



## 四川黄龙高山柳灌丛区钙华彩池地表水渗漏机制探究

刘馨泽, 高文皓, 徐荣林, 孙东, 姜莉萍, 唐淑, 仁青周, 徐梦宇, 翟胜强

**Exploration on the surface water leakage mechanism of travertine pools in Salix cupularis shrub area of Huanglong Scenic Spot, Sichuan Province**

LIU Xinze, GAO Wenhao, XU Ronglin, SUN Dong, JIANG Liping, TANG Shu, REN Qingzhou, XU Mengyu, and ZHAI Shengqiang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202309019>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 上新世红土微观结构参数与渗透系数的变化关系研究

A study of the relationship between the coefficient of permeability and microstructure of the Pliocene laterite

杨玉茹, 李文平, 王启庆 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 153–160

#### 黑河流域中游盆地地表水与地下水转化机制研究

Study on the conversion mechanism of surface water and groundwater in the middle reaches of the Heihe River Basin

祁晓凡, 李文鹏, 崔虎群, 康卫东, 刘振英, 邵新民 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 29–43

#### 颗粒级配与孔隙比对粗粒土渗透系数的影响

Effects of gradation and void ratio on the coefficient of permeability of coarse-grained soil

丁瑜, 饶云康, 倪强, 许文年, 刘大翔, 张恒 水文地质工程地质. 2019, 46(3): 108–108

#### 改性糯米灰浆的室内研究及在九寨沟钙华地质裂缝修复中的应用

A laboratory study of modified glutinous rice mortar and its application to repair travertine geological cracks in Jiuzhaigou

范明伟, 裴向军, 杜杰, 肖维阳, 周立宏, 杨华阳 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 183–190

#### 基于相关指标的裂隙岩体渗透系数估算模型研究

A model for estimating hydraulic conductivity of fractured rock mass based on correlation indexes

王玮, 钱家忠, 马雷, 王德健, 马海春, 赵卫东 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 82–89

#### 白洋淀湖岸带地表水与地下水垂向交换研究

A study of vertical exchange between surface water and groundwater around the banks of Baiyangdian Lake

李刚, 马佰衡, 周仰效, 赵凯, 尤冰, 李木子, 董会军, 李海涛 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 48–54



关注微信公众号，获得更多资讯信息

DOI: [10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202309019](https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202309019)

刘馨泽, 高文皓, 徐荣林, 等. 四川黄龙高山柳灌丛区钙华彩池地表水渗漏机制探究 [J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(5): 195-206.

LIU Xinze, GAO Wenhao, XU Ronglin, et al. Exploration on the surface water leakage mechanism of travertine pools in Salix cupularis shrub area of Huanglong Scenic Spot, Sichuan Province[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(5): 195-206.

## 四川黄龙高山柳灌丛区钙华彩池地表水渗漏 机制探究

刘馨泽<sup>1</sup>, 高文皓<sup>1,2</sup>, 徐荣林<sup>3</sup>, 孙东<sup>1</sup>, 姜莉萍<sup>3</sup>, 唐淑<sup>3</sup>, 仁青周<sup>3</sup>, 徐梦宇<sup>1</sup>, 翟胜强<sup>1</sup>

(1. 四川省地质环境调查研究中心, 四川成都 610081; 2. 成都理工大学材料与化学化工学院, 四川  
成都 610059; 3. 黄龙国家级风景名胜区管理局, 四川松潘 623300)

**摘要:** 近年来, 黄龙世界自然遗产地部分钙华景观群出现了程度不同的退化, 其中地表水强渗漏及黑化、沙化等问题在高山柳灌丛密集分布区呈规模化出现, 但是灌丛扩张和渗漏增强之间的关联机制尚未开展充分论证。为研究高山柳覆盖程度对钙华渗漏增强的影响, 在黄龙上游映月彩池北部选取典型灌丛区彩池群, 设置了 4 个灌丛盖度水平: 无灌木(盖度<10%)、少灌木(盖度 10%~30%)、多灌木(盖度 30%~60%)、全灌木(盖度>60%), 实施原位入渗试验测定渗漏强度, 评估灌丛区钙华孔隙结构和渗透参数变化, 对比非灌丛区天然渗漏强度, 进而总结高山柳灌丛影响下的钙华地表水渗漏机制。结果表明: (1) 钙华彩池渗漏强度随高山柳盖度增加而增强, 当盖度超过 60% 后, 渗漏强度发生显著变异, 应与大孔隙快速导流有关; (2) 灌丛区因受藻类活动、植物残体分解等因素影响形成多孔隙、孔洞新生钙华, 造成天然渗漏强度高于非灌丛区; (3) 高山柳灌木根系活动导致钙华松散、孔隙直径增大、有效孔隙度增加、渗透系数提升, 地下水渗流增强引起钙华彩池整体地表水渗漏增强; (4) 高山柳根系对钙华孔隙结构改造以根劈作用为基础, 并伴有根系水溶液对钙华胶结物的溶蚀作用, 使钙华趋向均匀松散化, 高山柳灌丛区根系和藻类活动等主要控制了地表水的渗漏增强过程。研究成果对黄龙钙华自然遗产景观演化分析和保育具有一定的参考价值。

**关键词:** 黄龙景区; 高山柳灌丛; 钙华彩池; 渗漏; 有效孔隙度; 渗透系数

中图分类号: P641.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)05-0195-12

## Exploration on the surface water leakage mechanism of travertine pools in Salix cupularis shrub area of Huanglong Scenic Spot, Sichuan Province

LIU Xinze<sup>1</sup>, GAO Wenhao<sup>1,2</sup>, XU Ronglin<sup>3</sup>, SUN Dong<sup>1</sup>, JIANG Liping<sup>3</sup>, TANG Shu<sup>3</sup>,  
REN Qingzhou<sup>3</sup>, XU Mengyu<sup>1</sup>, ZHAI Shengqiang<sup>1</sup>

(1. Sichuan Geological Environment Survey and Research Center, Chengdu, Sichuan 610081, China;  
2. College of Materials and Chemistry & Chemical Engineering, Chengdu University of Technology,  
Chengdu, Sichuan 610059, China; 3. Huanglong National Scenic Spot Administration,  
Songpan, Sichuan 623300, China)

收稿日期: 2023-09-07; 修訂日期: 2024-01-31

投稿网址: [www.swdzgcdz.com](http://www.swdzgcdz.com)

基金项目: 四川省科技计划资助项目(2024NSFSC0111); 国家环境保护水土污染协同控制与联合修复重点实验室开放基金(GHBK-2023-01); 四川省地质调查研究院科研项目(SDDY-Z2022008; SCIGS-CYBXM-2023004)

第一作者: 刘馨泽(1987—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事自然景观资源保护研究工作。E-mail: [cliu\\_7411@163.com](mailto:cliu_7411@163.com)

通讯作者: 徐荣林(1974—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事景区管理与旅游可持续发展研究工作。E-mail: [xrl@vip.163.com](mailto:xrl@vip.163.com)

**Abstract:** Recently, some travertine landscape groups in Huanglong Scenic Spot have been degraded to varying degrees. Surface water leakage, blackening and desertification have occurred on a large scale in the dense distribution area of *Salix cupularis* shrub, which has adversely affected the core value of the Huanglong World Natural Heritage Site. The relationship between shrub expansion and leakage enhancement has not been fully understood. In this study, travertine pool group of typical shrub area was selected in the north of Yingyue Pool in the upper reaches of Huanglong, and 4 shrub cover levels were set: no shrub (coverage <10%), little shrub (coverage 10%–30%), many shrub (coverage 30%–60%), and whole shrub (coverage >60%). In-situ infiltration test was conducted to determine the leakage intensity and to evaluate the changes of travertine pore structure and permeability parameters in shrub area. With the comparison of the leakage intensities in different shrub cover level areas, the mechanism of surface water leakage of travertine under the influence of *Salix cupularis* scrub is summarized. The results show that (1) the leakage intensity increases with the increase of coverage. When the coverage of *Salix cupularis* shrub exceeds 60%, the leakage intensity changes significantly, which should be related to the rapid diversion of large pores. (2) Under the influence of algae activities and decomposition of plant residues, new travertine with more pores and holes is formed in the scrub area, resulting in higher natural leakage intensity than that in the non-scrub area. (3) The root activities of *Salix cupularis* shrub changes the primary travertine structure, leading to loose primary travertine and increases of pore diameter, effective porosity, and permeability coefficient. The enhanced groundwater seepage resulted in enhanced overall surface water leakage in the travertine pool. (4) The transformation of travertine pore structure by *Salix cupularis* roots is depended on the root cleavage. The dissolution of travertine cement by root solution leads travertine to uniform loose accumulation. The results show that the root and algal activities in *Salix cupularis* scrub area mainly control the process of surface water leakage enhancement. This study have basic value for the evolution analysis and conservation of Huanglong travertine natural heritage landscape.

**Keywords:** Huanglong Scenic Spot; *Salix cupularis* shrub; travertine pool; leakage; active porosity; permeability coefficient

黄龙世界自然遗产地,以亚洲独一无二的绝美钙华彩池群景观闻名于世。近些年来,黄龙钙华彩池出现了普遍性且规模缓慢扩大的非震损退化问题,如地表水强渗漏,钙华黑化、沙化等,在高山柳(*Salix cupularis*)灌丛区及周缘带分布较为集中,退化现象降低了钙华景观品质,对自然遗产地核心价值形成了不利影响。高山柳耐寒耐旱,生存能力极强<sup>[1]</sup>,在黄龙景区内分布极广。1992年以前,存在人为清理、牲畜啃食灌丛现象,一定程度上遏制了灌丛的无序扩张;1992年后,景区落实了自然遗产地严格的植被保护措施,景区灌木丛长期以来处于较强烈的扩张状态,对钙华造成破坏并形成“灌丛侵位”,同时在全球变暖的大背景下,高山柳灌丛有进一步扩张趋势<sup>[2]</sup>,这些都导致对钙华的缓慢蚕食及改造仍将持续。因此,亟需开展高山柳灌丛活动、扩展和钙华渗漏特征增强之间关联机制的研究,用以服务科学保护钙华。

黄龙景区部分地段地表水减少进而造成钙华黑化现象,研究者认为起因是地表水渗漏、径流下渗量

增加<sup>[3]</sup>,地表水和地下水分配格局随之变化,地表水域收缩、下游水系变动,引发钙华黑化、沙化等次生问题。地表水流经灌丛林区时下渗较为明显,灌丛植被对钙华渗透性的影响研究未见相关文献,但植被对土壤孔隙结构、渗透性的影响有较多的研究成果可作为参考。土壤孔隙结构对土壤入渗能力起到显著的控制作用,主要指标为土壤容重、有效孔隙度(非毛管孔隙度)、总孔隙度、土壤裂隙等,其中对土壤稳定入渗能力起到极显著提升控制作用的为有效孔隙度<sup>[4–6]</sup>。相关研究中,川西高原典型高山柳灌丛区土壤相对于外围裸地,因植被根系活动出现孔隙度和有效孔隙度上升,地表水源涵养能力很差<sup>[1, 7–8]</sup>。植物根系对土体渗透性增强作用明显<sup>[9–11]</sup>,会形成植物增渗效应<sup>[12]</sup>,根系形成的根孔尤其是大孔隙会显著改善土壤渗透性能<sup>[13]</sup>,大孔隙引导的优势水流使土壤水分快速下渗<sup>[14]</sup>。灌木根劈、灌丛凋落叶片分解及其间微生物活动等会促进大孔隙产生<sup>[8]</sup>,控制了土壤渗透系数的变异<sup>[13]</sup>。

目前,已有黄龙地表水渗漏研究成果普遍为初步

定性分析,且未明确灌丛存在强渗漏现象。高山柳灌丛活动和钙华渗漏增强关联性研究尚未见文献报道。类比土壤入渗研究,本文对钙华渗漏增强的量化评估和影响机制进行了分析探讨,作为灌丛区钙华退化研究的前期探索内容。研究区位于黄龙核心景区上游、映月彩池北部,为核心景区内受高山柳灌丛影响最强烈的彩池群。通过原位入渗试验分析灌丛盖度与彩池渗漏强度的关联,基于微观形貌表征、室内土柱试验等手段分析灌丛区松散钙华孔隙结构和渗透参数变化,综合探究灌丛区钙华地表景观水强渗漏机制。

研究成果可为合理认识植被和钙华空间竞争关系、调控灌丛盖度对钙华进行科学保育提供依据和参考。

## 1 研究区概况

黄龙景区位于四川省阿坝州松潘县黄龙乡,其核心景区内主要非灌丛彩池群为五彩池、争艳池、迎宾彩池,其余均为灌丛区彩池群,规模上以映月彩池为代表。如图1所示,研究区地处黄龙核心景区上游映月彩池北部、黄龙寺北东方向,图中Q1—Q9为主要泉群,B1—B3为非灌丛区彩池入渗试验点。

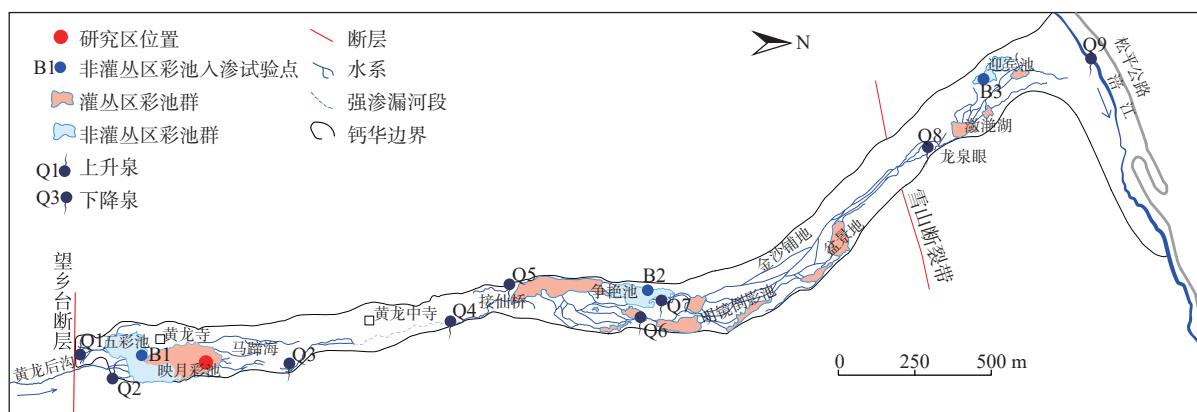


图1 研究区位置图

Fig. 1 Study area location

研究区内彩池群丰水期充水,高山柳灌丛呈斑块状分布,高度普遍为60~150 cm,冠幅直径50~180 cm,灌木盖度普遍为30%左右,边缘地带上升至60%以上,并形成小乔木,高度180~240 cm。映月彩池片区外围区域长期失水,钙华已经完全退化,高山柳覆盖度达100%,高度170~220 cm,冠幅直径90~250 cm,冠层下苔藓、草被连片分布,仅依稀可见残留的边石坝遗迹。2022年受中国区域性高温事件影响,同期水量下降,映月彩池下游马蹄海滩地干涸钙华黑化范围扩大。

映月彩池水源绝大部分来自转花池东侧的黄龙后沟,流量为转花池泉水总量的4~8倍,具备一定的钙华沉积能力,形成了与五彩池规模、形态、颜色差异较大的彩池景观。地表水自南向北径流约380 m,大部分水量通过彩池渗漏进入地下,剩余水量出灌丛区分成东西滩流延伸至马蹄海一带。

映月彩池内渗漏水体转为地下径流,在下游一定距离出露形成二次转化泉<sup>[15]</sup>;泉水流出地表后,进入下游彩池群内,一部分地表水又重新下渗,彩池群前

缘又形成新的二次转化泉;如是往复形成4个循环段,最终所有水体全部排入涪江。自转花池至涪江,钙华层平均厚度18 m,下伏为不透水的、厚度逾20 m的冰水沉积泥砾层,基岩为三叠系砂板岩,此结构控制了黄龙核心景区内地表水和地下水在钙华层内的循环转化(图2)。

## 2 材料和方法

### 2.1 入渗试验布置

灌丛区原位入渗试验彩池共计17处(图3),另在五彩池(B1)、争艳池(B2)、迎宾池(B3)3处非灌丛区彩池进行对照入渗试验(图1),试验采用闭水法。以单个彩池为单元,以彩池最深处为零基准面,放置水尺测量彩池水位历时变化,截断进池水体,当水位下降至边石坝顶面高度时,无池水外溢,试验开始,记录初始彩池水位,间隔1~5 min读取一次水位,至水位下降至距彩池底部不足5 cm时,试验结束。将彩池表层灌丛地面部分全部清除后,形成一个完整的人渗单元,进行入渗试验。试验之前,保持彩池连续充水8 h

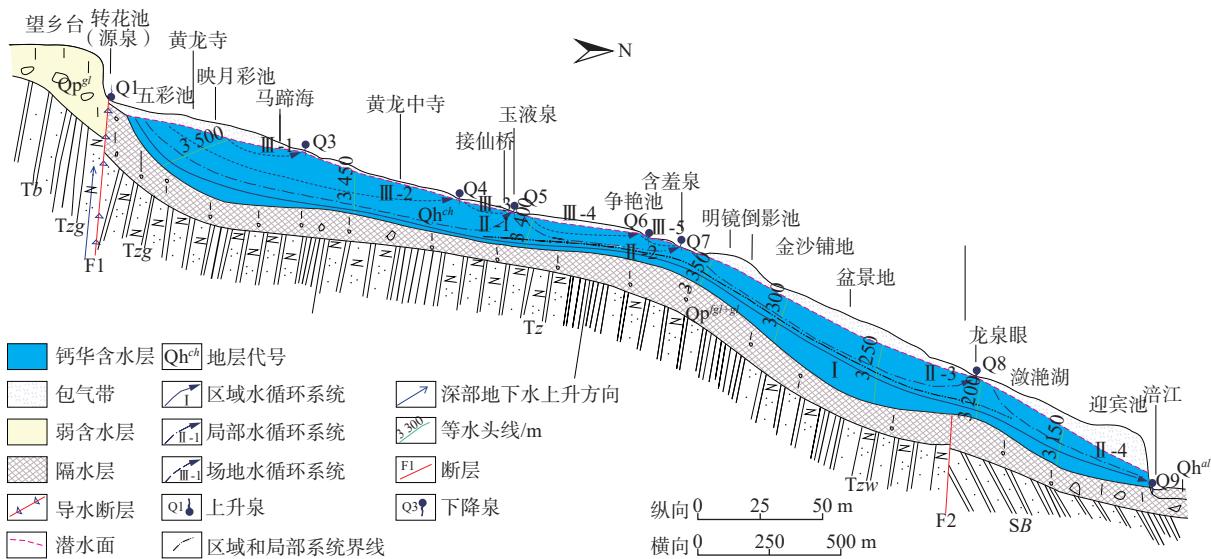


图 2 黄龙景区水循环结构简图

Fig. 2 Water circulation structure of Huanglong Scenic Spot

注:  $Qh^{ch}$ —全新统钙华沉积层,含水;  $Qp^{gl}$ —更新统冰砾砾石层;  $Qp^{gl+gl}$ —更新统冰水沉积、冰砾泥砾层,隔水层;  $Qh^{al}$ —全新统冲积层;  $Tzg$ 、 $Tz$ 、 $Tzw$ 、 $Tb$ —三叠系变质砂岩夹板岩及不等厚互层;  $SB$ —志留系白龙江群变质砂岩夹板岩;  $F1$ —望乡台断层;  $F2$ —雪川断裂带南边界断层。



图 3 研究区清理后高山柳灌丛分布及灌丛区入渗试验彩池分布、采样点位置

Fig. 3 Distribution of *Salix cupularis* shrub in the study area and the location of sampling points

以上,保证彩池底部钙华体处于饱和状态。闭水试验完成时间为 2022 年 6 月。

图 3 为 2022 年高山柳灌丛清理后的无人机航拍照片。在此之前,研究区内高山柳灌丛较密集,彩池边界不清晰,且北部边缘地带钙华池黑化明显(图 4)。

高山柳灌丛垂直投影面占彩池面积百分比为盖度,灌丛分布范围显著控制了土壤孔隙度等指标提升

区的范围,故参考植物盖度分级标准,结合研究区灌丛覆盖状态,将钙华彩池盖度分为 4 级(表 1):无灌木(盖度<10%)、少灌木(盖度 10%~30%)、多灌木(盖度 30%~60%)、全灌木(盖度>60%)。

## 2.2 钙华样品采集和测试

如图 3 所示,采集灌丛区完全松散钙华样品 1 组(G01),N 彩池底部新生未固结松散钙华样品 1 组



图4 研究区清理前高山柳灌丛分布情况

Fig. 4 Distribution of *Salix cupularis* shrub before clearing in the study area

表1 研究区试验彩池按高山柳灌丛盖度分级情况

Table 1 Classification of pools for testing in the study area according to the coverage of *Salix cupularis* shrub

序号	彩池编号	彩池充水情况	盖度分级	彩池面积/m <sup>2</sup>	序号	彩池编号	彩池充水情况	盖度分级	彩池面积/m <sup>2</sup>
1	A	丰水期充水	无灌木	32.3	10	F	丰水期充水	少灌木	29.0
2	I	丰水期充水	无灌木	40.6	11	N	丰水期充水	少灌木	39.4
3	J	丰水期充水	无灌木	13.9	12	B	丰水期充水	多灌木	8.9
4	K	丰水期充水	无灌木	191.6	13	G	丰水期充水	多灌木	16.7
5	L	丰水期充水	无灌木	8.0	14	O	丰水期充水	多灌木	18.3
6	M	丰水期充水	无灌木	36.1	15	H	丰水期充水	全灌木	12.3
7	C	丰水期充水	少灌木	11.2	16	SG-C	干涸黑化	全灌木	22.4
8	D	丰水期充水	少灌木	5.2	17	X	完全退化	全灌木	1.3
9	E	丰水期充水	少灌木	31.1					

(G02), 进行颗粒分析和扫描电镜(SEM)分析; 采集区内天然正常固结钙华样品3组(GS1—GS3)进行SEM分析。前述样品用以分析高山柳灌丛区钙华完全松散后的孔隙结构变化、微观表征等。采集典型的灌丛区松散钙华和正常钙华, 包括钙华砾(Dc1)、钙华砂(Dc2)、正常钙华(Dc3), 进行达西土柱渗流试验, 测定有效孔隙度、渗透系数, 评估灌丛区松散钙华的渗透参数变化, 试验由成都理工大学水文地质实验室完成。达西土柱渗流试验获取垂向渗透系数, 按照均匀介质分析。钙华彩池地表水为垂向渗漏, 外围边石坝为致密低渗区域, 土柱模型可以较好体现这一过程, 试验测量值略大于实际渗透系数, 尺度效应较小。对正常钙华块体样品(Dc3)进行微型CT(Micro-CT)扫描, 分辨率为1/5 μm, 获取孔隙直径数据。

## 2.3 数据分析

### 2.3.1 渗漏强度计算

钙华彩池内水分垂向入渗过程依据土壤水运动格林-安普特(Green-Ampt)模型和达西渗流模型分析<sup>[16]</sup>。定义钙华彩池的渗漏强度( $L_k$ )概念, 表示在彩池满水且不发生外溢的条件下, 单位时间通过单位面积的彩

池下渗水量。 $L_k$ 反映的是地表水通过钙华层垂向稳定入渗的能力, 值越大表明钙华彩池渗漏越强。本文采用闭水试验求解 $L_k$ , 以试验初期(0.5~1 h)的水位下降速率值为试验钙华彩池单元的 $L_k$ , 使用初期水位( $h$ )-时间( $t$ )数据序列进行线性拟合, 其斜率绝对值即为 $L_k$ 数值。

平均渗漏强度( $\bar{L}_k$ )采用加权计算, 如式(1):

$$\bar{L}_k = \sum L_{ki} S_i / \sum S_i \quad (1)$$

式中:  $L_{ki}$ ——第*i*个彩池的渗漏强度/(m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>·m<sup>-2</sup>);

$S_i$ ——第*i*个彩池的单元面积/m<sup>2</sup>。

### 2.3.2 经典统计学分析

$L_k$ 数值的离散程度以变异系数( $C_v$ )表明, 计算公式为:

$$C_v = \frac{S_d}{\bar{L}_k} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $S_d$ ——渗漏强度标准差。

$C_v > 100\%$ 为强变异,  $10\% \leq C_v \leq 100\%$ 为中等变异,  $C_v < 10\%$ 为弱变异<sup>[17]</sup>。

### 2.3.3 钙华孔隙大小分析

孔隙大小对地下水运移的影响较大, 孔喉(孔隙

通道最细小的部分)起到主要控制作用,故分析孔隙大小时用孔喉直径进行比较。本文中孔喉直径和孔隙直径意义相同。

松散钙华堆积物颗粒排列为立方体形式<sup>[18]</sup>,孔隙直径计算公式如式(3):

$$d = 0.414D \quad (3)$$

式中:  $d$ —孔隙直径/mm;

$D$ —钙华颗粒粒径/mm。

在完整钙华上钻取 1 cm 的小岩样,利用 Micro-CT 设备扫描干燥岩样,获得初始孔隙结构下的数字岩心,在此基础上利用 Avizo 软件统计等效孔喉半径,计算获得  $d$ 。

### 3 结果

#### 3.1 高山柳不同盖度条件下钙华彩池渗漏特征

根据 2.1 节对彩池盖度的分级,随着高山柳盖度的增加,  $L_k$  呈现快速增加趋势(图 5)。由表 2,  $\bar{L}_k$  在数值上存在如下关系:全灌木( $\bar{L}_k=7.16 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m}^2)$ )>多灌木( $\bar{L}_k=4.04 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m}^2)$ )>少灌木( $\bar{L}_k=2.40 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m}^2)$ )>无灌木( $\bar{L}_k=1.53 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m}^2)$ )。不同盖度分级之间  $\bar{L}_k$  相对增加幅度为 57%~77%,全灌木彩池  $\bar{L}_k$  是无灌木彩池的 4.7 倍。说明灌木盖度越大,对表层钙华的破坏范围越大,彩池内地表水渗漏也越明显。

盖度增加,  $L_k$  的变异程度也在增强。在无灌木彩池,高山柳对钙华彩池渗漏的影响微弱,  $L_k$  为  $1.47 \sim 1.77 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m}^2)$ ,  $\bar{L}_k$  为  $1.53 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m}^2)$ ,  $L_k$  数值离散程度极小,  $C_v$  仅为 7.4%,为弱变异。在少灌木彩池,灌丛影响开始变得显著,  $L_k$  为  $1.97 \sim 2.96 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m}^2)$ ,  $\bar{L}_k$  为  $2.40 \text{ m}^3/(\text{d}\cdot\text{m}^2)$ ,相对无灌木彩池增加 57%,同时  $C_v$  增强,为 18.7%。在多灌木彩池,  $L_k$  相对少灌木彩池增加 68%,但  $C_v$  未明显增加。在全灌木彩池,  $L_k$  相对增加幅度增大至 77%,  $C_v$  也明显增加至 59.5%。

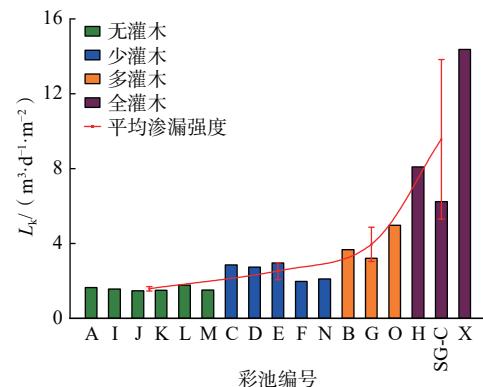


图 5 灌丛区不同盖度钙华彩池渗漏强度的变化

Fig. 5 Variation of leakage intensity of travertine pools with different coverage in shrub area

表 2 灌丛区钙华彩池渗漏强度统计分析

Table 2 Statistical analysis of leakage intensity of travertine pool in shrub area

盖度分级	$L_k$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ )	$\bar{L}_k$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$ )	$S_d$ /%	$C_v$ /%
无灌木	1.47 ~ 1.77	1.53	11.4	7.4
少灌木	1.97 ~ 2.96	2.40	44.9	18.7
多灌木	3.21 ~ 4.97	4.04	91.3	22.6
全灌木	6.24 ~ 14.37	7.16	426.1	59.5
总体			322.0	138.4

#### 3.2 灌丛松散钙华孔隙结构和渗透性参数变化

钙华彩池内因高山柳灌丛的存在,形成差异极大的结构组合,裸露区域保持原有钙华结构,灌丛区则形成松散钙华,其孔隙结构及渗透性参数存在较大差异。

##### 3.2.1 钙华孔隙结构特征变化

天然钙华为钙质胶结的多孔介质,原生孔隙结构主体为颗粒微间隙<sup>[19]</sup>,由钙华颗粒及其混杂物堆积过程形成。研究区内钙华  $d$  普遍小于 0.1 mm(图 6),典型值为  $(0.0246 \pm 0.016) \text{ mm}$ (图 7),具有不均匀性。钙华体内的微小孔隙有一定连通性,为地下水渗透、运移的主要通道,这是钙华天然具备一定渗透能力的结

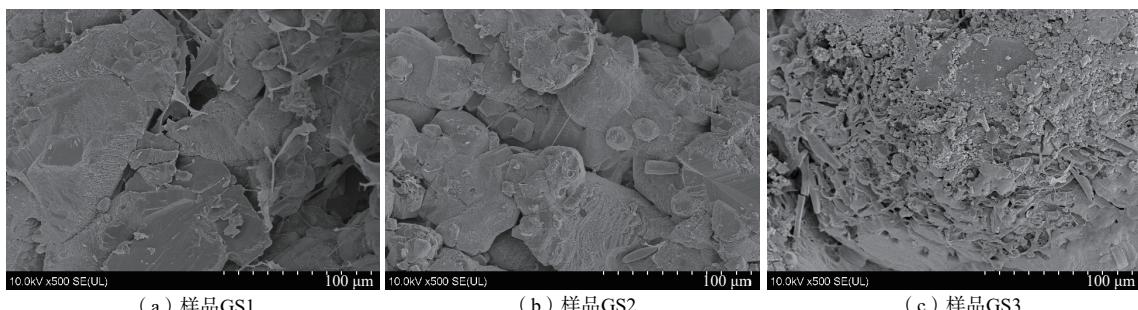


图 6 天然钙华微观孔隙特征

Fig. 6 Microscopic pore characteristics of normal travertine

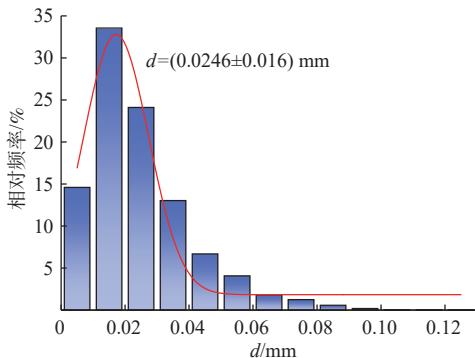


图 7 天然钙华孔隙直径特征 (Dc3)

Fig. 7 Pore diameter characteristics of natural travertine (sample Dc3)

构基础。

完整钙华在高山柳灌丛根系的改造下,整体钙质胶结作用基本消失,孔隙结构发生巨大变化,结构主体变为二次松散后的不规则颗粒(钙质胶结颗粒为主),原颗粒间紧密排列的四面体变为疏松的立方体排列,孔隙度、 $d$ 随之增加。

灌丛区松散钙华呈砾砂、粗砂状(G01, 图 8),可代表高山柳根系破坏钙华的普遍情况。G01 样品中大部分颗粒粒径大于 0.25 mm,并夹有部分细砂、粉粒土,其颗粒特征和彩池底部因重力沉积成因新形成的未固结钙华(G02)一致。颗粒粒径大于 0.25 mm 的水稳定性团聚体质量分数增加,使松散土体稳定入渗速率显著提高<sup>[20]</sup>,灌丛区松散钙华中的此类团聚体占比达

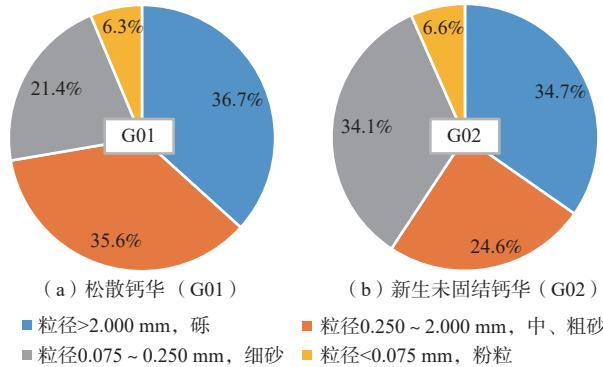


图 8 灌丛全覆盖区颗粒组成特征

Fig. 8 Particle composition characteristics in the full cover of shrubland

70% 以上,是灌丛松散钙华发生相对较强入渗的重要原因之一。

G01 样品在粉粒、砾、砂区颗粒中均发现高山柳灌木根须存在,根劈作用在百微米级至厘米级内都较为明显,在此条件下钙华原生孔隙结构破坏是剧烈且全面的,穿插强烈(图 9),说明松散钙华颗粒堆积形成的新孔隙结构内根系形成的根孔也占据了一部分。松散钙华孔隙结构颗粒间无胶结,呈现疏松的立方体排列,堆积颗粒粒径对孔隙大小起到重要的控制作用。G01 样品中粒径大于 0.075 mm 的颗粒占比超过 90%,计算可得松散体内绝大部分  $d$  大于 0.03 mm(表 3)。

$d$  为 0.30 ~ 0.03 mm 时,重力水较容易通过<sup>[21]</sup>,表征此类钙华结构相对完整的胶结钙华体更容易发生较强

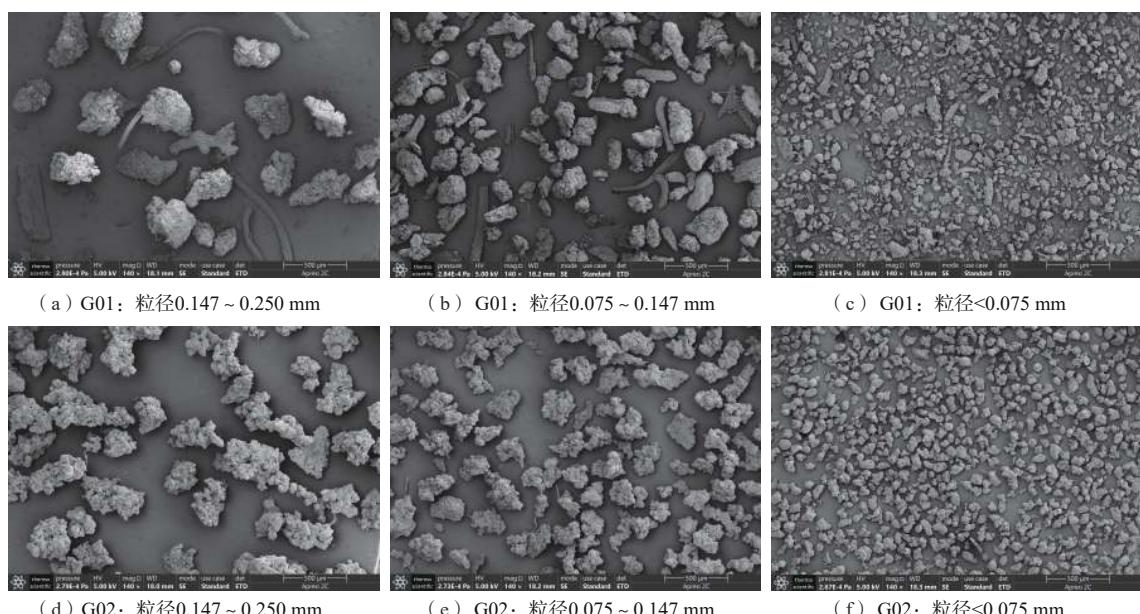


图 9 灌丛区松散钙华颗粒微观表征

Fig. 9 Microscopic characterization of loose travertine particles in shrublands

表 3 松散钙华孔隙直径<sup>①</sup>  
Table 3 Pore diameter of loose travertine

样品编号	位置	类别	钙华颗粒粒径/mm	占比/%	颗粒名称 <sup>②</sup>	$d^3/\text{mm}$
G01	全灌木区 干涸彩池	完全松散钙华	>2.000	36.7	砾	>0.80
			0.250~2.000	35.6	中、粗砂	0.10~0.80
			0.075~0.250	21.4	细砂	0.03~0.10
			<0.075	6.3	粉粒	<0.03
G02	N彩池底部	新生未固结钙华	>2.000	34.7	砾	>0.80
			0.250~2.000	24.6	中、粗砂	0.10~0.80
			0.075~0.250	34.1	细砂	0.03~0.10
			<0.075	6.6	粉粒	<0.03

注:①去除样品中的粗大根系后进行分析;②据《土的工程分类标准》(GB/T 50145—2007)确定;③颗粒排列方式按立方体。

的渗流,引发其上覆地表水体渗漏增强。 $d$  大于 0.30 mm 的大孔隙,重力水可自由通过<sup>[21]</sup>,此类大孔隙由钙华砾、粗砂等颗粒堆积而成, $d$  最大可超过 0.80 mm,起到快速导流作用,进一步强化渗漏。灌丛区钙华松散过程中 $d$  明显增大。本处天然钙华典型 $d$  为(0.0246±0.016) mm,松散化后,颗粒粒径大于 0.25 mm 的松散水稳性钙华占比 70% 以上, $d$  普遍大于 0.10 mm(表 3)。大部分松散钙华 $d$  大于 0.03 mm,其中 $d$  大于 0.80 mm 的大孔隙占比为 36.7%。因此,松散钙华有效孔隙大量增加,据式(4)可知,钙华彩池底部有效渗流断面扩大,钙华透水性变好<sup>[18]</sup>,渗透性增强。

### 3.2.2 钙华渗透参数变化

灌丛区松散钙华代表组成为钙华砾、钙华砂。据图 10,钙华砾、钙华砂相对正常钙华渗透参数均有明显提升,渗透系数增加了 2.5~4.9 倍,有效孔隙度提升了 54%~75%。稳定入渗条件下,稳定渗漏水量与有效孔隙度、地下水实际流速存在如下关系:

$$Q = VA = KIA = n_e u A = u A' \quad (4)$$

$$A' = n_e A \quad (5)$$

式中: $V$ —地下水渗透流速/(m·s<sup>-1</sup>);

$Q$ —稳定渗漏水量/(m<sup>3</sup>·d<sup>-1</sup>);

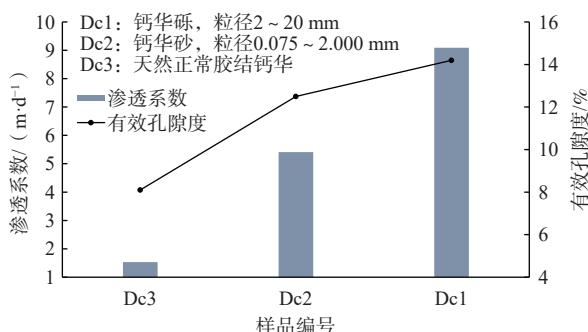


图 10 灌丛区典型松散钙华渗透系数和有效孔隙度关系

Fig. 10 Effective porosity and permeability coefficient of typical loose travertine in the shrub area

$A$ —渗流断面面积/m<sup>2</sup>;

$K$ —渗透系数/(m·d<sup>-1</sup>);

$I$ —水力梯度;

$n_e$ —有效孔隙度/%;

$u$ —地下水实际流速/(m·s<sup>-1</sup>);

$A'$ —有效渗流断面面积/m<sup>2</sup>。

当  $A$  为彩池面积( $S$ )时,  $L_k$  可表示为式(6):

$$L_k = \frac{Q}{S} = V = KI = n_e u \quad (6)$$

$Q$  增加主要是  $n_e$  增加导致  $A'$  扩大或较大孔隙内  $u$  增加。彩池  $L_k$  增加, 主要是  $n_e$  增加或  $u$  增加进而控制  $K$  增加。灌丛松散钙华(Dc1、Dc2) $K$  明显增加, 控制  $Q$  和  $L_k$  增加。

据图 10,  $K$  增加幅度明显高于  $n_e$ , 由(6)式可知,  $u$  也发生了显著提高, 这说明重力水流增强与  $d$  增大有直接联系。以 Dc1 样品(钙华砾)为例,  $K$  增加为正常钙华的 5.9 倍,  $n_e$  为 1.75 倍, 区域潜水面稳定,  $I$  为定值, 则  $u$  变为正常钙华的 3.4 倍。

## 4 讨论

### 4.1 灌丛与非灌丛区钙华渗漏特征

高山柳灌丛生物活动提升了钙华彩池的  $L_k$ 。五彩池、争艳池、迎宾池等处于非灌丛区,未受高山柳灌丛影响,  $L_k$  为 0.56~1.13 m<sup>3</sup>/(d·m<sup>2</sup>), 平均值为 0.79 m<sup>3</sup>/(d·m<sup>2</sup>), 明显低于灌丛区彩池(表 4)。在同等规模水源的涵养下,灌丛区彩池规模普遍小于非灌丛区彩池。争艳池周边及下游高山柳灌丛区彩池群增加(图 1), 地表水入渗量显著增加,地下水径流占比达到一半甚至更高<sup>[15]</sup>,大型彩池群的发育条件变差,各水循环段主要彩池群面积变小。

灌丛区因落叶淋溶作用,氮、磷贡献显著增加<sup>[22]</sup>,可提升水中藻类丰度,生物活动参与钙华沉积过程较

表 4 非灌丛区钙华彩池渗漏强度统计分析

Table 4 Statistical analysis of leakage intensity of travertine pools in the non-shrub area

编号	位置	类型	$S/m^2$	$L_k/(m^3 \cdot d^{-1} \cdot m^{-2})$	$\bar{L}_k/(m^3 \cdot d^{-1} \cdot m^{-2})$
B1	五彩池		8 862	0.56	
B2	争艳池	非灌丛区	8 796	0.87	0.79
B3	迎宾池		4 230	1.13	
无灌木彩池	灌丛区		1.47 ~ 1.77	1.53	

强烈。灌丛区钙华形成过程中会夹杂有丰富的藻类、植物叶片、茎秆残体,残体埋藏分解后,原位形成大量孔隙,孔隙连通性较好。藻类胞外分泌酸性物质对钙华矿物形成侵蚀作用<sup>[23]</sup>,导致钙华形态不均匀并形成较多孔洞,此类原生孔隙、孔洞直径为毫米级至厘米级<sup>[19]</sup>,具备良好的透水性能,提升了地下水的径流条件。与非灌丛区开阔场地平稳流场形成的致密层纹钙华相比,灌丛区钙华容易被微生物改造,渗透性更强。当灌丛区落叶层积聚形成腐殖层时,微生物活动增强<sup>[24]</sup>,对下伏钙华的生物溶蚀增强,钙华孔洞直径增加,相对深部钙华体,10~20 cm以浅土壤容重下降、孔隙度增加趋势更明显<sup>[1]</sup>,成土过程被强化,表层钙华逐渐完全松散化。

#### 4.2 灌丛区彩池地表水强渗漏机制

灌丛区钙华松散解体是在高山柳根系活动的引导下完成的,介质孔隙结构发生强烈变化,渗透性增强,这是高山柳灌丛区钙华彩池地表水强渗漏的核心机制。原生钙华由较细颗粒组成,具备毛细屏障作用<sup>[25]</sup>,转为较粗颗粒的物质后,屏障作用减弱乃至消失。灌丛根系在钙华中生长发育,根尖向周围的钙华体施加轴向压力<sup>[26]</sup>,使钙华形成裂隙、孔洞并扩大,变得疏松<sup>[8]</sup>。高山柳根系有复杂的多层次细微分枝结构<sup>[27]</sup>,厘米级的主根和小于2 mm的高密度细根<sup>[28]</sup>在钙华体内纵横交叉、缠绕、网结,疏松钙华的同时也增强了孔隙间的连通性,控制较小的团聚体随水流下移充塞孔隙,孔隙变大。同时,灌丛区存在大量的微生物活动,钙华初期形成较大孔隙或裂隙后,因本区地处青藏高原东缘的高寒山区,冰劈和冻融作用进一步加剧了钙华松散化。

由式(4)(5)(6)可知,某一钙华彩池内因灌丛活动 $Q$ 、 $L_k$ 增加,核心控制因素为 $n_e$ 增加,有效孔隙中的大孔隙进一步提升 $u$ ,宏观上表征为 $K$ 增加。灌丛区松散钙华呈砾、砂状,相对于正常钙华, $d$ 变大,原正常钙华的微小毛管孔隙大量转变为有效孔隙, $n_e$ 明显升高,导致松散钙华 $A'$ 扩大,有效孔隙内的大孔隙导

致 $u$ 增加, $K$ 整体增加,故而引起地表水入渗增强。钙华体内松散不规则颗粒堆积而成的大孔隙及根系形成的根孔,对钙华体内重力水的快速疏导起到了重要作用。高山柳灌丛对土壤理化性质主要产生影响的层位为60 cm以浅<sup>[29]</sup>,这一层位恰好是灌丛松散钙华所在,因为这一松散强渗层的存在,提升了地面至潜水面之间钙华的平均渗透系数,强化了钙华地表水入渗能力。松散层底部为高山柳的水平根系层,有部分根系穿越松散层钻入下伏较坚硬的钙华结构中,也一定程度扩大了部分孔隙、提升了 $n_e$ 。灌丛改造钙华分为两个阶段,第一阶段为钙华解体松散,第二阶段是在松散介质中根系继续延展,而普通土壤只经历了第二阶段,故对钙华的孔隙结构改造远比普通土壤更为剧烈,其地表水入渗能力提升幅度更大。

一个或多个灌丛侵位点改造钙华结构引起局部地表水渗漏增强,宏观上钙华彩池单元整体表现为 $L_k$ 增加。灌丛盖度越大, $L_k$ 增加趋势越强烈,渗漏强度的变异性也在增强,尤其是盖度大于60%以后尤为明显,应为大孔隙快速引流导致 $u$ 显著增加,即高山柳灌丛根系穿插形成较大根孔。松散钙华内高山柳根系自粉粒土至砾土区间均可见(图9),根系直径自微米级至厘米级均有,复杂的根系为水分快速向深部运移提供了条件。灌丛根系为水分和土体深部渗流提供优势通道,为水分穿透效应<sup>[30~32]</sup>,灌木根系规模越大,这种效应越明显。高山柳为耐旱灌木,其根系可能要延伸到潜水面附近<sup>[33]</sup>,强化了穿透效应。 $L_k$ 变异程度较大的彩池出现了较多的老年期高山柳<sup>[34]</sup>,高度超过2 m(试验彩池X),粗大根系密度较大,能快速导水的大孔隙增加。一般情况下高山柳灌木为增长型种群结构<sup>[34]</sup>,即幼年个体多,老年个体少,而黄龙景区高山柳老年个体占比越来越大,强渗漏趋势也在不断增强。

方解石饱和指数较高的水体渗漏进入下伏钙华层内,因地下水运移缓慢,二氧化碳脱气近乎停滞,方解石饱和指数下降(此类现象在深度较大、流速极为缓慢的钙华彩池地表水体中也有发现,笔者称之为脱气抑制);高山柳密集的根系及微生物呼吸活动产生较多二氧化碳并扩散进入地下水,水体二氧化碳分压增加,pH下降<sup>[29]</sup>,方解石饱和指数进一步下降,令根系附近地下水具备一定侵蚀性,促进了钙华胶结物溶解,加强了钙华介质松散化趋势。据相关研究,高山柳灌丛斑块土壤相对于非灌丛生长地段,土壤pH下降较为明显,土体呈弱酸性至中性<sup>[1]</sup>。黄龙景区内水

体中二氧化碳浓度较高,相对于普通土壤,黄龙灌丛区土壤 pH 下降趋势更为明显。以映月彩池丰水期 9 月水质为例, pH 为 8.3, 温度为 10.3 °C, Ca<sup>2+</sup>质量浓度为 101.6 mg/L, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>质量浓度为 324.2 mg/L, 方解石饱和指数为 1.14, 水体进入钙华层内, 根系附近水溶液 pH 按降至 7.0 估算, 方解石饱和指数下降至 -0.15, 已具备对钙华的溶蚀能力。

综上可知,高山柳根系对钙华的结构改造以根劈作用为基础,溶蚀作用辅以加强,进而控制灌丛区钙华形成松散程度较为均匀的堆积物。

一般情况下,高山柳灌丛对已成型原生钙华的结构改造(根系活动)强于新生钙华(藻类活动等)。新生钙华结构的改善可通过清理灌丛、优化水环境包括降低水中氮磷养分、清理植物残片、降低藻密度等达成。因灌丛根系造成的原生钙华结构损坏,复原保育仍依赖人工介入,手段如下:清理灌丛包括降低灌丛总体密度、清理株高及冠幅较大的高山柳;人工手段诱导形成新生致密低渗钙华复原表层天然钙华结构,如此方能避免灌丛区钙华退化进一步加剧。

## 5 结论和建议

(1)随着盖度增加,形成的强渗漏区范围扩大,导致钙华彩池  $L_k$  整体增加。全灌木彩池(盖度>60%)  $L_k$  为无灌木彩池(盖度<10%)的 4.7 倍,呈现极强的渗漏特征。盖度增加,渗漏强度  $C_v$  亦在增加,尤其是盖度大于 60% 后呈现显著特征,与大孔隙的增加有关。

(2)高山柳灌丛区钙华沉积过程中,因植物残片及藻类活动等生物因素影响,新生钙华孔隙、孔洞较多,  $L_k$  强于非灌丛区钙华彩池。

(3)高山柳灌丛根系活动导致了钙华解体,孔隙结构转变为较松散的立方体排列,  $d$  增大、 $n_e$  增加、 $A'$  扩大、 $u$  增加,  $L_k$  增强从而令钙华彩池地表水入渗增强。灌丛区钙华结构改造演变过程中,以根劈作用为主,根系水溶液溶蚀为重要的补充作用,根系及微生物呼吸活动释放二氧化碳对钙华产生溶蚀,使钙华钙质胶结变弱乃至消失,形成较为均匀的松散颗粒堆积体。

(4)一般情况下,高山柳灌丛对成型原生钙华的影响强于新生钙华,且高山柳生存能力极强,扩张较快,灌丛密集区对钙华景观的正常发育产生了明显不利影响。不同龄级高山柳对地表水渗漏的影响有所不同,后续建议加强灌木群落结构对钙华孔隙结构的影响研究。合理协调灌丛和钙华之间的关系是科学保护钙华遗产需要重点考虑的问题。

## 参考文献 (References) :

- [1] 舒向阳.高寒沙地高山柳灌丛系统碳氮磷化学计量及储量特征 [D].雅安:四川农业大学, 2018. [ SHU Xiangyang. Stoichiometry and storage of C, N and P affected by afforestation with Salix cupularis in an alpine desert ecosystem[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2018. (in Chinese with English abstract) ]
- [2] WANG Yafeng, LIANG Eryuan, LU Xiaoming, et, al. Warming-induced shrubline advance stalled by moisture limitation on the Tibetan Plateau[J]. Ecography, 2021, 44(11): 1631 – 1641.
- [3] 张金流,王海静,董立等.世界遗产——四川黄龙钙华景观退化现象、原因及保护对策分析 [J].地球学报, 2012, 33(1): 111 – 120. [ ZHANG Jinliu, WANG Haijing, DONG Li, et al. An analysis of travertine landscape degradation in Huanglong Ravine of Sichuan, a world's heritage site, and its causes and protection countermeasures[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2012, 33(1): 111 – 120. (in Chinese with English abstract) ]
- [4] 何苗苗,刘芝芹,王克勤,等.滇池流域不同植被覆盖土壤的入渗特征及其影响因素 [J].水土保持学报, 2022, 36(3): 181 – 187. [ HE Miaomiao, LIU Zhiqin, WANG Keqin, et al. Soil infiltration characteristics and influencing factors under different vegetation cover types in Dianchi Lake basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(3): 181 – 187. (in Chinese with English abstract) ]
- [5] 李青林,杨静,王琨,等.不同植被类型人工绿地土壤饱和导水能力、持水特征的比较 [J].土壤通报, 2021, 52(4): 828 – 835. [ LI Qinglin, YANG Jing, WANG Kun, et al. Comparison of saturated water carrying capacity and water holding capacity of artificial green land with different vegetation types[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2021, 52(4): 828 – 835. (in Chinese with English abstract) ]
- [6] 印家旺,阿拉木萨,苏宇航,等.科尔沁沙地不同土地利用类型土壤入渗特征比较研究 [J].水土保持通报, 2022, 42(4): 90 – 98. [ YIN Jiawang, A Lamusa, SU Yuhang, et al. Comparative study on soil infiltration characteristics of different land use types in Horqin Sandy Land[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 90 – 98. (in Chinese with English abstract) ]
- [7] 何露露,庞学勇.川西亚高山 4 种典型灌丛岛土壤持水能力及其影响因素 [J].应用与环境生物学报, 2021, 27(3): 632 – 638. [ He Lulu, PANG Xueyong. Soil water holding capacity of four typical shrub islands and its influencing factors in subalpine western

- [8] 汪璇, 杜树汉, 邓利梅, 等. 土壤不同孔隙度对川西典型植被系统水源涵养的影响 [J]. 中国水土保持科学(中英文), 2023, 21(1): 19–28. [WANG Xuan, DU Shuhan, DENG Limei, et al. Effects of different soil porosity on the water conservation of typical vegetation system in western Sichuan [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2023, 21(1): 19–28. (in Chinese with English abstract) ]
- [9] 王鑫皓, 王云琦, 马超, 等. 根系构型对土壤渗透性能的影响 [J]. 中国水土保持科学, 2018, 16(4): 73–82. [WANG Xinhao, WANG Yunqi, MA Chao, et al. Effect of root architecture on soil permeability [J]. Science of Soil and Water Conservation, 2018, 16(4): 73–82. (in Chinese with English abstract) ]
- [10] JIA Zijian, WENG Baisha, YAN Denghua, et al. The effects of different factors on soil water infiltration properties in High Mountain Asia: A meta-analysis [J]. CATENA, 2024, 234: 107583.
- [11] WANG Peipei, SU Xuemeng, ZHOU Zhengchao, et al. Differential effects of soil texture and root traits on the spatial variability of soil infiltrability under natural revegetation in the Loess Plateau of China [J]. CATENA, 2023, 220(A): 106693.
- [12] 陈敬业, 王钧, 宫清华, 等. 植被增渗效应对花岗岩残积土浅层滑坡的影响机理研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(3): 115–124. [CHEN Jingye, WANG Jun, GONG Qinghua, et al. Influence mechanism of vegetation infiltration effect on shallow landslides of granite residual soil [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(3): 115–124. (in Chinese with English abstract) ]
- [13] 刘目兴, 吴丹, 吴四平, 等. 三峡库区森林土壤大孔隙特征及对饱和导水率的影响 [J]. 生态学报, 2016, 36(11): 3189–3196. [LIU Muxing, WU Dan, WU Siping, et al. Characteristic of soil macropores under various types of forest coverage and their influence on saturated hydraulic conductivity in the Three Gorges Reservoir Area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(11): 3189–3196. (in Chinese with English abstract) ]
- [14] 何常清. 岷江上游两种典型森林群落生态水文特征研究 [D]. 南京: 南京林业大学, 2009. [HE Changqing. The Ecohydrological characteristics of two typical forests in the upper reaches of Minjiang River [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2009. (in Chinese with English abstract) ]
- Sichuan [J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2021, 27(3): 632–638. (in Chinese with English abstract) ]
- [15] 刘馨泽, 孙东, 曹楠, 等. 黄龙核心景区多层次水循环系统结构研究 [J]. 中国岩溶, 2021, 40(1): 19–33. [LIU Xinze, SUN Dong, CAO Nan, et al. Study on the structure of multi-layer water circulation system in the core scenic spot of Huanglong [J]. Carsologica Sinica, 2021, 40(1): 19–33. (in Chinese with English abstract) ]
- [16] MOHAMMADZADEH-HABILI J, HEIDARPOUR M. Application of the Green-Ampt model for infiltration into layered soils [J]. Journal of Hydrology, 2015, 527: 824–832.
- [17] HU Wei, SHAO Mingan, REICHARDT K. Using a new criterion to identify sites for mean soil water storage evaluation [J]. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(3): 762–773.
- [18] 张人权, 梁杏, 荆孟贵, 等. 水文地质学基础 [M]. 6 版. 北京: 地质出版社, 2011. [ZHANG Renquan, LIANG Xing, JIN Menggui, et al. Fundamentals of hydrogeology [M]. 6th ed. Beijing: Geological Publishing House, 2011. (in Chinese) ]
- [19] 代群威, 党政, 彭启轩, 等. 钙华天然海绵地质体多孔特性及其对水循环调节意义——以四川黄龙为例 [J]. 矿物学报, 2019, 39(2): 219–225. [DAI Qunwei, DANG Zheng, PENG Qixuan, et al. Porosity of travertine natural sponge geological bodies and its significance in regulating water circulation: A case study of travertine at Huanglong ravine, Sichuan Province, China [J]. Acta Mineralogica Sinica, 2019, 39(2): 219–225. (in Chinese with English abstract) ]
- [20] 丁康, 徐学选, 陈文媛, 等. 长武塬边坡不同植被下土壤团聚体及入渗特征 [J]. 北京林业大学学报, 2017, 39(12): 44–51. [DING Kang, XU Xuexuan, CHEN Wenyuan, et al. Soil aggregates and infiltration characteristics under different vegetations in Changwu tableland slope of northwestern China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2017, 39(12): 44–51. (in Chinese with English abstract) ]
- [21] 李孝良, 陈效民, 周炼川, 等. 西南喀斯特地区土壤饱和导水率及其影响因素研究 [J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(5): 74–76. [LI Xiaoliang, CHEN Xiaomin, ZHOU Lianchuan, et al. Soil saturated hydraulic conductivity and its influential factors in southwest karst region of China [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(5): 74–76. (in Chinese with English abstract) ]
- [22] 张婷, 代群威, 邓远明, 等. 九寨沟优势植物凋落物叶片淋溶的碳氮磷释放特征 [J]. 中国岩溶, 2021, 40(1): English abstract) ]

- 133 – 139. [ ZHANG Ting, DAI Qunwei, DENG Yuanming, et al. Release characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus from withered leaves of dominant plants in Jiuzhaigou valley[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(1): 133 – 139. (in Chinese with English abstract) ]
- [23] 董发勤, 郑飞, 代群威, 等. 钙华非经典沉积的纳米生长过程与调控机制初探——以九寨沟—黄龙钙华形成为例 [J]. *中国岩溶*, 2021, 40(1): 55 – 67. [ DONG Faqin, ZHENG Fei, DAI Qunwei, et al. Preliminary study on nanometer growth process and regulatory mechanism of travertine nonclassical deposition: A case study of travertine in Jiuzhaigou valley and Huanglong region[J]. *Carsologica Sinica*, 2021, 40(1): 55 – 67. (in Chinese with English abstract) ]
- [24] 刘小龙, 胡健, 周青平, 等. 若尔盖高原典型草地灌丛化对植被特征和土壤养分的影响 [J]. *草地学报*, 2022, 30(4): 901 – 908. [ LIU Xiaolong, HU Jian, ZHOU Qingping, et al. Effects of typical shrub-encroached grassland on vegetation characteristics and soil nutrients in the Zoige Plateau[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022, 30(4): 901 – 908. (in Chinese with English abstract) ]
- [25] 王强民, 赵明, 彭鸿杰, 等. 旱区不同层状结构土壤的水分运移过程与模拟 [J]. *水文地质工程地质*, 2023, 50(4): 84 – 94. [ WANG Qiangmin, ZHAO Ming, PENG Hongjie, et al. Water transport process and simulation of layered soils with different configurations in an arid region[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(4): 84 – 94. (in Chinese with English abstract) ]
- [26] 王力, 邵明安, 王全九. 林地土壤水分运动研究述评 [J]. *林业科学*, 2005, 41(2): 147 – 153. [ WANG Li, SHAO Ming'an, WANG Quanjiu. Review on soil water movement in forestland[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2005, 41(2): 147 – 153. (in Chinese with English abstract) ]
- [27] 谢春华, 关文彬, 张东升, 等. 长江上游暗针叶林生态系统主要树种的根系结构与土体稳定性研究 [J]. *水土保持学报*, 2002, 16(2): 76 – 79. [ XIE Chunhua, GUAN Wenbin, ZHANG Dongsheng, et al. Structure of root system of major trees and stability of soil-body dominated by them in dark coniferous ecosystem in upper reach of Yangtze River[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(2): 76 – 79. (in Chinese with English abstract) ]
- [28] 林代杰, 郑子成, 张锡洲, 等. 不同土地利用方式下土壤入渗特征及其影响因素 [J]. *水土保持学报*, 2010, 24(1): 33 – 36. [ LIN Daijie, ZHENG Zicheng, ZHANG
- Xizhou, et al. Characteristic and influencing factors of soil infiltration of different land use patterns[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, 24(1): 33 – 36. (in Chinese with English abstract) ]
- [29] 谢欢欢. 高山柳(*Salix paraquiescens*)修复对高寒沙化草甸土壤理化性质和植被的影响 [D]. 绵阳: 绵阳师范学院, 2018. [ XIE Huanhuan. Effects of *Salix paraquiescens* restoration on soil properties and vegetation in alpine desertified meadow[D]. Mianyang: Mianyang Teachers' College, 2018. (in Chinese with English abstract) ]
- [30] 董宾芳, 傅瓦利. 土壤优势流的植物根系效应 [J]. *安徽农业科学*, 2006, 34(23): 6249 – 6251. [ DONG Binfang, FU Wali. Effect of the plant root system on preferential flow in soil[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences.*, 2006, 34(23): 6249 – 6251. (in Chinese with English abstract) ]
- [31] 王发, 聂云鹏, 陈洪松, 等. 典型喀斯特白云岩小流域土壤-表层岩溶带厚度空间异质性特征 [J]. *地质科技通报*, 2024, 43(1): 306 – 314. [ WANG Fa, NIE Yunpeng, CHEN Hongsong, et al. Spatial heterogeneity characteristics of soil-epikarst thickness in a typical karst dolomite small watershed[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2024, 43(1): 306 – 314. (in Chinese with English abstract) ]
- [32] 蒲俊兵. 地球关键带与岩溶关键带: 结构、特征、底界 [J]. *地质科技通报*, 2022, 41(5): 230 – 241. [ PU Junbing. Earth's critical zone and karst critical zone: Structure, characteristic and bottom boundary[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2022, 41(5): 230 – 241. (in Chinese with English abstract) ]
- [33] 祝晓松, 裴小龙, 王伟, 等. 山丘区地表基质空间异质性特征及其对植被生态影响 [J/OL]. *地质通报*, (2023-12-19) [2024-03-21]. [ ZHU Xiaosong, PEI Xiaolong, WANG Wei, et al. Spatial heterogeneity characteristics of ground substrate in hilly area and its impact on vegetation ecology[J/OL]. *Geological Bulletin of China*, (2023-12-19) [2024-03-21]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.4648.p.20231218.1514.002.html>. (in Chinese with English abstract) ]
- [34] 徐文兵, 赵敏, 瓦勒塔, 等. 青藏高原东北缘 3 种灌木数量性状、龄级结构及自疏特征 [J]. *草业科学*, 2019, 36(5): 1207 – 1214. [ XU Wenbing, ZHAO Min, WA Leta, et al. Quantitative traits, age structure and self-thinning rule of three shrubs on northeast edge of Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Pratacultural Science*, 2019, 36(5): 1207 – 1214. (in Chinese with English abstract) ]