

高寒阴湿区边坡浅层土体温湿响应规律研究

孙巍锋, 常洲, 兰恒星, 晏长根, 杨万里, 徐伟

The response regularity of temperature and humidity of surface soil on slopes in high-cold and humid areas

SUN Weifeng, CHANG Zhou, LAN Hengxing, YAN Changgen, YANG Wanli, and XU Wei

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202109057>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于自组织神经网络的污染场地多监测指标相关性分析

Correlation analysis of multiple monitoring indicators of contaminated site based on self-organizing map

马春龙, 施小清, 许伟伟, 任静华, 王佩, 吴吉春 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 191-202

基于主成分分析法的Q2黄土湿陷特性研究

A study of the collapsibility of Q2 loess based on principal component analysis

王玉涛, 刘小平, 曹晓毅 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 141-148

人工制备结构性软黏土长期变形特性试验研究

An experimental study of the long-term deformation characteristics of artificial structured soft clay

杨爱武, 郑宇轩, 肖敏 水文地质工程地质. 2019, 46(2): 133-133

承德地区天然含锶矿泉水空间分布及特征分析

Distribution and characterization analyses of strontium-bearing mineral spring water in the Chengde region

朱雪芹, 刘文波, 李志明, 陈坦, 任玉祥, 邵海, 王龙凤 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 65-73

上硬下软反倾边坡开挖变形响应的物理模拟

Physical simulation of the excavation deformation response of counter-tilt slope with rigid layers on the soft

郑达, 毛峰, 王沁沅, 苏杭, 李文龙 水文地质工程地质. 2019, 46(5): 89-95

黄河三角洲浅层地下水埋深动态与降水的时空响应关系

An analysis of the space-time patterns of precipitation-shallow groundwater depth interactions in the Yellow River Delta

张晨晨, 黄, 何云, 刘庆生, 李贺, 吴春生, 刘高焕 水文地质工程地质. 2020, 47(5): 21-30



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202109057

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.

高寒阴湿区边坡浅层土体温湿响应规律研究

孙巍锋^{1,2}, 常洲², 兰恒星^{1,3}, 晏长根², 杨万里⁴, 徐伟⁵

- (1. 长安大学地质工程与测绘学院, 陕西西安 710054; 2. 长安大学公路学院, 陕西西安 710064;
3. 中国科学院地理科学与资源研究所/资源与环境信息系统国家重点实验室, 北京 100101;
4. 甘肃路桥公路投资有限公司, 甘肃兰州 730030;
5. 甘肃公航旅定临高速公路管理有限公司, 甘肃定西 744300)

摘要: 基于长期原位监测对高寒阴湿区边坡土体温湿响应规律研究存在的不足, 选取甘肃双达高速公路沿线土-岩二元结构边坡为研究对象, 构建远程监测系统对边坡浅层土体温度及大气降雨开展了为期 2 年多的现场监测, 结合傅里叶模型与 Pearson 相关性分析方法, 揭示了边坡土体水热迁移及降雨入渗规律, 分析了边坡土体温湿度相互作用效应。研究结果表明: (1) 边坡浅层土体温湿度随时间呈简谐式周期变化, 且变化幅度随埋深逐渐减小, 2 m 深度处土体月平均温度变化具有一定滞后性, 滞后时间约为 30 d。(2) 年内 3 月与 9 月, 土体月平均温度曲线出现“纽结”现象, 使边坡呈现出由春夏季表热而内凉向秋冬季表寒而内温转变的趋势。(3) 春季降雨期, 土体含水率增长仅发生在 50 cm 深度以内; 夏季降雨期, 降雨引起更深层土体含水率变化, 因雨水持续性补充, 浅层土体湿度长时间保持在 35% 以上。(4) 土体温湿度存在较高的正相关关系, 随土体埋深增加温湿度相关性增强, 不同时期温湿度相互影响程度不同, 年内温湿度相关性表现出“循环圈”效应。研究成果可为进一步认识边坡土体水文响应规律、水-热相关性与坡面侵蚀机理提供一定参考。

关键词: 高寒阴湿区; 浅层土体; 长期监测; 温湿响应; 相关性分析

中图分类号: P642.11

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)05-0204-10

The response regularity of temperature and humidity of surface soil on slopes in high-cold and humid areas

SUN Weifeng^{1,2}, CHANG Zhou², LAN Hengxing^{1,3}, YAN Changgen², YANG Wanli⁴, XU Wei⁵

- (1. School of Geological Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China;
2. School of Highway, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710064, China; 3. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4. Gansu Luqiao Highway Investment Group Co. Ltd., Lanzhou, Gansu 730030, China; 5. Gansu Gonghanglyu Dinglin Expressway Management Co. Ltd., Dingxi, Gansu 744300, China)

Abstract: Previous studies on the temperature and humidity of slopes in cold and humid areas based on long-term

收稿日期: 2021-09-28; 修订日期: 2021-11-17

投稿网址: www.swdgcgz.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(42077265; 42041006; 41790443); 甘肃省交通运输厅科技项目(2021-19); 中央高校基本科研业务费(300102262901)

第一作者: 孙巍锋(1989-), 男, 博士, 讲师, 主要从事岩土工程研究工作。E-mail: sung_boy@yeah.net

通讯作者: 晏长根(1975-), 男, 博士, 教授, 主要从事岩土工程研究工作。E-mail: yanchanggen@163.com

in-situ monitoring are insufficient. Therefore, a soil-rock slope along the Shuangda Expressway in Gansu Province is selected as the research object, and the humidity and temperature of shallow soil and rainfall are monitored for more than two years based on the constructed remote monitoring system. Combination of the Fourier model and Pearson correlation analysis, the soil moisture-heat migration at different depths and rainfall infiltration law are explored, and the interaction relationship between temperature and humidity is analyzed. The results show that the temperature and humidity of shallow soil change periodically in a harmonic way, and the variation range decreases gradually with the depth. In March and September, the temperature curves of each soil layer showed a 'knot' phenomenon, which impels the slope to change from one condition characterized by hot outside and cold inside in spring and summer to another condition characterized by cold outside and warm inside in autumn and winter. The change in mean monthly temperature of soil at a depth of 2 m has a certain lag, and the lag time is about 30 days. The depth of rainfall infiltration can occur only within the depth of 50 cm in spring, while the rainfall can infiltrate into deeper soil in summer, and the moisture content of soil stays above 35% because of sustained replenishment by rain. Soil temperature and humidity have a highly positive correlation, the correlation increases with soil depth and the correlation in different periods shows a "circulating ring" effect. The research results may provide some reference for further understanding the eco-hydrological response of soil, the water-heat correlation and the mechanism of surface erosion in terms of slope.

Keywords: cold and humid areas; shallow soil; long-term monitoring; temperature & humidity; correlation analysis

随着我国交通基础工程建设逐渐向地形地貌复杂的山区沿伸, 不可避免的出现了大量高陡边坡^[1-2]。天然状态下, 边坡浅层土体大多处于非饱和状态, 在气温、日照、降雨、蒸发等因素持续作用下, 边坡应力场、位移场发生改变, 从而影响到边坡浅层土体稳定状态^[2-3], 广泛的土体侵蚀及剥落病害已逐渐成为威胁山区公路及铁路正常运营的巨大隐患^[4-5]。因此, 研究土体中的水-热耦合关系对我国中西部地区边坡稳定性具有重要意义。

近年来, 关于水-热效应对土体性质的影响在国内外受到了广泛关注^[6-8], 相关学者针对土体温度场与水分场变化进行了一系列室内外试验与理论分析。马稚桐等^[9]基于长期原位监测, 研究了风沙滩地区水热迁移规律, 认为土中水分运动受到水头梯度和温度梯度的共同影响; Taylor 等^[10]、杨梅学等^[11]、赵逸舟等^[12]通过高山地区的原位观测, 对冻土地区土体水分迁移规律进行了深入分析, 并对比了冻结期与融化期土体水分运移特征; 马剑等^[13]、李静等^[14]、车宗玺等^[15]以祁连山云杉林为研究对象, 通过现场监测以探讨青海云杉林土体水热的变化特征及土体水热间的相互作用机制, 认为土体温度与海拔之间存在负相关关系, 而土体平均湿度与海拔高度关系可用二项式表示。随着科技水平的提高, 高新技术也逐渐成为研究

土体温湿互作效应的有利助手, Jodry 等^[16]根据嵌入式电极装置的二维直流电阻率成像监测方法, 对不同季节河堤温湿度变化规律进行分析, 验证了采用永久电极对温湿度进行监测的可行性。Lacava 等^[17]、Wagner 等^[18]利用卫星技术对土体温湿度进行评估, 并通过与现场监测进行对比从而验证了卫星传感器的可靠性。此外, 陈棠茵等^[19]、李彦龙等^[20]、蔡国庆等^[21]及王铁行等^[22-23]对温度影响下的土体水热迁移进行了室内试验与理论分析, 为进一步正确认识非饱和土中水-热耦合效应奠定了基础。

上述研究虽然对土体水-热过程有了一定的认识, 但鲜有关于原位边坡土体温湿度长时间序列的水-热研究工作的相关报道, 反映出对原位边坡温湿度变化规律的认识仍然存在不足。高寒阴湿区广泛分布于我国甘肃中西部地区, 具有海拔高、气候阴冷、昼夜温差大、降水丰富且集中等特点, 在阴湿区进行工程建设时由于水文地质情况恶劣, 在冷热交替与干湿循环作用下, 边坡表面频繁出现剥落、侵蚀病害, 不仅破坏了坡面生态美观, 也严重威胁着山区道路的安全运营。可见, 以高寒阴湿地区工程边坡为研究对象, 开展长期的土体水热研究工作具有重要的理论与现实意义。

鉴于此, 以甘肃双城至达里加高速公路(双达高

速)沿线的土-岩二元结构边坡为研究对象,通过无线远程监测技术实时获取了 2 年多的边坡浅层土体温湿度变化数据,揭示了甘肃高寒阴湿区边坡浅层土体长期温湿度迁移规律,并分析了边坡浅层土体温湿度的相互响应效应。研究结果有利于了解我国高寒阴湿地区边坡土体的水文响应规律与水-热相互作用关系,加深对坡面侵蚀和浅层失稳机制的认识,并为合理的坡面生态修复和边坡浅层防护提供切实试验依据。

1 研究区概况

临夏双达高速穿越温带半湿润区与高寒阴湿区过渡带,海拔 2 060 ~ 2 950 m,年平均气温 6.6 °C,最低气温 -12.5 °C,最高气温 28.3 °C,年平均降雨量为 630.6 mm,相对湿度 68.2%,年蒸发量约 540 mm,全年 57% 的降雨集中在 7—9 月份,为冬春干燥、夏秋湿润、全年气候阴冷的典型高寒阴湿地区。

研究区穿越侵蚀堆积河谷地貌与侵蚀洪积残梁地貌,形成了多处高陡的土-岩二元边坡,边坡上覆土层厚度范围为 2 ~ 4 m,根据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)对土体基本物理力学性质进行测试,结果显示:土体比重 2.72,平均密度 1.84 g/cm³,液限 29.8%,塑限 18.7%,塑性指数 11.1,平均渗透系数 1.2×10⁻⁵ cm/s。采用 Bettersize 2000 激光粒度分布仪对土样颗粒级配进行测试,结果如图 1 所示,土体所属类别为低液限粉土。受阴湿区气候影响,上覆土体湿度主要受大气降雨影响,边坡开挖过程中,未发现地下水与裂隙水。

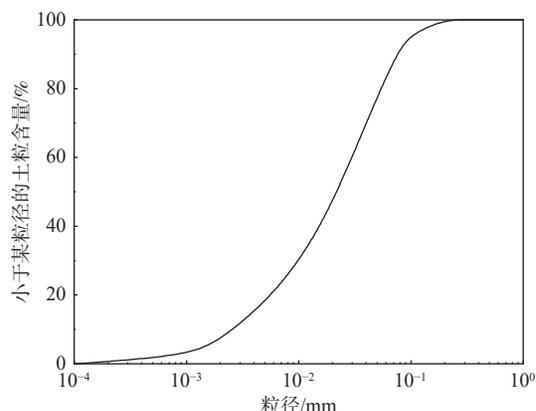


图 1 边坡上覆土体级配曲线
Fig. 1 Gradation curve of overlying soil

2 监测方案

选取研究区某二元边坡坡顶第 5 级边坡断面,布

置监测点对日降雨量与温湿度变化进行实时监测,边坡温湿监测系统(图 2)主体由现场硬件和在线软件组成,包括参数感应层、采集传输层、供电层、防护层与数据管理层。温湿度和大气降雨监测采用温湿度计(型号 YTDY0100)与翻斗式雨量计(精度 0.2 mm),监测数据通过采集传输模块以 GPRS 形式远程传输至在线软件(云平台 and APP),并可进行监测数据的实时查看、下载和处理。

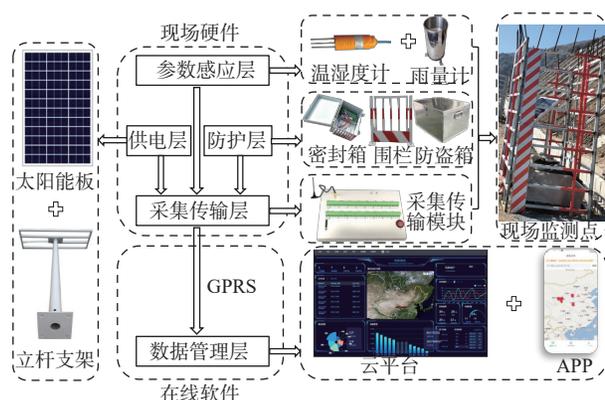


图 2 边坡土体温湿度监测系统组成图
Fig. 2 Soil temperature and humidity monitoring system

图 3 为监测边坡剖面结构形式与温湿度计布置情况,由坡面垂直向内 0.2, 0.5, 1.25, 2 m 深度处理置温湿度计,共布置温湿度计 3 排(1、2、3 号监测点),分别位于坡顶、坡中、坡底,同排温湿度计横向间隔 0.15 m,其中温度、湿度分别用 *T*(temperature)、*H*(humidity)表示,在边坡坡顶布置雨量计用以监测大气降雨,温湿度计每小时采集 1 次数据,雨量计当有降雨发生时会自动记录降雨量,所有监测传感器接入现场远程传输模块进行自动采集与远程传输。温湿度监测起止时间为 2017 年 11 月 27 日—2020 年 5 月 26 日,其中土体湿度监测点 H1-1 因设备故障造成部分监测数据丢失,其他监测点数据采集正常。

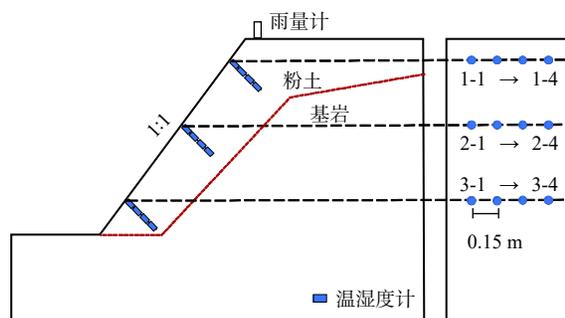


图 3 边坡监测断面示意图
Fig. 3 Slope monitoring section

3 结果

3.1 边坡表层土体温湿度变化

3.1.1 年温湿度变化

监测期间边坡表层土体温湿度随时间变化曲线如图 4 所示, 边坡剖面各测点温湿度最大值、最小值与平均温湿度以及标准差值见表 1。边坡土体温湿度变化大体呈现简谐式周期性变化, 边坡温湿度最大值、最小值均位于边坡 0.2 m 深度处, 温度最大值、最小值分别为 23.5 °C(2019 年 8 月 17 日)与 -3.1 °C(2018 年 2 月 11 日), 其中在每年 1 月末至 2 月下旬, 0.2 m 深度处土体会出现零下温度, 土体内部水分冻结, 土体湿度显著下降; 湿度最小值为坡中 0.2 m 深度处的 18.06%(2018 年 2 月 11 日), 年内 6—9 月为研究区降雨集中期, 边坡土体含水率迅速增大, 土体体积含水

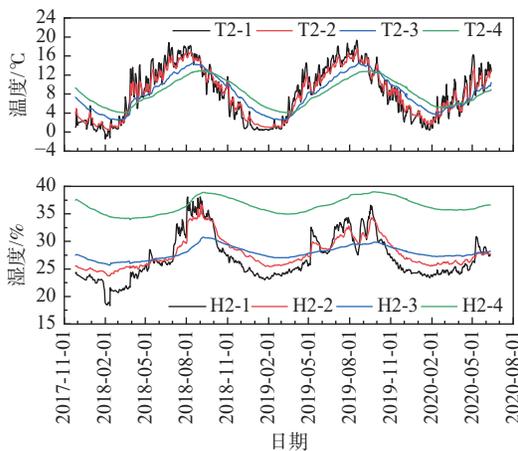


图 4 土体温湿度历时曲线

Fig. 4 Soil temperature and humidity duration curve

表 1 监测时段内边坡温湿度情况

Table 1 Slope temperature and humidity conditions during the monitoring period

| 监测点 | 温度/°C | | | 湿度/% | | |
|-----|-------------|------|------|-------------|-------|-------|
| | 平均值±标准差 | 最小值 | 最大值 | 平均值±标准差 | 最小值 | 最大值 |
| 1-1 | 10.31±6.030 | -2.6 | 23.5 | - | - | - |
| 2-1 | 8.74±5.715 | -3.1 | 22.5 | 27.37±3.968 | 18.06 | 39.50 |
| 3-1 | 10.32±5.677 | 0.1 | 21.0 | 27.11±1.723 | 23.31 | 35.62 |
| 1-2 | 10.04±5.098 | 0.7 | 18.5 | 26.89±1.487 | 23.94 | 31.06 |
| 2-2 | 8.52±4.859 | 0.5 | 18.0 | 28.15±2.762 | 23.69 | 37.44 |
| 3-2 | 10.08±4.925 | 1.2 | 18.1 | 28.70±1.284 | 25.56 | 32.12 |
| 1-3 | 9.39±3.891 | 2.2 | 15.1 | 29.07±2.085 | 26.87 | 39.44 |
| 2-3 | 8.43±3.585 | 2.5 | 14.7 | 28.04±1.157 | 25.69 | 30.81 |
| 3-3 | 9.17±3.581 | 2.5 | 14.8 | 29.89±1.272 | 27.06 | 33.25 |
| 1-4 | 8.91±3.004 | 3.3 | 13.6 | 32.50±1.022 | 30.87 | 34.56 |
| 2-4 | 8.46±2.745 | 4.0 | 13.1 | 36.55±1.408 | 34.12 | 39.06 |
| 3-4 | 8.73±2.619 | 3.6 | 13.0 | 34.48±1.067 | 32.25 | 37.50 |

率最大值为坡顶 0.2 m 深度处监测点的 39.5%(2018 年 9 月 1 日)。

边坡土体温湿度变化幅度随埋深增大逐渐减小, 以 2 号监测点为例, 在监测时段内, T2-1 至 T2-4 各点深度处土体全年变化范围分别为 -3.1 ~ 23.1 °C、0.5 ~ 18 °C、2.5 ~ 14.7 °C、4 ~ 12.5 °C, 温度变化幅度分别为 26.2, 17.5, 12.2, 8.5 °C, 各点温度下界随埋深增大而逐渐增大, 而温度上界随埋深增大而逐渐减小。H2-1 至 H2-4 监测点土体变化范围分别为 18.06% ~ 39.5%、23.69% ~ 37.44%、25.69% ~ 30.81%、34.12% ~ 39.06%, 变化幅度分别为 21.44%、13.75%、5.12%、4.94%。

3.1.2 月温湿度变化

图 5 为 2019 年内 2 号监测点各深度土体月平均温度变化曲线, 边坡土体月温度均值呈现出简谐波型周期变化, 2—8 月为浅层土体温度上升期, 温度上升速率较快, 0.2, 0.5 m 深度处土体月平均温度最大值均出现在 8 月, 分别为 16.4, 15.7 °C; 年内 8 月至次年 1 月为温度下降期, 月平均温度最小值分别为 0.6, 1.3 °C。对于较深部土体, 年内 3—9 月为温度上升期, 1.25, 2 m 深度处土体月平均温度最大值位于 9 月, 分别为 13.5, 12.7 °C; 9 月至次年 3 月为温度下降期, 月平均温度最小值分别为 2.8, 4.1 °C。对比不同深度土层月平均温度变化曲线可以发现, 每年 3 月与 9 月土体月平均温度曲线出现“纽结”现象, 3 月上旬至 9 月中旬, 各测点温度表现为 T2-1>T2-2>T2-3>T2-4, 而在 9 月下旬至次年 3 月上旬, 各测点温度表现为 T2-4>T2-3>T2-2>T2-1。

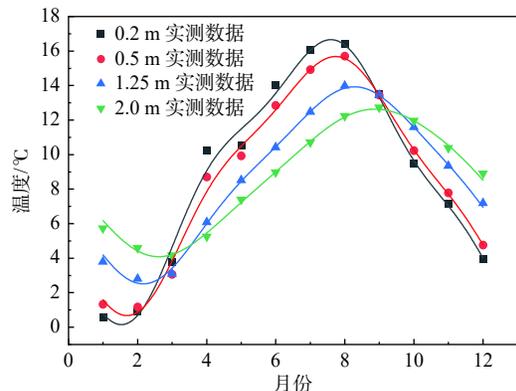


图 5 边坡月平均土体温度曲线

Fig. 5 Monthly average soil temperature curve of slope

注: 图中实线为傅里叶模型拟合曲线。

图 6 为 2019 年 2 号监测点不同深度月平均湿度变化曲线, 自 5 月开始, 研究区降雨量逐渐增加, 而 10 月之后, 降雨量逐渐降低, 在 5 月与 10 月湿度曲线

同样出现了“纽结”现象,表现为 5—10 月之间 0~0.5 m 深度处土体含水率超越 1.25 m 深度处土体含水率;而各土层土体月平均湿度均小于 2 m 深度处土体平均湿度,在 2 m 深度处并未出现类似“纽结”现象。

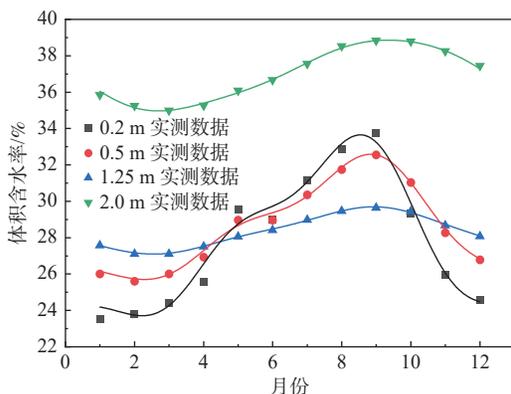


图 6 边坡月平均土体湿度曲线
Fig. 6 Monthly average soil moisture curve of slope
注:图中实线为傅里叶模型拟合曲线。

3.1.3 浅层土体湿度变化规律

基于边坡浅层土体实测温湿度响应规律,构建傅里叶级数模型,利用月平均温湿度值来表述阴湿区边坡浅层土体温湿度变化规律,计算公式见式(1)。

$$H(t) = H_a + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ A_n \cos \left[\frac{2n\pi}{P} (t - t_0) \right] + B_n \sin \left[\frac{2n\pi}{P} (t - t_0) \right] \right\}$$

$$T(t) = T_a + \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ A_n \cos \left[\frac{2n\pi}{P} (t - t_0) \right] + B_n \sin \left[\frac{2n\pi}{P} (t - t_0) \right] \right\} \quad (1)$$

式中: H ——土体湿度/%;

T ——土体温度/°C;

H_a ——各深度土体年平均湿度/%;

T_a ——各深度土体年平均温度/°C;

t ——月份;

t_0 ——最高体积含水率月份;

n ——变幅序号,取 1, 2, 3, ...;

A_n 、 B_n ——傅里叶级数变幅系数,可分别由式(2)

(3)计算;

P ——土体温湿度变化周期,取 12。

$$A_n = \frac{2}{P} \int_0^P H_a(t) \cos \left[\frac{2n\pi}{P} (t - t_0) \right] dt \quad (2)$$

$$B_n = \frac{2}{P} \int_0^P H_a(t) \sin \left[\frac{2n\pi}{P} (t - t_0) \right] dt \quad (3)$$

根据傅里叶模型,对边坡不同深度处(0.2, 0.5, 1.25, 2 m)土体湿度月均值进行拟合,拟合结果分别见图 5、图 6,当 n 为 3 时,模型拟合结果已趋于良好。

3.2 降雨对边坡湿度的影响

3.2.1 干湿季边坡湿度动态特征

研究区 2019 年 1—5 月气候干燥,降雨量 134.6 mm,日平均气温 3.95 °C,最大降雨日为 5 月 6 日(降雨量 16.33 mm/d),其余日期降雨量均低于 10 mm/d;6—10 月降雨量为 407.6 mm,日平均气温 14.94 °C。图 7(a)(b)分别为 2019 年 5 月 6 日与 6 月 27 日(降雨量 16.31 mm/d)降雨前后不同深度土层湿度变化图,由此对比分析干湿季降雨作用下土体湿度的动态变化特征。

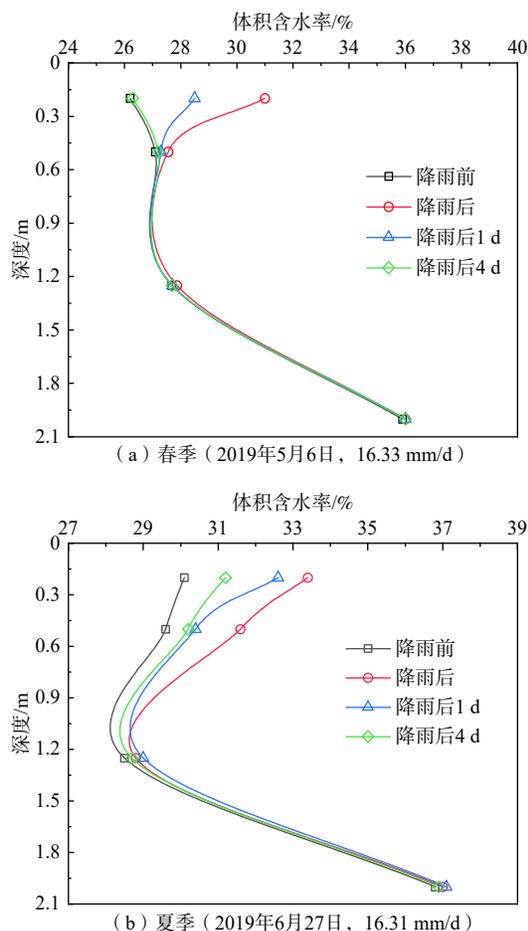


图 7 单次降雨作用下不同深度土体含水率变化曲线
Fig. 7 Soil moisture content curves at different depths

由图 7(a)(b)可知,干湿季不同降雨工况下,边坡浅层土体(0~0.2 m)湿度的响应规律基本一致,而变化幅度不同,春季降雨时,0.2 m 深度处土体含水率迅速升高,降雨结束后含水率由 26.2% 上升至 31%,上升幅度为 17.8%,降雨结束后 1 d,含水率下降至 28.5%,降雨结束后 4 d 后含水率下降至 26.3%,已基本恢复至降雨之前水平。

夏季降雨时,土体含水率由 30.1% 上升至 33.4%,上升幅度为 10.9%,降雨结束后 4 d 后含水率下降至 31.2%,

仍高于降雨之前水平。对于较深层土体(0.5~2 m), 春季降雨期间土体湿度基本无明显变化, 而夏季降雨时引发土体湿度产生小幅变动, 0.5 m 深度处降雨结束后土体含水率由 29.6% 上升至 31.6%, 上升幅度为 6.7%, 降雨结束 4 d 后土体含水率下降至 30.2%; 1.25 m 深度处降雨结束后土体含水率由 28.5% 上升至 28.8%, 而降雨结束后 1 d, 土体含水率变为 29.0%。

3.2.2 集中降雨下边坡湿度动态特征

2019 年 6 月 15 日—11 月 1 日集中降雨期间 2 号

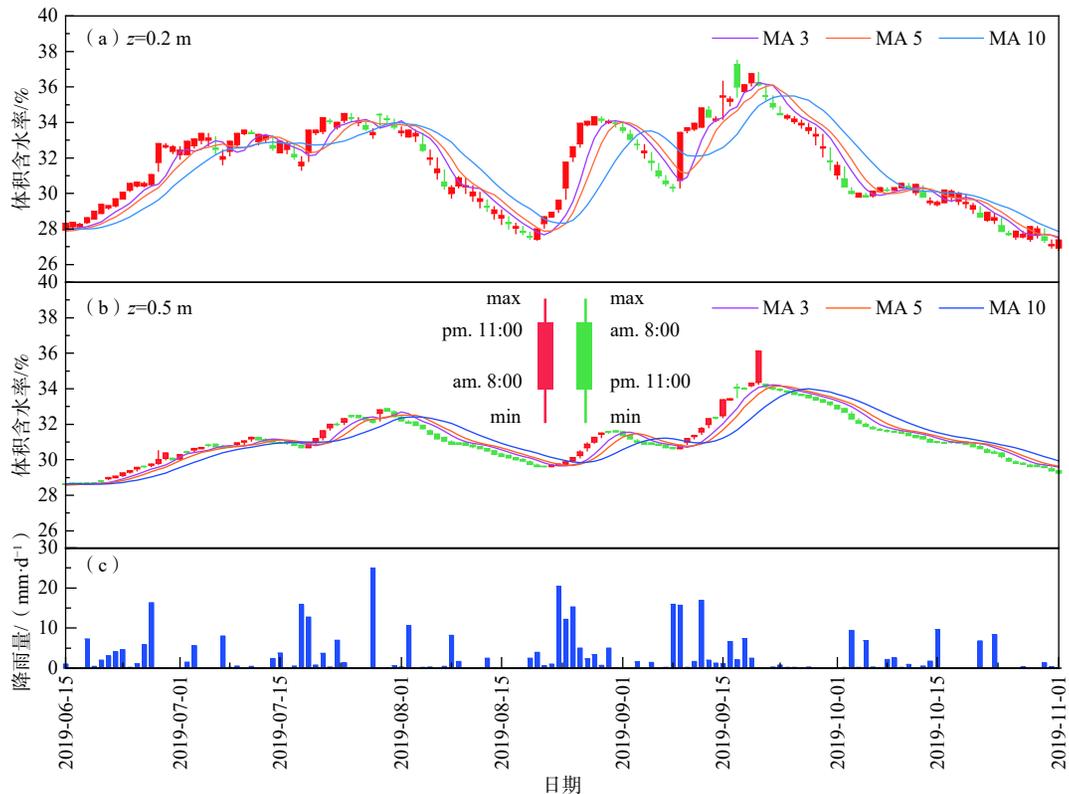


图 8 连续降雨期间边坡含水率变化曲线

Fig. 8 Slope moisture content curve during continuous rainfall

如图 8(a)所示, 在夏季集中降雨下, 不同深度土体湿度响应规律不同, 边坡以下 0.2 m 深度处土体含水率对降雨较为敏感, 自 6 月 15 日降雨事件后, 受持续性降雨补给, 土体湿度稳步上升, 至 6 月 27 日含水率达 33.3%, 之后含水率在 31%~35% 之间波动变化。8 月 1 日过后, 降雨量显著减少, 土体湿度迅速下降, 至 8 月 19 日达到最低点为 27.3%, 与 6 月 15 日初始降雨时土体湿度基本一致。8 月 20 日过后, 在降雨补给下, 土体含水率又呈现波动回升态势, 并表现出最大含水率高于第一次持续降雨下最大含水率现象。9 月 20 日过后, 集中降雨期基本结束, 0.2 m 深度处土体含水率快速下降至雨季之前水平。

监测点 0.2, 0.5 m 深度处土体温湿度变化曲线见图 8(a)(b), 红色柱状图表示当日上午 8 时至下午 11 时日间经历降雨补给土体含水率增大, 为“增湿日”; 绿色柱状图表示日间经历日照升温土体含水率降低, 为“干燥日”。同时, 监测时段内各监测点日含水率最大值、最小值以及含水率 3 日均值(MA 3), 5 日均值(MA 5)和 10 日均值(MA 10)也被记录在内, 图 8(c)为 6 月 15 日—11 月 1 日日降雨量值。

如图 8(b)所示, 0.5 m 深度处土体含水率变化较为平缓, 较 0.2 m 深度处土体含水率变化存在一定的滞后性, 同时变化幅度相对较小, 在整个降雨期间土体湿度保持在相对稳定水平, 含水率基本稳定在 28.6%~34.2%。

3.3 边坡水-热互作效应

2019 年度内各深度土体温湿度时程曲线变化规律基本一致(图 9), 同一时间内边坡内部土体温度、湿度之间存在着良好相互作用关系。采用式(4)对边坡土体温湿度进行 z-score 标准化处理, 并进行 Pearson 相关性分析, 同一深度处土体水-热相关性分析结果见图 10。

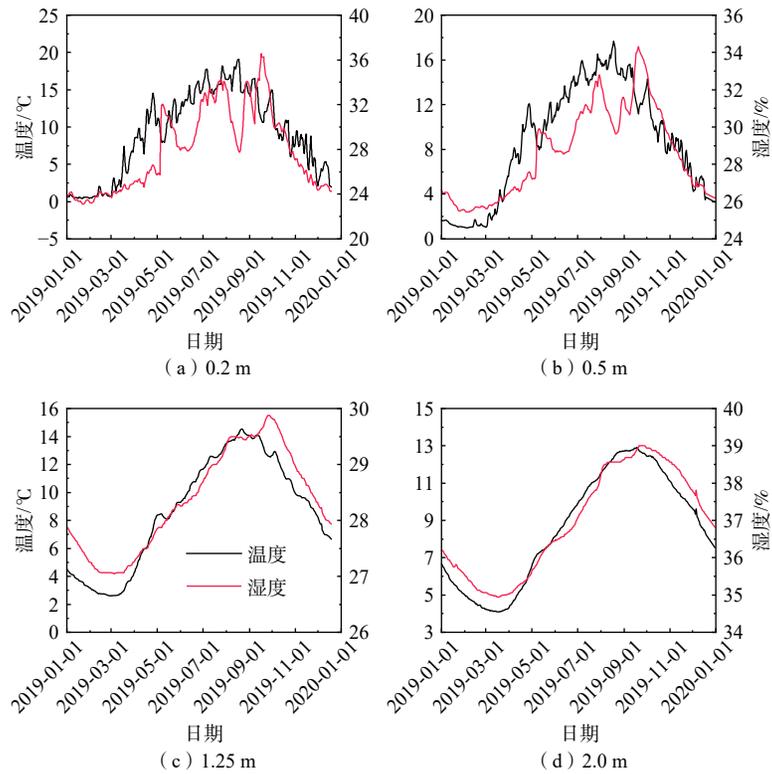


图 9 不同深度土体温湿度时程曲线

Fig. 9 Variation curves of soil temperature and humidity

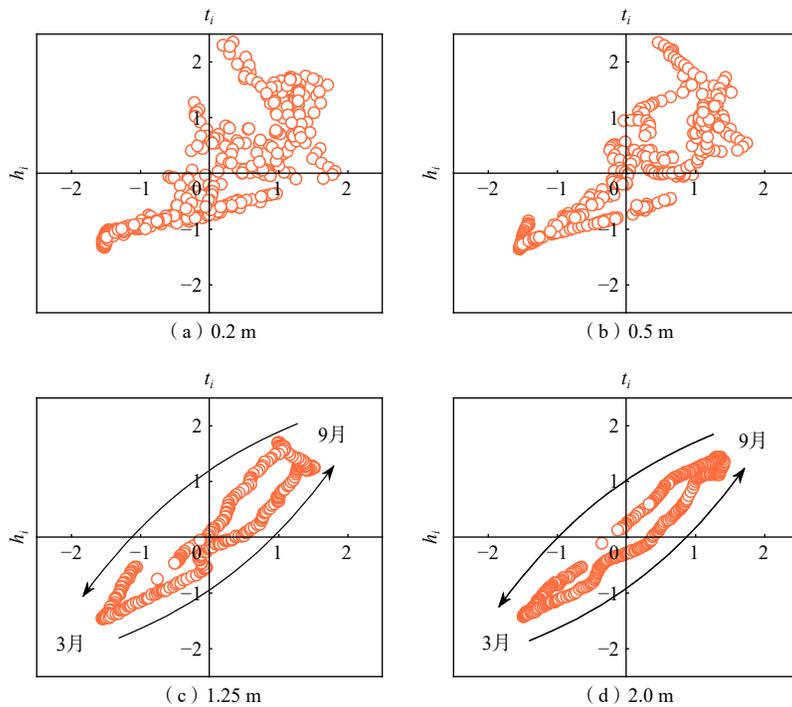


图 10 边坡不同深度土体水-热相关性分析

Fig. 10 Correlation of soil water-heat at different depths

如图 10 所示, 土体水分变化与温度变化有着显著的相关性, 不同深度处土体温湿度相关性高次序列为 2 m>1.25 m>0.5 m>0.2 m; 在 1.25 m 深度以下, 土

体温湿度相关性明显提高, 同时, 在 1.25, 2 m 深度处, 年内 3—9 月温湿度相关关系呈现出明显的“循环圈”效应。

将不同深度处温湿度相关关系列于表 2, 从边坡浅层土体观测点温湿度 Pearson 相关性分析结果可以看出: 坡面内不同深度处土体温度或湿度之间、同一深度处土体温度与湿度之间、不同深度处的土体温度与湿度之间均呈现出极显著相关性。

$$x_i = (X_i - \bar{X})/s \quad (4)$$

式中: x_i ——土体温/湿度标准化值;
 X_i ——土体温/湿度原数据值;
 \bar{X} ——土体温/湿度均值;
 s ——温/湿度标准差。

表 2 边坡土体水-热 Pearson 相关性分析结果

Table 2 Pearson correlation analysis results of water-heat of slope soil

| 温/湿度 | $T_{0.2m}$ | $T_{0.5m}$ | $T_{1.25m}$ | $T_{2.0m}$ | $H_{0.2m}$ | $H_{0.5m}$ | $H_{1.25m}$ | $H_{2.0m}$ |
|-------------|------------|------------|-------------|------------|------------|------------|-------------|------------|
| $T_{0.2m}$ | 1 | 0.979 | 0.856 | 0.674 | 0.805 | 0.778 | 0.711 | 0.534 |
| $T_{0.5m}$ | 0.979 | 1 | 0.928 | 0.774 | 0.843 | 0.839 | 0.803 | 0.644 |
| $T_{1.25m}$ | 0.856 | 0.928 | 1 | 0.948 | 0.856 | 0.915 | 0.955 | 0.867 |
| $T_{2.0m}$ | 0.674 | 0.774 | 0.948 | 1 | 0.757 | 0.878 | 0.985 | 0.978 |
| $H_{0.2m}$ | 0.805 | 0.843 | 0.856 | 0.757 | 1 | 0.941 | 0.794 | 0.641 |
| $H_{0.5m}$ | 0.778 | 0.839 | 0.915 | 0.878 | 0.941 | 1 | 0.923 | 0.808 |
| $H_{1.25m}$ | 0.711 | 0.803 | 0.955 | 0.985 | 0.794 | 0.923 | 1 | 0.955 |
| $H_{2.0m}$ | 0.534 | 0.644 | 0.867 | 0.978 | 0.641 | 0.808 | 0.955 | 1 |

4 分析

4.1 边坡表层土体温湿度分析

边坡浅层土体对大气温湿度响应较为敏感, 随土体埋深增加, 温湿度变化幅度逐渐减小, 而响应时间逐渐增大, 其他学者的研究成果也验证了这一发现^[12, 24]。这一特性主要受土体导热性影响, 大气热量向土体深部传递时伴随着能量衰减, 深部土体较浅层土体温度变化存在一定的滞后性, 导致边坡土体温度随土体埋深变化趋势基本相同, 但平均温度与温度变化幅度随土体埋深增加逐渐减小。不同埋深土体温度变化曲线可采用傅里叶函数进行表征, 函数拟合结果表明土体温度变化滞后时间与土体埋深变化近似呈正比, 边坡 2 m 深度处较 0.2 m 深度处土体温度变化滞后约 30 d。

同时, 受深度土体温度变化滞后性与变化幅度影响, 每年 3 月与 9 月不同深度土体月平均温度曲线表现出“纠结”现象, 研究区大气温度以暖热为主, 边坡温度特征呈现出“表热而内凉”的特点, 而每年 9 月下旬至次年 3 月上旬, 大气温度以冷寒为主, 边坡呈现出“表寒而内温”的特点。

4.2 降雨对边坡湿度的影响分析

受降雨、气温、蒸发量影响, 不同季节土体渗透系数存在差异, 导致各土层湿度对降雨响应规律不同。春季表层土体初始含水率较低, 如图 7(a)所示, 土体较干燥, 基质吸力较大, 土体持水能力较强, 降雨期间雨水主要储存在 0.5 m 以上土层中, 通过水分蒸发与植物升腾作用而消散, 并不引起深部土层湿度变化;

而夏季边坡表层土体初始含水率较高, 如图 7(b)所示, 且土层前期不断经历降雨蒸发引发的干湿循环效应, 使得土颗粒间形成了优势渗流通道, 降雨期间雨水入渗到较深部土体所需时间变短, 造成较深层土体含水率升高, 这也是相同降雨强度下夏季 0.2 m 深度处土层含水率变化幅度低于春季的原因。

在夏季持续降雨过程中, 土体含水率上升趋势逐渐形成, 上升过程中体积含水率所形成的高点与低点日照蒸发作用起到抑制作用, 使得土体含水率上升、下降过程具有持续性, 较难出现较大差值的跳跃性变化。此特点在 8 月 20 日—9 月 20 日降雨期间表现最为明显, 如图 8(a)所示, 在 8 月 20 日降雨作用下, 土体含水率开始回升, 并于 29 日达到高点 34%, 后续降雨量虽然减少, 且夏季边坡外部较高的温度给土体水分蒸发提供了条件, 但受土体湿度日均线的抑制作用, 土体湿度下降幅度较小, 9 月 8 日的土体含水率低点(30.1%)仍高于 8 月 20 日(27.3%); 由于前期持续性降雨-蒸发引起的干湿胀缩作用, 土体结构松散, 网状裂隙密布, 裂隙范围土体的渗透性显著提高, 当土体再次受到降雨补给后, 土体含水率得以迅速上升, 且此时较深部土层易受到浅层土体雨水下渗补给。这也是边坡浅层滑坡多发生在多次降雨后的某一降雨事件的原因。

4.3 边坡水-热互作效应分析

随土体埋深增大, 边坡土体温湿度相关性逐渐增强, 其主要原因为土体温度变化是影响边坡内部热量平衡与水分迁移的重要因素^[7]。一方面, 当土体埋深

较大时,土中水分并未与大气直接接触而导致温度影响下的直接蒸发;另一方面,由于降水对 2 m 深度处土体含水率影响缓慢,土体含水率变化幅度较小,使得水分的迁移主要受土体温度梯度影响,导致埋深较大土体温湿度呈现出明显的正相关关系。

在夏季,土壤温度逐渐增高,而此时为阴湿区连续降雨期间,土壤初始含水率较高,当温度升高时,土壤含水率存在陡降态势,这主要受较高温度影响使土体内水分迅速蒸发。浅层土体温湿度变化虽波动较为强烈,但总体变化趋势基本一致,仍表现出较高的相关性。根据全年土体温湿度相关性分析(图 10)可知,年内 3—9 月温湿度相关关系呈现出明显的“循环圈”效应,这可能由不同时期温湿度相互影响程度不同所导致。

我国高寒阴湿区水文气候条件恶劣,开展边坡土体温湿度长期监测对该地区边坡工程的合理生态防护与监控具有重要意义。通过开展路堑边坡土体水分与温度的相互响应机制研究,为进一步揭示边坡的土体水分与气候因子耦合、坡面侵蚀与浅层失稳机制奠定了一定基础。在今后工作中,仍需应用较先进的现代技术手段不断加强边坡土体水-热相互响应效应以及相互作用机理方面的研究。

5 结论

(1)边坡土体温湿度随季节呈简谐式周期性变化,浅层土体变化幅度较大,深层土体变化幅度相对较小,且深层土体温度变化存在一定滞后性,2 m 深度处较 0.2 m 深度处土体温度变化滞后时间约为 30 d。

(2)受深部温度变化幅度与滞后性影响,土体月平均温度曲线在 3 月与 9 月出现“纽结”现象,使得春夏季边坡土体温度特征表现为表热而内凉,而秋冬季表现为表寒而内温;采用傅里叶级数可较好表征不同深度处温湿度响应规律。

(3)土体渗透特性具有明显的季节性特点,春季降雨期间雨水入渗深度仅为 50 cm,而在夏季连续降雨作用下,土颗粒间易形成渗流通道,雨水可入渗至更深部土体,土体含水率呈现出先升高后缓慢降低的趋势。

(4)Pearson 相关性分析结果表明土体水分迁移与温度变化相关性显著,深部土体水分变化的主要影响因素是温度梯度引导下的水分迁移,而浅层土体受多种因素影响导致水分变化机理较复杂,但仍具有较高的相关性。

参考文献 (References) :

- [1] 余诗刚,林鹏.中国岩石工程若干进展与挑战[J].岩石力学与工程学报,2014,33(3):433-457. [SHE Shigang, LIN Peng. Some developments and challenging issues in rock engineering field in China[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2014, 33(3): 433 - 457. (in Chinese with English abstract)]
- [2] HUGGEL C. Recent extreme slope failures in glacial environments: Effects of thermal perturbation[J]. Quaternary Science Reviews, 2009, 28(11/12): 1119 - 1130.
- [3] XU Q J, YIN H L, CAO X F, et al. A temperature-driven strength reduction method for slope stability analysis[J]. Mechanics Research Communications, 2009, 36(2): 224 - 231.
- [4] 叶万军,杨更社,彭建兵,等.冻融循环导致洛川黄土边坡剥落病害产生机制的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2012,31(1):199-205. [YE Wanjun, YANG Gengshe, PENG Jianbing, et al. Test research on mechanism of freezing and thawing cycle resulting in loess slope spalling hazards in Luochuan[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2012, 31(1): 199 - 205. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 曾磊,赵贵章,胡炜,等.冻融条件下浅层黄土中温度与水分的空间变化相关性[J].地质通报,2015,34(11):2123-2131. [ZENG Lei, ZHAO Guizhang, HU Wei, et al. Spatial variation characteristics of temperature and moisture in shallow loess layer under freezing-thawing condition[J]. Geological Bulletin of China, 2015, 34(11): 2123 - 2131. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 王铁行,李宁,谢定义.土体水热力耦合问题研究意义、现状及建议[J].岩土力学,2005,26(3):488-493. [WANG Tiehang, LI Ning, XIE Dingyi. Necessity and means in research on soil coupled heat-moisture-stress issues[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(3): 488 - 493. (in Chinese with English abstract)]
- [7] WANG T H, SU L J. Experimental study on moisture migration in unsaturated loess under effect of temperature[J]. Journal of Cold Regions Engineering, 2010, 24(3): 77 - 86.
- [8] 张正,马学宁,朱启有.兰州地区黄土水平冻胀力分析[J].中国地质灾害与防治学报,2021,32(1):102-107. [ZHANG Zheng, MA Xuening, ZHU Qiyou. Experimental analysis of horizontal frost heaving force of loess in Lanzhou City of Gansu Province Area[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2021, 32(1): 102 - 107. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 马稚桐,王文科,赵明,等.半干旱地区地表-地下水系统水热运移与裸土蒸发研究[J].水文地质工程地质,

- 2021, 48(4): 7 – 14. [MA Zhitong, WANG Wenke, ZHAO Ming, et al. Hydrothermal transfer and bare soil evaporation in surface-groundwater systems in semi-arid areas[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2021, 48(4): 7 – 14. (in Chinese with English abstract)]
- [10] TAYLOR R V, SEASTEDT T R. Short- and long-term patterns of soil moisture in alpine tundra[J]. *Arctic and Alpine Research*, 1994, 26(1): 14 – 20.
- [11] 杨梅学, 姚檀栋, 王绍令, 等. 藏北高原土壤的温湿特征[J]. *地理研究*, 1999, 18(3): 312 – 317. [YANG Meixue, YAO Tandong, WANG Shaoling, et al. The features of soil temperature and moisture on Northern Tibetan Plateau[J]. *Geographical Research*, 1999, 18(3): 312 – 317. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 赵逸舟, 马耀明, 马伟强, 等. 藏北高原土壤温湿变化特征分析[J]. *冰川冻土*, 2007, 29(4): 578 – 583. [ZHAO Yizhou, MA Yaoming, MA Weiqiang, et al. Variations of soil temperature and soil moisture in northern Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2007, 29(4): 578 – 583. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 马剑, 刘贤德, 李广, 等. 祁连山北麓中段青海云杉林土壤水热时空变化特征[J]. *干旱区地理*, 2020, 43(4): 1033 – 1040. [MA Jian, LIU Xiande, LI Guang, et al. Spatial and temporal variations of soil moisture and temperature of *Picea Crassifolia* forest in north piedmont of central Qilian Mountains[J]. *Arid Land Geography*, 2020, 43(4): 1033 – 1040. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 李静, 盛煜, 吴吉春, 等. 祁连山大通河源多年冻土区浅层土壤水热时空变化特征[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(4): 994 – 1001. [LI Jing, SHENG Yu, WU Jichun, et al. Spatial and temporal variations of the superficial hydrothermal characteristics in permafrost regions in the source areas of the Datong River, Qilian Mountains[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(4): 994 – 1001. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 车宗玺, 李进军, 汪有奎, 等. 祁连山西段草地土壤温度、水分变化特征[J]. *生态学报*, 2018, 38(1): 105 – 111. [CHE Zongxi, LI Jinjun, WANG Youkui, et al. Characteristics of soil temperature and water content variation in the western Qilian Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(1): 105 – 111. (in Chinese with English abstract)]
- [16] JODRY C, PALMA L S, FARGIER Y, et al. 2D-ERT monitoring of soil moisture seasonal behaviour in a river levee: A case study[J]. *Journal of Applied Geophysics*, 2019, 167: 140 – 151.
- [17] LACAVA T, BROCCA L, CALICE G, et al. Soil moisture variations monitoring by AMSU-based soil wetness indices: A long-term inter-comparison with ground measurements[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(10): 2317 – 2325.
- [18] WAGNER W, REIMER C, BAUER-MARSCHALLINGER B, et al. Long-term soil moisture time series analyses based on active microwave backscatter measurements[J]. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 2015, 40(7): 545 – 550.
- [19] 陈荣茵, 朱宝龙. 温度、湿度循环条件下砂岩物理特性试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2014, 41(1): 74 – 78. [CHEN Tangyin, ZHU Baolong. Experimental study of physical properties of sandstone under the cycling conditions of temperature and humidity[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2014, 41(1): 74 – 78. (in Chinese with English abstract)]
- [20] 李彦龙, 王俊, 王铁行. 温度梯度作用下非饱和土水分迁移研究[J]. *岩土力学*, 2016, 37(10): 2839 – 2844. [LI Yanlong, WANG Jun, WANG Tiehang. Moisture migration of unsaturated soil due to thermal gradients[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2016, 37(10): 2839 – 2844. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 蔡国庆, 赵成刚, 刘艳. 非饱和土土-水特征曲线的温度效应[J]. *岩土力学*, 2010, 31(4): 1055 – 1060. [CAI Guoqing, ZHAO Chenggang, LIU Yan. Temperature effects on soil-water characteristic curve of unsaturated soils[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2010, 31(4): 1055 – 1060. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 王铁行, 陆海红. 温度影响下的非饱和黄土水分迁移问题探讨[J]. *岩土力学*, 2004, 25(7): 1081 – 1084. [WANG Tiehang, LU Haihong. Moisture migration in unsaturated loess considering temperature effect[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2004, 25(7): 1081 – 1084. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 王铁行, 卢靖, 岳彩坤. 考虑温度和密度影响的非饱和黄土土-水特征曲线研究[J]. *岩土力学*, 2008, 29(1): 1 – 5. [WANG Tiehang, LU Jing, YUE Caikun. Soil-water characteristic curve for unsaturated loess considering temperature and density effect[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(1): 1 – 5. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 赵利云, 张茂省, 孙萍萍, 等. 基于原位监测的浅层黄土斜坡水分运移规律分析[J]. *地质与资源*, 2021, 30(4): 492 – 498. [ZHAO Liyun, ZHANG Maosheng, SUN Pingping, et al. Analysis of water movement law in shallow loess slope based on in situ monitoring[J]. *Geology and Resources*, 2021, 30(4): 492 – 498. (in Chinese with English abstract)]