

浅层黄土冬季温度场的变化规律研究

张 辉¹, 王铁行², 罗 扬², 许 健²

(1. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055)

摘要: 通过季节冻土区浅层黄土现场温度测试, 研究了冬季浅层黄土温度场的变化规律. 测试得出: 较深处温度变化在冬季过后气温回升时有滞后性; 地面温度日变化幅度最大, 最大峰值温度出现在下午 2 时左右, 且随着深度增加, 出现峰值温度的时间逐渐向后推移; 土体温度的日变化随深度的增加逐渐减小, 超过 30 cm 可不考虑温度日变化; 给出了非饱和黄土温度场的计算方法, 总结阐述适用于渭北旱塬浅层土温度场计算参数的选取, 比较了渭北旱塬彬县的计算结果和实测结果, 验证了该数值计算方法及参数取值的合理性; 进一步模拟渭北旱塬不同气温, 讨论了最大冻深的变化规律, 并拟合得到了渭北旱塬最大冻深与气温的关系式.

关键词: 季节冻土区; 浅层黄土; 温度场; 数值分析

中图分类号: TU445

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2015)02-0245-05

Study on temperature field variation rule of shallow loess in winter

ZHANG Hui¹, WANG Tiehang², LUO Yang², XU Jian²

(1. School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China)

Abstract: Through field tests of shallow loess in seasonal frozen ground, temperature field variation in shallow loess is studied. Testing results show that temperature changes of deeper soil lags when temperatures rise after the winter. Temperature variation range of the ground surface is the largest. Maximum peak temperature appears at 14:00 or so. The peak temperature goes gradually backwards in time as the depth increases. The diurnal variation of the soil temperature decreased as the depth increases without considering temperature diurnal variation when the depth is more than 30 cm. A numerical model of temperature of unsaturated loess was given, and parameters of the model which applies to the Weibei upland were summarized. The comparison of calculation results with the tests results of Bin country in the Weibei upland indicates that the numerical calculation method is reasonable. Simulating different air temperatures in the Weibei upland, the changing law of the maximum frost depth was discussed, and the relationship between the maximum frost depth and air temperature in the Weibei upland was obtained by fitting.

Key words: seasonal frozen ground; shallow loess; temperature field; numerical analysis

黄土地区大多属于干旱、半干旱地区, 且属于季节冻土区, 受辐射, 湿度, 蒸发, 风速等自然因素影响浅层土温度场随季节变化较大, 特别是冬季土体温度低于 0℃ 时便会冻结, 土体的物理力学性质因冻结作用发生变化而导致一系列工程冻害问题, 例如水渠冻害; 冻胀形成的纵向裂缝和道路翻浆; 黄土高原地区黄土边坡剥落、溜方、滑塌等^[1-7]. 这些工程冻害的发生主要因为在冻结作用下发生水分迁移, 冻结区含水量增大, 冻结区的物理力学性质也随冻结融化过程发生很大变化而引起的. 水分迁移的发生过程就是未冻区水分在水头差的作用下向冻结锋面迁移的过程, 而对于密度、含水量一定的土体, 引起水头差的主要因素就是温度梯度, 因此研究温度场的变化是研究水分迁移以及由此引起的冻害问题的基础. 王铁行^[8-9]等在现有冻土理论、热力学

原理及流体力学理论等基础上, 提出了一套考虑风速、辐射和蒸发等多种自然因素及工程外表特征的温度场有限元数值模型与分析方法, 并以青藏高原和西安为例对浅层土温度场进行了数值分析, 但是模拟均是以月平均气温等参数进行计算, 得到每个月温度场平均值, 对于以天为单位计算黄土地区温度场的精度还需验证; Goodrich, Berg, Zarling 等人, Heinz 和 Fang^[10-13]先后对各种边界因素的温度场进行了研究, 得到了再加拿大和阿拉斯加冻土区考虑风速、辐射和蒸发等因素的差分方程, 但仅限与一维问题; 高玉佳等人^[14]对吉林粉质粘土浅层土体温度场变化进行了监测, 简单探讨了温度的变化规律; 唐朝生等人^[15]利用自主开发的土体温度物理模型试验系统, 以南京地区的下蜀土为对象, 研究了土体剖面温度随时间的变化规律, 但是整个试

收稿日期: 2013-08-12

修改稿日期: 2015-04-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(51078309, 51208409); 陕西省教育厅专项科研计划项目(12JK0914)

作者简介: 张辉(1986-), 男, 博士, 讲师, 主要从事黄土及冻土工程理论及实践研究. E-mail: 0107zhanghui@163.com

验是在正温下进行了,没有冻结作用下温度场的变化规律.目前在工程方面对于黄土高原地区浅层黄土冬季温度场变化规律研究尚少,基于此,本文通过现场测试研究黄土地区浅层土冬季温度场变化规律,并对此进行考虑自然因素的数值计算,总结阐述适用于渭北旱塬浅层土温度场计算参数的选取,并与实测值比较,验证该数值模型的合理性.

1 冬季温度场现场测试研究

1.1 现场场地概况

现场测试以彬县、铜川、洛川各地各取一个测试点.彬县测试点为黄土塬上平地,经度为E108°4'52",纬度为N35°10'48",表层有小草覆盖,如图1所示;洛川测试点为黄土塬侧边坡阴坡坡脚平台,冲沟前缘地带,经度为E109°24'25",纬度为N35°51'35";铜川测试点为一冲沟前缘地带,经度为E109°06'57",纬度为N35°7'49";三个场地的植被覆盖率相似.场地浅层土均为粉质粘土,黄褐色,地下水位较深,其基本物理参数如表1.

表1 基本物理指标
Tab.1 Basic physical index

地点	干密度 /g cm ⁻³	平均含水量 /%	液限 /%	塑限 /%	塑性 指数
洛川	1.53	21.2	30.74	18.03	12.74
铜川	1.50	18.5	29.71	17.75	11.96
彬县	1.55	21.5	30.90	18.10	12.80

1.2 测试方法

预先在土层1 m范围内每隔10 cm埋设温度传感器,适时测不同深度处的温度,人工读取数据.传感器采用北京朝阳自动化仪表厂生产的热电阻ZWP Pt100温度传感器,测温范围为-30℃~+85℃,精度为0.1℃.图1为现场读温度数据.为了更好的反映冬季浅层土温度的变化,地温的测试时间从2011年12月15日开始到2012年3月10日,且测试浅层土温度的日变化值.



图1 现场温度测试
Fig.1 Test temperature

1.3 地表土温度场测试结果

按照上述测试方案,得到浅层黄土随时间的变化结果如图2~4所示.图2中温度均为当天温度平均值.

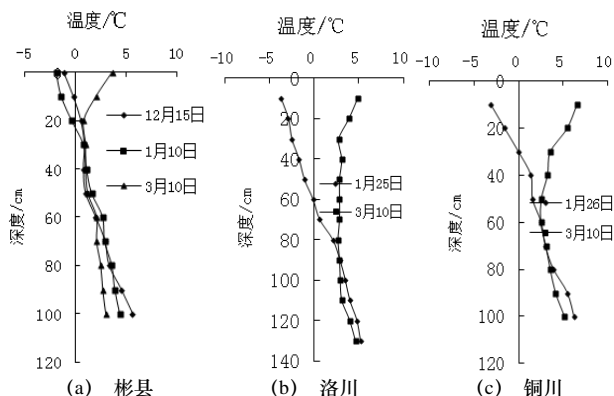


图2 不同地点浅层黄土温度随时间的变化
Fig.2 Temperature variation of shallow loess with time in different locations

从图2中可以看出该场地在冬季随着时间推移地表土温度降低,冻土深度越来越大,彬县在1月10日冻深为26 cm,洛川1月25日冻深61 cm,铜川1月26日冻深28 cm.到3月10号,气温已经回升到正温,表层土温度上升,已没有冻土,但是彬县50 cm以下,洛川90 cm以下,铜川60 cm以下较深处温度反而降低,这是由于随着气温的升高,土气热量交换,但土体热传导能量需要时间,因此较深层的土体还在原来的条件下继续缓慢降低,从宏观上看较深处的温度变化具有滞后性.

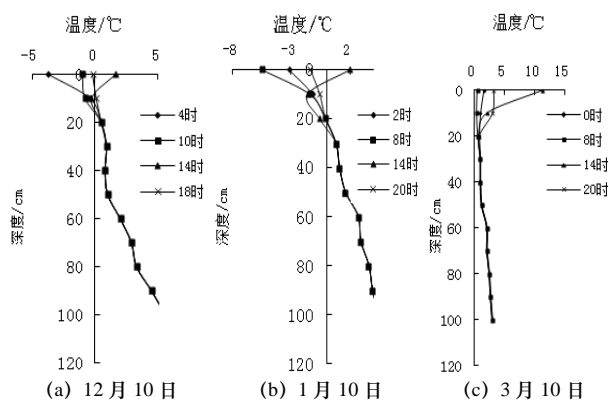


图3 彬县地温随深度日变化
Fig.3 Ground temperature diurnal variation with depth in Binxian County

从图3和图4中可以看出随着深度增加,温度日变化幅度逐渐减小.地面温度日变化幅度最大,最大峰值温度出现在下午2时左右,且随着深度增加,出现峰值温度的时间逐渐向后推移.冬季地面约5 cm深度左右因冻融相变影响,其温度日变化过程比较复杂,每日经历一次冻结融化过程.当深度大于20 cm时,温度日变化幅度已经很小,当深

度大于 30 cm 时,温度日变化幅度几乎为 0,可不考虑其日变化问题,只考虑温度随季节的变化问题。图 3 和图 4 中 (b) 图 14 时地表 10 cm 到 20 cm 范围内温度曲线出现交叉现象,即当地面温度升高

到最大时,10~20 cm 范围内土体温度反而降低,这是由于气温的日变化在地表土体热传导过程中滞后性造成的。

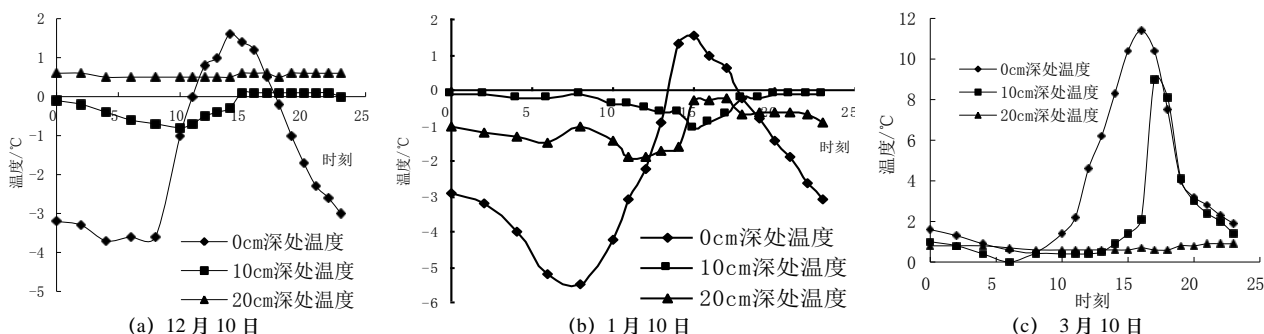


图4 彬县地表不同深度处温度日变化

Fig.4 Diurnal variation of temperature at earth's surface in Binxian County

2 考虑气温影响的最大冻深数值分析

辐射、蒸发、湿度、风速等气候因素随时间是变化的,受此影响,浅层土温度场属非稳态相变温度场,其基本方程如下:

$$([K] + \frac{[N]}{\Delta t})\{T\}_t = \{P\}_t + \frac{[N]}{\Delta t}\{T\}_{t-\Delta t} \quad (1)$$

式中: $[K]$ 为温度刚度矩阵; $[N]$ 为非稳态变温矩阵; $\{T\}$ 为温度值的列向量; Δt 为时间步长; $\{P\}$ 为合成列阵; 下标 t 表示时间。

采用等参四边形单元,刚度矩阵和变温矩阵参数确定如下:

$$k_{l,n} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \frac{\lambda}{16|J|} (D_2 \frac{\partial H_n}{\partial \xi} + D_1 \frac{\partial H_n}{\partial \eta}) d\xi d\eta + A\alpha s \quad (2)$$

($l, n = i, j, k, m$)

$$n_{l,n} = \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \rho C_p |J| H_l H_n d\xi d\eta \quad (l, n = i, j, k, m) \quad (3)$$

式中: i, j, k, m 为单元节点; λ 为导热系数; ρC_p 为容积比热容; $|J|$ 、 D_1 、 D_2 、 H 都是积分基点坐标 (ξ, η) 的函数,与节点坐标有关; α 为对流换热系数; s 为换热边界长; A 对非第三类边界取 0,对第三类边界, l 等于 n 时, A 取 $1/3$, l 不等于 n 时 A 取 $1/6$ 。导热系数和容积比热容的取值采用王铁行^[16]的研究结果按下式取值:

$$\lambda = (4.17w^2 + 1504)10^{0.25\rho_d^{-3.9}} \quad (4)$$

$$C = \rho_d (1.27 + 0.021w)10^3 \quad (5)$$

列阵 $\{P\}$ 参考有关文献[8],确定 $\{P\}$ 由四项组成,按下式进行计算:

$$\{P\} = \{P_1\} + \{P_2\} + \{P_3\} + \{P_4\} \quad (6)$$

式中: $\{P_1\}$ 为相变列阵; $\{P_2\}$ 为辐射换热列阵,由太阳短波辐射列阵 $\{P_{2S}\}$ 、大地长波辐射列阵 $\{P_{2E}\}$ 和大气长波辐射列阵 $\{P_{2A}\}$ 构成; $\{P_3\}$ 为对流换热列阵; $\{P_4\}$ 为蒸发耗热列阵。

$$P_{li} = \sum_{s=1}^2 \sum_{t=1}^2 \omega_s \omega_t \frac{\rho L}{\Delta t} (\Delta f)_l |J| H_l |_{\xi_s, \eta_t} \quad (7)$$

$$\{P_2\} = \{P_{2S}\} + \{P_{2E}\} + \{P_{2A}\} \quad (8)$$

$$(P_{2S})_l = Q_h (1 - \lambda_1) \cdot s / 2 \quad (9)$$

$$(P_{2E})_l = -l_1 \times 4.88 \times 10^{-8} \times (273 + T)^4 \cdot s / 2 \quad (10)$$

$$(P_{2A})_l = l_2 \times 4.88 \times 10^{-8} \times (273 + T_a)^4 \cdot \beta' \cdot s / 2 \quad (11)$$

$$(P_3)_l = \alpha \cdot s \cdot T_a / 2 \quad (12)$$

$$(P_4)_l = U \cdot G \cdot s / 2 \quad (13)$$

式中: l 为第三类边界结点; $(\Delta f)_l$ 为节点 l 在时间间隔 Δt 内固相率的变化值; L 为相变潜热; ω_s 、 ω_t 为权数; ρ 为密度; Q_h 为地平面每平方米受到的太阳辐射量; λ_1 为地面对太阳辐射的反射率; l_1 、 l_2 分别为大地、大气辐射黑度; β' 为大地对大气辐射的吸收率; T 、 T_a 分别为地面和大气温度; U 为地表土面蒸发量, G 为水的气化潜热。

查阅气象资料可得地表水平面每平方米太阳辐射量,表 2 为根据 30 年的气象资料得到的渭北旱塬冬季每旬平均太阳辐射量。

表2 彬县地区太阳辐射量(MJ/m²)
Tab.2 Solar radiation energy in Binxian Area

时间	太阳辐射	时间	太阳辐射
12月中旬	76.2	12月下旬	73.1
1月上旬	69.7	1月中旬	47.9
1月下旬	80.8	2月上旬	95.3
2月中旬	84.4	2月下旬	99.2
3月上旬	128.2		

参考有关文献[9],取大地辐射黑度 $l_1=0.68$.大气辐射黑度 l_2 与大地对大气辐射的吸收率 β' 的取值比较复杂,其值与气温、云量、湿度、粉尘含量等因素有关.气温和湿度不仅可以反映空气中水蒸气的多少,也可以反映云量和空气质量.因此,本文选取气温和湿度作为气候的特征指标确定 l_2 与 β' ,经拟合气象实测天然地表温度,并考虑到公式(9)中 l_2 与 β' 作为一个整体,得到 $l_2\beta'$ 的确定关系式:

$$l_2\beta' = f + 0.006T_a + 0.004S_d \quad (14)$$

式中: T_a 为气温, $^{\circ}\text{C}$; S_d 为相对湿度,%; f 为综合考虑其他因素影响的区域性系数,渭北旱塬取值0.25.

对流换热系数 α 由自然对流和强迫对流两部分组成,对流换热系数按下式计算:

$$\alpha = 5.7 + 4.1V \quad (15)$$

式中:风速 V 单位 m/s ; 换热系数单位 $\text{W}/(\text{m}^2\text{ }^{\circ}\text{C})$.

土面蒸发量可按下式计算:

$$U = (-0.1 + 0.118w - 0.0043w^2)u_w \quad (16)$$

式中: w 为土表面含水量; u_w 为水面蒸发量.

表3 气温和相对湿度

Tab.3 Air humidity and atmospheric temperature

月份	T_a	S_d
12	-3.2	65
1	-5.0	59
2	-2.1	62
3	4.5	63

浅层黄土温度场受多种因素影响,但在同一区域,极端气候对黄土最大冻深的影响主要是气温的影响.以渭北旱塬彬县为例,彬县地区冬季平均气温及相对湿度见表3.以彬县12月15日实测数据为已知温度场,时间步长取1d,采用上述方法计算冬季温度场的变化过程,计算结果如图5所示.

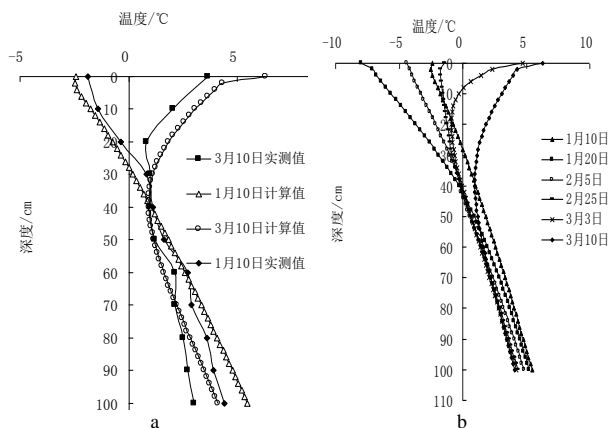


图5 数值计算结果

Fig.5 The results of numerical calculation

从图5 (a) 中可看出,1月10日和3月10日计算值和实测值比较吻合,说明上述数值计算方法是合理的.从图5 (b) 中可以看出最大冻深约42 cm,从12月开始,表层土温度越来越低,到1月下旬降到最低,之后土体温度开始回升,到3月10日土体已经全部回到正温.同实测规律一样,较深处的温度随气温的回升因导热的滞后性反而降低.

进一步考虑极端气温对彬县最大冻深的影响,分别取一月份气温为 -8°C , -11°C , -15°C 计算最大冻深,结果如表4所示.

表4 气温和最大冻深

Tab.4 Atmospheric temperature and the maximum frost depth

气温/ $^{\circ}\text{C}$	最大冻深/cm
-5	42
-8	58
-11	66
-15	72

从表4 中可看出最大冻深随气温的降低而增大,但增大的幅度减小,对最大冻深与气温的关系进行拟合,拟合式如式(17)所示,相关系数为0.9561,可见采用式(17)拟合气温和最大冻深的关系式可行的.

$$h = 18.3 \times \sqrt{T_a} + 3.7 \quad (17)$$

式中: h 为最大冻深(cm), T_a 为气温的绝对值($^{\circ}\text{C}$),该气温指距地面1.5 m处的大气温度.式(17)适用于预估渭北旱塬气温为 $-5 \sim -15^{\circ}\text{C}$ 的最大冻结深度.

陕西渭北旱塬是黄土高原中地势较平坦的部分.影响地温变化的气候因素很多,但影响最大的气候因素是太阳辐射和气温,对于渭北旱塬地区,太阳辐射相差不大,气温就成了影响浅层黄土温度的主要因素,因此式(17)可用来估计渭北旱塬地区不同气温下最大冻结深度.

3 结论

通过季节冻土区现场测试浅层黄土温度场的变化,开展了冬季浅层黄土温度场的变化规律.测试得出:在冬季随着时间推移地表土温度降低,冻土深度越来越大;随着冬季过后气温回升,较深处土体温度变化存在滞后性;随着深度增加,温度日变化幅度逐渐减小.地面温度日变化幅度最大,最大峰值温度出现在下午2时左右,且随着深度增加,出现峰值温度的时间逐渐向后推移.给出了非饱和黄土的温度场计算方法,总结阐述适用于渭北旱塬浅层土温度场计算参数的选取,比较了渭北旱塬彬县的计算结果和实测结果,验证了该数值计算方法及参数选取

的合理性。进一步模拟渭北旱塬不同气温,讨论了最大冻深的变化规律,并拟合得到了渭北旱塬最大冻深与气温的关系式。

参考文献 References

- [1] 谢定义. 试论我国黄土力学研究中的若干新趋向[J]. 岩土工程学报, 2001, 23(1): 3-13.
XIE Dingyi. Exploration of some new tendencies in research of loess soil mechanics[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2001, 23(1): 3-13.
- [2] 张冬青, 张喜发, 辛德刚, 等. 季节冻土区高速公路路基含水状况与冻害调查[J]. 公路, 2004(2): 140-146.
ZHANG Dongqing, ZHANG Xifa, XIN Degang, et al. Investigation on frost damage and water-bearing condition of expressway subgrade in seasonally frozen soil region[J]. Highway, 2004(2): 140-146.
- [3] 王铁行, 王娟娟, 张龙党. 冻结作用下非饱和黄土水分迁移试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2012, 44(1): 7-14.
WANG Tiehang, WANG Juanjuan, ZHANG Long-dang. Experimental research on moisture migration in freezing unsaturated loess[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2012, 44(1): 7-14.
- [4] KAY B D M, FUKUDA. The importance of water migration in the measurements of the thermal conductivity of unsaturated frozen soils[J]. Cold Region Science and Technology, 1981(5): 95-106.
- [5] 王念秦, 罗东海. 黄土斜(边)坡表层冻结效应及其稳定性响应[J]. 工程地质学报, 2010, 18(5): 760-765.
WANG Nianqin, LUO Donghai. Freezing effect on loess slope and its stability response[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(5): 760-765.
- [6] 罗东海. 冻融期黄土滑坡实验研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2010.
LUO Donghai. Experiment for loess landside of freezing-thawing[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2010.
- [7] 马世雄. 冻融作用对黄土边坡剥落影响的试验研究[D]. 西安: 西安科技大学, 2012.
MA Shixiong. Experimental study of freezing-thawing to spalling of loess slope[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2012.
- [8] 王铁行, 刘自成, 岳彩坤. 浅层黄土温度场数值分析[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2007, 39(4): 463-467.
WANG Tiehang, LIU Zicheng, YUE Caikun. Thermal regime in shallow soil strata in loess plateau[J]. J. Xi'an University of Architecture and Technology: Natural Science Edition, 2007, 39(4): 463-467.
- [9] WANG Tie-hang, HU Chang-shun, LI Ning. Numerical analysis of ground temperature in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Science in China (ser. E), 2002, 45(4): 433-443.
- [10] GOODRICH L E. An introductory review of numerical methods for ground thermal regime calculations[R]. Ottawa, Canada: Nation Research Council of Canada, 1982.
- [11] BERG R L. Effect of color and texture on the surface temperature of asphalt concrete pavements[M]. Fairbanks, USA: Alaska Department of Transportation and Public Facilities, 1986.
- [12] ZARLING J P, BRALEY W A, PELZ C. The modified Berggren method-a review[C]//Proceedings of the Fifth International Conference on Cold Regions Engineering. New York: American Society of Civil Engineering, 1989: 267-273.
- [13] HEINZ G S, FANG X. Simulated climate change effects on ice and snow covers on lakes in a temperature region[J]. Cold Regions Science and Technology, 1997, 25: 137-152.
- [14] 高玉佳, 王清, 陈慧娥, 等. 温度对季节性冻土水分迁移的影响研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(5): 698-702.
GAO Yujia, WANG Qing, CHEN Huie, et al. Effect of temperature on migration of water in seasonal frozen soils[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(5): 698-702.
- [15] 唐朝生, 施斌, 高磊, 等. 土体剖面温度物理模型试验研究[J]. 工程地质学报, 2010, 18(6): 913-919.
TANG Chaosheng, SHI Bin, GAO Lei, et al. Physical model testing of temporal variation of soil temperature in depth[J]. Journal of Engineering Geology, 2010, 18(6): 913-919.
- [16] 王铁行, 刘自成, 卢靖. 黄土导热系数和比热容的实验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(4): 654-658.
WANG Tiehang, LIU Zicheng, LU Jing. Experimental study on coefficient of thermal conductivity and specific volume heat of loess[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(4): 654-658.

(本文编辑 桂智刚)