型东西向总长5.3 m，高 2 m，每个边坡宽 1.5 m，长 4 m，坡比为 1∶1.75，坡向朝北，边坡底部和背部与自然土壤直接接触，允许水分从此处排出。

生态边坡模型土壤填筑所用的土料为某小区改造工程深基坑黏土，其液限为 41%，塑限为 23%，最大干密度为 1.75，最优含水率为 20%，渗透系数为 $8.10\times10^{-5}$ cm/s，填筑时压实度控制为 85%；在边坡模型土壤填筑过程中，狗牙根与多花木兰边坡在填土到距离设计高度 3 cm 后停止填筑，在其表面铺设一层厚 3 cm 的生态基材，生态基材中水泥、绿化添加剂、植物种子的质量比为 8∶3.5∶0.05；对于裸土边坡则填筑到设计高度时停止填筑。填筑完成后对试验边坡进行覆膜养护，待植物发芽后撤去保护膜。边坡模型建设施工完成现场如图 1 所示。从左至右依次为狗牙根生态防护边坡（下文简称狗牙根边坡）、多花木兰生态防护边坡（下文简称多花木兰边坡）和裸土边坡。

在填筑模型时同步埋设体积含水率传感器，选用的传感器型号为 SW-100（土壤体积含水率，精度为 0.1%）。边坡共铺设 11 个高度敏感的水分传感器，位于生态边坡的中轴线上，沿着垂直坡面由浅入深 20 cm、40 cm、60 cm、100 cm 和 150 cm 布置（土壤水分入渗速率随着土壤深度的增加逐渐减小，因此在 0～60 cm 土壤区域加密布置含水率传感器），编号分别为 $W_{上1}$ 到 $W_{上5}$、$W_{中1}$ 到 $W_{中4}$、$W_{下1}$ 和 $W_{下2}$，分别位于垂直坡面的 1/4、1/2 和 3/4 处（坡上、坡中和坡底），传感器布设如图 2 所示。




图 1　生态边坡模型

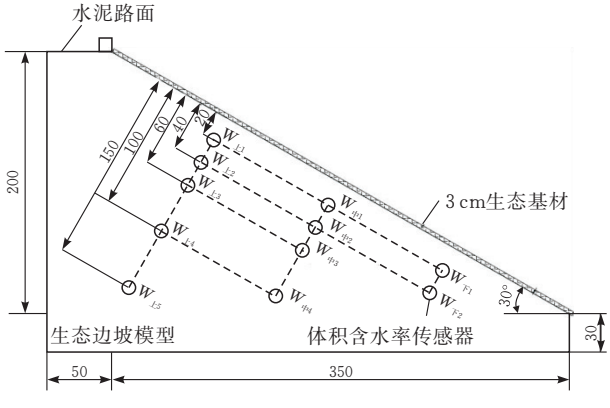



图 2　生态边坡模型水分传感器布置　cm

待生态边坡模型植物在自然条件成坪后进行试验。试验基地的气象数据由试验场地内安装的太阳能多功能气象站提供，可实时监测降雨量、累计降雨量、温度、风向、风速等数据。

### 2.3 降雨情况介绍

生态边坡模型自植物发芽后共经历了 7 次大雨(>8 mm/h)、9 次中雨(2～8 mm/h)、15 次小雨(<2 mm/h),三个试验边坡在自然条件下成坪后的状态如图 3 所示。其中,裸土边坡由于坡面无任何防护措施,在多次降雨-蒸发循环作用下,坡面土体松散,水土流失严重,沿坡面形成了数条冲沟,最深处达 4 cm(如图 3a 所示);而狗牙根和多花木兰边坡植物茂密,长势良好,坡面植物已成坪,对坡面起到很好的防护作用,坡面未见明显的冲沟和水土流失现象(如图 3b 和图 3c 所示)。通过认真观察狗牙根边坡,发现:植株生长茂密,覆盖度达 90%以上,草甸厚约 20 cm,单株平均长度约为 40 cm,根系长为 20～40 cm,坡面无明显裂隙,但边坡表面粗糙,凹凸不平,存在大量孔隙,这可能是由于狗牙根种植密度大,其根系生长穿透坡面生态基材造成的。相比于狗牙根边坡,多花木兰边坡坡面植株较为稀疏,但多花木兰枝繁叶茂,覆盖度达 80%,单株平均高度约为 140 cm,根系长为 50～60 cm,并且坡面生态基材较完整,未见明显的裂隙和孔隙,表明其在坡面形成了完整的防护层。



(a)裸土边坡 (b)狗牙根边坡 (c)多花木兰边坡

图 3 生态边坡模型植物生长状态

植物成坪后,利用水分传感器实时监测三个边坡的土壤水分变化情况,通过研究发现:三个边坡在多次降雨条件下,边坡内不同深度处含水率变化具有相似的变化规律。因此,为了深入分析含水率时空变化规律,本文选取 2022 年 4 月 22 日一场历时 8 h 累计降雨量为 26 mm 的典型降雨进行研究,系统分析了狗牙根和多花木兰边坡中降雨湿润锋、含水率时程曲线以及降雨结束后水分再分布规律。此次降雨前试验基地经历约 10 d 的晴天,试验边坡土壤含水率保持稳定。降雨在 22 日 15 时开始并逐渐增强,在 17 时降雨强度达到峰值 8.2 mm/h 并持续 1 h,此后降雨强度逐渐降低至 0.6 mm/h,在 24 时降雨停止,逐时降雨量变化如图 4 所示。降雨结束后 3 d 内天气为多云。本次试验自 4 月 22 日 15 时开始实时监测边坡土壤含水率变化情况直至 25 日 15 时,持续 72 h。

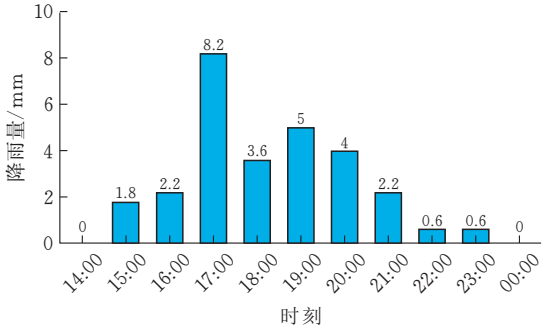



图 4 降雨过程中降雨量逐时变化曲线
(4 月 22 日 15 时至 24 时)

## 3 试验结果与分析

### 3.1 植被种类对生态边坡湿润锋的影响

在土壤水分下渗过程中,湿润区前端与干土层形成的明显交界面称作湿润锋,可以直观表示水分在土壤基质势和重力势共同作用下的入渗速率特征[19]。通过研究发现:三个边坡在多次降雨条件下,不同边坡位置湿润锋运移速率具有相似的变化规律。以坡上位置为例,三个试验边坡坡上位置湿润锋深度随时间的变化如图 5 所示。

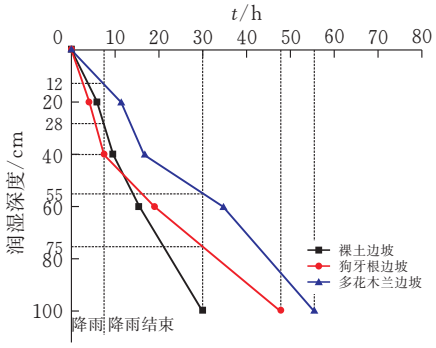



图 5 边坡模型湿润锋深度随时间变化曲线

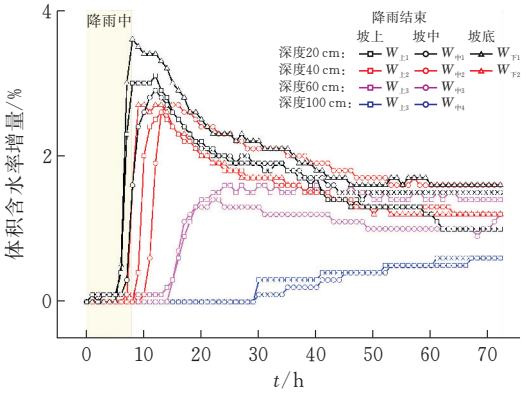
由图 5 可知,在降雨过程中裸土边坡、狗牙根和多花木兰边坡的湿润锋运移速率均较大,在降雨结束后减小。并且,降雨过程中狗牙根边坡湿润锋运移速率最快(图中斜率最大),裸土边坡次之,多花木兰边坡最慢。在降雨过程中,狗牙根边坡水分湿润深度可达 40 cm,入渗速率约为 5.35 cm/h;裸土边坡水分润湿深度约为 28 cm,入渗速率约为 5.3 cm/h,略小于狗牙根边坡;多花木兰边坡湿润锋深度约为 12 cm,入渗速率约为 1.8 cm/h,远小于狗牙根边坡和裸土边坡。而在降雨结束后,裸土边坡水分下渗速率最快,狗牙根边坡次之,多花木兰边坡最慢。例如,降雨结束 30 h 后,裸土边坡、狗牙根边坡和多花木兰边坡湿润锋的深度分别为 100 cm、75 cm 和 55 cm,入渗速率分别为 2.7 cm/h、1.4 cm/h 和 2 cm/h。此外,在降雨结束前后,裸土边坡的水分入渗速度变化较小,狗牙根和多花木兰边坡变化更大。

在此次降雨中，裸土边坡、狗牙根边坡和多花木兰边坡坡上位置水分入渗到深度 100 cm 处分别需要 30 h、47.5 h 和 55.5 h。

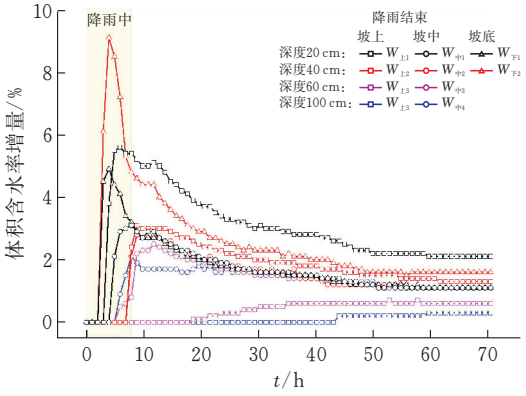
雨水降落以后的去向一般可以分为三部分：一是被植被茎叶截留，二是向边坡内部入渗，三是在坡面形成径流，三者相互影响。由于三个试验边坡表面的植物覆盖和渗透特性不同，从而对其湿润锋的变化产生显著影响。在降雨过程中，裸土边坡由于表面土体松散，黏结力小，无植物覆盖，表面水分来不及入渗而形成径流，从而对水分入渗速率产生影响。对于狗牙根边坡，一方面其坡面防渗结构的大量孔隙和狗牙根根系为雨水提供了快速入渗通道，另一方面狗牙根草甸拦截一部分雨水，避免雨水直接作用在坡面形成径流，在一定程度上增加了雨水入渗量，在这两方面共同作用下，狗牙根边坡的湿润峰运移速率在降雨过程中快于其他两个试验边坡；多花木兰边坡由于坡面植株稀疏，防渗结构完整，具有较好的抗渗性，在一定程度上阻碍了雨水的入渗。试验中也观察到多花木兰边坡最先形成径流（降雨约 6 min 后），导致水分入渗速率低于其他边坡。而在降雨结束后，由于降雨停止、土体蒸发损耗以及植物蒸腾作用和生长需求，导致下方土壤得到的水分补给减小，进而使水分入渗速率减小。狗牙根边坡除了土层水分补给减少，更深处（>40 cm）狗牙根根系含量降低在一定程度上降低了水分下渗速度，从而导致水分下渗速率相比降雨过程中的变化较大；多花木兰边坡由于防渗结构完整，在一定程度上阻碍了水分蒸发损耗，因此其水分下渗速率相比降雨过程中的变化较小，是三者中最小的。

### 3.2　不同植被种类的生态边坡土壤水分入渗曲线

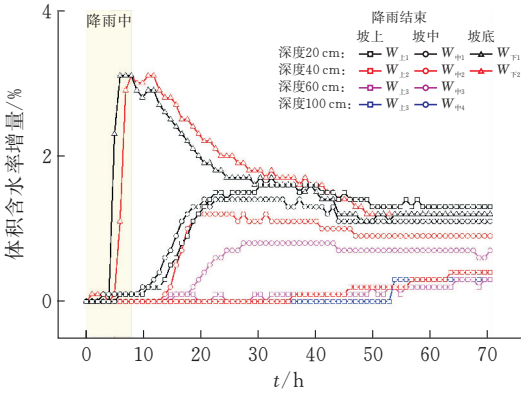
三个试验边坡土壤体积含水率相对于初始含水率的增量随时间的变化曲线，如图 6 所示。由图可知，三个试验边坡所有测点体积含水率整体呈现先增加、再减小、然后趋于稳定的变化趋势，这与一般降雨条件下边坡土壤水分的变化规律一致。但对于不同植物种类、不同深度、不同坡面位置，其含水率时程曲线存在差异。由图 6a 可知，裸土边坡土壤含水率在降雨快结束时出现明显增加，先是深度 20 cm处的含水率显著增加，其次是深度 40 cm、60 cm和 100 cm，各深度传感器含水率最先发生突变的时间依次为降雨开始后 7 h、9 h、16 h 和 30 h。此外，20 cm、40 cm、60 cm 和 100 cm 土壤的含水率的平均增量（同一深度的所有传感器所测含水率增量的平均值）分别约为 3%、2.5%、1%和 0.5%，随深度增加逐渐减小，这是因为水分在下渗过程中润湿土壤发生水分损耗所引起。由图 6a 还可知，在同一深度，裸土边坡不同边坡位置的含水率变化整体上表现出坡底处最快，其次是坡上处，最后是坡中处。




(a)裸土边坡




(b)狗牙根边坡




(c)多花木兰边坡

图 6　试验边坡土壤含水率增量随时间变化曲线

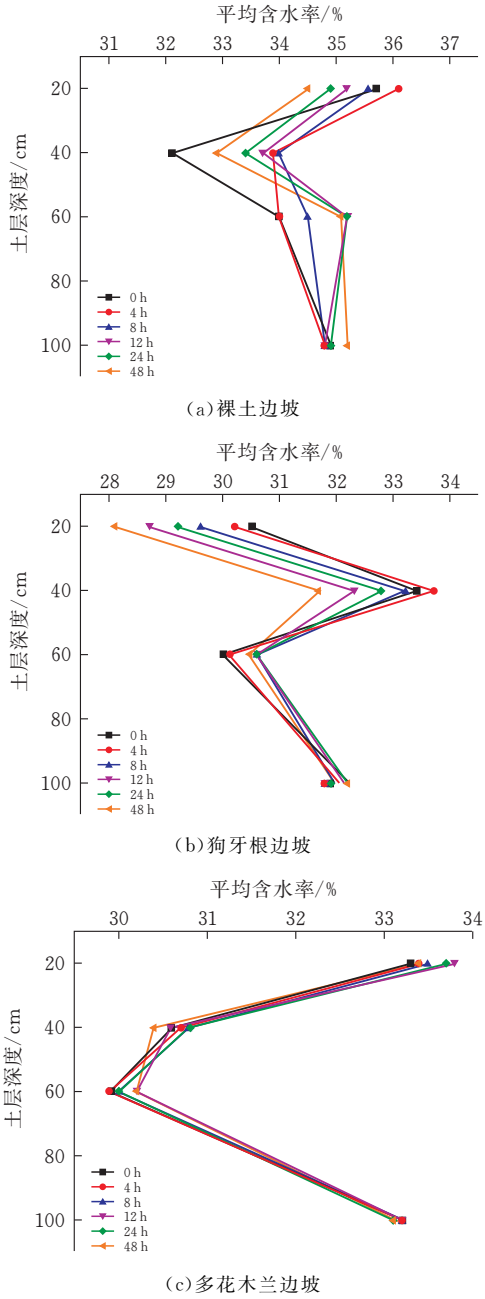
由图 6b 可知，相比于裸土边坡，狗牙根边坡对降雨入渗响应快速。与裸土边坡不同深度含水率变化规律一致，狗牙根边坡整体上也是深度小的位置先发生变化；但不同于裸土边坡的是，狗牙根边坡不同深度含水率对降雨入渗的响应时间均早于裸土边坡，同一测点处的含水率变化速率和变化量均大于裸土边坡，并且狗牙根边坡不同深度处的响应时间差异较小。例如狗牙根边坡坡中位置深度为 20 cm、40 cm、60 cm 和 100 cm 的 $W_{中1}$、$W_{中2}$、$W_{中3}$ 和 $W_{中4}$ 传感器处含水率在降雨开始后的 4 h、5 h、5 h和 5 h 快速变化，相对于初始含水率的变化量最

大值分别为3.2%、2.9%、2.5%和 2.2%，对比裸土边坡坡中位置的含水率增量最大值分别增加了 0.5%、0.3%、1%和 1.7%。降雨结束后土壤含水率变化速率降低并保持稳定，此时含水率增量分别为 2.1%、2%、1.7%和 1.6%。狗牙根边坡产生这种明显的变化主要是因为：一方面，坡面的草甸层拦截雨水，增加了坡面入渗雨量，另一方面坡面多孔隙防渗结构和狗牙根根系促进雨水入渗，减小水分下渗过程中的损失所引起的。另外，狗牙根边坡坡面不同位置水分入渗速率表现为沿坡底向上逐渐降低。除了径流和水分向下运移增加了坡底位置的雨水入渗量，同时狗牙根边坡坡底位置植物密度高，在一定程度上提高了其渗透性，从而导致坡底位置最先对降雨入渗产生响应。

由图 6c 可知，多花木兰边坡对降雨入渗响应缓慢。多花木兰边坡不同深度土壤含水率变化规律与裸土边坡、狗牙根边坡一致，但其变化速率和变化量均明显小于裸土边坡和狗牙根边坡。例如，多花木兰边坡坡底 20 cm 和 40 cm 处的 $W_{下2}$、$W_{下1}$测点含水率变化最为明显，相对于初始含水率的变化量约为 2.4%，而狗牙根边坡 $W_{下2}$、$W_{下1}$测点相对于初始含水率的变化量为 9.1%和 5%，显著大于多花木兰边坡。其次多花木兰边坡坡上 40 cm 和 60 cm 处的 $W_{上2}$、$W_{上3}$测点含水率在降雨结束后 36 h 内无明显变化，表明花木兰边坡坡上此时的入渗深度不足 60 cm，明显低于裸土边坡、狗牙根边坡。另外，多花木兰边坡坡面不同位置含水率变化规律与狗牙根边坡一致，呈现出沿坡底向上逐渐降低的变化规律。

### 3.3 植被种类对生态边坡水分再分布的影响

边坡土壤中的水分运移在降雨结束后并没有停止，而是由势能高的位置继续向势能低的位置迁移。降雨结束后，由于没有水源补充，只能消耗土层剖面中原先湿润部分中的水分，湿润锋继续向下润湿土层。此时，土层剖面中的水分在土壤基质势和水分重力势的共同作用下，随时间不断重新分配。本文对三个试验边坡在降雨结束后 48 h 内 20 cm、40 cm、60 cm 和 100 cm 土层的平均体积含水率进行分析，研究其水分再分布规律。裸土边坡、狗牙根和多花木兰边坡在 100 cm 深度土体水分重分布演化曲线如图 7 所示。由图 7 可知，降雨结束后，三个试验边坡不同深度土壤体积含水率随时间变化趋势不同，裸土边坡土壤含水率随深度增加呈现先减小再增加的变化趋势，狗牙根边坡土壤含水率则表现出随深度先增加再减小然后再增加的规律，多花木兰边坡土壤含水率呈现随深度先减小再增加的变化规律，这可能与降雨前土壤的初始含水率及其对降雨响应速度有关。




(a)裸土边坡

(b)狗牙根边坡

(c)多花木兰边坡

图 7 不同植被覆盖下生态边坡水分重分布随时间变化曲线

由图 7 还可知，三个试验边坡不同深度土壤水分随时间变化规律和变化幅度并不相同，如图 7a 所示，降雨结束后裸土边坡各深度土层含水率呈现先增加再减小的变化趋势。这可能是因为，裸土边坡对降雨的入渗响应较缓慢，降雨结束后上方土层水分仍会继续向下运移，同时土壤蒸散作用也会造成含水率降低，不同深度土壤含水率随时间的变化是水分下渗和蒸发耗水共同作用下的表征。裸土边坡 20 cm、40 cm 和 60 cm 深度土壤水分分别在降雨结束后 4、8 h 和 24 h 开始降低，各深度土壤在降雨结束 48 h 内水分的损失量分别为 1.7%、1.2%和 0.2%，随深度增加逐渐减小。值得注意的是深度

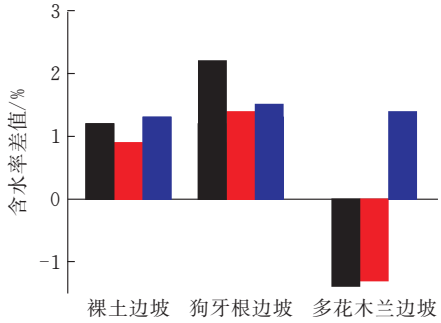
100 cm处的含水率变化较小，整体上呈现随时间增加缓慢增加的趋势。

由图 7b 可知，在降雨结束后，狗牙根边坡不同深度土壤水分随时间变化规律与裸土边坡存在显著差异。与裸土边坡的变化不同，狗牙根边坡 20 cm 深度土层含水率随时间增加逐渐减小，这可能是因为狗牙根边坡对降雨入渗响应快速，降雨结束后边坡表面几乎没有滞留水分；而 40 cm 和 60 cm 深度土壤含水率随时间增加呈现先增加再减小的变化趋势，与裸土边坡变化规律一致。不同深度土壤水分开始降低的时间分别为降雨结束 0、4 h 和 24 h，早于裸土边坡；此外，各深度土壤在降雨结束 48 h 内水分的损失分别为 2.5%、2%和 0.4%，大于裸土边坡。这可能是因为除了土壤蒸散作用会造成水分损失外，植被蒸腾作用和正常生长也会消耗水分，从而导致狗牙根边坡水分损失量较大；并且由于狗牙根根系长度集中在 20～40 cm，导致 40 cm 深度内的水分的损失量较更深处的较大。另外，相比裸土边坡，狗牙根生态防护边坡深处土壤（＞40 cm）在降雨结束后的含水率变化较小，表明狗牙根边坡在降雨结束前后层土壤水分较快降低，但深层土壤水分变化较小，较为稳定。

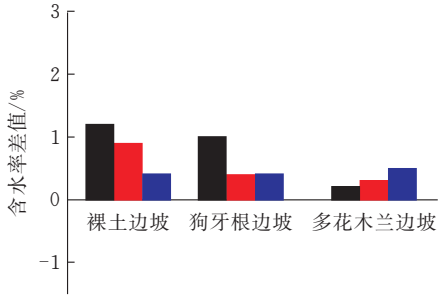
由图 7c 可知，多花木兰边坡不同深度处土壤含水率在降雨结束 48 h 内的变化较小，表明多花木兰边坡在降雨结束后不同深度处的水分均较为稳定。这主要是因为多花木兰边坡表面的防渗结构较为完整，对降雨入渗起到很好的隔绝作用，极大地减小了雨水入渗量。同时这也表明较为完整的生态基材对下覆土壤起到很好的保护作用，显著降低了土壤蒸发。

### 3.4　植物种类对生态边坡降雨后含水率变化特征的影响

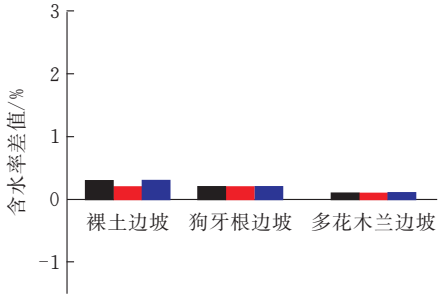
由 3.3 节分析可知，降雨结束后三个试验边坡表层 20 cm 处土壤含水率变化更加显著，为进一步了解三个试验边坡在降雨结束后表层含水率变化情况，本文对三个试验边坡降雨结束 3 d 内边坡表层含水率日变化量和总变化量情况进行分析，结果如图 8 所示。降雨后 3 d(23 日至 25 日)均为多云，由图 8 知，三个试验边坡同一边坡位置的土壤含水率的损失量均随时间增加逐渐减小。例如，在 3 d 观测期内裸土边坡，狗牙根边坡和多花木兰边坡表层坡脚处含水量损失量分别由 1.3%降低至 0.3%、2.2%降低至 0.2%以及 1.4%降低至 0.1%。这可能是由于坡面植物生长、植物蒸腾作用、水分下渗和蒸发作用会导致土壤水分降低，而土壤水分减少会使土壤水分损失量进一步降低。此外，试验边坡不同



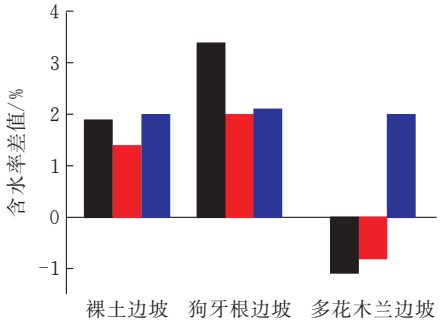
(a)23 日与 22 日含水率差值



(b)24 日与 23 日含水率差值



(c)25 日与 24 日含水率差值



(d)25 日与 22 日含水率差值

图 8　不同植物覆盖下生态边坡坡面土壤水分日变化差值情况

位置对土壤含水率变化的影响随时间增加越来越小，其中裸土边坡由于表面没有植物覆盖，坡面各部位土壤蒸散作用相近，因而各部位含水率变化差值相近；而狗牙根边坡含水率变化差值表现为坡上最大，其次是坡中与坡底，这可能是坡上水分会下渗补充到边坡下部，使坡上土壤含水率变化差值大于坡中与坡底处；而多花木兰边坡坡上和坡中位置含水率 23 日仍然在增加，24 日水分损失量为坡底最大，坡中次之，坡上最小，25 日趋于一致，这主要受边坡

表面防渗结构影响，坡上和坡中入渗速率极为缓慢，滞后于坡底处引起的。此外，3 d 观测期内三个试验边坡总的水分损失量为狗牙根边坡相对最大，裸土边坡次之，多花木兰边坡最小，与前述分析结果一致。

## 4 结论

本文通过建设大型生态边坡模型，研究了不同植物覆盖下生态边坡的水分动态变化规律。选取一场自然降雨条件，对裸土边坡、狗牙根边坡、多花木兰边坡不同深度、不同坡面位置的含水率变化进行了研究，分析了三个试验边坡的湿润锋、降雨含水率时程曲线以及降雨结束后的水分再分布规律，得到的主要结论如下：

1)在降雨过程中，狗牙根边坡水分下渗速率最大，裸土边坡的次之，多花木兰边坡的最慢，三者湿润锋的最大深度分别为 40、28 cm 和 12 cm。降雨结束后，裸土边坡、狗牙根边坡和多花木兰边坡湿润锋的运移速率均随降雨结束而减小，并且狗牙根边坡的减少量最多，多花木兰边坡次之，裸土边坡变化最小；此外降雨结束后裸土边坡水分入渗速度最大，狗牙根边坡次之，多花木兰边坡最慢；入渗到深度 100 cm 处分别需要 30h、47.5h 和 55.5h。

2)狗牙根边坡对降雨的入渗响应最快，裸土边坡的次之，多花木兰的边坡最慢。三个试验边坡的水分入渗量和入渗速度均随深度增加而降低，并且狗牙根边坡的含水率变化量和水分入渗速率均明显大于裸土边坡，而多花木兰边坡小于裸土边坡。不同边坡位置对植被生态边坡土壤入渗速率的影响一致，由坡底向坡中、坡上，依次降低。

3)三个试验边坡降雨结束后的水分再分布规律差异明显。降雨结束后，裸土边坡各深度土层含水率随时间变化呈现先增加再减小的变化趋势；狗牙根边坡表层(＜20 cm)含水率随时间增加而逐渐减小，深处(＞20 cm)的土壤含水率随时间增加呈现先增加再减小的变化趋势，并且更深处(＞40 cm)的土壤含水率变化较小，相比裸土边坡更稳定；多花木兰边坡不同深度处土壤含水率随时间增加均无明显变化，相对裸土边坡和狗牙根边坡水分变化更为稳定。

4)降雨结束一段时间内，三个试验边坡表层同一坡面位置含水率日变化量随时间均呈现逐渐减小的规律，并且同一边坡不同坡面位置对土壤含水率日变化的影响随时间越来越小。降雨结束 3 d 观测期内三个试验边坡的总水分损失量为狗牙根边坡相对最大，裸土边坡次之，多花木兰边坡最小。

[ 参 考 文 献 ]


[1] 生态环境部.“十四五”生态保护监管规划[EB/OL]. (2022-03-18)[2022-12-18]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk03/202203/t20220323_972383.html 2025-07-31.

[2] 邹群，邹国平. 高速公路生态护坡技术及其应用[J]. 筑路机械与施工机械化，2013，30(02)：52-54.

[3] GAO X，WU P，ZHAO X. Estimating spatial mean soil water contents of sloping jujube orchards using temporal stability[J]. Agricultural Water Management，2011，102(01)：66-73.

[4] 吴宏伟. 大气-植被-土体相互作用：理论与机理[J]. 岩土工程学报，2017，39(01)：1-47.

[5] ZHU H，ZHANG L M，GARG A. Investigating plant transpiration-induced soil suction affected by root morphology and root depth[J]. Computers and Geotechnics，2018，103：26-31.

[6] 李毅，邵明安. 人工草地覆盖条件下降雨入渗影响因素的实验研究[J]. 农业工程学报，2007(03)：18-23.

[7] YU H D，MAS B . Temporal stability of soil water storage under four types of revegetation on the northern Loess Plateau of China[J]. Agricultural Water Management，2013，117：33-42.

[8] 曾辰. 水蚀风蚀交错带不同植被覆盖条件坡面土壤水分循环的实验研究[D]. 咸阳：西北农林科技大学，2006.

[9] 黄俊，吴普特，赵西宁. 坡面生物调控措施对土壤水分入渗的影响[J]. 农业工程学报，2010，26(10)：29-37.

[10] 李文政，刘目兴，易军，等. 三峡山地不同坡位土壤的水分特征曲线及水力学性质[J]. 水土保持学报，2021，35(03)：135-142.

[11] 李平，王冬梅，丁聪，等. 黄土高寒区典型植被类型土壤入渗特征及其影响因素[J]. 生态学报，2020，40(05)：1610-1620.

[12] 吴钦孝，韩冰，李秧秧.黄土丘陵区小流域土壤水分入渗特征研究[J].中国水土保持科学，2004，2(02)：1-5.

[13] KARGAS G，SOULIS K X，KERKIDES P. Implications of hysteresis on the horizontal soil water redistribution after infiltration[J]. Water，2021，13(19)：2773-2773.

[14] 包含，侯立柱，刘江涛，等. 室内模拟降雨条件下土壤水分入渗及再分布试验[J]. 农业工程学报，2011，27(07)：70-75.

[15] SU H，WU D，LU Y，et al. Experimental and numerical study on stability performance of new ecological slope protection using bolt-hinge anchored block[J]. Ecological Engineering，2021，172(01)：1-12.

[16] 程鹏，李锦辉，宋磊. 生态边坡的水力和力学特性分析：试验研究[J]. 岩土工程学报，2017，39(10)：1901-1907.
[17] 叶兴，杨启红，张超波，等.长江河岸边坡狗牙根根系力学性能研究[J].人民长江，2022，53(04)：195-200.
[18] 李紫娟，夏振尧，张伦，等.根系及裂隙角度对基材原位剪切特性的影响[J].水土保持通报，2021，41(02)：51-57.
[19] 黄殿男，焦美怡，李琳，等. 污泥掺混改良沙土的水分入渗及再分布规律[J]. 水土保持研究，2020，27(01)：189-196.

# Soil Moisture Dynamic Analysis of Ecological Protection Slope under Natural Rainfall Conditions

XIAO Henglin[1,2], YANG Yutian[1], BAI Yuxia[1]

(1 *School of Civil Engin., Architecture and Environment, Hubei Univ.of Tech., Wuhan* 430068, *China*; 2 *Key Laboratory of River and Lake Health Smart Perception and Ecological Restoration, Ministry of Education, Wuhan* 430068, *China*)

**Abstract**: Soil moisture change has an important influence on slope stability. In order to study the temporal and spatial variation of soil moisture in plant-protected slopes under natural rainfall conditions, a large-scale model ecological slope test was carried out in this paper. Three slopes with a slope ratio of 1: 1.75 and a height of 2m were constructed. Cynodon dactylon and Magnolia multiflora were used for slope protection, and bare soil slopes were used as control groups. Taking a representative natural short-term moderate rainfall as the background, the soil moisture wetting front migration rate, water content time history curve and water redistribution law of three test slopes under different slope protection vegetation coverage at different depths ( 20 cm, 40 cm, 60 cm and 100 cm ) and different slope positions ( upper slope, middle slope and bottom slope ) were analyzed. The test results show that : 1 ) During the rainfall process, the wetting front migration rate of Cynodon dactylon slope is the largest, followed by bare soil slope, and the slowest of Magnolia multiflora protective slope. The depths of the three wetting fronts are 40 cm, 28 cm and 12 cm, respectively. After the rainfall, the wetting front migration rate of the three test slopes decreases ; 2 ) In the process of rainfall infiltration, the overall infiltration rate and infiltration amount of Cynodon dactylon protective slope are the largest, and the Magnolia multiflora protective slope is the smallest. In addition, the infiltration rate at different positions on the surface of the vegetation ecological slope decreases from the bottom of the slope to the middle and upper slopes in turn. 3) After the end of rainfall, the water redistribution law of the three test slopes was significantly different. Compared with the bare soil slope, the soil moisture content of 0-40 cm on the surface of the Cynodon dactylon protective slope was significantly reduced, but the deeper soil moisture content was basically stable, while the water content of each depth of the Magnolia multiflora protective slope was almost unchanged. 4) After the end of rainfall, the difference of soil moisture content in the surface soil of the three test slopes gradually decreased with time, and the influence of different slope positions on the difference of soil moisture content gradually decreased with time.

**Keywords**: ecological slope protection; vegetation type; ecological substrate; rainfall infiltration; soil water redistribution

[责任编校：裴　琴]