

短时气温冻融周期内土坡浅层的水热状况分析*

阙云¹, 陈晓鹏²

(1.福州大学 土木工程学院,福州 350116;2.厦门市市政工程设计院有限公司,福建 厦门 361000)

摘 要:为揭示短时冻融周期内土坡浅层的水热状况特征,选取典型短时冻土区域,采用现场气象监测与数值模拟相结合的技术手段对短时气温冻融周期内土坡浅层水热状况进行分析。结果表明:在3个月冻期总持续时间内,共有18次气温冻融周期,其中16次为1 d气温冻融周期,1次为2 d气温冻融周期,1次为6 d气温冻融周期。气温冻融周期内最低气温为-4.4℃,最高气温为10.8℃;日辐射峰值范围为41~827 W/m²;平均风速为3.5~3.7 m/s;大气中水汽接近饱和状态。6 d与1 d气温冻融周期内土壤最大冻结时间分别为32 h与5 h,最大冻深分别为10 cm与5 cm,土壤含冰率分别为0.16与0.14,短时冻区应重点关注边坡浅层10 cm以内土壤强度的冻融损伤。1 d气温冻融周期内,土壤冻结时段一般为3:00—8:00之间。土壤冻结的开始时刻取决于最低气温,而土壤冻结持续时间取决于太阳辐射高低,若土壤冻结时间与太阳辐射时间相重叠或者气温处于土壤冻结温度以下的持续时间小于1.5 h,边坡土壤不易冻结。因此,同一边坡的阳面与阴面在土壤冻结开始时刻与冻结持续时间存在较大差异。

关键词: 短时冻区;气温冻融周期;土坡;数值模拟;水热状况

中图分类号:U416.1 文献标识码:A 文章编号:1673-0836(2017)06-1630-09

Hydrothermal Regime Analysis on Shallow Layer of Soil Slope under Short-term Freeze-thaw Cycles

Que Yun¹, Chen Xiaopeng²

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, P.R. China;

2. Xiamen Municipal Engineering Design Institute Co.Ltd., Xiamen, Fujian 361000, P.R. China)

Abstract: Taking typical short-term frozen zone in Fujian province of China as an example, hydrothermal regime on shallow layer of soil slope in short-term freeze-thaw cycles were analyzed based on the combination of meteorological monitoring method and numerical simulation. The results show that there are 18 times of freeze-thaw cycles of air temperature from Dec. 2013 to Feb. 2014 which include 16 times of one day freeze-thaw cycle of air temperature, 1 time of two days freeze-thaw cycle of air temperature and 1 time of six days freeze-thaw cycle of air temperature. During the short-term freeze-thaw cycles of air temperature, the minimum and maximum of air temperature can reach -4.4℃ and 10.8℃, respectively. Peak of daily radiation ranges from 41 to 827 W/m², and average wind speed is between 3.5 and 3.7 m/s. Atmospheric humidity is close to saturation. During six days or one day of freeze-thaw cycle of air temperature, maximum duration of the soil freezing is between 32 h and 5 h, maximum frozen depth amount to respectively 10cm with 5cm, ice content of frozen soil is 0.16 and 0.14, respectively. In view

* 收稿日期:2017-05-29(修改稿)

作者简介:阙云(1980-),男,江西黎川人,博士,副教授,主要从事路基工程方面的研究。

E-mail:Queyun_2001@tom.com

基金项目:国家自然科学基金(41302215,41772297);福建省自然科学基金(2014J01185);福州大学科技发展基金(2013-XQ-39)

of freezing-thawing damage in short-term frozen area, strength degradation of soil slope at the depth range of 0~10 cm should be focused on. During one day of freeze-thaw cycle of air temperature, soil freezing time is between 3a.m and 8a.m. The initial freezing time of soil depends on minimum air temperatures and freezing time of soil depends on intensity of daily radiation. Shallow layer of soil slope is not easy to be frozen when air temperature below soil freezing temperature and solar radiation is in coexistence or when the duration of air temperature below soil freezing temperature is less than 1.5 h. So, initial freezing time and duration of the freezing between the sunny slope and the shady slope at the same short-term frozen zone are big divergence.

Keywords: short-term frozen zone; freeze-thaw cycles of air temperature; soil slope; numerical simulation; hydrothermal regime

0 引言

短时冻土区(冻结时间在数小时至数日)广泛分布在中国长江以南、珠江流域以北地区,面积约 190 万平方公里^[1]。相比较于多年与季节冻土,短时冻土具有冻融次数频繁、冰雪融化后土质含水率高等特点。因而,区域内土质边坡冬季失稳原因与地处短时冻区所引发的边坡浅层短时反复冻融息息相关。例如,福建省南平地区武夷山、浦城、光泽、政和 4 个县市公路边坡冻融失稳达 255 处(如图 1)、总长 21.2 km,总面积为 18.5 万 m²。



图 1 福建省典型边坡浅层冻融失稳

Fig.1 Typical slope failure due to freeze-thaw cycles in Fujian province

相比于多年与季节冻土,短时冻土无论是其深度、热融及冻融过程都不完全相同,对此类条件下引发的地质灾害类型及其影响机制的理论、试验及数值方面均不同于多年与季节冻土区^[2]。因此,近年来国内外学者逐渐关注并开展此方面研究,取得了很多重要的成果。如在 2008 年我国南方发生的百年一遇的极端冰雪灾害中,由于高强度降雪及冰雪融化引起了滑坡等地质灾害达 3 106 处,分析灾害原因,多是对南方短时冻土气候诱发地质灾害问题未能引起足够的重视^[3]。

此外,王璐等^[4]通过对江西等四省表土的调查

与试验研究,对南方短时冻土的分布地区、冻胀等级、危害性进行了分析。郭麒麟等^[5]分析了在极端冰雪条件下南方短时冻土的热物理性质及强度特征。王永忠等^[6]、吴礼舟等^[7]分别以湖北咸宁典型粉质黏土和成都地区典型重塑黏土为例,分析了南方短时冻土的抗剪强度指标衰减规律与冻胀融沉变化特征。上述成果多侧重于短时冻土的物理力学参数的特性方面,对于短时冻土区气候下边坡浅层冻深、冻融过程中的水热状况等仍未清晰。鉴于此,本文选取福建省典型短时冻土区域,采用自动气象站对短时冻土区气候进行监测,并采用数值模拟对该气候条件下土坡浅层水热状况进行分析。

1 典型短时冻区气候特征

1.1 现场气象监测

选取福建省省道 303 线 K364+900 处边坡为现场监测地点,采用 PC-3 型移动式自动气象站进行监测(如图 2)。气象站包括环境温湿度传感器、太阳总辐射表、风速传感器等。主要监测内容包括太阳辐射、气温、风速、空气相对湿度等,监测周期为 2013 年 12 月 1 日—2014 年 2 月 28 日。

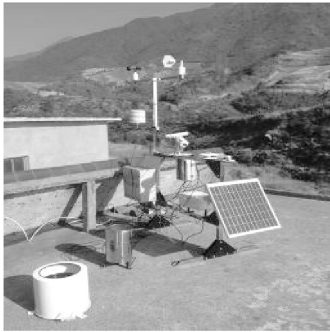


图 2 移动式自动气象站

Fig.2 Automatic weather stations

1.2 气象监测结果

现场气温、辐射、风速(其中 2014 年 2 月 9

日—2014 年 2 月 14 日期间风速传感器出现故障,未采集到数据)及相对湿度监测结果如图 3 所示。

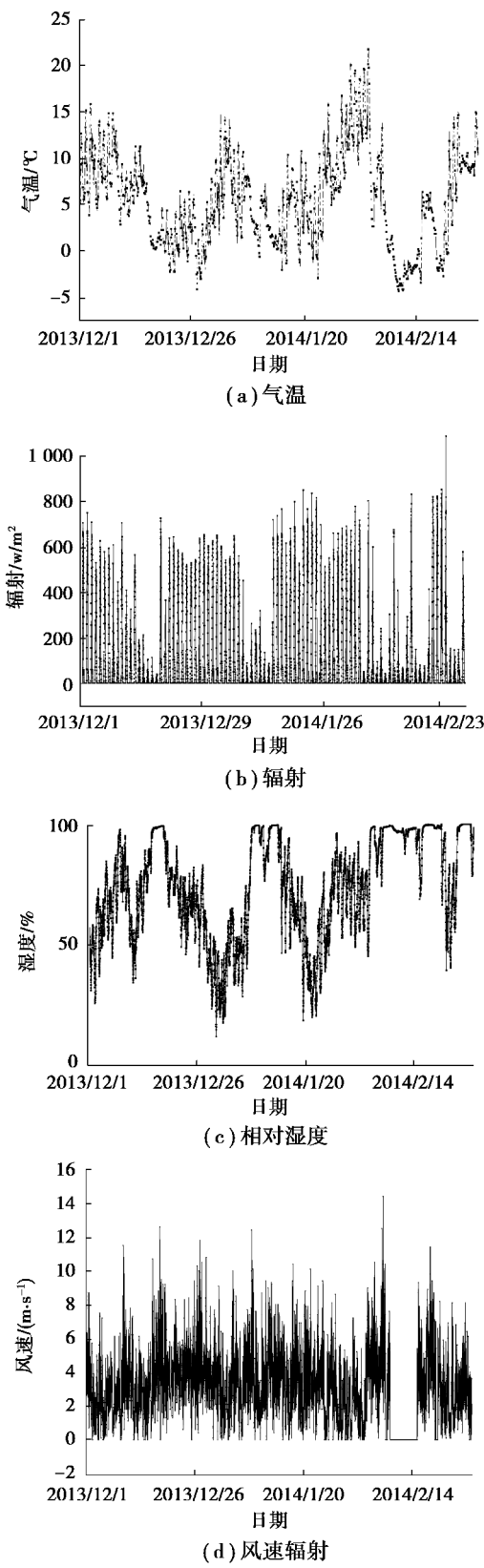


图 3 现场监测结果
Fig.3 Results of field monitoring

由现场监测结果,可得该区域内短时冻区气候呈现以下特征:

(1)工程区冻期总持续时间为 3 个月左右,分别为 12 月、1 月、2 月。以气温从“零度以上~零度以下~零度以上”作为一次气温冻融周期,冻期持续时间内共有 18 次气温冻融周期,其中 16 次为 1 d 气温冻融周期,1 次为 2 d 气温冻融周期,1 次为 6 d 气温冻融周期。

(2)气温冻融周期内最低气温为-4.4℃,最高气温为 10.8℃,气温最大日较差达 13.2℃。气温冻融周期内日最高气温一般出现在 13:00~15:00,日最低气温一般出现在 5:00~7:00。

(3)气温冻融周期内日辐射峰值范围为 41~827 W/m²。太阳辐射作用时间段一般为 7:00~17:00,峰值出现时间段为 11:00~14:30。根据 HIPERPAV II 中推荐太阳辐射峰值的取值范围^[8]可知,气温冻融周期内,天气状况基本以多云天及阴天为主。气温在零度以下时太阳辐射多数为 0,但也存在零下气温与辐射共存的情况,说明即便在日间,边坡表层仍然有可能处于冻结状态。

(4)气温冻融周期内空气湿度变化较大,12 月与 1 月份气温冻融周期内大气平均湿度为 30%左右,而 2 月份气温冻融周期内大气平均湿度在 75%以上。同时,大气湿度与气温呈一定相关性,气温骤降时,湿度增大,说明大气降温时伴随着下雨,导致空气湿度偏大,水汽接近饱和状态。

(5)气温冻融周期内平均风速为 3.5~3.7 m/s,最大风速达 14.4 m/s。

2 水热耦合模型及程序编制

2.1 水热耦合模型及求解

边坡水热耦合模型采用 Harlan 模型^[9]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\rho_i \partial \theta_i}{\rho_l \partial t} = D(\theta) \left(\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \theta}{\partial y^2} \right) + \frac{\partial K(\theta)}{\partial y} \\ C \frac{\partial T}{\partial t} - L_f \rho_i \frac{\partial \theta_i}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right) \end{cases} \quad (1)$$

式中: θ 、 θ_i 分别为含水率和含冰率; $D(\theta)$ 、 $K(\theta)$ 分别为水分扩散率和导水系数; ρ_i 、 ρ_l 分别为冰、水的密度; C 、 λ 、 L_f 分别为比热容、导热系数及冻融潜热; T 、 t 分别为温度及时间。其中,未冻水含量计算式通过室内测温法试验测得: $\theta_u = 0.519T^{-1.18}$ 。

基于 ADI 隐式差分方法对式(1)进行求解,采

用 MATLAB 语言编制程序。

2.2 边界条件

边界条件主要考虑蒸发、太阳辐射、净辐射、对流换热、蒸发潜热。

蒸发强度 E 采用 Campbell 模型^[9-10]:

$$E = \frac{\rho_{vs} - \rho_{va}}{r_v}$$

(2)

式中: ρ_{vs} 、 ρ_{va} 分别为地表、空气水汽密度; r_v 为阻力系数。

热边界主要由蒸发潜热、太阳总辐射、净辐射及对流换热累加而得。其中蒸发潜热计算式为^[11]:

$$Q = LE$$

(3)

式中: $L = 2.494\ 63 \times 10^9 - 2.247 \times 10^6 T_s$, T_s 为土壤表层温度。

太阳辐射计算式为^[12]:

$$q_s = \alpha_s \cdot I_f \cdot q_{solar}$$

(4)

式中: q_s 为太阳辐射吸收热流, W/m^2 ; α_s 为太阳辐射的吸收率; I_f 为考虑太阳在 24 h 中的辐射角度的辐射强度系数; q_{solar} 为太阳辐射峰值。

净辐射计算式分别为^[13-14]:

积雪净辐射:

$$L_{sp} = \varepsilon_{sp}(L_a - \sigma T_K^4)$$

(5)

土壤净辐射:

$$L_s = \varepsilon_s(L_a - \sigma T_K^4)$$

(6)

式中: L_{sp} 、 L_s 分别为雪层和土壤的表层净长波辐射量; T_K 为绝对温度。 ε_{ac} 、 σ 分别为热辐射系数(土壤取值为 0.65, 积雪取值为 0.8)、常数($5.669\ 7 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4$)。

对流换热、对流换热系数^[15]分别由式(7)、式(8)确定。

$$q = h_c(T_s - T_a)$$

(7)

$$h_c = 3.727C[0.9(T_s + T_a) + 32]^{-0.181} |T_s - T_a|^{0.266} \sqrt{1 + 2.857w}$$

(8)

式中: h_c 为对流换热系数; C 为常数,当地表温度高于空气时取 1.79,反之取 0.89; w 为风速, m/s ; T_a 、 T_s 分别为空气与坡表温度。

气温日变化模型^[16]采用以下计算式得到:
$$T_a = T_1 + T_2[0.96\sin\omega(t - t_0) + 0.14\sin2\omega(t - t_0)]$$

(9)

式中: T_a 为大气温度, $^{\circ}C$; T_1 为日平均气温, $^{\circ}C$; T_2 为日气温振幅, $^{\circ}C$; T_{max} 为日最高气温, $^{\circ}C$; T_{min} 为日最低气温, $^{\circ}C$; t_0 为初相位,一般取 $\tau_0 = 9(h)$; ω 为角频率, $\omega = 2\pi/24(rad)$ 。

2.3 计算参数

试验土样选取福建省省道 303 线 K364+900 处边坡,物理力学参数如表 1。

表 1 土样物理力学参数

Table 1 Physical and mechanical parameters of soil sample

干密度	液限	塑限	塑性指数	饱和导水率	不均匀系数	曲率系数
$r_d/(g \cdot cm^{-1})$	$W_L/\%$	$W_p/\%$	$I_p/\%$	$K_s \times 10^{-5}/(cm \cdot s^{-1})$	C_u	C_c
1.78	25.85	38.57	12.72	5.56	73	0.877

土壤热参数取值:未冻土与冻土骨料颗粒比热分别为 $0.84\ kJ/(kg \cdot K)$ 、 $0.77\ kJ/(kg \cdot K)$; 土壤中水和冰的比热分别取 $4.182\ kJ/(kg \cdot K)$ 、 $2.09\ kJ/(kg \cdot K)$ ^[1],冻土导热系数 λ_f 与未冻土导热系数 λ_u 分别由式(10)、式(11)^[1]得到。

$$\lambda_f = 0.104 \times 10^{-3} r_d^{0.921} + 3.72 \times 10^{-5} r_d \theta$$

(10)

$$\lambda_u = 0.408 \times 10^{-3} r_d^{0.945} + 1.72 \times 10^{-5} r_d \theta$$

(11)

式中: r_d 为土质干密度, g/cm^3 。

相变潜热^[14]计算式如下:

$$Q = L\rho_d(w - w_u)$$

(12)

式中: Q 、 L 、 ρ_d 、 w 、 w_u 分别为相变潜热、水冻融潜热(一般工程热工计算取 $334.56\ kJ/kg$)^[1]、干密度、总含水率、未冻含水率。

采用滤纸法确定土水特征曲线,并运用 VG 模型拟合, VG 模型方程^[17]如式(13)所示。

$$\theta(H)=\begin{cases}\theta_r+\frac{\theta_s-\theta_r}{[1+|\alpha H|^n]^m}H<0\\ \theta_sH\geq0\end{cases}\quad(13)$$

式中: θ 为土壤含水率; θ_r 、 θ_s 分别为残余含水率以及饱和含水率(由试验测得分别为 0.10、0.38); H 为土壤负压; α 、 n 、 m ($m=1-1/n$) 为拟合参数, 由拟合结果可得 $\alpha=0.016\ 3$ 、 $n=1.744\ 5$ ^[18]。

未冻土导水系数、冻土导水系数分别由式(14)、式(15)^[19]计算。

$$K(\theta)=K_sS_e^{1/2}\left[1-\left(1-S_e^{1/m}\right)^m\right]^2\quad(14)$$

$$K_i(\theta)=K(\theta)/I\quad(15)$$

式中: S_e 为有效饱和度; K_s 为饱和导水率; $I=1\ 010\theta_1$ 。

未冻土、冻土水分扩散系数分别由式(16)、式(17)^[19]计算。

$$D(S_e)=\frac{(1-m)K_sS_e^{1/2-1/m}}{\alpha m(\theta_s-\theta_r)}\left[\left(1-S_e^{1/m}\right)-m+\left(1-S_e^{1/m}\right)^m-2\right]\quad(16)$$

$$D_i(\theta)=D(\theta)/I\quad(17)$$

2.4 初始条件

2.4.1 初始含水率

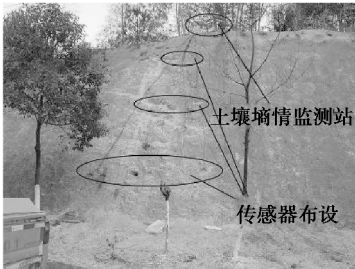
采集现场边坡坡面 30cm 内土样测试含水率, 其结果为 0.25 左右^[18], 故数值模拟设定边坡初始含水率为 0.25。由室内冻结温度试验得, 该含水率下土壤冻结温度为 -1.9℃^[18]。

2.4.2 初始温度

采用 PC-2SQ 型土壤墒情监测站针对残积土边坡进行温度监测, 监测站主要包括: 传感器、支架、实时监测分析软件、数据通讯及传感器连接电缆, 供电主要依靠太阳能电池板, 实现野外自供电。监测位置仍选择在省道 303 线 K364+900 处边坡, 边坡高度为 7.5 m, 边坡坡度为 1:0.67。选定边坡坡脚(高 1 m)、坡中(高 4 m)、坡顶(高 6 m)3 处, 分别沿水平深度依次为 10 cm、22.5 cm、25.8 cm 3 个位置埋设 TDR-3 型温湿度传感器, 共 9 个测试点。考虑到本次采用的 TDR-3 温湿度传感器自身尺寸上的限制, 并保证监测在户外能够顺利进行, 本次监测最浅深度为水平深度 10 cm 位置, 现场监测布设状况如图 4 所示。



(a) 土壤墒情监测站



(b) 现场检测布设

图 4 土壤墒情监测

Fig.4 Monitoring Soil moisture content

选取浅层深度 0~25 cm 不同位置的边坡温度测试值, 运用 MATLAB 将 3 个位置的温度随深度分布规律进行 3 次函数拟合, 在此基础上, 推算其他各位置的温度值, 结果整理如表 2 所示(下划线数据为 12 月 27 日零时刻实测数据)。

表 2 边坡浅层深度温度变化规律
Table 2 Temperature variation of slope

深度 /cm	0	5	10	15	20	22.5	25	25.8
坡脚	4.78	5.2	<u>5.5</u>	5.71	5.85	<u>5.9</u>	5.94	<u>5.95</u>
坡中	3.73	3.97	<u>4.3</u>	4.69	5.11	<u>5.33</u>	5.53	<u>5.6</u>
坡顶	4.73	4.62	<u>4.6</u>	4.67	4.81	<u>4.9</u>	5	<u>5.03</u>

由表 2 可见, 拟合效果在坡面深度 10 cm 以下位置较为准确, 但是在 0~10 cm 位置结果存在较大误差(表格中斜体部分数据), 如当日零时刻的气温为 -0.7℃, 边坡 3 处位置浅层表面拟合计算的 温度范围却在 3.73℃~4.78℃, 因此, 拟合公式不适用于该时段边坡温度分布的推算。鉴于此, 以下通过小型土柱试验模拟边坡在低气温状况下, 0~10 cm 位置温度分布规律。

小型土柱试验思路为: 通过冻结 15 cm 高度土柱, 以 10 cm 位置现场试验结果为基准, 探究 10 cm 位置温度为 5℃左右时, 边坡浅层的温度分布规

律。试验制冷设备采用冰箱,测温设备采用热电偶及 DH3816 数据采集箱,土柱下边界及侧边界采用砂、棉絮隔温(模拟单向冻结),隔温以 10 cm 深度位置温度变化缓慢为标准,热电偶埋置深度分别为深度 2 cm、4 cm、6 cm、8 cm、10 cm 位置。试验如图 5、图 6 所示。



图 5 试验土柱
Fig.5 Soil columns sample



图 6 测温设备

Fig.6 Temperature measuring instrument

试验结果表明,当深度 10 cm 位置温度范围为 3 ℃~5 ℃时,各层间温度梯度如表 3 所示。

表 3 浅层温度梯度分布 ℃·cm⁻¹

Table 3 Temperature gradient of slope				
温度	深度/m			
	2~4	4~6	6~8	8~10
5.5 ℃	-1	-0.6	-0.3	-0.1
4.6 ℃	-1	-0.6	-0.3	-0.1
3.8 ℃	-1	-0.6	-0.4	0
平均值	-1	-0.6	-0.33	-0.07

从表 3 中可见,随着环境气温的降低,浅层范围内温度梯度的变化随着位置深度的增大而逐渐减小,表层 2 cm 位置至 4 cm 位置温度梯度可以达到 1 ℃/m,深度 8 cm 至 10 cm 位置上的温度梯度则基本为零。运用表 3 的试验结果,修正表 2 中浅层温度误差,结果如表 4 所示。

表 4 修正后边坡浅层深度温度变化规律 ℃·cm⁻¹

Table 4 Temperature variation of slope					
位置	with the correction				
	2 cm	3 cm	6 cm	8 cm	10 cm
坡脚	1.5	3.5	4.7	5.36	5.5
坡中	0.3	2.3	3.5	4.16	4.3
坡顶	0.6	2.6	3.8	4.46	4.6

基于表 4 以及表 2 的测试结果,运用 MATLAB 对边坡初始时刻温度分布规律进行拟合,可以得出二维尺度上边坡浅层初始温度的分布规律。为将得出的拟合函数直接应用于边坡水热耦合计算,取坡面水平深度为 x 轴,坡面位置垂直高度为 y 轴, x 轴向三次拟合, y 方向上二次拟合,得到拟合算式如式(18)^[18],拟合效果如图 7 所示。拟合的可决系数 R^2 为 0.982 9,拟合效果良好,可作为确定零时刻初始温度分布初始条件。

$$T(x,y) = 0.698\ 6 + 96.09x - 1.201y - 500.7x^2 + 3.432xy + 0.148\ 9y^2 + 799.6x^3 + 1.112x^2y - 0.553\ 2xy^2$$

(18)

式中: x 、 y 分别为坡面水平深度与垂直高度,m。

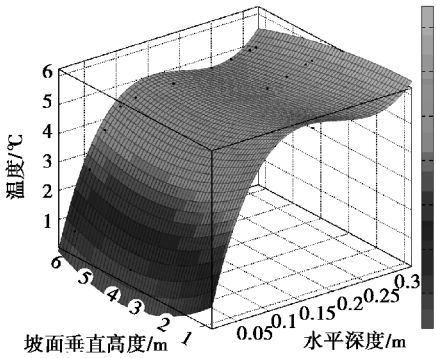


图 7 边坡浅层温度分布拟合三维图

Fig.7 Fitting result of temperature distribution of slope

3 计算结果与讨论

3.1 2013 年 12 月份典型气温冻融周期下土坡浅层水热状况

12 月份气温共发生 8 次气温冻融周期,选取 2013 年 12 月 26 日—2013 年 12 月 30 日气候作为该月典型冻融周期进行边坡浅层水热计算,计算结果如图 8 所示。

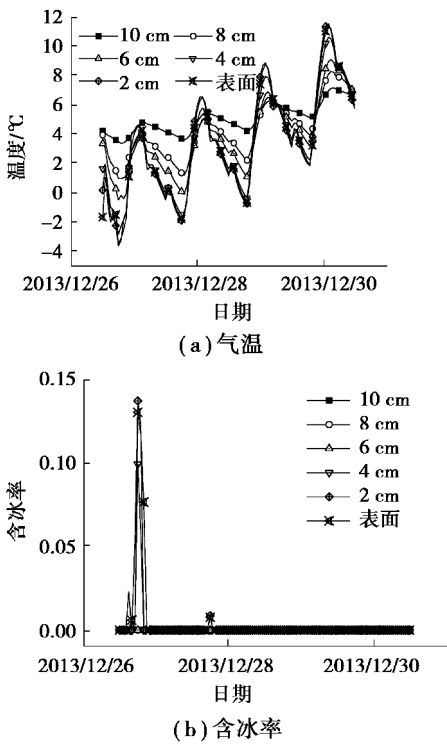


图 8 2013.12.27—2013.12.30 土坡浅层水热状况计算结果

Fig.8 Hydrothermal calculation results of shallow soil slope during 2013.12.27—2013.12.30

由图 8 可见:在 2013 年 12 月 26 日至 2013 年 12 月 30 日期间内,经历了 3 次 1 d 气温冻融周期,最低气温分别为 -4.4°C 、 -3.1°C 、 -2.1°C ,低于土体冻结温度(-1.9°C)的时间分别为 7 h、12 h、1 h;边坡浅层仅经历了 2 次冻融过程,第一次冻融发生在 12 月 27 日 3:00—8:00,最低温度为 -3.8°C ,第二次冻融发生在 12 月 28 日 6:00—7:00,最低温度为 -2.0°C ;边坡浅层两次冻融的最大含冰率分别为 0.14 和 0.01,冻结深度分别约为 5 cm 和 3 cm。虽然 12 月 28 日的气温低于土体冻结温度时间比 12 月 27 日更长,但由于 12 月 27 日的最低气温比 12 月 28 日低 1.2°C ,故 12 月 28 日最大含冰率和

冻结深度均比 12 月 27 日更低;12 月 29 日最低气温为 -2.2°C ,但土壤温度仅为 -1.7°C ,低于土壤冻结温度,因而边坡浅层未发生冻结情况。说明气温对于土壤冻结起主要因素,但气温低于土壤冻结温度的持续时间过短,土壤不易冻结。

3.2 2014 年 1 月份典型气温冻融周期下土坡浅层水热状况

1 月份气温共发生 6 次冻融周期,选取 2014 年 1 月 14 日—2014 年 1 月 24 日气候作为该月典型冻融周期进行边坡浅层水热计算,计算结果如图 9 所示。

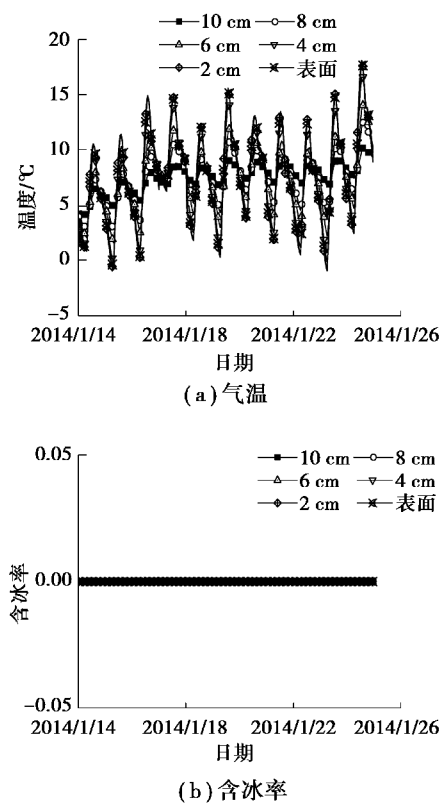


图 9 2014.1.14—2014.1.24 土坡浅层水热状况计算结果

Fig.9 Hydrothermal calculation results of shallow soil slope during 2014.1.14—2014.1.24

由图 9 可见:在 2014 年 1 月 14 日至 2014 年 1 月 24 日期间内,出现 6 次 1 d 气温冻融周期,日最低气温为 -2.9°C ,各气温冻融周期低于土壤冻结温度(-1.9°C)的持续时间均小于 1.5 h;边坡浅层未出现冻融现象,整个时期内边坡浅层含冰率恒为 0,虽然最低气温为 -2.9°C ,达到土壤冻结温度(-1.8°C),但由于气温低于土壤冻结温度的持续时间在 1 h 左右,且时间为早晨 7:00 左右,此时太阳辐射对土壤冻结开始产生作用,因而,本段时间

内边坡浅层土壤未冻结。说明即使土壤温度达到土壤冻结温度,若太阳辐射对边坡土壤冻结开始起作用,边坡土壤仍不易冻结。

3.3 2014年2月份典型气温冻融周期下土坡浅层水热状况

2月份气温共发生4次冻融周期,选取2014年2月8日—2014年2月21日间气候作为该月典型冻融周期进行边坡浅层水热计算,计算结果如图10所示。

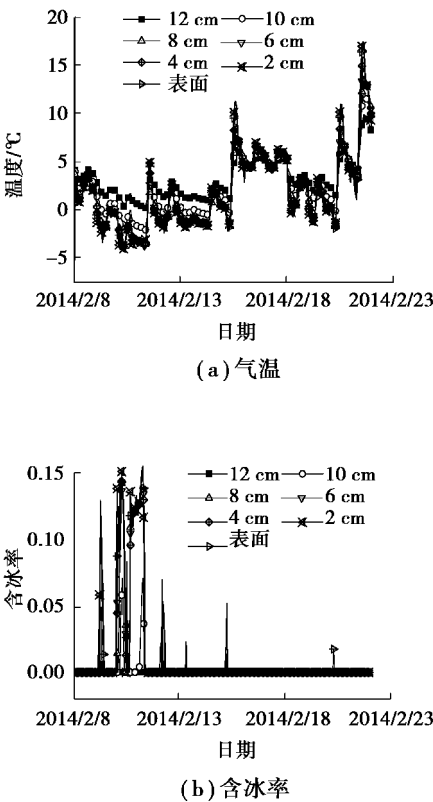


图 10 2014.2.8~2014.2.21 土坡浅层水热状况计算结果
Fig.10 Hydrothermal calculation results of shallow soil slope during 2014.2.8~2014.2.21

由图 10 可见:在 2014 年 2 月 8 日至 2014 年 2 月 21 日期间内,经历了 4 次气温冻融周期,分别为 1 次 6 d 冻融周期(2 月 9 日—2 月 14 日)、1 次 2 d 冻融周期(2 月 19 日—2 月 20 日)、2 次 1 d 冻融周期(2 月 8 日、2 月 15 日),最低气温为 $-4.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-4.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $-3.4\text{ }^{\circ}\text{C}$;边坡浅层土壤经历了 3 次冻融过程,其中,2 月 10 日 1:00—2 月 11 日 9:00 土壤经历了 32 h 左右的冻结时间,边坡浅层冻结深度达 12 cm,土壤最大含冰率达 0.16。说明即使日间存在太阳辐射,只要气温低于土壤冻结温度且持续时间足够长,土壤仍可冻结。

4 结论

(1) 监测区域内冻期总持续时间为 2013 年 12 月至 2014 年 2 月共 3 个月左右,期间共有 18 次气温冻融周期,其中 16 次为 1 d 气温冻融周期,1 次为 2 d 气温冻融周期,1 次为 6 d 气温冻融周期。

(2) 气温冻融周期内最低气温为 $-4.4\text{ }^{\circ}\text{C}$,最高气温为 $10.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,气温日较差最大达 $13.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。气温冻融周期内日辐射峰值范围为 $41\sim 827\text{ W/m}^2$,天气状况基本以多云天及阴天为主。气温冻融周期内平均风速为 $3.5\sim 3.7\text{ m/s}$,大气平均湿度较大,大气降温时伴随着下雨,导致空气中水汽接近饱和状态。

(3) 6 d 气温冻融周期内土壤冻结时间超过 32 h,最大冻深达 10 cm,土壤含冰率达 0.16;而 1 d 气温冻融周期下土壤最大冻结时间为 5 h,最大冻深为 5 cm,土壤最大含冰率为 0.14。因此,短时冻区应重点关注边坡浅层 10 cm 以内土壤强度的冻融损伤。

(4) 1 d 气温冻融周期内,土壤冻结时段一般为 3:00~8:00 之间,气温处于土壤冻结温度以下的持续时间,决定土壤含冰率峰值,如持续时间小于 1.5 h,土壤不易冻结。

(5) 1 d 气温冻融周期内,土壤冻结的开始时刻取决于最低气温,而土壤冻结持续时间取决于太阳辐射高低,若土壤冻结时间与太阳辐射时间相重叠,则即使土壤温度低于土壤冻结温度,边坡土壤仍不易冻结。因此,气温相近的同一路段,阳坡面与阴坡面在土壤冻结开始时刻与冻结持续时间存在较大差异。

参考文献 (References)

[1] 徐敦祖,王家澄,张立新.冻土物理学[M].北京:科学出版社.(Xu Xuezu, Wang Jiacheng, Zhang Lixin. Frozen Soil Physics [M]. Beijing: Science Press, 2010. (in Chinese))
[2] 缪海波,殷坤龙,邢林啸,等.极端冰雪灾害条件下松散堆积体边坡演化分析[J].岩土力学,2012,33(1): 147-154.(Miao Haibo, Yin Kunlong, Xing Linxiao, et al. Evolution analysis of loose debris slope under condition of extreme snow hazard[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(1): 147-154. (in Chinese))

- [3] 李远耀,柴波,缪海波.南方极端冰雪气候与地质灾害的关系分析[J].安全与环境工程,2012,19(6):22-28.(Li Yuanyao, Chai Bo, Miao Haibo. Correlation Analysis between Geological Disasters and Extreme Ice-snow Climate in Southern China [J]. Safety and Environmental Engineering, 2012, 19(6): 22-28. (in Chinese))
- [4] 王璐,孙云志,郭麒麟,等.南方极端冰雪气候条件下冻土特征[J].人民长江,2010,41(7):58-62.(Wang Lu, Sun Yuzhi, Guo Qilin, et al. Characteristics of frozen soil in South China under extreme climatic conditions of snow and ice[J]. Yangtze River, 2012, 43(9):58-62(in Chinese))
- [5] 郭麒麟,孙云志.南方短时冻土的热物理性质及抗压强度特征[J].人民长江,2012,43(9):51-54(Guo Qilin, Sun Yunzhi. Thermal physical performance and compressive strength characteristics of short-term frozen soil in southern area of China[J]. Yangtze River, 2012, 43(9):51-54.(in Chinese))
- [6] 王永忠,刘雄军,艾传井,等.南方短时冻土抗剪强度指标 C 、 φ 值的试验研究[J].武汉大学学报(工学版),2010,43(2):198-202(Wang Yongzhong, Liu Xiongjun, Ai Chuanjing, et al. Experimental investigation on shear strength parameters C and φ for a temporarily frozen soil in South China[J]. Engineering Journal Of Wuhan University, 2010, 43(2):198-202.(in Chinese))
- [7] 吴礼舟,许强,黄润秋.非饱和粘土的冻胀融沉过程分析[J].岩土力学,2011,32(4):1025-1028(Wu Lizhou, Xu Qiang, Huang Runqiu. Analysis of freezing-thawing test process of unsaturated clay[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(4): 1025-1028. (in Chinese))
- [8] Denisov Y M, Sergeev A I, Bezborodov G A, et al. Moisture evaporation from bare soils [J]. Irrigation and Drainage Systems, 2002, 16(3):175-182.
- [9] Harlan R L. Analysis of Coupled heat-fluid transport in partially frozen soil[J]. Water Resource, 1973, 9(5): 1314-1323
- [10] Campbell G S. A simple method for determining unsaturated conductivity from moisture retention data [J]. Soil science, 1974, 117(6):311-314
- [11] Bristow K L, Horton R. Modeling the impact of partial surface mulch on soil heat and water flow [J]. Theoretical and applied climatology, 1996, 54(1-2): 85-98.
- [12] 朱伯芳.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].北京:中国电力出版社,1999.(Zhu Bofang. Thermal stresses and temperature control of mass concrete[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999. (in Chinese))
- [13] Mu S, Ladanyi B. Modelling of coupled heat, moisture and stress field in freezing soil [J]. Cold Regions Science and Technology, 1987, 14(3):237-246
- [14] 郑秀清,樊贵盛,邢述彦.水分在季节性非饱和冻融土壤中的运动[M].北京:地质出版社,2002.(Zheng Xiuqing, Fan Guisheng, Xing Shuyan. Soil water transfer in seasonal unsaturated freezing and thawing soil[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002. (in Chinese))
- [15] 陈祖鑫.福建省花岗岩残积土路堤温湿耦合效应研究[D].福州:福州大学,2012.(Chen Zuxin. Research on the temperature and humidity coupling effect on the granite eluvial soil embankment in Fujian province[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2012.(in Chinese))
- [16] 严作人.层状路面体系的温度场分析[J].同济大学学报,1984,12(3):76-85.(Yan Zuoren. Analysis of the temperature field in layered pavement system [J]. Journal of Tongji University, 1984, 12(3): 76-85. (in Chinese))
- [17] Van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5):892-898.
- [18] 阙云,陈小鹏,荣耀.短时冻区气候下土坡浅层水热状况的数值分析[J].广西大学学报(自然科学版),2015,40(1):220-227(Que Yun, Chen Xiaopeng, Rong Yao. Numerical analysis on hydrothermal conditions of shallow soil slope under the climate of short-term frozen zone [J]. Journal of Guangxi University, 2015, 40(1): 220-227. (in Chinese))
- [19] 毛雪松,李宁,王秉刚,等.多年冻土路基水热力耦合理论模型及数值模拟[J].长安大学学报(自然科学版),2006,26(4):16-20(Mao Xuesong, Li Ning, Wang Binggang, et al. Numerical Analyses of Deformation and Stress Fields in Permafrost Regions [J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2006. 26(4):16-20.(in Chinese))