

## 裂隙岩体非饱和带温度场和湿度场分布特征及其生态学意义

李冉, 周建伟, 苏丹辉, 郑晓明, 陈峰, 张鹏

### Distribution characteristics of temperature field and humidity field in the unsaturated zone of fractured rock mass and their ecological significance

LI Ran, ZHOU Jianwei, SU Danhui, ZHENG Xiaoming, CHEN Feng, and ZHANG Peng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202210034>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 水汽场中气液态水质量比的确定方法

Determination of the ratio of liquid water mass to gaseous water mass in water vapor field

易珍莲, 宁立波, 尹峰, 赵国红 水文地质工程地质. 2019, 46(1): 43-43

#### 含单裂隙非饱和带中轻非水相流体修复的数值模拟

Numerical simulation of light non-aqueous phase liquids remediation in the unsaturated zone with single fractures

赵科锋, 王锦国, 曹慧群 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 43-55

#### 非饱和带二氧化碳入侵对表生植物及土壤的影响

Influence of carbon dioxide invasion in the unsaturated zone on vegetation and soil

潘颖, 赵晓红, 王文科, 邓红章, 韩枫, 罗平平, 杨雨萌, 张徽 水文地质工程地质. 2021, 48(4): 180-189

#### 基于非均质系数的裂隙岩体表征单元体研究

Investigation of the representative elementary volume of fractured rock mass using the homogeneity index

王晓明, 杜玉芳, 梁旭黎 水文地质工程地质. 2021, 48(2): 55-60

#### 膨胀土边坡非饱和渗流及渐进性破坏耦合分析

A coupling analysis of unsaturated seepage and progressive failure of an expansive soil slope

陈亮胜, 韦秉旭, 廖欢, 张寒冰 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 132-140

#### 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



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202210034

李冉, 周建伟, 苏丹辉, 等. 裂隙岩体非饱和带温度场和湿度场分布特征及其生态学意义 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(5): 203-211.

LI Ran, ZHOU Jianwei, SU Danhui, *et al.* Distribution characteristics of temperature field and humidity field in the unsaturated zone of fractured rock mass and their ecological significance[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(5): 203-211.

# 裂隙岩体非饱和带温度场和湿度场分布特征及其生态学意义

李冉<sup>1</sup>, 周建伟<sup>2,3</sup>, 苏丹辉<sup>2</sup>, 郑晓明<sup>2</sup>, 陈峰<sup>2</sup>, 张鹏<sup>2</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)地质调查研究院, 湖北武汉 430074; 2. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北武汉 430074; 3. 自然资源部矿山生态效应与系统修复重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 矿产资源开发及交通设施建设导致大量山体破坏, 形成的高陡岩质边坡引发严重的地质安全隐患及生态功能退化等问题, 高陡岩质边坡的生态修复势在必行。边坡生态修复的重点在于植被的重建, 目前尚存在修复理论缺乏、重建条件不明等诸多难题。为了阐明岩质边坡内温度场和湿度场与边坡植物生长之间的关系, 在山东省章丘市小东山建立试验场, 开展了多期次边坡温度和相对湿度监测试验, 研究了岩质边坡温度场和湿度场的分布特征, 并深入分析了其生态学意义。研究表明: (1) 大气温度造成了各季节监测孔内温度变化的差异性, 冬季裂隙岩体非饱和带内热量从岩体深层传递到岩体表面, 春季、夏季则相反, 岩体内变温带的深度范围是 0~467 cm, 恒温带的深度大于 467 cm; (2) 冬季边坡内的相对湿度随着深度的增加先升高再降低, 春季、夏季边坡内的相对湿度随着深度的增加逐渐升高; (3) 冬季岩体内 20 cm 深度附近会出现水汽饱和带, 夏季在 20~40 cm 深度处开始出现水汽饱和带并往更深处延伸; (4) 岩体内温度和湿度适宜植物生长, 将植物在春季种于 20 cm 深度附近更易于存活。研究结果对于指导岩质边坡生态修复工作具有重要的理论意义与应用价值。

**关键词:** 裂隙岩体; 非饱和带; 水汽场; 温度场; 湿度场; 分带特征; 边坡复绿

中图分类号: TD167; X171.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2023)05-0203-09

## Distribution characteristics of temperature field and humidity field in the unsaturated zone of fractured rock mass and their ecological significance

LI Ran<sup>1</sup>, ZHOU Jianwei<sup>2,3</sup>, SU Danhui<sup>2</sup>, ZHENG Xiaoming<sup>2</sup>, CHEN Feng<sup>2</sup>, ZHANG Peng<sup>2</sup>

(1. Institute of Geological Survey, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China;  
2. School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei 430074, China;  
3. Key Laboratory of Mine Ecological Effects and System Restoration, MNR, Beijing 100081, China)

**Abstract:** Exploitation of mineral resources and construction of traffic facilities have led to the destruction of a large number of mountains, resulting in the formation of high and steep rock slopes, which have caused serious geological safety hazards and ecological function degradation. The ecological restoration of high and steep rock

收稿日期: 2022-10-14; 修订日期: 2022-12-23

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

基金项目: 国家自然科学基金项目(41572344; 41877265; 42077182); 科技部国家重点研发计划项目(2018YFC1801700)

第一作者: 李冉(1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事矿山地质环境保护与生态修复研究。E-mail: [liran2020@cug.edu.cn](mailto:liran2020@cug.edu.cn)

通讯作者: 周建伟(1975-), 男, 博士, 教授, 主要从事矿山地质环境保护与生态修复研究。E-mail: [jw.zhou@cug.edu.cn](mailto:jw.zhou@cug.edu.cn)

slopes is imperative. The key of slope ecological restoration is vegetation reconstruction. At present, there are still many problems such as lack of restoration theory and unclear reconstruction conditions. In order to clarify the relationship between the temperature and humidity fields and the plant growth in the rock slope, this study established a test site near Xiaodongshan in the city of Zhangqiu in Shandong Province. Multi-period monitoring experiments on the temperature and humidity field in the rock slope were carried out, the distribution characteristics of the temperature and humidity field in the rock slope are examined, and their ecological significance is analyzed in detail. The results show that (1) the atmospheric temperature causes the difference of the temperature variation in the monitoring hole in different seasons. In winter, the heat in the unsaturated zone of fractured rock mass is transferred from deep layer to surface layer, but in spring and summer it is opposite, The depth of the variable temperature zone ranges from 0 – 467 cm, and the depth of the constant temperature zone is greater than 467 cm. (2) In winter, the relative humidity in the slope first increases and then decreases with the increasing depth. In spring and summer, the relative humidity in the slope increases gradually with the increasing depth. (3) The water vapor saturated zone appears near the depth of 20 cm in winter, and begins to appear at the depth of 20 – 40 cm in summer and extends deeper. (4) The temperature and humidity in the rock mass are suitable for the growth of plants, and the plants are easier to survive if they are planted near the depth of 20 cm in spring. The results are of has important theoretical significance and application value for guiding the ecological restoration of rock slopes.

**Keywords:** fractured rock mass; unsaturated zone; water vapor field; temperature field; humidity field; zonation characteristics; slope revegetation

中国约 80% 的矿产资源通过露天开采的形式开发, 矿山开采后形成的裸露边坡植被恢复成为生态修复领域的巨大难题<sup>[1]</sup>。在植被修复工作中, 适宜的温度和湿度对植物的存活和生长起着极为重要的作用, 基于此, 许多学者对温度及其与水分的关系进行了大量研究。例如, Mahdavi 等<sup>[2]</sup>、Hedayati-dezfooli 等<sup>[3]</sup>研究了温度梯度对土壤中水分运移的影响; Cary 等<sup>[4]</sup>分析了温度梯度对土壤水分分布的影响; Rose 等<sup>[5]</sup>探究了土壤含水率与温度的变化关系等。相关研究发现, 土壤的初始含水率与温度梯度会对土壤水分运移产生显著影响<sup>[4, 6]</sup>, 土壤含水率随温度变化近似呈正弦曲线波动<sup>[5]</sup>等等。

除此之外, 在土壤深层, 渗透性相对较低, 温度的变化不仅影响孔隙压力的变化, 还会引起水分相态的变化, 此时温度梯度对气态水的迁移作用是不能被忽视的<sup>[7]</sup>。李建东等<sup>[8]</sup>通过室内模型试验发现受水蒸气迁移传热影响的土体, 其升温速率较大; 曹文炳等<sup>[9]</sup>通过对冻土进行温度和水分监测, 提出由温度梯度控制的气态水凝结会影响土体内水分迁移过程; 刘飞飞等<sup>[10]</sup>通过建立数学模型发现水蒸气扩散系数随温度的升高而增大。

对于裂隙岩体, 部分学者通过动态监测<sup>[11]</sup>或建立数学模型研究大气温度<sup>[12]</sup>、渗流速率<sup>[13]</sup>等条件与裂隙

岩体温度场分布的关系。还有许多学者通过数值模拟探究裂隙水流对岩体温度场分布的影响<sup>[14-17]</sup>, 均取得了许多创新性的成果。

然而, 裂隙岩体湿度场研究主要针对石窟侵蚀问题, 对岩壁浅表层凝结水生成规律进行探索。如李燕<sup>[18]</sup>对麦积山石窟凝结水的凝结特征进行研究, 结果表明凝结水主要形成于夏季和秋季, 气候条件是影响凝结水形成的关键因素; 马策等<sup>[19]</sup>基于壁温和岩体含水率监测发现降雨前和降雨期间最容易形成凝结水。目前仅有少部分研究关注到裂隙岩体内凝结水的形成位置<sup>[20]</sup>、日变化和季节变化对凝结水量的影响<sup>[21]</sup>、湿度的季节变化规律<sup>[22]</sup>、水汽运移机制等方面<sup>[23]</sup>。且对于裂隙岩体内温度和湿度分布规律及其与植物生长之间的关系、凝结水生成量等研究较为不足。

本文通过对山东省章丘市小东山矿山高陡岩质边坡的温度和湿度(本研究中湿度指相对湿度)进行监测, 通过对高陡岩质边坡非饱和带内温度场和湿度场的分布特征进行分析, 研究了温度场和湿度场的分带性规律, 阐明了其生态学意义。

## 1 研究区概况

研究区位于山东省济南市章丘南部山区, 属暖温带半湿润大陆性季风气候, 雨热同期, 年平均气温

12.8 °C, 年均降水量 600.8 mm。研究区属丘陵地貌, 地势总体为东南高、西北低, 地面海拔高度为 45 ~ 200 m, 原始地形坡度 15° ~ 35°, 研究区附近大部分河流、湖泊属小清河水系<sup>[24]</sup>。地质构造上属于鲁西隆起区, 断层发育, 普遍为单斜岩层, 地层岩性为奥陶系灰色中厚层白云质灰岩。

研究区试验场地为一由人工采石二十余年形成的高约 20 m 的裸露陡崖(图 1), 坡度大于 80°。场地内主要有 5 组不同产状的裂隙, 平均体裂隙率为 7.3%, 多组节理裂隙形成了较为复杂的裂隙网络, 为水汽迁移及转化提供了充足空间。

## 2 研究方法

### 2.1 温度场和湿度场监测

为了研究裂隙岩体非饱和带水汽场的分布变化规律, 本次试验主要对高 20 m 的陡崖进行温度和相对湿度监测。采用的监测仪器是 Apresys179-UTH 温湿度记录仪, 其温度量程为 -40 ~ 80 °C, 相对湿度量程

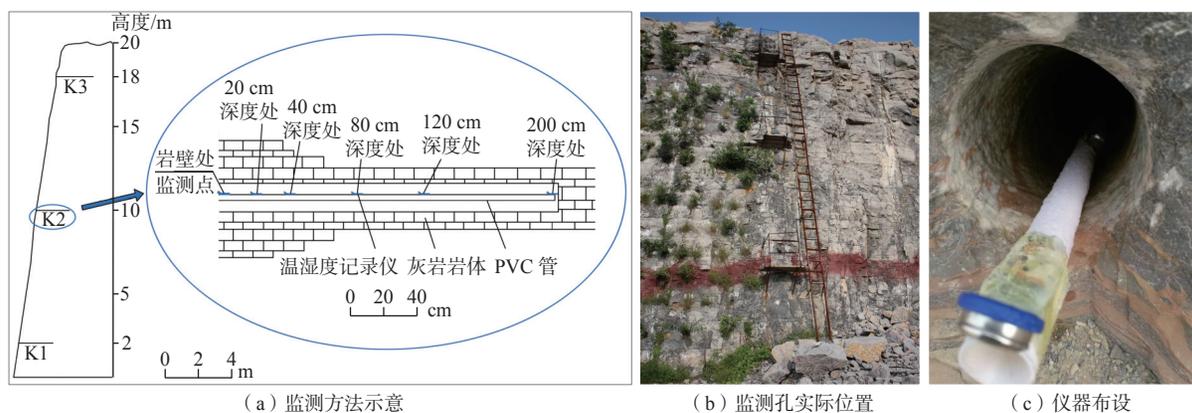


图 1 试验场复绿前

Fig. 1 Status of the test site before green restoration

为 1% ~ 100%, 温度和湿度测量误差分别为  $\pm 0.5$  °C 和  $\pm 5\%$ , 分辨率分为 0.1 °C 和 0.1%。具体监测方法如下:

在同一纵剖面上布设 3 个直径为 10 cm、深度为 200 cm 的监测孔(图 2)。3 个监测孔距离地面的高度分别为 2, 10, 18 m, 编号依次为 K1、K2、K3。在孔口以及距离孔口 20, 40, 80, 120, 200 cm 的深度处放置温湿度记录仪(固定于直径为 2 cm、长度为 2.1 m 的 PVC 管上)。



(a) 监测方法示意

(b) 监测孔实际位置

(c) 仪器布设

图 2 监测孔位置及孔内仪器布设图

Fig. 2 Position of the monitoring hole and the arrangement of instruments in the hole

### 2.2 数据获取与处理

本研究在 2015 年春季采用地境再造技术在试验场开展复绿工作, 而后在冬季(2016 年 1 月 20 日至 2016 年 1 月 26 日)、春季(2016 年 4 月 26 日至 2016 年 5 月 5 日)、夏季(2016 年 7 月 27 日至 2016 年 8 月 2 日)依次开展监测试验, 监测频率为 1 次/min, 监测周期内不间断。将采集后的数据导入 Excel 和 Origin 软件内进行处理, 得到监测周期内不同深度处温度、相对湿度、昼夜温差的均值和相关规律图件。需要说明的是, 由于秋季监测时间与夏季监测时间很接近, 导致监测数据差距较小, 因此未进行分析。

## 3 结果

### 3.1 温度场的分布变化

通过计算冬季、春季、夏季监测孔中不同深度处温度的均值, 获得温度随深度的变化情况(图 3)。由图可知, 在不同季节, 监测孔内温度变化规律存在差异性, 其主要影响因素为大气温度。冬季的大气温度较低, 裂隙岩体非饱和带内监测孔的温度随着深度的增加而升高, 裂隙岩体表面成为热量的耗散面。K1、K2、K3 内温度变化曲线近似平行, 其平均温度梯度分别为 0.039, 0.036, 0.034 °C/cm, 且随着深度的增加, 平均温度梯度稍趋平稳。

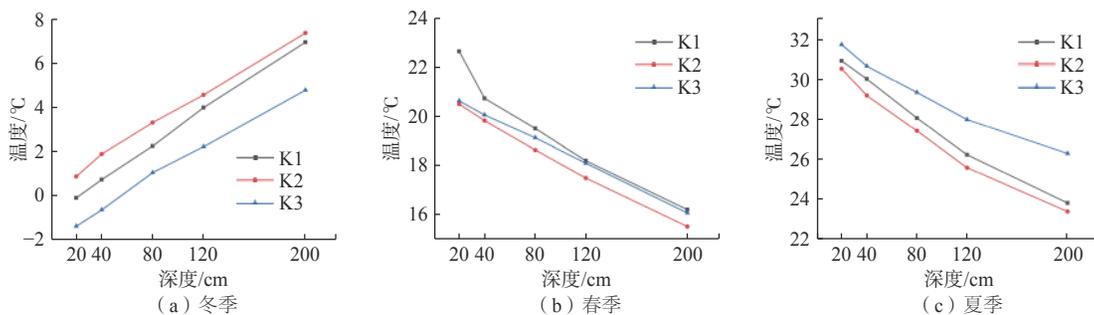


图 3 温度均值随深度变化图

Fig. 3 Variation of mean temperature with depth

春季与夏季监测孔内温度场的空间变化规律大致相同。春夏大气温度升高,超过裂隙岩体非饱和带内的温度,因此,监测孔内的温度随着深度的增加而降低,热量由大气向裂隙岩体内部运移,即大气成为裂隙岩体热量的补给源。同冬季一样,温度梯度随着深度的增加趋于平稳。不同的是,春季 K1、K2、K3 内温度变化曲线在 80 cm 之前相差较大,80 cm 之后逐渐趋于平行,其平均温度梯度分别为 0.036, 0.028, 0.025 °C/cm;夏季 K1 和 K2 内温度变化曲线近似平行,其平均温度梯度相等,为 0.040 °C/cm,而 K3 内温度变化曲线在 80 cm 之前近似平行,80 cm 之后则偏离较大,其平均温度梯度为 0.030 °C/cm。

### 3.2 湿度场的分布变化规律

通过计算冬季、春季、夏季监测孔中不同深度处相对湿度的均值,获得相对湿度随深度的变化情况

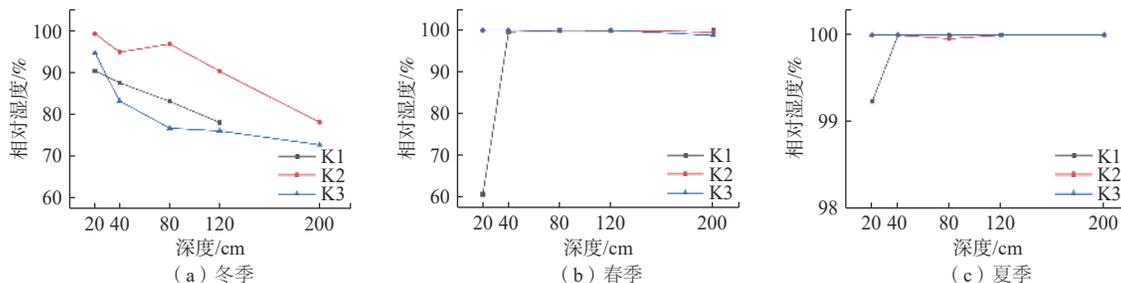


图 4 相对湿度随深度变化图

Fig. 4 Variation of relative humidity with depth

## 4 分析与讨论

### 4.1 温度场的分带特征

根据前人对地下温度变化的研究,常把地壳划分为 4 个地温带:①温度日变化带:该带温度受日气温影响,在气温变化剧烈的地区,温度日变化幅度较大;②温度年变化带:该带温度随季节性的气温变化而变化;③恒温带:该带不受季节性的气温变化影响;④低

(图 4)。由图可知,冬季 3 个监测孔内相对湿度同其他季节相比整体较低。K1 内相对湿度呈线性变化,自 20 ~ 120 cm 深度处持续减小;K2 内的相对湿度在 20 cm 处达到最高值 100%;K3 内的相对湿度变化大致亦呈线性规律,20 ~ 80 cm 深度范围内变化速率较快,湿度迅速降低,80 ~ 200 cm 深度范围内变化速率较慢,湿度缓慢降低。研究区冬季气候寒冷干燥,相对湿度较低,因此从岩石表面到孔深 20 cm 处相对湿度增加。需要说明的是,冬季监测时 K1 监测孔内 200 cm 深度处仪器损坏,造成该处数据缺失。

春季与夏季监测孔内湿度场的空间变化规律大致相同。春夏大气湿度高,K1 内湿度在 20 ~ 40 cm 时迅速升高,随后与 K2、K3 内湿度变化保持一致,其值相对稳定保持在 100% 附近。

温增热带:该带在恒温带以下,因受地球内部热力的影响,地层温度随埋藏深度的增加而升高<sup>[25]</sup>。而岩质边坡内根据温度的变化规律,同样存在温度场的分带性特征,本文经过研究,将其分为 3 个带:①日变温带;②季节变温带;③恒温带。

#### (1) 日变温带

受太阳辐射影响的地表极薄的带叫做变温带,温度效应对岩体的影响主要作用在日变温带<sup>[26]</sup>。根据前

人研究, 恒温带指的是温度基本保持恒定不变(变化范围在 0.1 °C 以内)的层、带<sup>[27]</sup>, 同时, 本次采用的监测仪器的分辨率为 0.1 °C, 因此可将 0.1 °C 作为温度变化的界限值, 变化幅度小于 0.1 °C 时, 可近似视为温度不变。

由表 1 可知, 当深度达到某一孔深时, 昼夜温差小于 0.1 °C, 此时深度继续增加, 温度几乎不再出现日变

化, 将昼夜温差小于 0.1 °C 时的深度作为日变温带的边界, 岩壁表面(0 cm)处到此深度的范围即为日变温带的范围。取冬季、春季、夏季 3 个季节各个高度处监测孔日变温带深度范围的均值作为该季节的日变温带范围, 结合表 1, 冬季日变温带的平均深度范围是 0 ~ 133 cm, 春季日变温带的平均深度范围是 0 ~ 80 cm, 夏季日变温带的平均深度范围是 0 ~ 67 cm。

表 1 昼夜温差统计表

Table 1 Statistics of day-night temperature difference

季节	孔高/m	昼夜温差/°C					
		0 cm	20 cm	40 cm	80 cm	120 cm	200 cm
冬季	2	—	0.62	0.36	0.15	0.11	0.04
	10	4.28	0.24	0.11	0.06	0.06	0.06
	18	—	0.34	0.28	0.12	0.12	0.07
春季	2	—	0.40	0.23	0.05	0.04	0.05
	10	3.30	0.33	0.02	0.04	0.05	0.04
	18	3.32	0.54	0.12	0.04	0.05	0.06
夏季	2	1.01	0.67	0.15	0.05	0.04	0.03
	10	—	0.52	0.01	0.02	0.02	0.01
	18	—	0.75	0.2	0.05	0.02	0.02

注: 表格中“—”表示数据缺失。

(2) 季节变温带与恒温带

当达到岩石裂隙非饱和带的某一深度( $h_1$ )时, 深度继续增加, 虽季节变化但温度不再变化。将深度小于  $h_1$  的范围称为季节变温带, 深度大于  $h_1$  的范围称为恒温带。由前人总结可知, 试验场多年平均温度近似等于恒温带温度<sup>[28-29]</sup>, 由于试验场多年平均温度约为

12.8 °C, 因此恒温带温度为 12.8 °C, 小于或大于 12.8 °C 的深度范围为季节变温带。

由图 5 可知, 春、夏、冬 3 个季节的孔内温度随孔深度增加均呈线性变化, 春、夏二季随着深度的增加, 温度逐渐降低; 冬季随着深度增加, 温度逐渐升高。

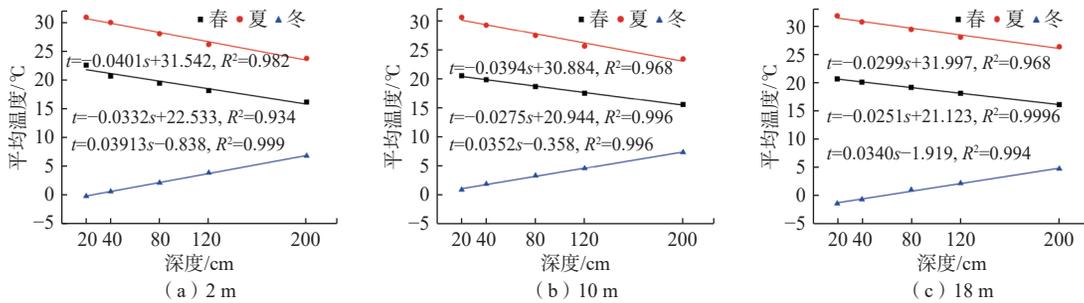


图 5 温度曲线变化方程图

Fig. 5 Equations for the change of the temperature curves

因此将恒温带温度即 12.8 °C 代入各季节不同高度处温度变化曲线方程(图 5), 可得各个季节恒温带边界深度值, 如表 2 所示。由计算数据可知, 冬季、春季、夏季 K3 的数据与 K1、K2 的数据均有较大差距, 这是因为岩壁高 20 m, K3 受外界温度的影响较大, 因此舍弃 K3 的数据。取最大深度作为季节变温带边

界, 冬季季节变温带的深度范围是 0 ~ 353 cm, 春季季节变温带的深度范围是 0 ~ 296 cm, 夏季季节变温带的深度范围是 0 ~ 467 cm。

恒温带温度不随季节变化而变化, 因此取冬季、春季、夏季 3 个季节变温带边界的最大深度作为恒温带的边界深度, 此深度为 467 cm。故变温带的深度范

表 2 季节变温带与恒温带界限值

Table 2 Limited values between the seasonal variable temperature band and the constant temperature band

监测季节	季节变温带与恒温带界限值/cm		
	K1	K2	K3
冬季	349	353	433
春季	293	296	332
夏季	467	459	642

围是 0 ~ 467 cm, 恒温带深度范围是大于 467 cm。

### 4.2 湿度场的分带特征

根据《热力学与分子物理学》的内容, 可把水汽分为 3 种状态, 即欠饱和态、饱和态和过饱和态<sup>[30]</sup>, 当单位时间内从液面蒸发的蒸汽分子数与返回液面凝结的蒸汽分子数相等时即为饱和态, 此时若温度升高或降低, 则蒸汽的蒸发速率会大于或小于凝结速率, 达到欠饱和态或过饱和态。但是由于本次监测仪器相对湿度的量程只有 100%, 即不能监测过饱和状态, 因此, 基于上述理论本研究将湿度场分为三带: 欠饱和带、近饱和带和饱和带。

如表 3 所示, 本文将平均相对湿度小于 95% 时的深度范围定义为欠饱和带, 95% 到小于 100% 之间的深度范围定义为近饱和带, 等于 100% 时的深度范围定义为饱和带。

表 3 湿度场三带划分依据

Table 3 Three-zone classification basis for the humidity field

湿度场三带	欠饱和带	近饱和带	饱和态带
平均相对湿度	<95%	[95%, 100%)	100%

裂隙岩体非饱和带是一个开放系统, 与外界存在水汽交换。水汽运移到某一深度时, 水汽含量达到了该温度下的饱和水汽含量, 即达到了饱和状态, 出现了水汽饱和带。由于春夏二季湿度整体变化规律较为相似, 故下面分析夏冬二季数据, 并做湿度分带性图(图 6)。

由图 6 可知, 夏季外界水汽含量高, 相对湿度大, 随着深度的增加相对湿度也越来越高, 在裂隙岩体内部约 20 ~ 40 cm 处开始出现水汽饱和带并一直延伸到深处。在冬季, 随着深度的不断增大, 相对湿度变化规律是由小变大再变小, 并在 20 cm 处达到峰值 100%。这是因为在岩体深部存在稳定潜水面, 该处温度和水汽含量均较高, 可能在地下水潜水面附近存在一个水汽饱和带。外部冬季寒冷干燥, 温度和相对湿度均较低。因此, 地下水饱和带为热源和水源, 由深

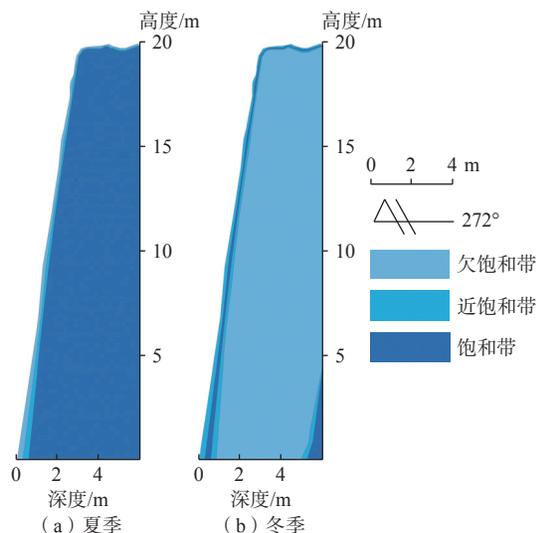


图 6 相对湿度分带性图

Fig. 6 Zonation of relative humidity

部至表面, 温度与水汽含量同时降低, 温度的降低使得饱和水汽含量也降低。距离壁面越近, 温度降幅越大, 当饱和水汽含量下降速度超过实际水汽含量下降速度时, 相对湿度就呈现出变大趋势。因此在某些观测时间段内, 冬季 20 cm 处的相对湿度也会达到 100%, 出现水汽饱和带。

### 4.3 分带的生态学意义

植物根系对生长环境的温度要求较高<sup>[31]</sup>, 根系温度通过影响根系生长进而对植物的生长起到关键作用<sup>[32]</sup>。一般植物根系在 2 ~ 4 °C 时开始有微弱生长, 在 10 ~ 30 °C 范围内随着温度增加生长加快<sup>[33]</sup>, 植物生长的高温阈值随物种不同而有较大差异<sup>[34]</sup>, 一般超过 30 ~ 35 °C 根系生长受到阻碍, 根系易老化<sup>[33]</sup>, 甚至死亡。植物分为直根系植物和须根系植物 2 类<sup>[35]</sup>, 其中须根系植物多为草本植物, 其根系绝大部分分布在岩土体表层 30 cm 以内<sup>[36-37]</sup>, 直根系植物一般为木本类植物, 木本类植物又分为灌木类植物和乔木类植物 2 种。灌木类植物根系多分布在岩土体表面以下 0 ~ 80 cm 内<sup>[32]</sup>, 乔木根系分布深度可达数米甚至十几米, 但一般在 0 ~ 45 cm 岩土层的根系密度最大<sup>[38]</sup>。

在华北地区, 植物的生长主要在春夏二季, 到冬季大部分一年生植物会死亡, 多年生植物会停止或缓慢生长。由图 5 可知, 冬季时, 岩体在 78 cm 深度时的温度可达到 2 °C, 且深度越深温度会越高, 而一般乔木和灌木等多年生植物的根系均生长在此范围内, 因此岩壁的温度场可保证植物在冬季可以实现缓慢生长。在春季和夏季, 随着孔深加大温度逐渐降低, 由

图3可知,岩壁内的温度均在10~35℃范围内,因此春夏季节裂隙岩体内的温度符合植物生长要求且有利于植物的生长。

对于植物生长来说,虽已有研究表明部分植物可以吸收气态水,但仅靠气态水是远远不够的,液态水是植物生长发育的关键。根据《热力学与分子物理学》<sup>[30]</sup>的研究,相对湿度为100%时是气液转化的临界状态;小于100%时,蒸发速率大于凝结速率,液态水转变为气态水;大于100%时,凝结速率大于蒸发速率,气态水转变为液态水,即凝结水形成。因此,在岩壁内部,水汽饱和带内频繁发生水汽转化,形成凝结水,并供给植物生长。在冬季深度20 cm附近存在水汽饱和带,夏季从20 cm至岩体深部均为水汽饱和带,草本植物、乔木、灌木的根系分布均在水汽饱和带附近,所以,岩体内的水汽场可保证岩壁植物的存活。

试验场进行复绿工作后,在无人工管护的情况下植物生长状况良好,已形成较好的遮挡效果(图7)。其生态修复效果亦可从实地印证裂隙岩体内的温度和湿度基本符合植物生长的要求。在进行复绿工作时,季节要尽量选择春季,种植深度要尽量选择20 cm附近,这是因为春夏二季岩体内的温度、湿度有利于植物快速生长,可以保证草本植物从生根发芽到结种过程的顺利完成,促进灌木和乔木迅速扎根到大于2℃(深度大于78 cm)的深度处,以此保证其在冬季也可以达到缓慢生长的状态,从而提高复绿效率。



图7 试验场复绿后

Fig. 7 Status of the test site after green restoration

## 5 结论

(1)冬季孔内的温度随深度的增加而升高,春季、夏季的温度随着深度的增加而降低;冬季的平均相对湿度随着深度的增加先升高再降低,春季、夏季的平均相对湿度随着深度的增加逐渐升高。

(2)冬季、春季、夏季日变温带的岩体深度范围分

别是0~133 cm、0~80 cm、0~67 cm;冬季、春季、夏季季节变温带的岩体深度范围分别是0~353 cm、0~296 cm、0~467 cm;恒温带深度大于467 cm。

(3)本文将湿度场分为欠饱和带(相对湿度<95%)、近饱和带(95%≤相对湿度<100%)和饱和带(相对湿度=100%),冬季岩体20 cm处出现水汽饱和带,夏季岩体20~40 cm处开始出现水汽饱和带。

(4)裂隙岩体内的温度和湿度能够满足植物成活和生长的需求,且种植深度为20 cm时存活率更高。

## 参考文献 (References) :

- [ 1 ] 夏冬,李富平,袁雪涛,等.露天矿岩质边坡生态重建技术研究现状及发展趋势[J].*金属矿山*,2018(1):1-10. [ XIA Dong, LI Fuping, YUAN Xuetao, et al. Research situation of ecological rehabilitation technology in rock open-pit mine and its developing trend[J]. *Metal Mine*, 2018(1): 1 - 10. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 2 ] MAHDAVI S M, NEYSHABOURI M R, FUJIMAKI H. Water vapour transport in a soil column in the presence of an osmotic gradient[J]. *Geoderma*, 2018, 315: 199 - 207.
- [ 3 ] HEDAYATI-DEZFOOLI M, LEONG W H. An experimental study of coupled heat and moisture transfer in soils at high temperature conditions for a medium coarse soil[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 137: 372 - 389.
- [ 4 ] CARY J W. Soil moisture transport due to thermal gradients: Practical aspects[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 30(4): 428 - 433.
- [ 5 ] ROSE C W. Water transport in soil with a daily temperature wave. II. Analysis[J]. *Soil Research*, 1968, 6(1): 45.
- [ 6 ] 孙巍锋,常洲,兰恒星,等.高寒阴湿区边坡浅层土体温湿响应规律研究[J].*水文地质工程地质*,2022,49(5):204-213. [ SUN Weifeng, CHANG Zhou, LAN Hengxing, et al. The response regularity of temperature and humidity of surface soil on slopes in high-cold and humid areas[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(5): 204 - 213. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 7 ] OLIVELLA S, GENS A. Vapour transport in low permeability unsaturated soils with capillary effects[J]. *Transport in Porous Media*, 2000, 40(2): 219 - 241.
- [ 8 ] 李建东,王旭,张延杰,等.水蒸气增湿非饱和黄土热湿迁移规律研究[J].*岩土力学*,2021,42(1):186-192. [ LI Jiandong, WANG Xu, ZHANG Yanjie, et al.

- Study of thermal moisture migration of unsaturated loess with water vapor[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(1): 186 – 192. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 9 ] 曹文炳, 万力, 陈康, 等. 季节冻土对包气带水分迁移的影响 [J]. *水文地质工程地质*, 2014, 41(6): 1 – 5. [ CAO Wenbing, WAN Li, CHEN Kang, et al. Influence of seasonal frozen soil on moisture migration in the aerated zone[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2014, 41(6): 1 – 5. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 10 ] LIU Feifei, MAO Xuesong, ZHANG Jianxun, et al. Isothermal diffusion of water vapor in unsaturated soils based on Fick's second law[J]. *Journal of Central South University*, 2020, 27(7): 2017 – 2031.
- [ 11 ] 袁进科, 裴向军, 程强, 等. 川藏高速公路沿线温度变化规律与斜坡温度场-变形分析 [J]. *公路交通科技*, 2019, 36(10): 33 – 42. [ YUAN Jinke, PEI Xiangjun, CHENG Qiang, et al. Analysis on temperature variation regularity and slope temperature field-deformation along sichuan-tibet expressway[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2019, 36(10): 33 – 42. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 12 ] 李萌. 高温高湿气候下隧道洞口段围岩(衬砌)热湿应力分析 [D]. 北京: 北京交通大学, 2016. [ LI Meng. Thermal-moisture stress analysis of tunnel portal rock in high temperature and humidity[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 13 ] FRANK S, HEINZE T, POLLAK S, et al. Transient heat transfer processes in a single rock fracture at high flow rates[J]. *Geothermics*, 2021, 89: 101989.
- [ 14 ] 高俊义. 裂隙参数对岩体水流-传热温度影响的数值模拟分析 [J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(6): 206 – 211. [ GAO Junyi. Numerical simulation analysis of the influence of fracture parameters on water flow and heat transfer temperature in rock mass[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2019, 30(6): 206 – 211. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 15 ] YAO Chi, SHAO Yulong, YANG Jianhua, et al. Effects of fracture density, roughness, and percolation of fracture network on heat-flow coupling in hot rock masses with embedded three-dimensional fracture network[J]. *Geothermics*, 2020, 87: 101846.
- [ 16 ] 陈金龙, 罗文行, 窦斌, 等. 涿鹿盆地三维多裂隙地质模型地温场数值模拟 [J]. *地质科技通报*, 2021, 40(3): 22 – 33. [ CHEN Jinlong, LUO Wenxing, DOU Bin, et al. Numerical simulation of geothermal field in a three-dimensional multi-fractured geological model of Zhuolu Basin[J]. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 2021, 40(3): 22 – 33. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 17 ] 张延军, 袁学兵, 马跃强, 等. 花岗岩双裂隙热-流耦合参数敏感性 [J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 2022, 52(6): 1971 – 1981. [ ZHANG Yanjun, YUAN Xuebing, MA Yueqiang, et al. Sensitivity of thermal-fluid coupling parameters of granite double fractures[J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 2022, 52(6): 1971 – 1981. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 18 ] 李燕. 麦积山石窟水汽凝结机理及防治措施研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2020. [ LI Yan. Mechanism and control measures of air moisture condensation in Maijishan grottoes[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 19 ] 马策, 蒋小伟, 闫宏彬, 等. 基于红外热成像技术的石窟壁面凝结水形成规律研究 [J]. *水文地质工程地质*, 2022, 49(4): 30 – 36. [ MA Ce, JIANG Xiaowei, YAN Hongbin, et al. A study of the formation pattern of condensation water in grottoes based on the infrared thermal imaging technology[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(4): 30 – 36. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 20 ] 李昂, 王化锋, 宁立波, 等. 边坡裂隙岩体内凝结水形成区域的分布特征 [J]. *地球科学进展*, 2020, 35(2): 189 – 197. [ LI Ang, WANG Huafeng, NING Libo, et al. Distribution characteristics of formed region of condensate in slope fractured rock mass[J]. *Advances in Earth Science*, 2020, 35(2): 189 – 197. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 21 ] 朱睨亭, 黄景春, 宁立波, 等. 裂隙岩体内凝结水时空分布规律——以宜阳锦屏山为例 [J]. *水文地质工程地质*, 2018, 45(4): 1 – 6. [ ZHU Xianting, HUANG Jingchun, NING Libo, et al. Temporal and spatial distribution of condensate water in fractured rock mass: A case study in the Jinping Mountain of Yiyang County[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2018, 45(4): 1 – 6. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 22 ] 余启明, 宁立波, 赵国红, 等. 裂隙岩体水汽场湿度季节变化规律研究 [J]. *水电能源科学*, 2019, 37(12): 91 – 94. [ YU Qiming, NING Libo, ZHAO Guohong, et al. Study of seasonal variation law of water vapor field humidity in fractured rock mass[J]. *Water Resources and Power*, 2019, 37(12): 91 – 94. (in Chinese with English abstract) ]
- [ 23 ] 周建伟, 苏丹辉, 袁磊, 等. 岩质边坡非饱和带水汽运移机制及其生态学意义 [J]. *地质科技通报*, 2020,

- 39(1): 53 – 59. [ ZHOU Jianwei, SU Danhui, YUAN Lei, et al. Water vapor transport mechanism in unsaturated zone of rock slope and its ecological significance[J]. Bulletin of Geological Science and Technology, 2020, 39(1): 53 – 59. (in Chinese with English abstract) ]
- [24] 孔凡彪. 山东章丘黄土沉积中砾石层的砾组结构特征研究 [D]. 济南: 山东师范大学, 2018. [ KONG Fanbiao. Fabric characteristics of gravel layer in the loess of the Zhangqiu, Shandong Province[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2018. (in Chinese with English abstract) ]
- [25] 蒋裕强, 陆廷清. 石油与天然气地质概论 [M]. 北京: 石油工业出版社, 2010. [ JIANG Yuqiang, LU Tingqing. Introduction to petroleum and natural gas geology[M]. Beijing: Petroleum Industry Press, 2010. (in Chinese). ]
- [26] 张国厅. 高寒山区表层岩体的温度效应研究——以四川藏区主要公路为例 [D]. 成都: 成都理工大学, 2017. [ ZHANG Guoting. Study on temperature effect of shallow rock mass in alpine area: A case study of rockfall along Tibet region roads[D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2017. (in Chinese with English abstract) ]
- [27] 王楚骄. 东缘进藏交通廊道地温分布及隧址区地温分析方法 [D]. 成都: 西南交通大学, 2013. [ WANG Chujiao. The distribution of geotemperature field of sichuan-tibet highway & the method to simulate ground temperature of tunnel site[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013. (in Chinese with English abstract) ]
- [28] 孙占学, 张文, 胡宝群, 等. 沁水盆地大地热流与地温场特征 [J]. 地球物理学报, 2006, 49(1): 130 – 134. [ SUN Zhanxue, ZHANG Wen, HU Baoqun, et al. Features of heat flow and the geothermal field of the Qinshui Basin[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(1): 130 – 134. (in Chinese with English abstract) ]
- [29] 刘晓燕, 赵军, 石成, 等. 土壤恒温层温度及深度研究 [J]. 太阳能学报, 2007, 28(5): 494 – 498. [ LIU Xiaoyan, ZHAO Jun, SHI Cheng, et al. Study on soil layer of constant temperature[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2007, 28(5): 494 – 498. (in Chinese with English abstract) ]
- [30] 邹邦银. 热力学与分子物理学 [M]. 武汉: 华中师范大学出版社, 2004. [ ZOU Bangyin. Thermodynamics and molecular physics[M]. Wuhan: Central China Normal University Press, 2004. (in Chinese) ]
- [31] WALKER J M. One-degree increments in soil temperatures affect maize seedling behavior[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1969, 33(5): 729 – 736.
- [32] 吴丹. 不同光照、播量和根系温度对工厂化水稻育秧的影响 [D]. 南京: 南京农业大学, 2015. [ WU Dan. Effect of different light, sowing rate and root temperature on growth and developmeng of rice seedlings[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015. (in Chinese with English abstract) ]
- [33] 刘炜. 秸秆覆盖的土壤温度效应及其影响小麦生长的机理研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007. [ LIU Wei. Effect of straw mulching on soil temperature and mechanism of mulching impact on wheat growth[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2007. (in Chinese with English abstract) ]
- [34] 曲明南. CO<sub>2</sub> 升高和短期高温胁迫对玉米幼苗生理生化指标的影响 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2013. [ QU Mingnan. Effects of elevated CO<sub>2</sub> and short-term heat stress on physiological and biochemical variables in maize seedlings[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2013. (in Chinese with English abstract) ]
- [35] 樊维. 裂隙岩体植物根劈作用机理研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2016. [ FAN Wei. The mechanism study of rock-broken process by root-growth of plant in fractured rock[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016. (in Chinese with English abstract) ]
- [36] MUELLER K E, TILMAN D, FORNARA D A, et al. Root depth distribution and the diversity-productivity relationship in a long-term grassland experiment[J]. *Ecology*, 2013, 94(4): 787 – 793.
- [37] 李慧强. 都江堰市蒲虹路边坡草本植物根系分布及抗拉特性研究 [D]. 雅安: 四川农业大学, 2015. [ LI Huiqiang. Research on the distribution and tensile properties of the root system of the slope herbaceous plant in puhong road, Dujiangyan City[D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2015. (in Chinese with English abstract) ]
- [38] 蔡施泽. 上海常见园林乔木根系分布特征与土壤蓄渗关系研究及应用 [D]. 上海: 上海交通大学, 2017. [ CAI Shize. Relationship between Shanghai common ornamental trees' root distribution and soil infiltration characteristics[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2017. (in Chinese with English abstract) ]