

岩石边坡基质-植被-大气系统的水分循环

孙海龙^{1,2}, 李绍才^{1,2}, 杨志荣¹, 何 磊³, 崔保山⁴

(1. 四川大学生命科学学院, 四川 成都 610064; 2. 四川省励自生态技术有限公司, 四川 成都 610031;
3. 四川大学建筑与环境学院, 四川 成都 610064; 4. 北京师范大学环境学院, 北京 100875)

摘要: 基质-植被系统是岩石边坡植被护坡工程的主要功能构件, 其水分循环过程影响工程效应的实现。以高羊茅为建植植物, 用 TDR 水分测定仪对不同表面处理、不同坡度的模拟边坡进行了 1 年的定位观测试验, 研究了岩石边坡基质-植被-大气系统的水分循环过程。结果显示: 坡度是影响岩石边坡基质-植被-大气系统水分循环的主要制约因素, 坡度增加不仅降低坡面的实际受雨量, 同时影响基质的水分输入, 系统的蒸散量随坡度增加而降低, 但变化幅度较小; 试验地气象条件下, 生长季的自然降水可满足 45°及 60°坡面植被所需, 75°坡面则出现水分亏缺; 由于基质良好的水分物理特性, 坡面产流为蓄满产流, 受降雨特征及基质初期含水量的影响较小, 在同一时空条件下, 不同坡面处理的基质含水量表现出微小差异, 为喷射混凝土面 > 灰岩 > 砂岩。研究从水分循环角度提出了植被护坡技术应用的工程调整措施, 为工程应用提供了必要的技术理论支持。

关 键 词: 基质-植被系统; 岩石边坡; 植被护坡; TDR; 水分循环;

中图分类号: P339 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2006)06-0818-06

水是影响环境变异的重要因子, 也是植被恢复和生态环境建设的主要制约因素^[1~3]。岩石边坡植被护坡工程是用植物与工程措施结合进行岩石坡面保护的重要途径与手段, 通过在坡面构建基质-植被系统来防护整个坡面^[4~6], 工程效应的发挥决定于系统的稳定发展, 系统的水分循环尤为重要, 但工程开挖形成的岩石边坡坡度较大(一般在 45°以上), 植被护坡工程中引导植被建植的基质非常有限(一般在 10 cm 厚以下)^[5], 且人工植被具有较高的密度, 完全覆盖于表面, 导致坡面水文过程具有较强的异质性。因此, 岩石边坡基质-植被-大气系统的水分转化是工程应用必须面对的基础科学问题, 对其深入研究可为岩石边坡的植被重建提供科学依据, 具有重要的理论和现实意义。目前, 国内外岩石边坡植被护坡的研究主要集中在新型生态材料、生态种植基及护坡施工方法等方面^[7~13], 还未见有关水分生态过程问题的研究。

本文利用模拟边坡的定位观测试验, 研究岩石边坡基质-植被系统的水分输入输出特征, 揭示其水分循环规律, 以期探明岩石坡面植被功能稳定的水分阈值条件, 实现工程措施的优化配置, 为岩石边坡植被护坡工程的应用提供必要的理论支持。

1 试验概况

1.1 试验地气候

试验地位于四川省彭州市升平镇。本地区气候属亚热带季风气候, 年平均气温 16.3℃, 最热月(7 月)平均气温 25.8℃, 最冷月(1 月)平均气温 5.6℃, 年平均降水量 1146.5 mm, 其中生长季(3~10 月)降水量 816.3 mm, 年平均相对湿度 79%, 年均蒸发量 1536.4 mm。

1.2 人工模拟边坡

人工模拟边坡坡高 4 m, 坡向 S, 用砖分别砌成 45°、60°及 75°坡度的三个独立边坡, 每边坡宽 25 m, 坡顶

收稿日期: 2005-10-11; 修订日期: 2006-05-08

基金项目: 国家重大基础研究(973)资助项目(2003CB415104); 国家攻关计划资助项目(2003BA901A30)

作者简介: 孙海龙(1976-), 男, 黑龙江海林人, 博士研究生, 主要从事岩石创面生态防护及抗逆植物资源开发的研究。

E-mail: lizistsun@vip.sina.com

通讯作者: 李绍才, E-mail: Lizist@vip.sina.com

设截水沟。为与工程应用相结合, 每坡度边坡共设置 3 个不同表面处理的试验小区, 分别为砂岩、灰岩及混凝土面 (C_{20}), 岩石面采用 100 cm × 50 cm × 10 cm 的石板砌成, 混凝土喷射厚度 5 cm。小区间用高 35 cm 的 PVC 板分隔, 砂岩及灰岩面每小区宽 3 m, 混凝土面试验小区宽 5 m, 在每个混凝土面小区内, 再用相同的 PVC 板沿坡分隔出 2 m 宽的一处单独试验区。坡面所用各类岩石的基本物理性质见表 1。

表 1 岩石的基本物理指标

Table 1 Physical index of rock

类 别	吸水率 / %	比 重	渗透系数 / (cm s^{-1})	总空隙率 / %
砂 岩	5.9	2.54	5.4×10^{-4}	14.1
灰 岩	0.8	2.59	1.6×10^{-6}	5.2

1.3 试验材料

(1) 试验草种及用量 试验草种采用工程中常用的高羊茅 (*Festuca arundinacea* Schreb), 发芽率 98%, 用量为 10 g/m^2 。喷射播种时间为 2003 年 4 月中旬。

(2) 喷射工艺 基质用植壤土(土壤类型为紫色土)与 TBS 绿化基材(具体组成见文献[6])按重量比 10:1 混合, 采用干喷法喷射(12 m^3 空压机、 $5 \text{ m}^3/\text{h}$ 混凝土喷射机)至试验坡面, 厚度 10 cm。基质混合物基本理化指标见表 2。

表 2 基质基本理化指标

Table 2 Physical and chemical index of substrate

容 重 / (g cm^{-3})	有机质 / (g/kg)	pH	饱和含水量 / %	萎蔫含水量 / %
1.07	47.06	6.57	54.5	6.13

1.4 试验方法

(1) 水分动态监测 在人工模拟边坡各处理的坡角设置径流收集装置, 测定径流量。采用多探针式 TDR 水分测定仪(德国制, 可同时测 6 个点位)测量不同处理的基质水分动态变化, 对每处理探针插入位置分为坡顶(距地面垂直高度 3.8 m)、坡中(距地面垂直高度 2 m)、坡底(距地面垂直高度 0.2 m)3 处, 每 10 d 观测一次, 并随机选取部分降水场次, 在混凝土坡面自降水开始即插入探针, 测量降水前后基质含水量变化, 并记录坡面产流历时。试验测量观测期为 2004 年 1 月至 2004 年 12 月。

制作 100 cm × 100 cm 的 PVC 试验槽 9 个, 槽深 35 cm, 采用相同工艺喷射种植植被, 喷射厚度同为 10 cm, 试验槽摆放坡度 45°、60°、75°, 坡角与地面高度 20 cm, 坡向与人工边坡相同, 每坡度设置 3 个重复, 在试验槽坡角安装带盖的径流收集槽, 用于测定降水后的径流输出。每 10 d 用 TDR 探针在试件中部测量一次含水量, 用水量平衡法估算期间的大致蒸散耗水量。

(2) 植被层截留量的测定 在每个混凝土坡面隔离出的 2 m 宽单独试验小区内, 沿坡向下铺设 U 型 PVC 槽, 槽宽 5 cm、高 1 cm, 共 15 根, 每根之间间隔 5 cm, 用于测量穿透降水, 以坡面受水量与穿透量的差值计算植被层截留量。

(3) 其他观测项目 采用自记式温度、湿度仪记录温湿度, 采用长期自记雨量计和日记雨量计, 记录降水量和降水过程。在观测小区外的剩余边坡上, 每 2 个月用样方法(1 m × 1 m)测定一次植被层生物量(分植被活体及枯落物), 每次 3 个重复。

2 结果与讨论

2.1 植被层对基质水分输入的影响

坡面植被层包括植被地上活体、立枯物(枯草)及凋落物 3 部分。由于植被建植时间较短, 凋落量较低(观测期内干重最高量为 5.7 g/m^2), 未完全覆盖基质层, 对基质水分输入的影响较小, 研究中未考虑其作用, 而立枯物储水后与基质间基本无水量转化, 因此, 植被层对基质水分输入的影响仅考虑了地上活体及立枯物对降水的截留, 研究期内植被层生物量(干重)变化范围为 $109.2 \sim 137.2 \text{ g/m}^2$, 其中立枯物生物量(干重)在 $48.4 \sim 80.7 \text{ g/m}^2$, 同期不同坡度坡面(45° > 60° > 75°), 植被生物量具有一定的差异性, 但最大差额为 5.7 g/m^2 (干重)。

表 3 反映了 2004 年不同坡面条件下植被层的截留状况。可以看出, 45° 坡面植被层可将小于 2 mm 的大气降水全部截留, 而 60° 及 75° 坡面, 植被层可将小于 5 mm 的大气降水全部截留; 在相同的大气降水条件下, 不同坡度坡面植被层对降水的截留有较大差异, 当大气降水量超过 10 mm 时, 截留量(垂直坡面水深)随坡度增加而提高; 在一年的降水过程中, 由于植被层的截留, 45°、60° 及 75° 坡面基质层的受水量(垂直坡面水深)分别降低为 771.7、495.9 及 196.3 mm, 表现为随坡度增加而降低。

表 3 不同坡面植被层在不同降水等级下的截留量及截留率

Table 3 Interception and interception rate for different gradient under

降水等级 / mm	降水 次数	大气降水量 / mm	45° 坡面			60° 坡面			75° 坡面		
			受水量 / mm	截留量 / mm	截留率 / %	受水量 / mm	截留量 / mm	截留率 / %	受水量 / mm	截留量 / mm	截留率 / %
0~1	32	26.3	18.6	18.6	100	13.2	13.2	100	6.8	6.8	100
1~2	12	17.4	12.3	12.3	100	8.7	8.7	100	4.5	4.5	100
2~5	20	46.5	32.9	28.9	87.8	23.3	23.3	100	12.0	12.0	100
5~10	13	87.8	62.1	33.7	54.3	43.9	34.5	78.6	22.7	21.7	95.6
10~20	8	113.4	80.2	22.1	27.5	56.7	23.7	41.8	29.4	26.5	90.1
20~50	16	441.6	312.3	32.1	10.3	220.8	34.3	15.5	114.3	36.8	32.2
50~80	4	271.5	192.0	20.2	10.5	135.8	24.7	18.2	70.3	26.2	37.3
>80	3	347.3	245.6	16.3	6.6	173.7	17.6	10.2	89.9	19.1	21.2
总计	106	1351.8	955.9	184.2	19.3	675.9	180.0	26.6	349.9	153.6	43.9

注: 受雨量及截留量指垂直坡面水深, 截留率指截留量与坡面受雨量的比值

2.2 坡面的产流特征

产流是下垫面对降水的再分配过程。产流机理主要有三种: 超渗产流、蓄满产流及两者混合的产流理论^[14]。表 4 列出了观测期内 3 场不同特征降水条件下, 产流前后坡中的基质含水量变化及坡面产流历时情况, 可以看出形成坡面产流时, 基质含水量也均接近饱和含水(54.5%), 受降水特征、坡度及基质初期含水量的影响较

表 4 不同降水条件下坡面产流特征

Table 4 Runoff properties of slope in different rainfall intensity

日 期	降水量 / mm	降水 历时/h	坡度/(°)	雨前基质 含水/ %	产流时基质 含水量/ %	产流 历时/min
2004-05-01	82.9	2.5	45	28.1	54.1	72
			60	23.4	54.2	124
			75	17.5	-	-
2004-07-12	68	16	45	18.1	54.3	720
			60	14.6	-	-
			75	10.7	-	-
2005-09-08	152	6	45	35.1	54.2	78
			60	31.3	54.3	128
			75	27.2	54.3	297

注: - 表示未形成产流; 含水量观测位置为坡中, 喷射混凝土面。

小, 表明坡面基质层产流可视为蓄满产流。主要由于基质具有良好的孔隙结构(其物理性质见表 5), 高有机质含

表 5 基质物理性质及渗透速率

Table 5 Physical properties and permeabilities rate of substrate

项目	总孔隙率 / %	非毛管孔隙度 / %	渗透速率/(mm·min ⁻¹)	
			初渗	稳渗
结果	62.37	38.91	4.2	0.9

量及保水材料的应用, 其具有较高的入渗速率, 且厚度有限, 使基质水分相对容易达到饱和; 在相同的降雨过程, 由于坡度越大, 坡面的受雨量降低, 且大坡度基质的雨前含水量相对较低, 导致坡面的产流历时随坡度增加而延长。

2.3 坡面基质的水分动态分布特征

表 6 反映了 2004 年 9 月 8 日的降水过后, 坡面基质水分自饱和开始的变化过程(期间仅有 3 场小于 5 mm 的降水, 基质无水分输入)。从表 6 中可以看出, 在时间动态下, 基质含水量沿坡面呈梯度分布, 从坡顶到坡底依次增大, 但由于植被根系存在及基质中保水材料的应用, 对水分的固持能力较高, 梯度变化较小, 在观测末期(10 月 8 日), 坡底与坡顶的水分差额最大仅为 9.3%(混凝土面, 75° 坡面); 坡底与坡顶的水分差额表现为随坡度增加而增大, 以喷射混凝土面的边坡基质水分变化为例, 在观测末期, 45° 坡面坡底与坡顶的水分差额为 6%, 而 75° 坡面的水分差额增加至 9.3%, 其他岩性的坡面也表现出相同的规律, 说明坡度增加, 水分受重力作

用沿坡面的迁移现象更加显著；相同坡度、相同坡高不同表面处理坡面的基质含水量表现出微小差异，为喷射混凝土面 > 灰岩 > 砂岩，说明有水分下渗到基岩，但由于岩石的渗透系数要比基质低的多，即使为渗透率最大的砂岩，其量也相当有限。但本研究的坡高仅为 4 m，更高边坡的水分运移过程还有待研究。

2.4 坡面植被群落的蒸散特征

探明坡面植被群落的蒸散特征，对科学计量系统的水分平衡条件具有重要意义。蒸散量的大小与气候条件、植被状况及基质(土壤)的初期含水量等因素有关。将各月的蒸散量变化绘制成图 1,可以看出，不同坡度条件下，相同时段内

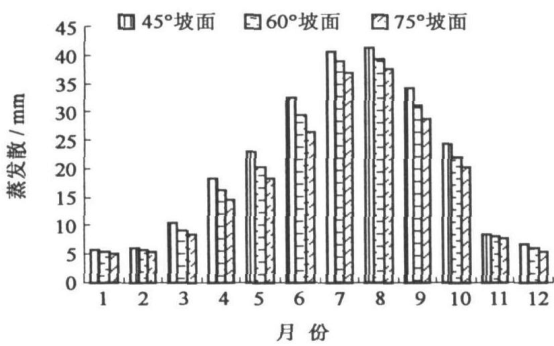


图 1 蒸散量的月变化

Fig. 1 Monthly varieties of evapotranspiration

的蒸散量随坡度增加而降低，主要因为不同坡度的植被层生物量不同及接受的太阳辐射强度出现差异造成的；蒸散量的月变化明显，主要集中在植被生长季(3~10月)，以7、8月份最高。以最高月的日平均蒸散量计算，10 cm厚基质饱和吸水后达到萎蔫含水量(6.1%)的时间分别为：45°坡面 36 d，65°坡面 38 d，75°坡面 40 d，以上为各坡度下，坡面植被在基质饱和吸水后，在试验地蒸散量最高季节的理论抗旱时间。

2.5 岩石边坡基质-植被系统的水量平衡分析

降水、植被截留、入渗、基质水分再分配，植物根系吸水、通过气孔扩散到叶片周围空气层，最后参与大气湍流交换等一系列的水量转化在连续不断的进行，形成了岩石坡面基质-植被-大气系统的水分循环过程。根据质量守恒定律，在某一时期水量收支差额等于其内部储水量的变化，因此，对岩石坡面基质-植被系统可写出如下水量平衡方程：

$$(P\cos\alpha + D) - (ET + I + R_s + F_d + C_d) = \Delta W \tag{1}$$

式中 D 为上方基质水分延坡运移补给量； ET 为蒸散量； I 为截留量； R_s 为地表径流量； F_d 是深层渗透量； C_d 基质水分延坡向下运移量。根据本文前面的研究，深层渗透量可以忽略不计，如果将坡面看作为一个单元，不考虑降水结束后基质水分的运移，式(1)可以简化为：

$$P\cos\alpha - (ET + I + R_s) = \Delta W \tag{2}$$

由此，对 2004 年 3 月至 10 月(坡面植被生长期)的坡面基质的水分收支情况统计于表 7。可以看出，在试验地的气象条件下，不考虑基质水分的耗损，自然降水可满足 45°及 60°坡面植被所需，75°坡面则出现水分亏缺；45°及 60°坡面，植被层截留、蒸散及径流为主要水分输出，而 75°的坡面则以植被层截留及蒸散为主，但由于坡

表 6 坡面基质水分的动态分布

Table 6 Dynamical distribution of water in substrate

基岩 类型	坡度 /(°)	坡面 位置	基质含水量的动态变化/ %				变幅 / %
			9.8	9.18	9.28	10.8	
混凝土	45	坡顶	54.2	39.3	24.6	10.1	44.1
		坡中	54.3	40.6	26.9	12.1	42.2
		坡底	54.4	42.7	30.2	16.1	38.3
	60	坡顶	54.3	39.1	24.2	10.3	44.0
		坡中	54.4	40.2	26.1	12.2	42.2
		坡底	54.5	43.1	30.9	17.6	36.9
	75	坡顶	54.2	38.6	23.9	10.5	43.7
		坡中	54.4	40.3	27.8	12.5	41.9
		坡底	54.4	43.6	32.6	19.8	34.6
灰岩	45	坡顶	54.3	38.7	23.8	9.1	45.2
		坡中	54.3	40.4	26.5	11.5	42.8
		坡底	54.4	42.5	29.7	15.5	38.9
	60	坡顶	54.3	38.1	23.1	9.2	45.1
		坡中	54.4	39.1	25.7	11.7	42.7
		坡底	54.4	42.6	29.8	16.3	38.1
	75	坡顶	54.3	37.2	22.6	9.3	45.0
		坡中	54.3	38.9	26.2	12.3	42.0
		坡底	54.4	42.2	31.1	17.4	37.0
砂岩	45	坡顶	54.3	37.5	23.1	7.7	46.5
		坡中	54.4	39.2	25.2	10.7	43.9
		坡底	54.3	42.3	28.9	14.8	40.5
	60	坡顶	54.2	37.2	22.1	8.1	46.1
		坡中	54.3	39.6	25.1	10.9	43.4
		坡底	54.5	42.1	29.5	15.9	38.6
	75	坡顶	54.3	36.5	21.7	8.4	45.9
		坡中	54.3	38.7	25.3	11.2	43.1
		坡底	54.3	41.7	29.8	16.1	38.2

面产流主要为蓄满产流,形成径流输出对基质水分输入并无不利影响。

表 7 坡面植被生态系统水量平衡统计表

mm

Table 7 Statistics of water balance of vegetation ecosystem

降水量	坡度	坡面受雨量		ET	RS	ΔW
890.4	45°	629.6	114.3	224.8	213.8	76.7
	60°	445.2	111.5	206.9	121.9	4.9
	75°	230.4	93.1	191.2	25.2	-78.1

注:除大气降雨量外,其于水量均指垂直坡面水深。

在工程实践中,相同地区,基岩为渗透性较好的砂岩时,坡面植被忍耐干旱的时间明显超过其他岩性的坡面。笔者分析,虽然岩体的相对水容量有限,但边坡后的巨大山体相当于岩体水库,且其容量受其他因素的影响较小,而植

被根系穿透基质附着在基岩表面,使水分形成岩体-植被间的转化,坡面植被出现水分亏缺所需的时间延长。本文模拟边坡设计成不同的基岩也是出于以上原因,但由于试验所用的人工模拟边坡的基岩厚度有限,对水分转化的作用不明显,需要进行深入的研究与科学计量,才能对岩石边坡植被护坡工程应用的水分阈值条件进行准确的量化。

2.6 工程应用的降水阈值条件分析

水量平衡分析是从整个生长季进行计算的,但由于岩石边坡条件下,基质厚度有限(水容量受到制约),无地下水的补给,如果降水不均匀分布,且降水特征满足不了基质水分的有效输入,则基质很容易出现水分亏缺,在水量平衡各分项中,降水量、植被层截留量、蒸散量水平可以根据气象条件及植被类型进行估算,但径流输出量是无法进行设计预测的,因此应将生长期划分为各个时段(笔者认为以月为单位比较合适)进行考虑。由于形成径流输出时,基质含水量已达饱和,所以各坡度条件下,不考虑基质自身的水分耗损及人工养护管理,在生长季各月内坡面植被稳定所需的理想降水量条件为

$$P \cos \alpha - I \geq ET \quad (3)$$

那么则有以下条件:

(1) 如果各月内的降水条件均满足式(3),则可认为降水条件满足需要,工程可以应用;

(2) 如果某月的降水条件不能满足式(3),但下个月的降水可将差额补足,且两次降水间隔时间内植被不会出现水分亏缺,则工程仍可应用。

根据以上结论,则可对岩石边坡植被护坡工程的适用性进行简单评价,对不适用的条件进行工程调整。例如,如果某工程原定开挖坡度为 75°,但根据 3 式的计算结果,坡度需小于 60°才不需进行人为水分管理,则需要修坡处理;如果降水间隔期最长为 60 d,原定基质设计厚度饱和吸水后仅能保证 40 d 的水分供应,也不能满足要求,需要增加基质厚度,提高基质的水容量。同时,在满足坡面植被覆盖的前提下,降低播种量,减少蒸腾耗水,以及应用抗旱性较强的品种,也是重要的工程调整策略。

3 结 论

(1) 在相同的降水过程,坡度增加降低了坡面基质的实际受水量,影响基质的水分输入,虽然相同时段内的蒸散量随坡度增加而降低,但影响幅度较小。

(2) 由于基质良好的水分物理特性,坡面产流为蓄满产流,受降水特征及基质初期含水量的影响较小,相同的降水过程,产流历时随坡度增加而延长。在时间动态下,基质含水量沿坡面呈梯度分布,从坡顶到坡底依次增大,但梯度变化较小,相同时空条件下,不同坡面处理的基质含水量表现出微小差异:喷射混凝土面 > 灰岩 > 砂岩;

(3) 在试验地气象条件下,从生长季根据水量平衡分析,自然降水可满足 45°及 60°坡面植被所需,75°坡面则出现水分亏缺;

(4) 在生长季各月内坡面植被稳定所需的理想降雨量条件为: $P \cos \alpha - I \geq ET$, 不考虑人工水分管理,岩石边坡植被护坡技术应用需对不适用的条件进行工程调整。

参考文献:

- [1] 雷志栋, 胡和平. 土壤水研究进展与评述[J]. 水科学进展, 1999, 10(3): 311 - 318.
- [2] 刘昌明, 孙 睿. 水循环的生态学方面: 土壤-植被-大气系统水分能量平衡研究进展[J]. 水科学进展, 1999, 10(3): 251 - 259.
- [3] 姚治君, 王建华. 区域水资源承载力的研究进展及其理论探讨[J]. 水科学进展, 2002, 13(1): 111 - 115.
- [4] 李绍才, 孙海龙. 我国岩石边坡植被护坡技术现状及发展趋势[J]. 资源科学, 2004, 26(8): 61 - 66.
- [5] 张俊云, 周德培, 李绍才. 岩石边坡生态护坡研究简介[J]. 水土保持通报, 2000, 20(4): 36 - 38.
- [6] 张俊云, 周德培, 李绍才. 厚层基材喷射护坡试验研究[J]. 水土保持通报, 2001, 21(4): 45 - 48.
- [7] 赵 华, 黄润秋. 岩石边坡生态护坡特点及其关键技术问题探讨[J]. 水文地质工程地质, 2004(1): 87 - 90.
- [8] 章梦涛, 付奇峰, 吴长文. 岩质坡面喷混快速绿化新技术浅析[J]. 水土保持研究, 2000, 7(3): 65 - 67.
- [9] Donald H G, Robbin B S. Biotechnical stabilization of high way cut slope[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1992, 118: 1395 - 1409.
- [10] Tanno Katsuji. Method of vegetation planting construction of mortar-spraying treating slope-face[P]. Appl. No.: JP950196970950710, Patent No.: JP9025633, 1997.
- [11] Ministry of Works and Transport. Use of bio-engineering in the road sector (geo-environmental unit) [R]. Nepal: Ministry of Works and Transport, 1999.
- [12] 张俊云, 周德培. 厚层基材植被护坡植物选型设计研究[J]. 水土保持学报, 2002, 16(4): 163 - 165.
- [13] 张季如, 朱瑞庚, 夏银飞, 等. ZLS 绿色生态护坡材料的强度试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(9): 1533 - 1537.
- [14] 陈洪松, 邵明安. 黄土区坡地土壤水分运动与转化机理研究进展[J]. 水科学进展, 2003, 14(4): 513 - 518.

Water cycle in substrate-vegetation-atmosphere system of rock slope^{*}

SUN Hai-long^{1,2}, LI Shao-cai^{1,2}, YANG Zhi-rong¹, HE Lei³, CUI Bao-shan⁴

(1. College of Life Sciences, Sichuan University, Chengdu 610064, China; 2. Sichuan Lizi Bioenvironmental Engineering Co. Ltd., Chengdu 610031, China; 3. College of Architecture and Environment, Sichuan University; Chengdu 610064, China; 4. College of Environmental Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: The substrate-vegetation system is the primary functional component of eco-engineering for the rock slope protection. The water cycle in the system can influence the engineering and achievement. In this paper, *Festuca arundinacea* Schreb is selected to study water cycle in substrate-vegetation-atmosphere system with the time domain reflector to investigate in situ for one year stimulating slope with the different surface treatments and the different gradients. The results show that the gradient is the main limiting factor of water cycle in substrate-vegetation-atmosphere system. A rise in gradient leads to a decrease in the actual precipitation reception of slope and a change in substrate water input. The evapotranspiration from the system decreases with the gradient improving, but the rangeability is small. Under weather conditions of the experiment area, the natural precipitation is sufficient for the vegetation with slopes of 45° and 60°, whereas deficient for the vegetation on a slope of 75°. Runoff happens when the substrate is fully filled with water due to its favorable moisture physical properties. The effect of the precipitation characteristics and the water content of the initial stages in the substrate on the process of runoff is small. Under the same space-time condition, water content in the substrate varies slightly in different treatments. They fallow in the order of spraying concrete slope > limestone > sandstone. The modified engineering measurements of eco-engineering are suggested from the point of water cycle, and provide necessary technical and theoretical support.

Key words: substrate-vegetation system; rock slope; eco-engineering; time domain reflector; water cycle

* The study is financially supported by the National Basic Research Program of China (2003CB415104).