

# W-OH 改良砾石石渣边坡渗漏效果的现场试验

盖皓茜<sup>1</sup>, 陈群<sup>1</sup>, 李露<sup>2</sup>, 周成<sup>1</sup>, 罗祺<sup>3</sup>

(1.四川大学 水利水电学院 山区河流保护与治理全国重点实验室, 四川 成都 610065;

2.中国市政工程西南设计研究总院有限公司, 四川 成都 610000; 3.广西新发展交通集团有限公司, 广西 南宁 530029)

**摘要:** [目的] 探究添加不同浓度的改性亲水性聚氨酯树脂(W-OH)溶液对砾石石渣坡面渗漏的改良效果, 为改良粗粒石渣的渗漏性能, 减少其水分漏失以及石漠化地区植被恢复提供理论支撑。[方法] 以广西石漠化地区某公路石渣边坡为研究对象, 在边坡现场采用不同的来流量对添加不同浓度 W-OH 溶液的石渣坡面开展人工径流入渗试验。[结果] 未经 W-OH 溶液处理的边坡渗漏严重, 当来流量大于 30 L/min 时可形成坡面径流。且来流量为 30 L/min 时径流率仅占来流量的 18.3%, 有 81.7% 的水从坡体渗漏流失。经 W-OH 溶液处理后坡面的稳定径流率和稳定入渗率均随来流量和 W-OH 溶液浓度的增大而增大。用 3%~6% 浓度的 W-OH 溶液处理后坡面的稳定径流率较未处理坡面提高了 200%~385.5%, 且 W-OH 溶液的浓度越高, 对坡面的处理效果越好。入渗径流比随来流量和 W-OH 溶液浓度的增大而减小。[结论] 采用 W-OH 溶液处理后可有效减少粗粒石渣边坡的渗漏量, 提升坡体的保水能力, 有助于边坡植被的修复。

**关键词:** 石漠化边坡; 石渣; 坡体渗漏; 石渣改良; 改性亲水性聚氨酯树脂(W-OH)

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)01-0065-09

中图分类号: S157, TV441

**文献参数:** 盖皓茜, 陈群, 李露, 等. W-OH 改良砾石石渣边坡渗漏效果的现场试验[J]. 水土保持通报, 2025, 45(1): 65-73. Ge Haoqian, Chen Qun, Li Lu, et al. On-site investigation of W-OH improvement effect on slope leakage from gravel slag slopes [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(1): 65-73. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.01.008; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.01.008.

## On-site investigation of W-OH improvement effect on slope leakage from gravel slag slopes

Ge Haoqian<sup>1</sup>, Chen Qun<sup>1</sup>, Li Lu<sup>2</sup>, Zhou Cheng<sup>1</sup>, Luo Qi<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Mountain River Protection and Management, College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu, Sichuan 610065, China;

2. Southwest Municipal Engineering Design & Research Institute of China, Chengdu, Sichuan

610000, China; 3. Guangxi New Development Transportation Group Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530029, China)

**Abstract:** [Objective] The use of modified hydrophilic polyurethane resin binder (W-OH) solution at different concentrations to reduce leakage from gravel slag slopes was investigated to provide theoretical support for reducing leakages from coarse gravel slag and to improve vegetation restoration in rocky desertification areas. [Methods] A highway slag slope in the rocky desertification area of the Guangxi Zhuang Autonomous Region was investigated. Artificial erosion experiments were conducted on a sloping gravel surface and the treatments were different concentrations of added W-OH solution with different erosion flow rates. [Results] The slope that was not treated with the W-OH solution produced large amounts of leakage water and runoff on the slope only appeared when the scouring discharge was greater than 30 L/min. When the scouring discharge was 30 L/min, the runoff rate accounted for 18.3% of the incoming flow rate and 81.7% of the water was lost due to slope leakage. However, the average runoff and average infiltration rates for the slope after treatment with the W-OH solution increased as the inflow rate and W-OH solution concentration rose. The stable runoff rate for the slope treated with W-OH solution concentrations of

收稿日期: 2024-05-30

修回日期: 2024-11-22

采用日期: 2024-11-23

资助项目: 四川省自然科学基金项目“碎石弃渣场的水力侵蚀机理及植被恢复技术研究”(24NSFSC0260); 2020年度第三批广西交通运输行业重点科技项目(22H1126)

第一作者: 盖皓茜(1999—), 女(汉族), 山西省运城市人, 硕士研究生, 研究方向为岩土工程。Email: 574984408@qq.com。

通信作者: 陈群(1972—), 女(汉族), 重庆市人, 博士, 教授, 主要从事土体渗流和土石坝工程方面的研究。Email: chenqun@scu.edu.cn。

3%—6% increased by 200%—385.5% compared to that of the untreated slopes and the higher the concentration of the W-OH solution, the better the treatment effect on the slope. The infiltration runoff ratio decreased as the inflow rate and the W-OH solution concentration increased. [Conclusion] Treatment with the W-OH solution effectively reduced leakage from coarse-grained slag slopes and improved the water retention capacity of the slope. These improvements contributed to slope vegetation restoration.

**Keywords:** rocky desertification slope; gravel slag; slope leakage; slay improvement; W-OH

石漠化地区的石渣边坡土壤稀缺<sup>[1]</sup>,坡面石渣松散堆积,渗透性强、持水性能弱<sup>[2-3]</sup>,在降雨过程中极易造成坡体的水分漏失<sup>[4-5]</sup>。因此,改良石渣的渗漏性能,减少其水分漏失,以利于植物生长是石漠化地区关注的重点问题。目前,针对渗漏治理的方法主要包括客土植被<sup>[6-7]</sup>和对石渣的直接处理<sup>[8]</sup>两种途径。客土法的土壤厚度有限,容易被雨水和风带走,极易发生水土流失,且成本较高。故对于石漠化地区石渣渗漏特性的改良方法已经慢慢从客土法转变为对石渣的直接处理。随着材料学科的高速发展,土体改良剂被应用于原位修复,其在改良土体结构,提高土体抵抗渗漏性能等方面效果显著<sup>[9-11]</sup>。其中,王树英等<sup>[12]</sup>发现增加高分子聚合物含量能延长渗透系数初始稳定期并显著减小渗流末期的渗透系数,且高分子聚合物含量越高,渗透系数降低越明显。Huang等<sup>[13]</sup>发现新型高分子复合材料 ADNB 可以有效改善土壤结构,降低土壤渗透系数。W-OH 是一种以水为固化剂的亲水性聚氨酯改性复合材料,王其东等<sup>[14]</sup>发现用 W-OH 改良砒砂岩,在砒砂岩表面可形成一层稳定的保护层,促使径流快速疏导。Liang等<sup>[15]</sup>用不同浓度的 W-OH 溶液喷洒在长石砂岩表面时,发现溶液可在短时间内渗透并形成柔性的多孔胶结层,长石砂岩的保水效益可增大 50%。Qin等<sup>[16]</sup>发现 W-OH 对红黏土边坡有降低土体孔隙率、

固化土壤结构的作用。杨思远等<sup>[17]</sup>研究发现在降雨条件下,W-OH 溶液浓度升高可降低煤矸石胶结体的稳定入渗率。目前对土体改良的研究主要是针对土颗粒较细的土体,且多为室内试验,对于粗颗粒的渗漏改良及现场试验研究得较少。为此,本文以广西石漠化地区某高速公路石渣边坡为研究对象,通过在边坡现场开展采用不同浓度的改性亲水聚氨酯树脂改良剂 W-OH 处理坡面的人工径流入渗试验,探究 W-OH 改良剂对坡体渗漏性能的改良效果。

## 1 砾石石渣边坡概况

研究的石渣边坡为广西石漠化地区某高速公路路肩边坡(图 1a)。该边坡是按照 1:1.75 的坡比开挖削坡后,在其表面铺砌了 20~30 cm 的砾石石渣的永久边坡,以下是裂隙发育、渗透性很强的石灰岩边坡。坡面石渣的干密度为 1.90 g/cm<sup>3</sup>,相对密度为 0.60。在坡面选取 5 个点取石渣样,通过筛分试验得到级配曲线(图 1b)。依据《土工试验方法标准(GB/T 50123—2019)》<sup>[18]</sup>,该石渣定名为级配良好砾。由常水头渗透试验测得石渣的平均渗透系数为  $6.80 \times 10^{-2}$  cm/s,渗透等级为强透水。该边坡位于亚热带季风气候区,年平均降水量为 1 600~1 807 mm,70%以上的降水集中在雨季(4—9 月)。天然年径流分布和降雨量分布基本一致,年径流深为 914.0~1 238.4 mm。

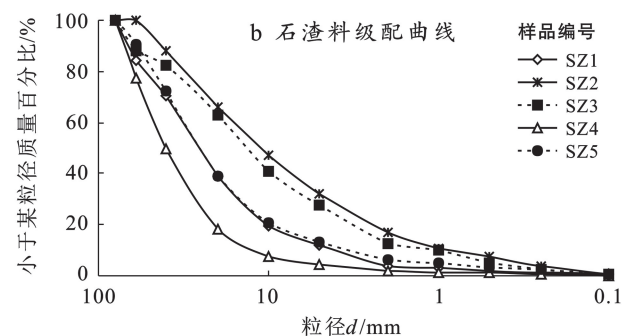


图 1 石渣边坡坡面及石渣料的级配曲线

Fig.1 Stone slag slope surface and grading curve of stone slag material

## 2 试验方案及方法

### 2.1 试验方案

现场试验于 2022 年 8 月在开挖削坡后铺砌石渣

的永久边坡上开展。根据现场的供水能力、坡面的漏失量等,并考虑尾水的收集难度,选择边坡底部段长、宽分别为 1.5 和 1 m 的坡面开展试验。由前人的研究成果以及改良石渣的室内持水及入渗特性试验研

究可知,浓度小于 3% 的 W-OH 溶液对石渣的改良效果较差,而浓度大于 6% 的 W-OH 溶液凝固速度非常快,向坡体内部渗入时较困难。为了探讨 W-OH 溶液浓度对石渣边坡渗流性能改良效果的影响,选择 3%~6% 共 4 个浓度的 W-OH 溶液分别对边坡石渣处理后开展坡面径流入渗试验。现场边坡表面的松散石渣层较薄,约 20~30 cm。通过现场预试验可知,在坡面上施用 4 L/m<sup>2</sup> 的 W-OH 溶液时,对石渣坡面的处理较充分且均匀。试验采用的最大来流量是依据当地降雨强度按照公式(1)<sup>[19]</sup> 确定:

$$Q = \frac{\alpha q A}{60} \quad (1)$$

式中:Q 为最大来流量(L/min);q 为雨强(mm/h);A 为集雨面积(mm<sup>2</sup>);α 为雨量折减系数。根据现场试验地点的气候水文资料,该地雨强可取 100 mm/h。试验坡面宽度为 1 m,依据现场边坡的坡度可得其单宽集雨面积约 30 m<sup>2</sup>;为保证安全,取较高的损失折减系数 0.8。将上述参数代入公式(1)计算可得最大来流量为 40 L/min。试验中发现未处理坡面在来流量为 30 L/min 时,坡面就发生明显的侵蚀破坏,因此针对未处理坡面的最大来流量采用 30 L/min。考虑 W-OH 溶液的浓度以及来流量的影响,现场坡面径流入渗的试验方案详见表 1。

表 1 坡面径流入渗现场试验方案

Table 1 Plan of runoff infiltration test for slope surface

处理方式	来流量/(L·min <sup>-1</sup> )
未处理坡面	5,10,15,20,30
3% W-OH 溶液	10,20,30,40
4% W-OH 溶液	10,20,30,40
5% W-OH 溶液	10,20,30,40
6% W-OH 溶液	10,20,30,40

## 2.2 试验方法

防止径流入渗过程中顶部来水向两侧漫流,在试验坡面两侧挖沟将塑料薄膜埋入石渣料底部,且在坡面以上预留 10 cm 的薄膜并用木板支撑以挡水,并在坡脚处铺设塑料膜收集坡面径流。最后在坡面上进行改良剂的施用与养护,在需处理的 4 个坡面上分别用 4 种浓度的 W-OH 溶液按照总用量 4 L/m<sup>2</sup>,以少量多次的方式从坡面均匀灌入坡体。处理后养护 24 h,在夜间或降雨时,用不透水的塑料薄膜遮盖,避免雨水破坏处理后的坡面,对试验结果造成影响。试验时采用自制可溢流亚克力水槽加导水膜提供径流,用洒水车连接软管控制流量为水槽连续供水。将水槽固定在坡面顶端,采用水准尺将水槽调平,确保水流均匀溢出。然后打开洒水车出水阀并调节出水流

量,达到所需流量时将供水管放入水槽中。待水槽水满后,水流从前端较低的侧壁表面溢出并沿导水膜流向坡面。在坡脚集水膜的末端用水桶收集溢出水流。在进行径流渗流试验时,通过在同一坡面逐级增大来流量,观察坡面湿润锋的运移变化。从水流开始溢出水槽时计时,每隔 2 min 更换一次水桶,每次历时 30 min。用电子秤称取水和桶的总质量,待水中的石渣完全静置后,倒掉上层清水。用塑料袋收集被侵蚀的石渣,编号后带回实验室用烘箱烘干后称取质量。

## 2.3 计算方法

径流率和入渗率可作为判断土体渗流程度的重要依据,依据试验结果可按照下式计算坡面径流率(R):

$$R = \frac{M - m_s - m_b}{1\,000 \Delta t \rho_w} \quad (2)$$

式中:M, m<sub>s</sub>, m<sub>b</sub> 分别为相同间隔时间内桶、水和石渣的总质量、烘干的石渣质量和桶的质量(g);ρ<sub>w</sub> 为水的密度(g/cm<sup>3</sup>)。由于顶部来水流量一定,则用单位时间内来流量(q)减去径流率(R)就可得到坡面入渗率:

$$I = q - R \quad (3)$$

径流系数是任意时段内径流深度与同时段内降水深度的比值,可用于评估用 W-OH 处理后砾石石渣坡面产生径流的比例,进而判断 W-OH 对砾石石渣的渗流改良效果。径流系数计算公式为:

$$\alpha = \frac{R}{q} \quad (4)$$

## 3 试验结果及分析

### 3.1 坡面径流变化过程及规律

图 2 为不同来流量下未处理坡面被冲刷 30 min 时的照片。来流量为 5 L/min 时(图 2a),顶部坡面仅 50—60 cm 范围的石渣湿润,且没有形成坡面径流。这是因为岩溶地区石渣边坡基岩存在许多裂缝,水流会产生大量的漏失。来流量增大至 10 L/min 时(图 2b),湿润锋开始继续前进,但仍未形成径流。来流量增大至 15 L/min 时(图 2c),左侧坡面出现优势流,湿润锋运移速度加快,已到达左侧坡脚。来流量增大至 20 L/min 时(图 2d),在坡面的中下部出现了一条细小的冲沟,坡面变得愈加湿润,但仍然未形成明显的坡面径流。根据文献<sup>[20]</sup>的研究内容可知喀斯特地区在降雨强度很小的时候,地表径流的径流损失率为 100%,同未处理坡面的试验结果一致。来流量增加至 30 L/min 时(图 2e),坡面产生了明显的径流。由于边坡的石渣十分松散,在水流作用下,细颗粒被带走,粗颗粒滞留,形成明显冲沟。部分水汇集到冲沟处,形成集中径流,冲沟慢慢加长加宽,随后趋于稳定。

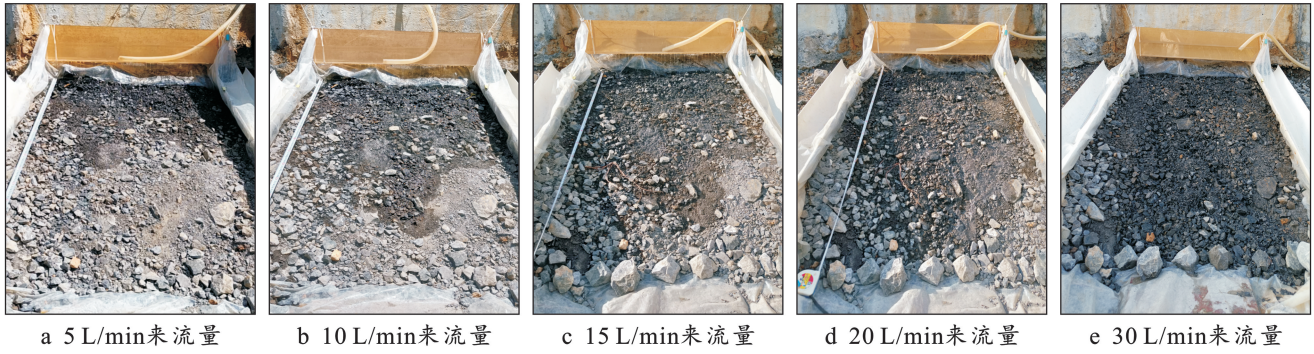


图 2 不同来流量下未处理坡面被冲刷 30 min 时的实时现场

Fig.2 Slope surfaces scoured 30 minutes by different inflow rate

不同来流量时未处理坡面的湿润面积随着时间的变化图 3 所示。试验坡面面积为  $1.5 \text{ m}^2$ ，来流量为  $20 \text{ L/min}$  时坡面已全部湿润，故来流量为  $30 \text{ L/min}$  时坡面无湿润面积变化。由图 3 可以看出，来流量不变时，湿润面积的变化主要分为快速增加和缓慢增加两个阶段。加大来流量后，湿润面积会有一个快速增大阶段，但很快增速又逐渐减慢。这是因为当流量较小时，后期的来水量和流入坡面的入渗量已大致平衡。增大来流量后，水流会快速打破之前的平衡，多余的水会继续向下使坡面湿润面积增加，但很快又会达到一个新的水量平衡状态。

在进行处理后坡面的径流入渗试验时，即使采用最小的来流量  $10 \text{ L/min}$  坡面也会迅速形成径流，径流面积达  $100\%$ 。图 4 为试验结束后不同浓度 W-OH 溶液处理的坡面照片。可以看出，经处理后的边坡孔隙被 W-OH 溶液填充，松散的土颗粒被粘结为较稳定的团聚体。经  $40 \text{ L/min}$  的来水流量入渗后，即使是最低浓度的 W-OH 溶液处理的坡面，也未形

成明显的冲沟和冲坑。这是因为 W-OH 溶液的胶结性较好，且在刚和水反应时呈液态，能够渗入坡体内部，填充孔隙，加固一定厚度的边坡，并在边坡表面形成网状凝胶膜。且 W-OH 溶液随着浓度的增大，对孔隙的填充程度越高，坡面孔隙的填充效果和表面成膜效果也越好。

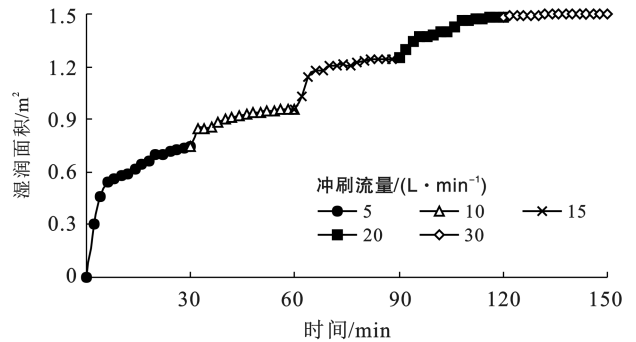


图 3 未处理坡面湿润面积的时程变化  
Fig.3 Time history variation in wetting area on untreated slope

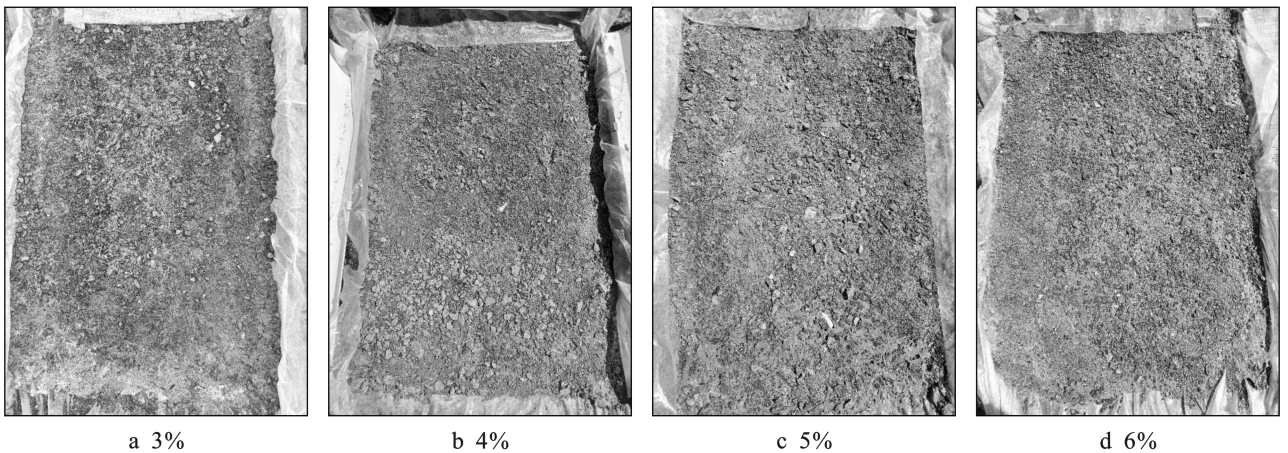


图 4 试验结束时不同浓度 W-OH 溶液处理的坡面

Fig.4 Slope surface treated by W-OH solution with different concentrations at end of test

### 3.2 坡面径流率变化规律

未处理坡面仅在来流量为  $30 \text{ L/min}$  时出现径

流。图 5 为该流量下径流率和坡体入渗率的时程变化。在前  $5 \text{ min}$  时，径流率近似呈线性增长，随后大

致平稳仅有轻微波动。将坡面形成稳定径流后的径流率平均值定义为稳定径流率,可得未处理坡面的稳定径流率为 5.5 L/min, 仅占来水流量的 18.3%。由此可见,未处理坡面的径流率较小,大部分水仍从坡体漏失。

图 6 为不同来流量下坡面径流率的时程变化。由图 6 可以看出坡面径流率曲线的变化基本相似,在前期增长较快,随后趋于稳定。径流率基本在 4 min 左右就能达到稳定状态,且来流量越大,坡面径流量越大。同一流量下,W-OH 溶液的浓度越高,坡面径流率越大。

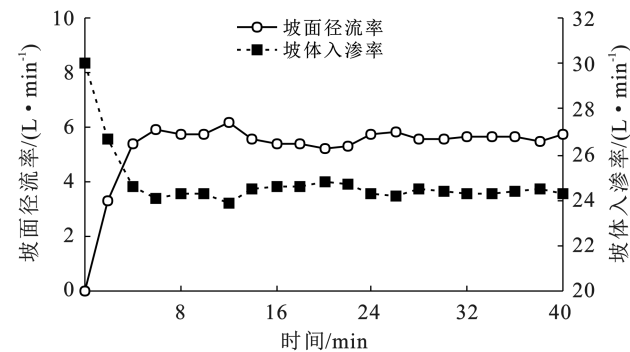
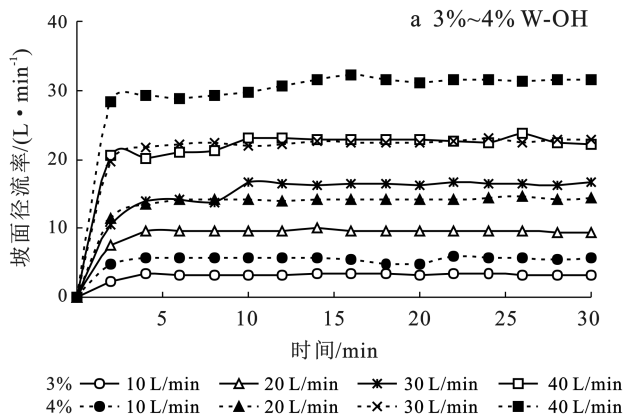


图 5 未处理坡面的径流率和坡体入渗率的时程变化  
Fig.5 Time history of runoff rate and infiltration rate on untreated slopes

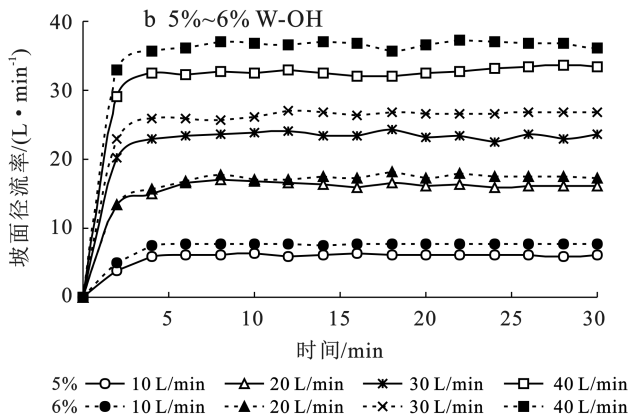


图 6 不同来流量下坡面径流率的时程变化

Fig.6 Time history of runoff rate for different inflow rates

坡面稳定径流率随来流量和 W-OH 溶液浓度的变化如图 7 所示。可以看出不同浓度 W-OH 溶液处理的坡面的稳定径流率随来流量的增大而近似线性增大。3%浓度的曲线明显低于其他较高浓度的,且

斜率较小,为 0.65。说明当浓度大于 3%时,处理效果更好。从图 7 可以看出,稳定径流率随着 W-OH 溶液浓度的增大而近似线性增大。当浓度由 3%增大至 4%时,稳定径流率的增幅最大。

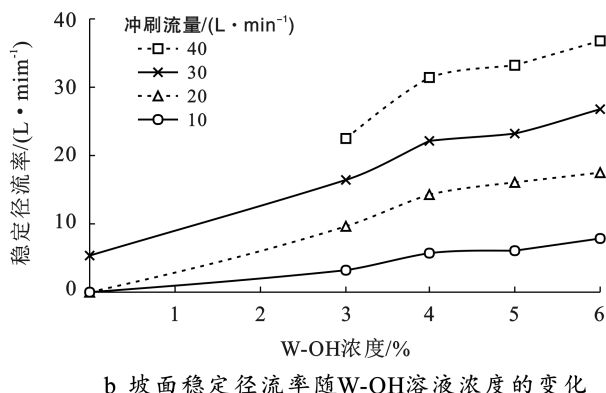
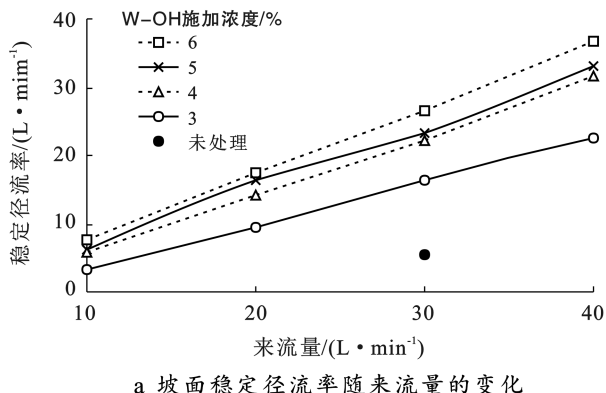


图 7 坡面稳定径流率随来流量和 W-OH 溶液浓度的变化

Fig.7 Variation in stable runoff rate of slope surface with inflow rates and W-OH solution concentration

W-OH 溶液浓度和来流量不同时的坡面稳定径流率及其增量和增大百分比详见表 2。用 3%浓度的 W-OH 溶液处理坡面后,在最小来流量 10 L/min 时,

坡面径流率可达到 3.44 L/min;来流量为 30 L/min 时,坡面的径流率达到 16.5 L/min,比未处理坡面的 5.5 L/min 提升了 200%。说明即使采用较小浓度的

W-OH 溶液对石渣边坡处理后也有明显的防渗漏效果。来流量为 30 L/min 时,用 4%~6% 浓度的 W-OH 溶液处理后坡面的稳定径流率为 22.15~26.7 L/min,较未处理坡面提高了 302.7%~385.5%。苏涛等<sup>[21]</sup>研究发现当固化剂 EN-1 在砷砂岩中的掺量由 0.02% 增至 0.50% 时,其稳定径流率从 2.45% 增至 26.13%。由此可见,W-OH 改良剂对砾石石渣等粗粒土边坡的渗漏处理效果更明显,可有效增加坡面的径流量,减少渗漏量。由表 2 可知,处理后石渣边坡的径流系数随来流量和 W-OH 溶液浓度的增大而增大。砾石石渣边坡的径流系数为 0~0.2,现场试验中未处理坡面的径流系数为 0.18,用 6% 浓度的 W-OH 溶液处理坡面后坡面的径流系数可达 0.77~0.92。

钟壬琳等<sup>[19]</sup>的研究可知红壤坡面的径流系数大于 0.9,可见 W-OH 对砾石石渣边坡的渗漏改良效果较好。W-OH 溶液对石渣的加固机理与其与水反应后生成的凝胶性质有关。W-OH 高分子链上的基团—NCO 可与水中的 OH<sup>-</sup> 快速反应,较短的时间内就可以生成力学性能较好的弹性凝胶体,且再次遇水不再发生反应。与水混合后的 W-OH 溶液在前期具有较好的流动性。一部分流入石渣内部,填充孔隙,包裹并粘结石渣颗粒。可减少土体的孔隙率,降低土体的渗透性,并在颗粒之间形成黏聚力。另外一部分附着在边坡表面,形成网状凝胶膜,可降低坡面的渗透性,从而减少水流的入渗量。且 W-OH 溶液浓度越高,对孔隙的填充程度越高,水流的入渗量也越小。

表 2 不同 W-OH 溶液浓度和来流量时的坡面稳定径流率、入渗率和径流系数  
Table 2 Stable runoff rate, infiltration rate and runoff coefficient of slope surface for different W-OH solution concentration and inflow rates

溶液浓度/%	来流量/ (L·min <sup>-1</sup> )	稳定径流率/ (L·min <sup>-1</sup> )	径流率增量/ (L·min <sup>-1</sup> )	增大比例/ %	稳定入渗率/ (L·min <sup>-1</sup> )	入渗率减少量/ (L·min <sup>-1</sup> )	减少比例/ %	径流系数
3	10	3.44	3.44	—	6.70	3.30	33.0	0.34
	20	9.55	9.55	—	10.75	9.25	46.3	0.48
	30	16.49	10.99	199.8	13.51	10.99	44.9	0.55
	40	22.65	—	—	17.35	—	—	0.57
4	10	5.64	5.64	—	4.36	5.64	56.4	0.56
	20	14.20	14.20	—	5.80	14.20	71.0	0.71
	30	22.15	16.65	302.7	7.85	16.65	68.0	0.74
	40	31.49	—	—	8.51	—	—	0.79
5	10	6.06	6.06	—	3.80	6.20	62.0	0.61
	20	16.20	16.20	—	3.94	16.06	80.3	0.81
	30	23.29	17.79	323.5	6.71	17.79	72.6	0.78
	40	33.18	—	—	6.72	—	—	0.83
6	10	7.72	7.72	—	2.28	7.72	77.2	0.77
	20	17.56	17.56	—	2.44	17.56	87.8	0.88
	30	26.70	21.20	385.5	3.19	21.31	87.0	0.89
	40	36.81	—	—	3.30	—	—	0.92

### 3.3 坡体入渗率变化规律

石渣的持水性能较差,在持续来水的过程中,部分水流会沿着基岩裂隙、孔洞等流失。坡体入渗率的大小可直接反应石渣边坡的水分流失程度。在来水流量一定的情况下,入渗率可通过公式(3)计算得到。当来流量较小时,未处理坡面上所有的水流均入渗,入渗率就等于来流量;当来流量为 30 L/min 时,未处理坡面产生径流。由图 5 可知,前 5 min 内入渗较多,随后入渗率趋于平稳。这是因为入渗前,坡体的含水率较低,土体的饱和度较小。试验前期,坡顶来水大部分都渗入土体,并通过孔隙渗漏,因此,入渗率较高。将坡面形成稳定入渗后的入渗率平均值作为

稳定入渗率,可得未处理边坡的稳定入渗率为 24.5 L/min,占总来水流量的 81.7%,漏失十分严重。使用 W-OH 改良剂改良土体一个重要目的就是改善坡体的水分漏失情况,减少入渗量,且使坡体能储存更多的水供植物生长所需。坡面稳定入渗率随来流量和 W-OH 溶液浓度的变化如图 8 所示。W-OH 溶液浓度一定时,稳定入渗率随来流量的增大而增大。说明来流量越大,水流能量越大,越易入渗。小来流量作用于未处理坡面时,水流全部漏失,未达到坡面的最大可渗漏量;而处理后的坡面在 10 L/min 便能达到稳定入渗。W-OH 溶液的浓度为 3% 时的曲线斜率最大,随着浓度的增大,曲线逐渐变平缓。这是

因为 3% 的 W-OH 凝胶体胶结性较弱,对土颗粒的胶结和表面成膜效果都较弱,对孔隙的填充程度也较低。因此,浓度越低,坡面入渗受流量变化的影响越大。从图 8 可以看出,不同流量下的曲线变化规律大致相同,稳定入渗率随着 W-OH 溶液浓度的增大而减小,这与杨思远等<sup>[17]</sup>将不同浓度的 W-OH 溶液喷施于煤矸石中进行入渗试验后的研究结果一致。在浓度由 3% 增至 4% 时,稳定入渗率减少 2.34~8.84 L/min,减少较明显,在 4%~6% 的范围内,稳定入渗率共减少 2.08~5.21 L/min,变化较小。说明在本试验的浓度范围内,W-OH 溶液浓度为 4% 时的处

理效率最高。不同 W-OH 溶液浓度和来流量时坡面的稳定入渗率和边坡处理后的稳定入渗率减少量及其百分比详见表 2。来流量为 30 L/min 时,未处理坡体的入渗率为 24.5 L/min;W-OH 溶液浓度为 3% 至 6% 时,坡体稳定入渗率为 13.51~3.19 L/min,较未处理坡面降低了 44.9% 至 87.0%。邢学刚等<sup>[22]</sup>用保水剂聚丙烯酰胺和活性炭对喀斯特地区的白云岩进行改良,发现在施入 3% 活性炭条件下,与不添加保水剂相比,添加 0.5% 和 1% 保水剂的入渗率分别下降了 12.31% 和 24.92%。可见,W-OH 溶液对石渣的处理效果较好,能有效减少坡体渗漏。

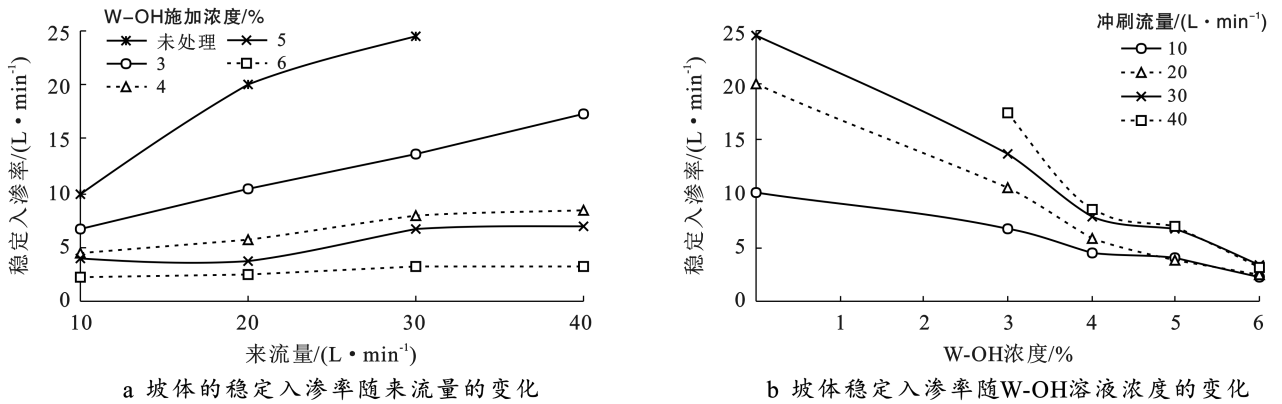


图 8 坡体稳定入渗率随来流量和 W-OH 溶液浓度的变化

Fig.8 Variation in stable infiltration rate of slope with inflow rates and W-OH solution concentration

### 3.4 入渗径流比变化规律

入渗径流比为入渗率与径流率的比值,能反映土体的入渗能力。未处理坡面在小流量入渗时,入渗率为 100%。来流量为 30 L/min 时,入渗径流比达 4.45(图 5)。

图 9 为处理后坡体入渗径流比随来流量和 W-OH 溶液浓度的变化。由图 9a 可知,入渗径流比随来流量的增大而非线性减少。在 10~20 L/min 的减少幅度最大,其减小幅度随来流量增大而逐渐变小。用浓度为 3% 的 W-OH 溶液处理后坡面的入渗径流比

为 1~2,比未处理坡面减少了 3.45~2.45,用其余 3 种 W-OH 溶液浓度处理时的入渗径流比均小于 1。说明处理后坡面的入渗率明显降低,渗漏改善效果较好。从图 9b 可以看出,入渗径流比随着 W-OH 溶液浓度的增大而非线性减小,分别从 0.77~2.03 减小到 0.09~0.30,共减少 0.68~1.73。其中,在 3%~4% 之间的减少幅度最大,为 0.47~1.26。说明 W-OH 溶液的添加能有效降低石渣边坡坡体的入渗径流比。因此,将改良剂 W-OH 用于石渣等粗粒土边坡修复中可以有效减少坡体的水分流失。

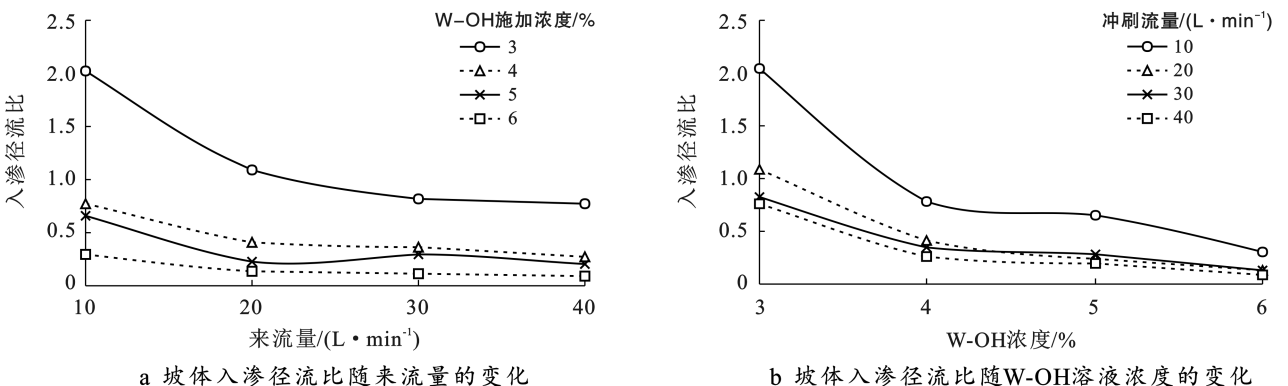


图 9 坡体入渗径流比随来流量和 W-OH 溶液浓度的变化

Fig.9 Variation in infiltration runoff ratio of slope with inflow rates and W-OH solution concentration

## 4 结论

(1) 对于未处理坡面,增大来流量的瞬间,径流面积会出现短暂的快速增大,在来流量一定时,坡面湿润面积缓慢增大并逐渐达到来水和漏失平衡状态。来流量为 30 L/min 时,未处理坡面开始产生径流。坡面的稳定径流率仅为 5.5 L/min,仅占来水流量的 18.3%。可见石漠化地区的石渣边坡渗透性强、持水性能弱,在降雨过程中极易造成坡体的水分漏失。

(2) W-OH 溶液的添加能有效降低石渣边坡坡面的入渗率,提高径流率,进而降低坡体的入渗径流比。处理后坡面的稳定径流率和稳定入渗率均随来流量的增大而近似线性增大。用 3%~6% 的 W-OH 溶液处理后,坡面的稳定径流率较未处理坡面提高了 200.0%~385.5%,稳定入渗率较未处理坡面降低了 44.9%~87.0%。处理后石渣边坡的入渗径流比随来流量和 W-OH 溶液浓度的增大而减小。说明 W-OH 溶液对砾石石渣边坡的渗漏处理效果明显,且 W-OH 溶液的浓度越高,处理效果越好。

(3) 将改良剂 W-OH 用于砾石石渣等粗粒土边坡修复中可以有效减少坡体的水分漏失,提升坡体的保水能力。在本试验的浓度范围内,W-OH 溶液浓度由 3% 增至 4% 时,稳定径流率的增幅、稳定入渗率及入渗径流比的减幅最大,W-OH 溶液浓度大于 4% 后,变化甚微,故 W-OH 溶液浓度为 4% 时的处理效率最高。

### 参考文献 (References)

- [1] 范金明,张超,钱慧,等.岩溶石漠化地区生态环境演变及驱动力分析[J].森林与环境学报,2024,44(3):298-307.  
Fan Jinming, Zhang Chao, Qian Hui, et al. Analysis of ecological environment evolution and driving forces in a karst rocky desertification area [J]. Journal of Forest and Environment, 2024,44(3):298-307.
- [2] 罗凯,罗祺,周成,等.石漠化边坡及其植被板槽的地下渗漏一体化综合观测技术及应用模拟[J].水利水电技术,2024,55(6):96-105.  
Luo Kai, Luo Qi, Zhou Cheng, et al. Integrated comprehensive observation technology and application simulation on underground leakage of rocky desertification slope and its vegetation plate slot [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024,55(6):96-105.
- [3] 崔静,温庆忠,黄佳健.喀斯特地区石漠化综合治理研究[J].中国水土保持,2024(4):49-52.  
Cui Jing, Wen Qingzhong, Huang Jiajian. Comprehensive management of stony desertification in karst areas [J]. Soil and Water Conservation in China, 2024(4):49-52.
- [4] 任娇娇,周运超,刘兵,等.石灰岩发育土壤团聚体形成机制研究[J].中国岩溶,2019,38(5):722-728.  
Ren Jiaojiao, Zhou Yunchao, Liu Bing, et al. Study on aggregate formation mechanism of soil in limestone [J]. Carsologica Sinica, 2019,38(5):722-728.
- [5] 陈石磊,熊立华,查悉妮,等.考虑喀斯特地貌的分布式降雨径流模型在西江流域的应用[J].人民珠江,2020,41(5):17-24.  
Chen Shilei, Xiong Lihua, Zha Xini, et al. Application of a DEM-based distributed rainfall-runoff model considering karst landform in the Xijiang River Basin [J]. Pearl River, 2020,41(5):17-24.
- [6] 张俊云.岩石边坡植被护坡系统的水分平衡及控制[J].岩石力学与工程学报,2013,32(9):1729-1735.  
Zhang Junyun. Moisture balance and control of bio-slope-engineering system for rock slope [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2013,32(9):1729-1735.
- [7] 舒安平,高小虎,舒晓锐.岩石边坡植被恢复工程中的客土稳定性分析[J].水土保持通报,2017,37(4):184-188.  
Shu Anping, Gao Xiaohu, Shu Xiaorui. Stability analysis of carrying soil in vegetation restoration project on rock slope [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017,37(4):184-188.
- [8] 郭凯先.W-OH 新材料特性及在青海湖周边地区沙化地植生固沙中的应用[J].中国农村水利水电,2012(4):30-32.  
Guo Kaixian. Characteristics of the new chemical material W-OH in the revegetation of desertified areas around Qinghai Lake and their application [J]. China Rural Water and Hydropower, 2012(4):30-32.
- [9] 张冠华,牛俊,孙金伟,等.土壤固化剂及其水土保持应用研究进展[J].土壤,2018,50(1):28-34.  
Zhang Guanhua, Niu Jun, Sun Jinwei, et al. Soil stabilizer and its application in soil and water conservation: A review [J]. Soils, 2018,50(1):28-34.
- [10] 肖衡林,马强,叶建军,等.水泥泥炭与纤维基干喷生态护坡基材配方优化及现场试验[J].农业工程学报,2015,31(2):221-227.  
Xiao Henglin, Ma Qiang, Ye Jianjun, et al. Optimization on formulation of peat-fiber-cement-based dry-sprayed substrate for slope ecological protection by site experiment [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015,31(2):221-227.
- [11] 王晓梅,陈建平,周云艳,等.厚层基材植物防护在红色粉砂岩边坡的应用[J].公路交通科技,2010,27(2):152-158.  
Wang Xiaomei, Chen Jianping, Zhou Yunyan, et al.

- Application of plant protection of thick-layer backing in red siltstone slope [J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2010,27(2):152-158.
- [12] 王树英,陈宇佳,钟嘉政,等.泡沫—泥浆—聚合物组合改良粗粒土塑流性及渗透性特征研究[J].*中国公路学报*,2023,36(8):214-224.  
Wang Shuying, Chen Yujia, Zhong Jiazheng, et al. Study on flow plasticity and permeability characteristics of foam-slurry-polymer conditioned coarse-grained soil [J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2023,36(8):214-224.
- [13] Huang Wei, Du Jiabin, Lai Haoqiang, et al. Soil and water conservation and ecological restoration on the slopes treated with new polymer composite materials [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2022,81(18):448.
- [14] 王其东,高海鹰,梁止水,等.新型亲水性聚氨酯对砒砂岩边坡抗降雨侵蚀的影响[J].*水土保持学报*,2016,30(3):29-32.  
Wang Qidong, Gao Haiying, Liang Zhishui, et al. Effect of a novel hydrophilic polyurethane on increasing pisha sandstone resistance to rainfall erosion [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2016,30(3):29-32.
- [15] Liang Zhishui, Wu Zhiren, Deng Lin, et al. Improving the consolidation properties of hydrophilic polyurethane for feldspathic sandstone water erosion prevention [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2020,27(15):17642-17651.
- [16] Qin Xiaochun, Ni Anchen, Zhang Nan, et al. Erosion control and growth promotion of W-OH material on red clay highway slopes: A case study in South China [J]. *Sustainability*, 2021,13(3):1144.
- [17] 杨思远,杨海龙,杨鹏辉,等.基于 W-OH 的矿区重构冻土阻水层功能评价模拟研究[EJ/OL].*干旱区地理*,1-14[2024-12-25].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.x.20240416.1948.001.html>.  
Yang Siyuan, Yang Hailong, Yang Penghui, et al. Function evaluation of reformed waterproof layer over frozen ground in mining area based on W-OH [EJ/OL]. *Arid Land Geography*, 1-14[2024-12-25].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/65.1103.x.20240416.1948.001.html>.
- [18] 中华人民共和国住房和城乡建设部.土工试验方法标准:GB/T 50123—2019[S].北京:中国计划出版社,2019.  
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the PRC. Standard for geotechnical testing methods: GB/T 50123—2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [19] 钟壬琳,张平仓.人工降雨和放水冲刷试验下红壤坡面径流与泥沙特征分析[J].*长江科学院院报*,2019,36(2):33-38.  
Zhong Renlin, Zhang Pingcang. Characteristics of runoff and sediment yield on red soil slope under artificial rainfall and scouring [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2019,36(2):33-38.
- [20] Messerschmid C, Lange J, Sauter M. Assessment of transmission loss in a Mediterranean karstic watershed (Wadi Natuf, West Bank) [J]. *Hydrological Processes*, 2018,32(10):1375-1390.
- [21] 苏涛,张兴昌.EN-1 对砒砂岩固化土坡面径流水动力学特征的影响[J].*农业机械学报*,2011,42(11):68-75.  
Su Tao, Zhang Xingchang. Effects of EN-1 soil stabilizer on slope runoff hydraulic characteristics of Pisha sandstone stabilized soil [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011,42(11):68-75.
- [22] 邢学刚,彭韬,王世杰,等.白云岩石漠化坡地土壤改良盆栽试验研究报道:以种植黑麦草为例[J].*地球与环境*,2017,45(2):229-235.  
Xing Xuegang, Peng Tao, Wang Shijie, et al. Agent and activated carbon as soil amendments on dolomite slopes: A case study of perennial ryegrass [J]. *Earth and Environment*, 2017,45(2):229-235.