

文章编号:0253-4339(2019)04-0135-09
doi:10.3969/j.issn.0253-4339.2019.04.135

地铁隧道围岩土体蓄放热特性各影响因素显著性研究

王丽慧¹ 张 媛¹ 杜志萍² 张雨蒙¹ 高仁义¹ 郑 懿³ 宋 洁³

(1 上海理工大学环境与建筑学院 上海 200093; 2 上海东方延华节能技术服务股份有限公司 上海 200060;
3 上海申通地铁集团有限公司技术中心 上海 202150)

摘 要 地铁区间隧道空气温度受围岩土体影响较大,而地铁区间隧道围岩土体温度分布又受许多因素的影响,为了更准确地得到围岩土体热库与传热的演化规律,需要了解各因素对传热的影响程度。本文采用 CHAMPS-BES 软件进行数值模拟,通过改变土体和空气温度对围岩传热影响的因素,利用正交试验法分析讨论各因素对围岩土体温度分布特性的影响程度和显著性,发现土壤导温系数对围岩土体热库峰值位置的影响为非常显著,当土壤导温系数为 $7.6\times10^{-7}\text{ m}^2/\text{℃}$ 时传热较快,连续运营 20 年热库厚度已超出了 50 m 的范围;在已有研究基础上,研究不同地区隧道围岩土体热库特性及蓄热量变化,得知地理位置越北,土体初始温度越低,对应的土体热库特性变化越显著,土体的年净蓄热量也越大,哈尔滨地区约为 $1.023\times10^5\text{ MJ}$,相当于列车散热量的 1.8%,但整体上土体年净蓄热量随着运营年限的增大而逐渐减小。

关键词 地铁隧道;围岩土体;蓄放热;正交试验;土壤导温系数

中图分类号:TK124;U231.51; U451+.2 文献标识码: A

Simulation Study on the Influence Factors of Thermal Characteristics of Surrounding Rocks in Subway Tunnels

Wang Lihui¹ Zhang Yuan¹ Du Zhiping² Zhang Yumeng¹ Gao Renyi¹ Zheng Yi³ Song Jie³

(1. School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, 200093, China; 2. Shanghai DFYH Tech Services Co., Ltd., Shanghai, 200060, China; 3. The Technological Centre of Shanghai Shentong Metro Group Co., Ltd., Shanghai, 200000, China)

Abstract The air temperature in a subway tunnel is influenced by the surrounding rocks. The temperature distribution in the surrounding rock is affected by many factors. To obtain the evolution trend of the heat transfer and thermal reservoir of the surrounding rocks, we need to understand the influence of various factors on the heat transfer. In this study, the CHAMPS-BES software is used to simulate the effect of the soil property and air temperature on the heat transfer in the surrounding rocks and the significant degree of influence of various factors on the temperature distribution characteristics in the surrounding rocks using an orthogonal experimental method. We find that the influence of the soil thermal diffusivity on the peak position of the surrounding rocks is very significant. When the soil thermal diffusivity is $7.6\times10^{-7}\text{ m}^2/\text{℃}$, the heat transfer is faster, and the thickness of the heat sink for 20 years exceeds the range of 50 m. On the basis of this research, the study on the characteristics of heat storage and change of the heat storage in the surrounding rocks in different regions reveals that the soil in north area has lower initial temperature, and the annual net heat storage of the soil is greater. In the Harbin area, the annual net heat storage of the soil is approximately $1.023\times10^5\text{ MJ}$, which is equivalent to 1.8% of the train heat dissipation. However, the annual net heat capacity of the soil gradually decreases with the increase in the operation years.

Keywords subway tunnel ; surrounding rock and soil; thermal storage; orthogonal test; soil thermal diffusivity

随着地铁运营时间的增长,列车在区间隧道内的散热量不断累积,远期运行地铁隧道内空气温度过高的现象日益突出,这不仅增大了地铁正常运行环控系统的能耗,还会带来车厢空调跳停的安全隐患。区间隧道多深埋在距离地表 15~20 m 的位置,上海地区

的区间隧道土体初始温度一般约为 15 ℃ ^[1],列车在行驶过程中放热量是区间温升的主要热源^[2],而区间周围半无限大土体的蓄放热能力随运行年限的演化是导致区间温升逐年变化的根本原因^[3-5]。因此,隧道围岩半无限大土体蓄放热能力的演化特性是有

效控制区间温度的根本。

既有研究采用现场实测,实验台缩尺模型模拟,理论分析和数值模拟等方法进行围岩土体温度场及隧道空气温度分布等相关研究。乔恒君^[6]估算列车运行发热量并建立物理模型,初步估算围岩吸热量占区间总热量的 26.4%。肖琳等^[7]利用模型实验研究了地铁围岩内土体热导率值 $1.048\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。王海彦等^[8-9]通过对隧道内有限范围的围岩体温度场的理论分析,得出隧道土体内各位置的温度变化规律。冯炼^[10]采用一维非稳态对流扩散模型,建立离散方程研究了隧道内空气温度场的分布特征。刘晶^[11]利用谐波法将隧道内的各种扰量当作周期性变化处理,定性分析了地铁隧道内空气温度的变化和地铁围岩壁面的温度变化,计算了地铁围岩的传热量。Wang Lihui 等^[12]搭建缩尺模型实验台分析了空气侧温度周期动态变化下,地铁隧道新建到远期 17 年的隧道围岩土体热库变化,指出实际地铁隧道模型中围岩土体热库厚度稳定在 20 m,热库峰值稳定在 $22.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,热库特征厚度稳定在 2 m。现有研究主要关注围岩传热量和围岩温度场分布,较少关注地铁区间隧道围岩土体温度与蓄放热量随运营年限的演化规律。

本文采用 CHAMPS-BES 模拟软件,利用正交试验方法,分析讨论土壤导温系数、空气温度振幅、空气温度相位对围岩土体温度演化特性的影响程度和显著性。针对不同地区的地铁隧道围岩土体热库特性及蓄热量变化进行对比,为改善远期运行的地铁区间隧道热环境提供参考,实现地铁环控系统节能减排可持续发展的目的。

1 数值模拟与验证

1.1 物理模型与边界条件

利用 CHAMPS-BES 软件建立模型,模型与实验台比例为 1 : 1,如图 1 所示。建立模型时进行如下假设:1)假设隧道土体处于不受地面空气温度影响的恒温层内;2)不考虑地下水渗流作用;3)模拟前,整个土壤层初始温度相同。该物理模型由围岩土壤、空气等组成。在物理模型结构中, X 轴方向取 0.32 m, Y 轴方向取 1 m, Z 轴方向取 0.3 m,空气温度作用于 X 轴表面,流动方向沿 X 轴正方向。地铁围岩传热计算模型采用多层平壁模型,温度分布为深度和时间的函数,空气与土壤的耦合传热简化为沿土壤深度方向的传热^[13]。

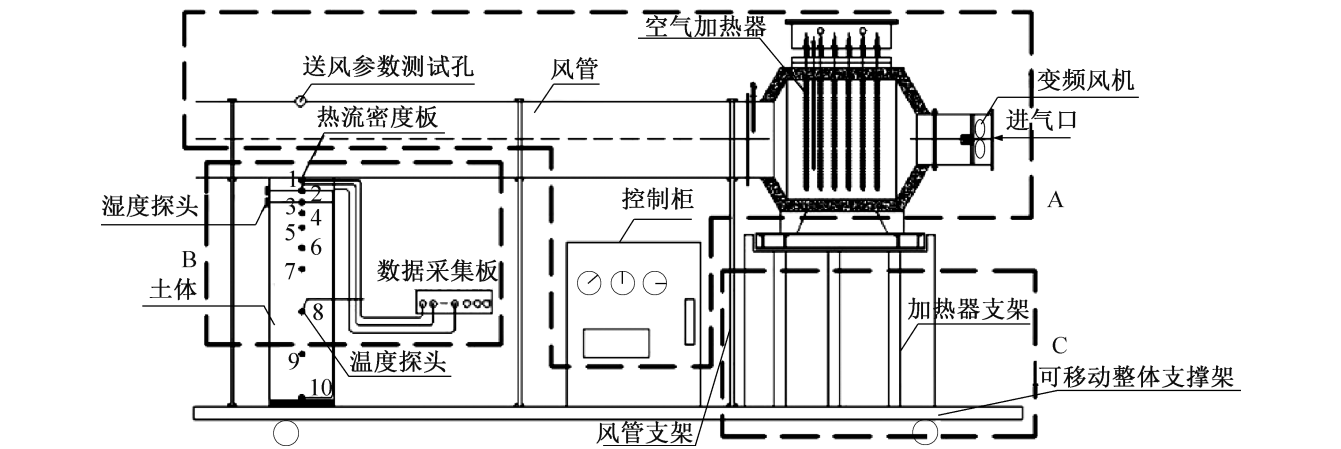


图 1 土体深度方向土体蓄放热缩尺模型实验台原理
Fig.1 The principle of soil heat storage scale experimental platform for soil depth direction

空气侧边界条件采用对隧道空气温度实测的数据,如图 2 所示。土壤导热过程遵循傅里叶准则,即时间相似比是几何相似比的平方;本文选取几何相似比为 1 : 20,则可得出时间相似比为 1 : 400,即实验台上 1 h 对应实际隧道运行 400 h,一年按 360 d 计算时,共计 8 640 h,按 1 : 400 计算,实际一年运行时间在实验台上为 21.6 h,平均作用于每个月上,则每个月的作用时间为 1.8 h。现每隔 1.8 h(相当于实际 1 个月时间)设定一个温度值,21.6 h 为一作用周期(实际 1 年时间),连续作用 15 个周期(实际 15 年),

模拟地铁从新建到远期运营过程。空气的相对湿度设定为恒定值 60%。风速取定值 1 m/s。空气与围岩壁面的换热为第三类边界条件,对流换热表面传热系数为 $8.38\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C})$ 。

土壤侧边界条件主要包括土壤初始温度、初始含水率、土壤导热系数等。本研究选用上海地铁某新建隧道和远期运营隧道内空气温度的实测值作为实验台的空气温度边界条件,推算出隧道中期空气温度,取每个月平均温度作为实验台的空气温度,每 5 年为一个运营阶段,分别代表新建期、运营中期、远期运

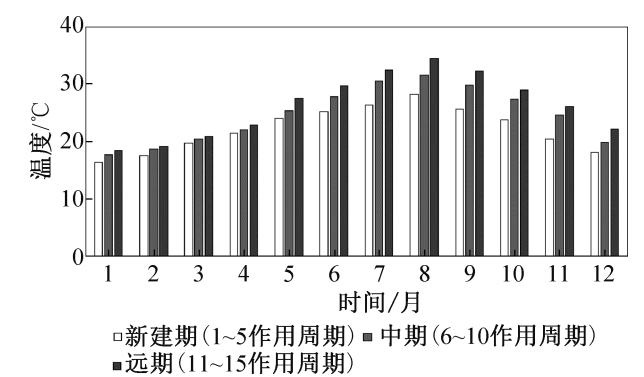


图 2 数值模拟空气侧逐月温度边界条件
Fig.2 Numerical simulation of air side of monthly temperature boundary conditions

营;实验台和相应数值模拟中所用土体取自上海某地铁区间隧道施工现场,实验测得该土壤为粘性土壤,初始温度为 14.3℃,初始土壤含水率为 0.426,密度为 1 782 kg/m³,导热系数为 1.02 W/(m·℃),比热为 1 940 J/(kg·℃),对应实际深度为 50 m。

1.2 缩尺模型实验验证

为验证 CHAMPS-BES 软件建立物理模型模拟的准确性,建立了缩尺模型实验台^[14],在遵循傅里叶相似准则的基础上,通过几何缩尺和时间缩尺模型实验台以空气和土体对流换热为边界条件,土体深度方向温度场随时间变化为研究对象,以研究实际地铁隧道围岩土壤温度场逐年演化规律及热量传递过程,并验证模拟物理模型的正确性。实验装置主要由 3 部分组成:空气加热及送风装置(A)、土体及温湿度和热流密度采集装置(B)、实验台支撑框架(C),实验原理如图 1 所示。

空气加热及送风装置(A)主要由变频风机、空气加热器、控制柜、风管、送风参数测试孔构成,空气加热器和变频风机通过导线与控制柜相连,送风温度、湿度、风速等送风参数由送风参数测试孔伸入相应参数测试仪器获得,可伸入的参数测试仪器包括热线风速仪、空气温湿度记录仪。土体及温湿度采集装置(B)主要由土壤表面热流密度探头、土壤湿度探头、土壤温度探头、土体、数据采集板构成,热流密度板布置在空气与土壤接触的表面。实验台支撑框架(C)主要由风管支撑架、加热器支撑架、可移动整体支撑架构成,所有的装置放置在可移动整体支撑架上面,且可拆卸移动。送风管、土体装置表面包裹 3 cm 厚的保温材料(如聚苯乙烯泡沫塑料);风管和土体用螺母对接,在土体底端 4 个角分别焊接可拧动螺母,通过扳手拧动 4 个螺母使土体升高或降低,方便安装和拆卸。

实验过程中土壤热湿传递实验台置于恒温恒湿室,空气从恒温恒湿室送风系统进入,依次经过变频风机、空气加热器、风管,风管出口与恒温恒湿室排风口相连;利用变频风机调节风速,通过空气加热器调节空气温度,恒温恒湿室空调箱调节温度的降低,同时也可以调节空气湿度,空气经过风管时掠过土壤表面,反应实际隧道模型土壤热湿传递过程。

图 3 所示为第 1 周期末、第 5 周期末、第 10 周期末、第 15 周期末的模型实验结果与 CHAMPS-BES 软

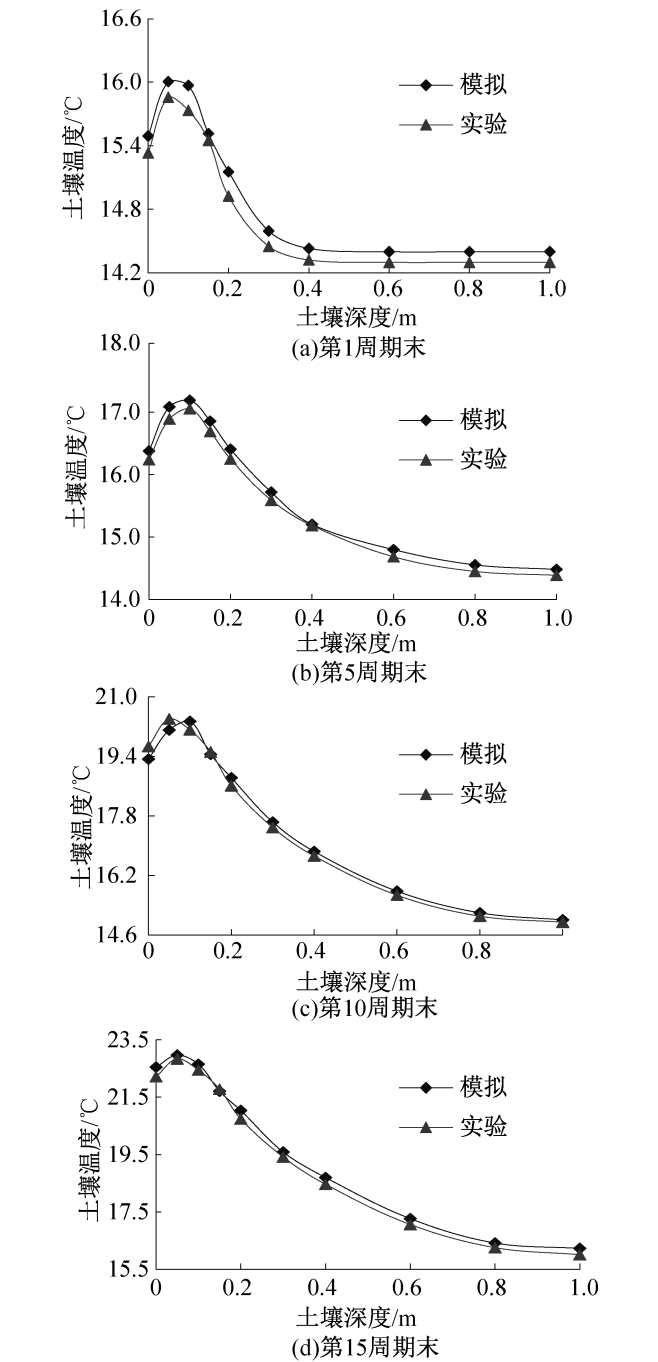


图 3 各典型周期末实验与模拟土壤温度分布结果对比
Fig.3 Comparison of experimental and simulated soil temperature distributions at the end of typical cycle

件模拟结果的对比。

第 5、10、15 周期土壤热库曲线分别代表空气温度在工况一(新建期)、工况二(中期)、工况三(远期)连续作用 5 个周期时每个工况下第 5 个周期内土壤内部温度分布。由图 3 可知,每种工况下,土壤年净蓄热量以指数形式变化,但整体上,随着空气温度的升高,土壤净蓄热量逐渐升高,实验结果与模拟结果之间总体平均误差在 3%之内,且软件模拟结果与实验结果偏差随土壤深度的增加而减小,由上述模拟结果与实验结果温度场分布规律的一致性,验证了软件模拟中土壤传热特性的可靠性,并用该软件物理模型进行后续变工况模拟分析。

2 正交试验法分析区间围岩土体蓄放热量影响因素

2.1 正交试验设计

2.1.1 制定因子水平表

影响地铁隧道围岩传热的因素众多,归纳起来可以分为空气侧参数和土壤侧参数两类影响因素,其中空气侧参数包括对流换热表面传热系数、空气温度振幅、空气温度分布相位等,土壤侧参数主要包括土壤比热容、导温系数、密度、容积含水率等。隧道围岩土体温度分布公式:

$$\theta(x,\tau)=A_r\phi\exp(-x\sqrt{\frac{\pi}{\alpha\tau}})\cos(\frac{2\pi}{T}\tau-x\sqrt{\frac{\pi}{\alpha T}}-\varphi)$$

(1)

式中: $\theta(x,\tau)$ 为距隧道表面 x 米处 τ 时刻的过余温度,实际温度与波动周期内的平均温度 t_m 的差值,即 $\theta=t-t_m$,℃; A_r 为隧道空气温度的振幅,℃; A 为围岩土体的导温系数, $\alpha=\lambda/\rho c$, m^2/s ; T 为隧道空气温度波动周期, s ; τ 为计算时间, s ; ϕ 为围岩表面温度波振幅与空气温度波振幅的比值,即 $\phi=A_w/A_r$; φ 为围岩表面温度波落后于空气温度波的相位。

由式(1)分析影响围岩土壤温度分布的主要因素有土壤导温系数 α 、空气温度振幅 A_r 、空气温度分布相位 φ ,因此,本次正交试验的因子选为土壤导温系数、空气温度振幅变化和空气温度相位。根据工程实际情况和气候变化特征确定本次正交试验各因子的水平值如表 1 所示。

2.1.2 选取考察指标

根据区间土体温度及蓄放热随年限变化的特性选取 5 个正交试验考察指标,分别为土体温度分布曲线的热库峰值位置即土体温度随时间波动的最大值的位置、峰值大小即土体温度随时间波动的最大值的大小、热库厚度即土体温度场发生变化的深度范围和

年净蓄热量即土体热库年净蓄热能力。

表 1 正交试验因子水平表
Tab.1 Orthogonal experimental factor level table

	A 土壤导温系数/ ($m^2/^\circ C$)	B 空气温度 振幅/ $^\circ C$	C 空气温度 分布相位
1	2.7×10^{-7}	7.1(21.1~35.3 $^\circ C$)	7 月中旬
2	4.8×10^{-7}	8.2(18.3~34.4 $^\circ C$)	8 月上旬
3	7.6×10^{-7}	9.3(12.4~30.9 $^\circ C$)	8 月中旬

2.1.3 正交试验安排

本研究采用三因子三水平的正交表($L_9(3^3)$),通过 9 组工况设置下的模拟结果分析在土壤导温系数、空气温度振幅、空气温度相位 3 因素对围岩土壤温度及蓄放热逐年演化特性影响的显著程度,每组土体热库蓄放热实验的模拟周期为从新建到投入运营的 20 年。

2.2 各考察指标随运营年限的模拟结果

在模拟的 20 年内,土体热库峰值位置、峰值大小、热库厚度和年末净蓄热量变化趋势如图 4 所示,随着传热年限的增大,热库峰值位置不断向土壤深处移动,前 10 年峰值位置移动较快,之后峰值位置移动较缓慢;峰值大小前 10 年增幅较大,后十年增幅较小;热库厚度随着运营年限的增大呈直线型增大,同时土体的年净蓄热量逐渐减小。

从第 1 年到第 20 年的传热过程中,热库峰值位置移动了约 1 m,如图 4(a)所示;热库峰值升高幅度约 4 $^\circ C$,空气温度振幅越大,热库峰值越大,如图 4(b)所示;热库厚度变化较显著,在 7~9 号实验中,由于土壤导温系数较大,为 $7.6\times 10^{-7} m^2/^\circ C$,热库厚度已达到模型厚度 50 m,其他实验工况下,热库厚度达到约 35 m,如图 4(c)所示;随着传热年限的增加,土壤净蓄热量以指数形式减少,如图 4(d)所示。

2.3 正交试验模拟结果及分析

对于上述正交试验中 9 种工况下数值模拟数据,以温度曲线峰值位置为例,首先针对土体温度分布曲线峰值位置的考察指标,由极差分析法得到 3 个影响因素对其影响显著性程度的排列顺序,具体分析过程和结果如表 2 所示。

同理,由极差分析法得到的 3 因素对土体围岩热库随年限演化特性的各主要考察指标的影响程度排序如表 3 所示。

方差分析法可进一步定性确定各因子对各考察指标影响的显著程度,如表 4 所示。方差分析法就是

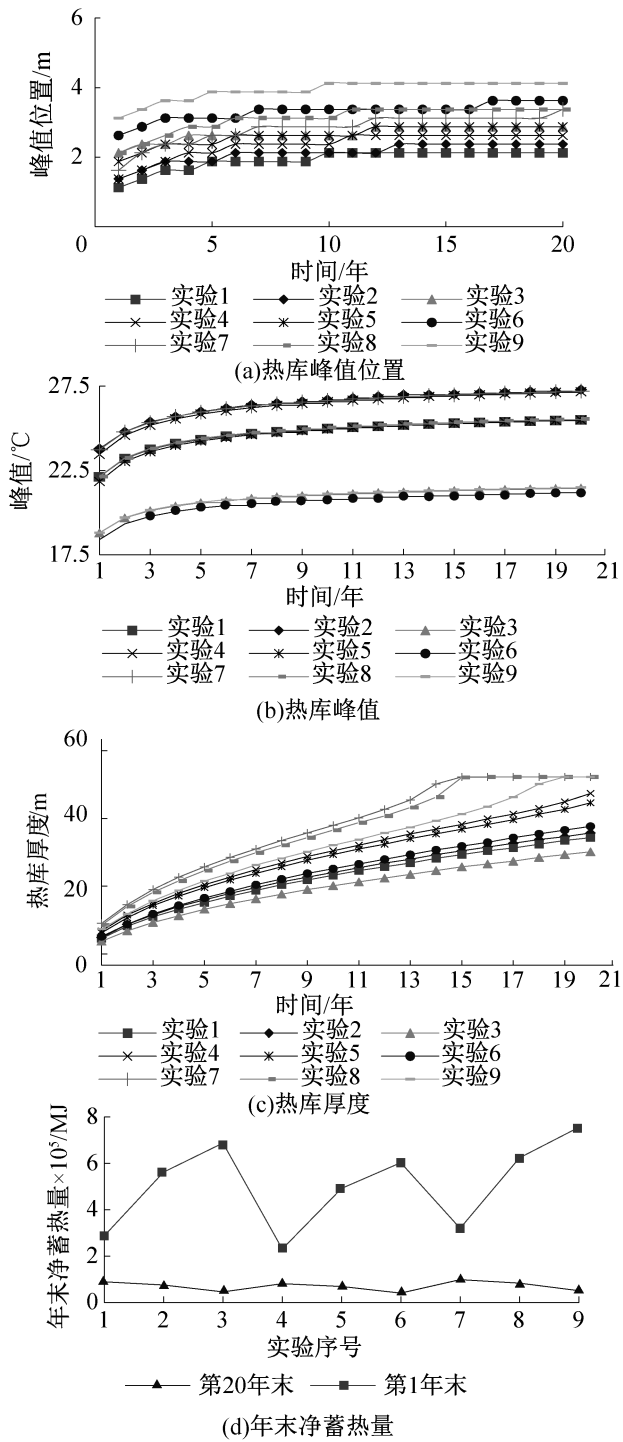


图 4 围岩土体温度分布特性曲线

Fig.4 Characteristic curve of temperature distribution of surrounding rock soil

将数据的总变异分解成因素引起的变异和误差引起的变异两部分,构造 F 统计量,作 F 检验,判断各因素作用的显著性。当 $F > 99.01$ 时,各因子对考察指标影响非常显著;当 $19 < F < 99.01$ 时,各因子对考察指标影响显著;当 $F < 19$ 时,各因子对考察指标影响不显著。

表 2 温度曲线峰值位置分析结果

Tab.2 Analysis of peak position of temperature curve

实验号	影响因素			峰值位置 结果/m
	A 导温系数/ ($\text{m}^2/\text{}^\circ\text{C}$)	B 空气温度 振幅/ $^\circ\text{C}$	C 空气 温度相位	
1	2.7×10^{-7}	7.1	7 月中旬	2.125
2	2.7×10^{-7}	8.2	8 月上旬	2.375
3	2.7×10^{-7}	9.3	8 月中旬	2.875
4	4.8×10^{-7}	7.1	8 月上旬	2.625
5	4.8×10^{-7}	8.2	8 月中旬	2.875
6	4.8×10^{-7}	9.3	7 月中旬	3.625
7	7.6×10^{-7}	7.1	8 月中旬	3.125
8	7.6×10^{-7}	8.2	7 月中旬	3.375
9	7.6×10^{-7}	9.3	8 月中旬	4.125
K1	7.375	7.875	9.125	—
K2	9.125	8.625	9.125	—
K3	10.625	10.625	8.875	—
K1 *	2.46	2.625	3.04	—
K2 *	3.04	2.875	3.04	—
K3 *	3.54	3.54	2.96	—
极差 R	1.08	0.92	0.08	—
主次顺序		A>B>C		

表 3 影响隧道围岩土体热库变化的因素主次顺序表

Tab.3 Main sequence of factors affecting the thermal reservoir change of tunnel surrounding rock mass

考察指标	各影响因素主次顺序
影响热库峰值位置	A 土壤导温系数>B 空气温度振幅大小>C 相位变化
影响热库峰值大小	B 空气温度振幅大小>A 土壤导温系数>C 相位变化
影响热库厚度	A 土壤导温系数>B 空气温度振幅大小>C 相位变化
影响土壤层第 20 年末的净蓄热量	B 空气温度振幅>A 土壤导温系数>C 相位变化

由方差分析法可得导温系数对于围岩土体热库峰值位置和围岩土体厚度的影响程度非常显著;空气温度振幅对于围岩土体峰值大小和围岩土体年净蓄热量影响程度极其显著。

表 4 各因子显著水平表
Tab.4 Significant level table of each factor

指标	因素	因素平方和	自由度 f	均方差	F 值	F0. 05(2,2)	F0. 01(2,2)	显著程度
峰值位置	A 导热系数	1. 76	2	0. 88	127	19	99. 01	非常显著
	B 空气温度振幅	1. 35	2	0. 67	97	19	99. 01	显著
	C 空气温度相位	0. 01	2	0. 006	1	19	99. 01	不显著
	误差	0. 01	2	0. 006	—	19	99. 01	—
峰值大小	A 导热系数	0. 03	2	0. 02	1. 3	19	99. 01	不显著
	B 空气温度振幅	53. 88	2	26. 94	2307. 1	19	99. 01	非常显著
	C 空气温度相位	0. 006	2	0. 003	0. 28	19	99. 01	不显著
	误差	0. 02	2	0. 01	—	19	99. 01	—
热库厚度	A 导热系数	431. 63	2	215. 81	44. 39	19	99. 01	显著
	B 空气温度振幅	33. 68	2	16. 84	3. 46	19	99. 01	不显著
	C 空气温度相位	10. 76	2	5. 38	1. 11	19	99. 01	不显著
	误差	9. 72	2	4. 86	—	19	99. 01	—
第 20 年末 净蓄热量	A 导热系数	2. 88×10 ¹⁴	2	1. 44×10 ¹⁴	68. 35	19	99. 01	显著
	B 空气温度振幅	3. 05×10 ¹⁵	2	1. 52×10 ¹⁵	720. 87	19	99. 01	非常显著
	C 空气温度相位	7. 62×10 ¹²	2	3. 81×10 ¹²	1. 803	19	99. 01	不显著
	误差	4. 22×10 ¹²	2	2. 11×10 ¹²	—	19	99. 01	—

3 典型气候区代表城市地铁区间土体蓄放热量演化特性对比

选取上海、北京、深圳、西安、哈尔滨 5 个代表城市分别表征我国 5 个典型气候区,即夏热冬冷地区、寒冷地区、夏热冬暖地区、温和地区和严寒地区,对比分析各城市区间土体温度和蓄放热演化特性,为各城市地铁区间远期运行温升提供参

考。各地区土壤相关热物参数如表 5 所示,5 个代表城市典型气象年的室外月平均空气温度如图 5 所示,根据隧道空气土体热平衡的基本原理和等效算法^[15]近似得到各城市远期运营地铁隧道内空气温度年逐月变化预测值,如图 6 所示。将此空气温度作为作用于土体的边界条件模拟连续运行 20 年后各城市地铁区间隧道土体温度与年净蓄热量的演化结果。

表 5 不同地区土壤热物参数
Tab.5 Soil thermal parameters in different regions

地区	土质	初始温度/ ℃	密度/ (kg/m ³)	导热系数/ (W/(m·℃))	比热/ (J/(kg·℃))
上海	粉砂质粘土	18. 5	1 788	1. 02	1 940
北京	砂质壤土	14. 0	2 300	1. 7	1 350
深圳	砂质粘壤土	23. 2	2 650	2. 1	1 050
西安	粉砂土	15. 6	1 820	1. 3	1 600
哈尔滨	粉砂质粘壤土	6. 6	1 850	1. 2	1 750

3.1 典型地区围岩土体热库动态形成过程

在同一地区,随着传热时间的增加,热库峰值逐

渐增大且峰值位置向土壤深度移动同时热库厚度加深;根据不同地区土壤热物参数如表 5 所示,得到土

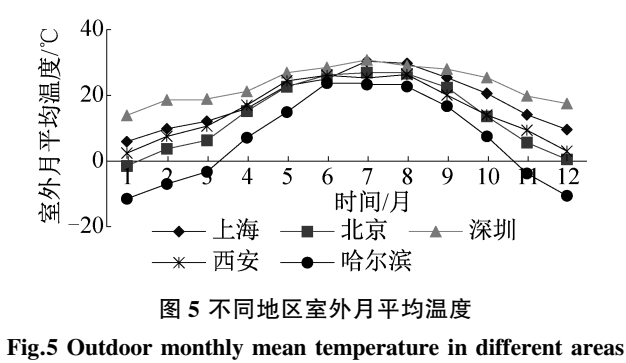


图 5 不同地区室外月平均温度

Fig.5 Outdoor monthly mean temperature in different areas

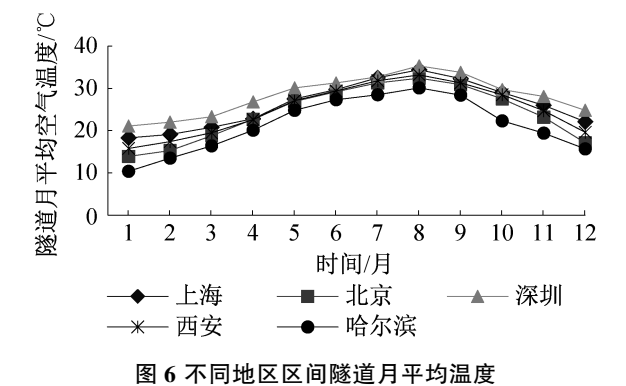


图 6 不同地区区间隧道月平均温度

Fig.6 Monthly mean temperature of tunnel in different regions

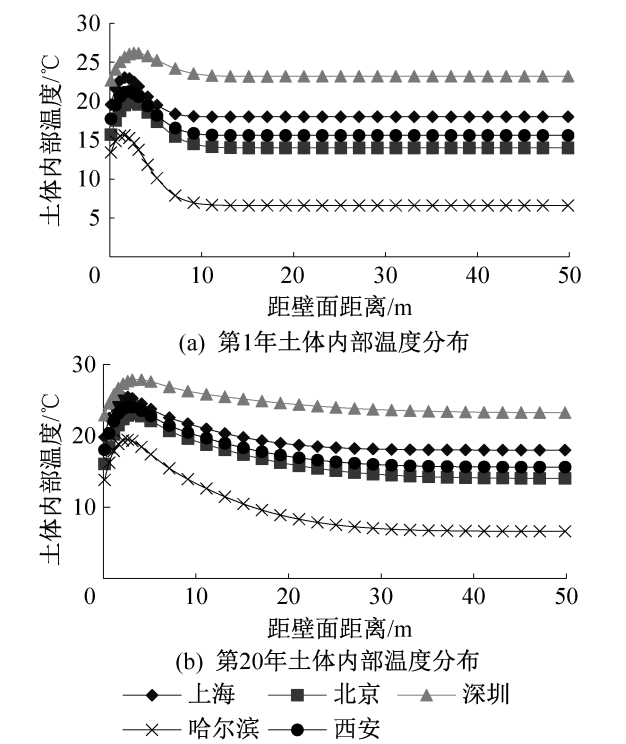


图 7 土体内部温度分布随时间的关系

Fig.7 The relationship between temperature distribution in soil and time

体初始温度,在同一深度和传热时间内,不同城市的土体初始温度越低,土体温度变化范围越大。如图 7

所示,哈尔滨地区,土体初始温度为 6.6℃,一年内土体温度变化范围为 10~15℃;而深圳地区,土体初始温度为 23.2℃,一年内土体温度变化范围仅为 3~5℃。对比第 1 年和第 20 年的土体内部温度分布,发现各地区第 20 年的土体温度比第 1 年整体增加了 3~5℃,且温度越低的地区,土体温度变化范围越大。

3.2 典型气候区代表城市土体热库温度随年限变化的对比

5 个典型地区的土体热库峰值随年限的增加而逐渐增大,且地理位置越北,热库峰值越小但变化越明显。如图 8(a) 所示,深圳地区前 5 年内温度升高了约 1.3℃,之后 15 年内温度升高了 0.6℃,稳定在 28℃内;而哈尔滨地区前 5 年内温度升高了约 3℃,之后 15 年内升高了 1.6℃,稳定在 20℃内。

5 个典型地区的热库峰值位置随年限增加逐渐向土体深度方向移动,不同地区土体导热系数越大,

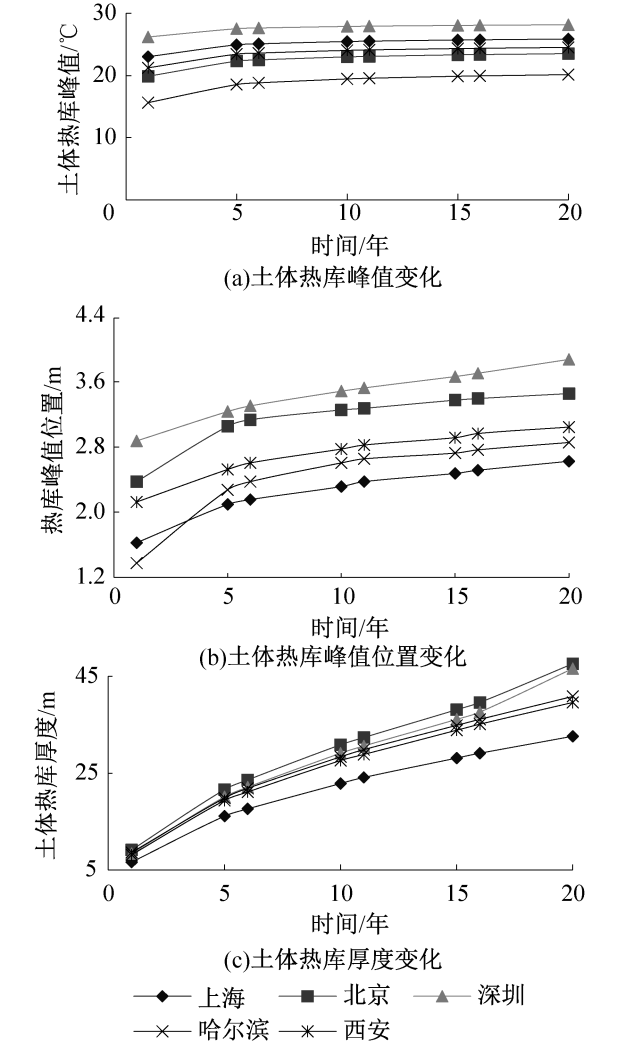


图 8 典型地区土体热库特性随时间的变化

Fig.8 Variation of soil thermal storage characteristics with time in five typical regions

对应土体热库峰值的位置移动也较大,反之则不然。如北京地区土壤导热系数较大为 $1.7\text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$, 对应热库峰值位置移动相对较大,达到约 3.2 m ;而上海地区土壤导热系数较小为 $1.02\text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$, 对应的热库峰值位置移动相对较小,约在 2.4 m 处,如图 8(b) 所示。

5 个典型地区的热库厚度也随年限的增加逐渐向土体深度方向延伸且每年的延伸距离基本相同,不同地区土体导热系数与土体比热越大,对应土体热库厚度越深,如北京地区土壤导热系数和比热较大分别为 $1.7\text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 和 $1\,350\text{ J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$, 土体热库厚度为 46 m 较其他地区都大;而上海地区土壤导热系数和比热较小分别为 $1.02\text{ W}/(\text{m}\cdot^{\circ}\text{C})$ 和 $1\,940\text{ J}/(\text{kg}\cdot^{\circ}\text{C})$, 热库厚度为 30 m 较其他地区都小,如图 8(c) 所示。

综上所述:土体热库峰值随年限的增加而逐渐增大;土体热库峰值的位置受土体导热系数影响最大,当土体导热系数越大时,土体热库峰值位置移动也较大;土体热库厚度受土体导热系数及土体的比热影响

最大,当土体导热系数和比热越大时,对应的土体热库厚度也越大。

3.3 典型地区土体年净蓄热量变化

典型地区土体年净蓄热量变化如图 9 所示,因为由北向南,隧道空气温度与土体温度差值逐渐减小,对应的土体年净蓄热量由北向南也逐渐减少,在同一年内,各地区年净蓄热量由大到小依次为:哈尔滨>北京>西安>上海>深圳。各地区在前 5 年内土体年净蓄热量变化较大,之后逐渐减少最终趋于稳定;且随着时间增加,各地区之间的年净蓄热量差值也逐渐减少。在地铁运营远期,哈尔滨地区土体年净蓄热量约为 $1.023\times 10^5\text{ MJ}$,相当于列车散热量的 1.8% ;北京地区约为 $8.09\times 10^4\text{ MJ}$,相当于列车散热量的 1.4% ;西安地区约为 $6.64\times 10^4\text{ MJ}$,相当于列车散热量的 1.2% ;上海地区约为 $5.67\times 10^4\text{ MJ}$,相当于列车散热量的 1.0% ;深圳地区约为 $4.26\times 10^4\text{ MJ}$,相当于列车散热量的 0.7% 。列车散热量基本保持不变,而土体年净蓄热量逐渐减少,因此导致隧道空气温度逐年升高。

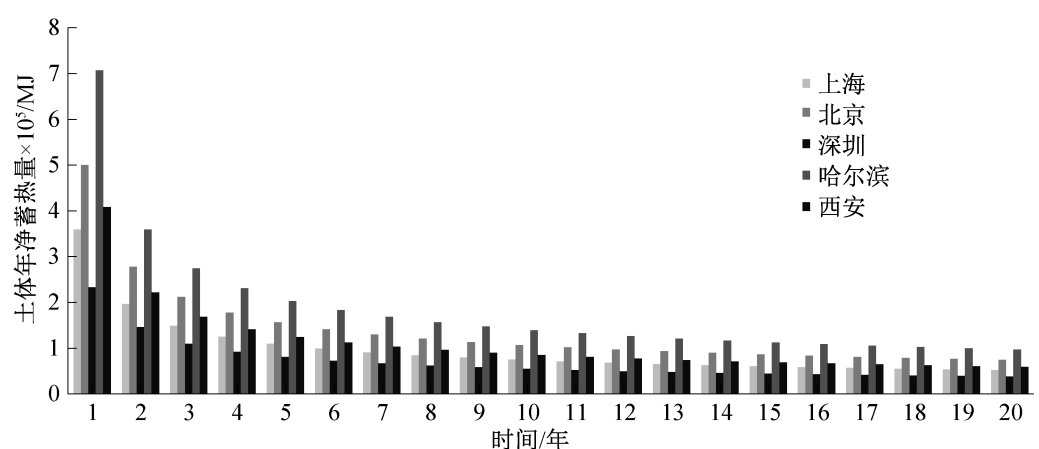


图 9 不同地区土体年净蓄热量随时间的变化
Fig.9 Annual net storage capacity of soil in different regions with time

4 结论

本文首先采用正交试验法分析各因素对土体温度热库特性及年净蓄热量的影响程度,然后结合隧道空气热平衡方程和当地的地理位置,模拟分析了 5 个具有代表性的城市地铁区间隧道围岩土体热库特性及年净蓄热量的演化特性,主要结论如下:

1) 基于 CHAMPS-BES 软件的模拟工况下,区间隧道的温升直接影响围岩土体热库的蓄放热特性。针对区间隧道空气温度振幅、空气温度相位和土壤导热系数 3 个影响因素条件下,由正交试验结果发现,空气温度振幅对围岩土体热库的峰值大小影响极其

显著,随着空气温度振幅的增大,热库峰值逐渐增大,对年净蓄热量的影响非常显著,对峰值位置的影响显著,对厚度的影响不显著;空气温度相位对围岩土体温度分布曲线的峰值位置、峰值大小、厚度及净蓄热量的影响均不显著;土壤导温系数对围岩土体热库峰值位置的影响为非常显著,当土壤导温系数为 $7.6\times 10^{-7}\text{ m}^2/^{\circ}\text{C}$ 时传热较快,连续运营 20 年热库厚度已超出了 50 m 的范围,对厚度和年净蓄热量的影响均为显著,对峰值大小的影响不显著。

2) 对比分析 5 个典型城市的区间隧道围岩土体热库特性及年净蓄热量的演化特性,得知地理位置越北,室外空气温度越低,对应的隧道空气温度也越低,

且变化振幅越大,土体初始温度也越低,但对应的土体热库特性变化越显著,土体的年净蓄热量也越大。

参考文献

- [1] 曾臻,匡亚迪,龚冀杰,等. 地铁区间隧道空气温特性研究[C]//2014铁路暖通年会论文集. 成都:中国铁道学会, 2005: 147-156. (ZENG Zhen, KUAN Gyadi, GONG Jijie, et al. The analyzing of the temperature distribution in the metro tunnel[C]//2014 Annual Conference on Railway Heating and Ventilation. Chengdu: China Railway Society, 2005:147-156.)
- [2] 王丽慧,吴喜平,宋洁,等. 地铁区间隧道速度场温度场特性研究[J]. 制冷学报, 2010, 31(3): 55-62. (WANG Lihui, WU Xiping, SONG Jie, et al. Study on velocity field and temperature field in subway tunnel[J]. Journal of Refrigeration, 2010, 31(3):55-62.)
- [3] 唐莎. 屏蔽门系统地铁隧道温度分布特性与监测方法研究[D]. 成都:西南交通大学, 2017. (TANG Sha. Study on the tunnel air temperature distribution and its monitoring in the metro with platform screen doors system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.)
- [4] 龚冀杰. 地铁区间隧道温度特性及其对站台环境的影响[D]. 重庆:重庆大学, 2014. (GONG Mingjie. Subway tunnel temperature characteristics and its impact on the site environment [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.)
- [5] 王丽慧,王鹏飞,陶辉. 不同因素对地铁隧道围岩侧土壤温度场分布影响的模拟研究[J]. 建筑节能, 2016, 44(5):21-25. (WANG Lihui, WANG Pengfei, TAO Hui. Simulation of different factors affecting the soil temperature field distribution at the surrounding rock side in subway tunnel[J]. Building Energy Conservation, 2016, 44(5): 21-25.)
- [6] 乔恒君. 地铁隧道围岩传热机制研究[D]. 南京:南京大学, 2011. (QIAO Hengjun. Study on the heat transfer mechanism of subway tunnel surrounding [D]. Nanjing: Nanjing University, 2011.)
- [7] 肖琳,杨成奎,胡增辉,等. 地铁隧道围岩内温度分布规律的模型实验及其热导率反算研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(2):86-91. (XIAO Lin, YANG Chengkui, HU Zenghui, et al. Model test on temperature distribution in metro tunnel surrounding rock and inverse calculation of its thermal conductivity[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(2):86-91.)
- [8] 王海彦,骆宪龙,杨石柱. 隧道围岩温度场变化规律理论分析[J]. 石家庄铁路职业技术学院学报, 2006, 5(2): 25-29. (WANG Haiyan, LUO Xianlong, YANG Shizhu. Theoretical analysis of temperature field variation of tunnel surrounding rock[J]. Journal of Shijiazhuang Institute of Railway Technology, 2006, 5(2):25-29.)
- [9] 胡增辉,李晓昭,赵晓豹,等. 隧道围岩温度场分布的数值分析及预测[J]. 地下空间与工程学报, 2009, 5(5): 867-872. (HU Zenghui, LI Xiaozhao, ZHAO Xiaobao, et al. Analysis and prediction of the temperature distribution around tunnels[J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2009, 5(5):867-872.)
- [10] 冯炼. 地铁网络系统环境控制数值模拟研究[D]. 成都:西南交通大学, 2001. (FENG Lian. Research on numerical simulation of subway network system environment control [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2001.)
- [11] 刘晶. 地铁热环境影响因素研究[D]. 天津:天津大学, 2003. (LIU Jing. Research on the influence factors of subway thermal environment[D]. Tianjing: Tianjin University, 2003.)
- [12] WANG Lihui, ZOU Xuecheng, TAO Hui, et al. Experimental study on evolution characteristics of the heat storage of surrounding soil in subway tunnels[J]. Procedia Engineering, 2017, 205:2728-2735.
- [13] WANG Zhiqiang, PEI Jingjing, ZHANG J S. Modeling and simulation of an activated carbon-based botanical air filtration system for improving indoor air quality[J]. Building and Environment, 2012, 54:109-115.
- [14] 王丽慧,邹学成,陶辉,等. 地铁隧道围岩热库逐年演化特性的实验研究[J]. 暖通空调, 2017, 47(5):53-57. (WANG Lihui, ZOU Xuecheng, TAO Hui, et al. Experimental study on evolution characteristics of the heat reservoir of surrounding rock in subway tunnels[J]. Journal of HV & AC, 2017, 47(5):53-57.)
- [15] 杜志萍. 地铁隧道围岩土体热库及其蓄放热性能演化特性的变因素研究[D]. 上海:上海理工大学, 2017. (DU Zhiping. The variable factors study of soil thermal store and its storage heat evolution characteristics of the subway tunnel surrounding rocks[J]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2017.)

通信作者简介

王丽慧,女,教授,博士,上海理工大学建筑与环境学院, 13816498129, E-mail: 66amy99@126.com。研究方向:地铁等地下空间室内热环境及节能。

About the corresponding author

Wang Lihui, female, professor, Ph. D., School of Environment and Architecture, University of Shanghai for Science and Technology, +86 13816498129, E-mail: 66amy99@126.com. Research fields: subway and other underground space indoor thermal environment and energy-saving.