

湘、沪、苏、汉首届“建筑环境营造与能源应用创新研讨会”



地铁区间气温随运营年限演化特性 与调控研究

上海理工大学
王丽慧 副院长 教授 博导

2025年7月11日



上海理工大学历史沿革

译文：每一艘开往上海的轮船都必须在这所大学的视线内经过；在这样一个校园里，任何有思想的学生都不能不感到自己生活在一个大的世界里。

——梅佩礼

原文：Every ship that goes to Shanghai must pass within full view of the College; any thoughtful student on such a campus is compelled to live in a large world.

——F. C. Mabee

出处：Fred Carleton Mabee. TheShanghaiBaptistCollege[J]. Educational Review, 1916, 8(7):218-225.



音乐堂



德国文化中心



累积之厚积薄发，夯实前行

——上海理工大学 环境与建筑学院

学院学科科研基地平台一览表

序号	类别	学科名称	批准时间	批准部门
1	上海市教委重点学科	建筑环境工程与节能	2007.10	上海市教委
2	机械工业联合会 重点实验室	机械工业煤（气） 高效燃烧与超低排放控制	2014.05	机械工业联合会
3	机械工业联合会 重点实验室	机械工业高大厂房健康环境与节能	2019.05	机械工业联合会
4	上海市重点实验室	动力工程多相流动与传热	2013.09	上海市科委
5	上海市重点学科建设	能源与环境跨学科创新平台	2013.01	中央财政部
6	交通运输部研发中心	卫生防疫技术交通运输行业研发中心	2020.07	交通运输部
7	上海高校IV类高峰学科建设	能源科学与技术	2023.01	上海市教委

2024

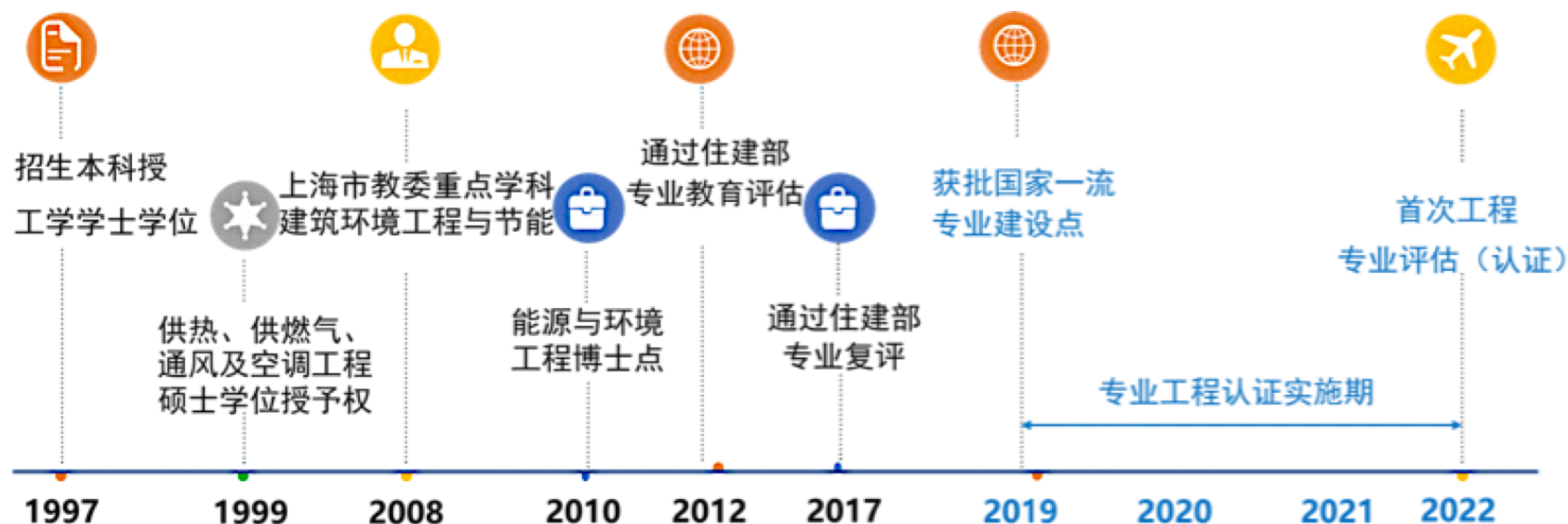
国自科：14项

决策咨询被采纳11篇，其中8篇认定为A类，3篇认定为B类，
学院教师为第一负责人为10篇，决策咨询专报受副国级领导单篇
批示2篇。

累积之厚积薄发，夯实前行

——上海理工大学 建环专业

综合实力



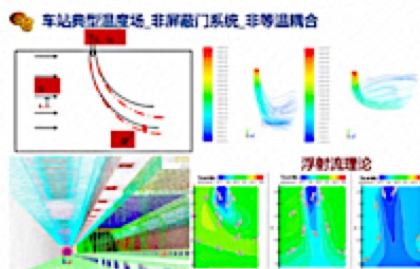
■ 师资与招生规模

✓ 专业教师22名；每年招收 80-100 名本科生，研究生60名

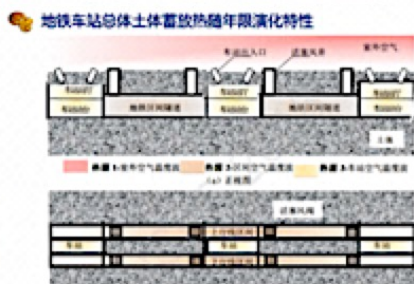
累积之厚积薄发，夯实前行

——上海理工大学轨道交通环境低碳、舒适、健康团队

方向1 间歇周期气流组织



方向2 土体蓄放热与区间温升



方向3 车站过渡区乘客热舒适



2004年师从同济大学吴喜平教授开展地铁热环境研究

2007年入职上海理工大学（上海市教委重点学科，国家一流本科专业交通运输部卫生防疫技术交通运输行业研发中心）

聚焦轨道交通6个主要研究方向主持完成地铁领域国家自然科学基金青年基金（2008年）和面上项目（2018年）各1项，近五年主持地铁等交通运输行业项目近30项。

近20年来，服务地铁万千乘客是团队科研工作的初心！

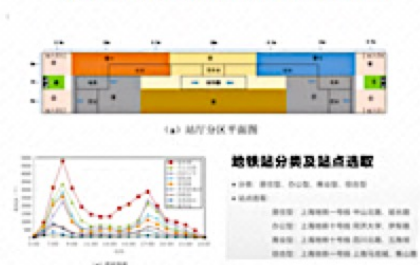


不负韶华

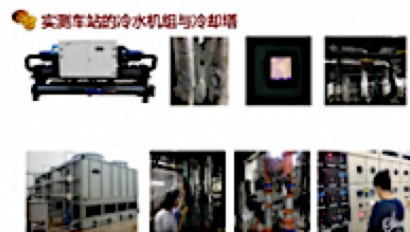
百年建筑造福社会



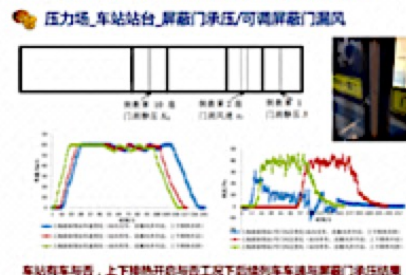
方向4 车站乘客行为特征与分区



方向5 车站分期负荷与设备能效



方向6 车站风能风压调控应用



目录

CONTENTS

01

背景

02

研究历程

03

调控举措

04

总结



01

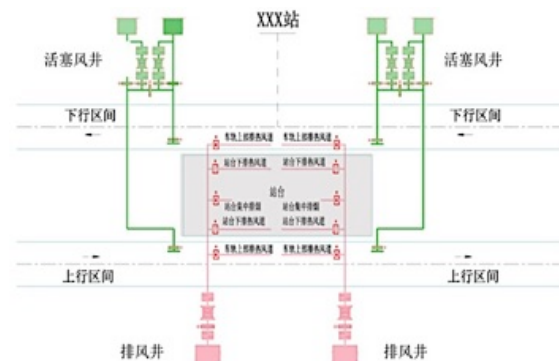
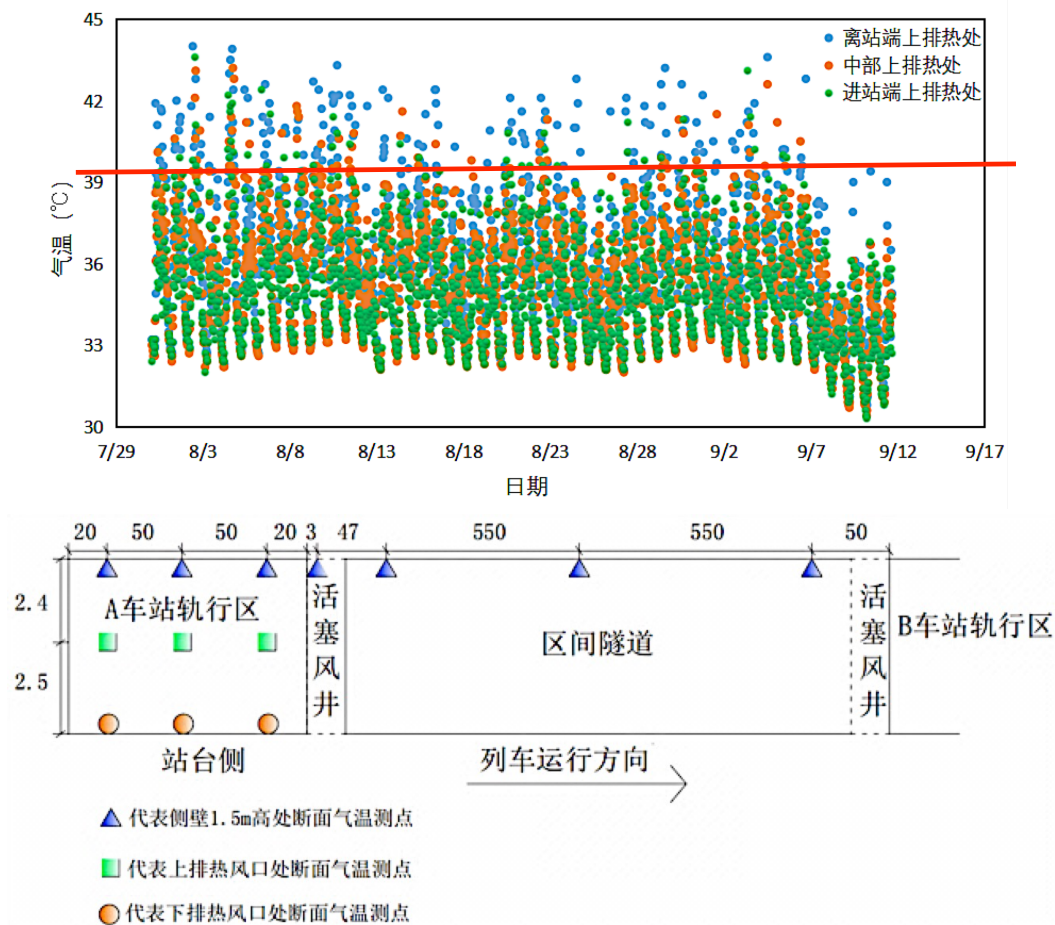
背景

1-1存在温升

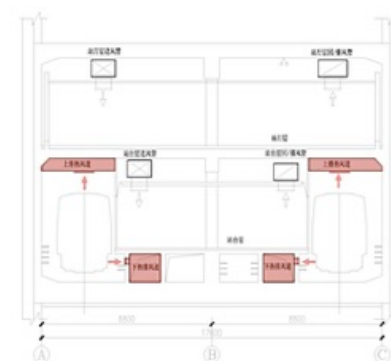
1-2保障安全与节能



1-1 存在温升-区间气温过高现象客观存在



典型地铁车站隧道通风系统简图



典型地铁车站排热风道布置图

1-2 保障安全与节能：区间温升后果之“底线思维”

远期运营地铁区间温升过高导致车厢空调设备停止运行，安全运营的底线。
——西医手段

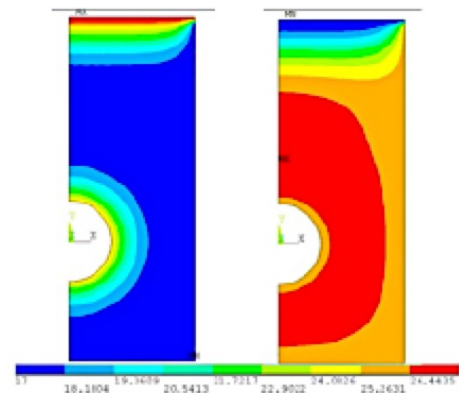


图 1-3 伦敦地铁区间温升高 图 1-4 上海地铁区间温升高用冰桶 图 1-5 区间新建与远期土体温升预研结果

对地铁安全运营的危害

隧道气温升高不仅会加剧车站和列车各自空调系统的能耗，到了地铁运营远期阶段，区间隧道日平均气温将达到35℃以上，甚至**超过40℃**临界值，引发列车车厢顶部空调**冷凝器停跳**，引起乘客恐慌，影响列车的安全运行

1-2 保障安全与节能：区间温升后果之“博弈思维”_中医治未病



区间温升带来车厢能耗上升，车站能耗上升



控制区间温升的手段的有效性，运行成本

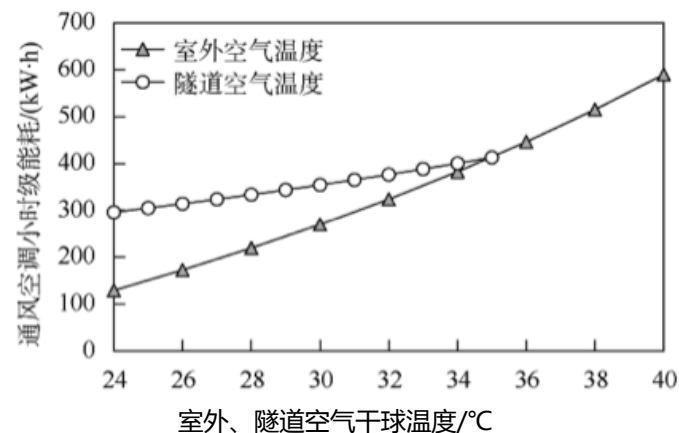
两者博弈的过程，决定了
采取的技术方式
运行的历史年限
运行的时段

初步测算，区间隧道每升温1℃，车厢空调能耗上升9%，车站空调能耗上升4%。

对列车空调能耗的影响

隧道环境	设定温度/℃	空调系统平均功率/W		相比上一温度工况功率增加比例/%	
		无载客	75%载客	无载客	75%载客
22℃/80%	22.75	2266	8482	-	-
28℃/70%	24.25	3600	11976	58.87	41.19
31.5℃/65%	25	4818	14784	33.83	23.45
35℃/60%	26	6062	16337	25.82	10.50

对车站空调能耗的影响





02

研究历程

——区间温升随运营年限的演化特性

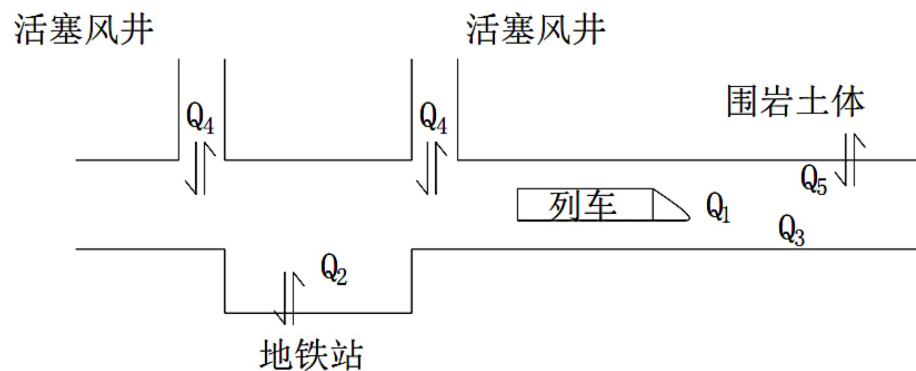
2-1土体侧

2-2空气侧

2-3土体空气迭代



2-1基于机理，聚焦土体侧_区间空气热平衡



简化了三方面因素：

- 一：忽略地铁列车与区间隧道空气的换热量
- 二：忽略区间隧道壁面渗水与排水水分等引起的潜热交换；
- 三：假设地铁列车在区间隧道中运行时，其产热量沿区间隧道轴向均匀分布。

$$\Delta Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5$$

ΔQ 为区间隧道空气变化热量

Q_1 为列车运行产热量（轨行区摩擦生热+夏季车厢冷凝器散热）

Q_2 为车站屏蔽门渗透风携带的热量

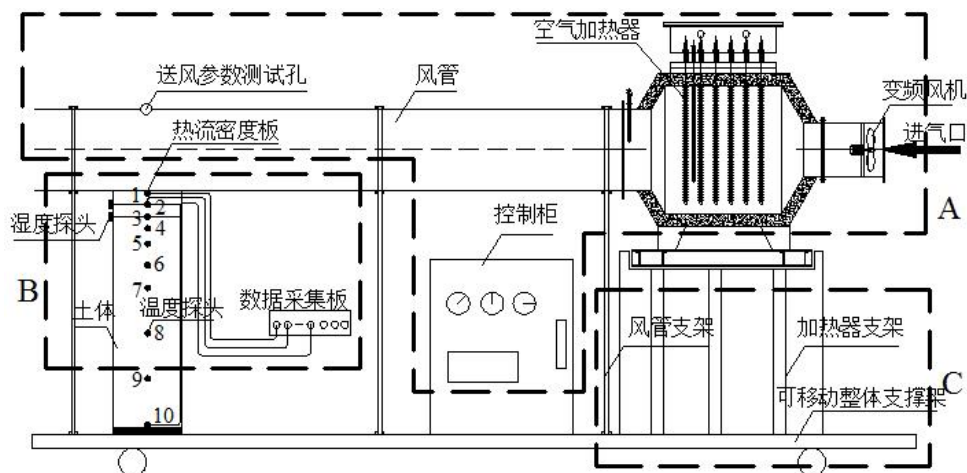
Q_3 为隧道照明产热量

Q_4 为活塞风井渗透风携带的热量

Q_5 为区间隧道围岩土体传热量

为了达到降低远期区间隧道气温的目的，只要影响不同的热量 Q 即可

2-1基于机理，聚焦土体侧_缩尺模型试验



土壤温度场演化特性实验台原理图

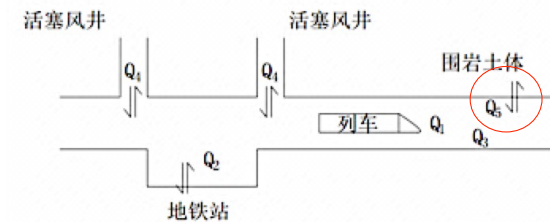
实验台分为三部分：

A：空气加热及送风装置

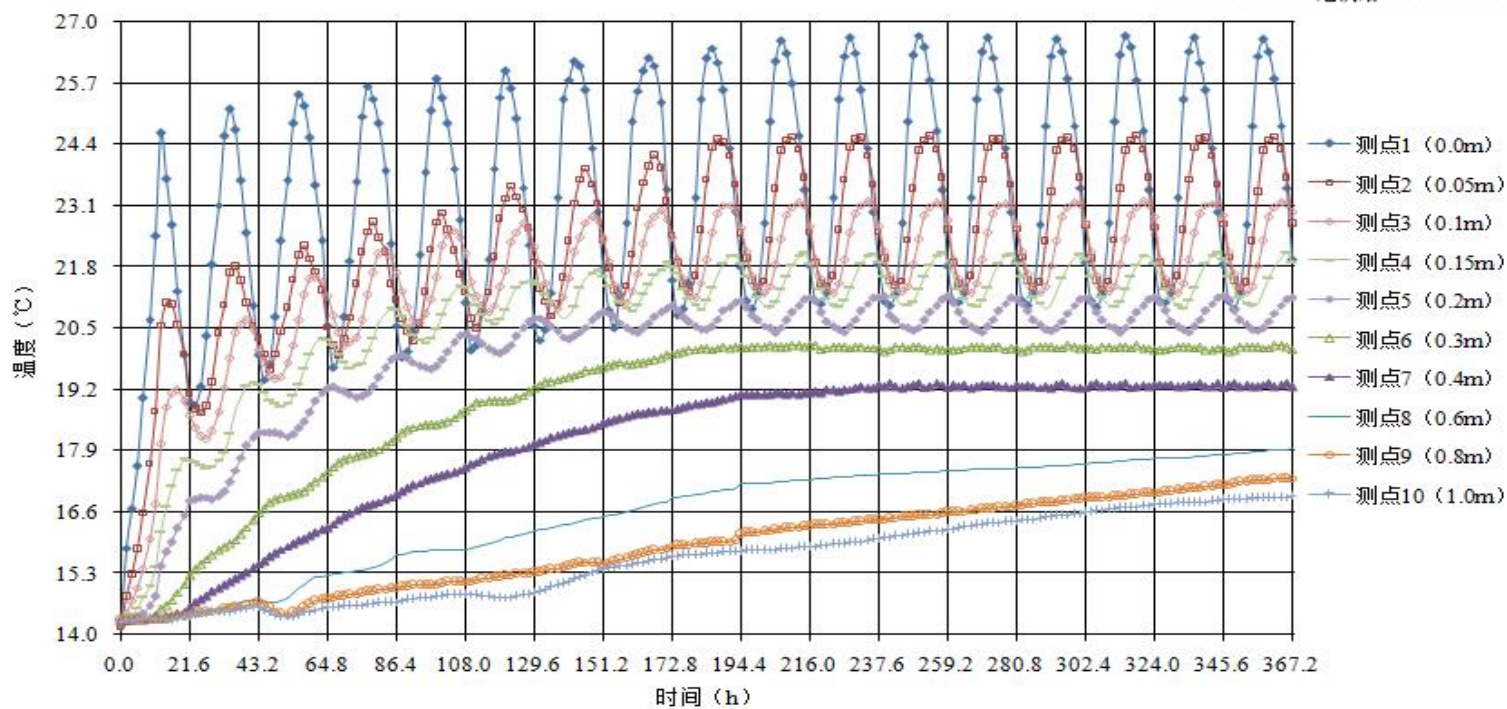
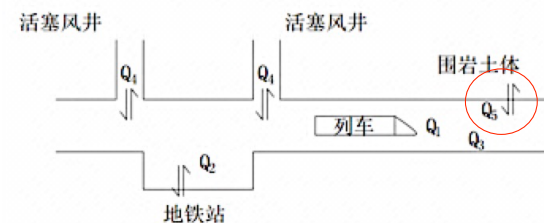
B：土体及温湿度、热流密度采集装置

C：实验台支撑框架

傅里叶准则相似_几何比例尺1:20,时间比例尺1:400



2-1基于机理，聚焦土体侧_土体温度随运营年限演化的实验结果



①测点1~测点5：温度以波动形式升高后趋于稳定，振幅逐渐减小。

②测点6~测点7：温度先升高后趋于稳定。

③测点8~测点10：整个周期保持升高的趋势。

Q_5 区间隧道围岩土体传热量逐年下降

2-1基于机理，聚焦土体侧_土体温升变工况的模拟研究

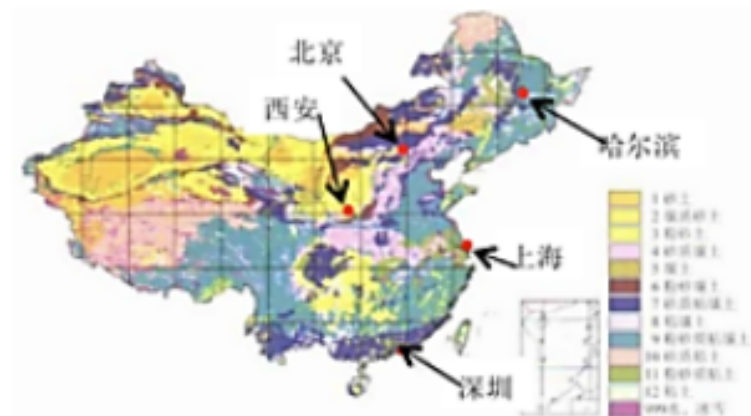
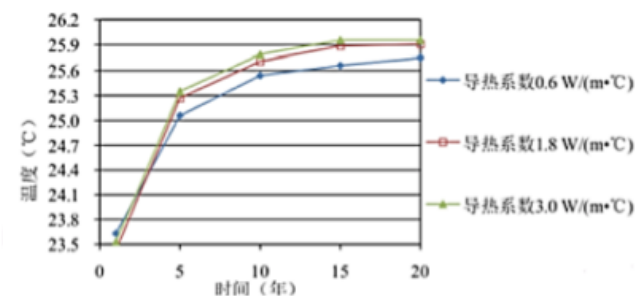


图 5-2 我国土壤分布

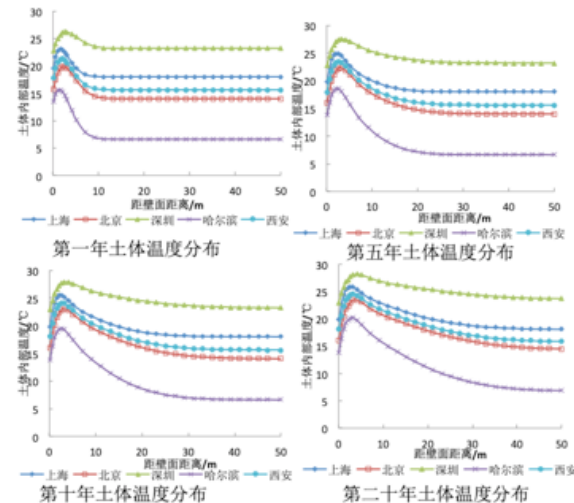
表 5-8 不同地区土壤热物参数

地区	土质	初始温度 (°C)	密度 (kg/m³)	导热系数 (W/m·°C)	比热 (J/kg·°C)
上海	粉砂质粘土	18.5	1788	1.02	1940
北京	砂质壤土	14	2300	1.7	1350
深圳	砂质粘壤土	23.2	2650	2.1	1050
西安	粉砂土	15.6	1820	1.3	1600
哈尔滨	粉砂质粘壤土	6.6	1850	1.2	1750

champs-bes 变工况模拟区间土体温度



土体导热系数的影响





02

研究历程

——区间温升随运营年限的演化特性

2-1土体侧

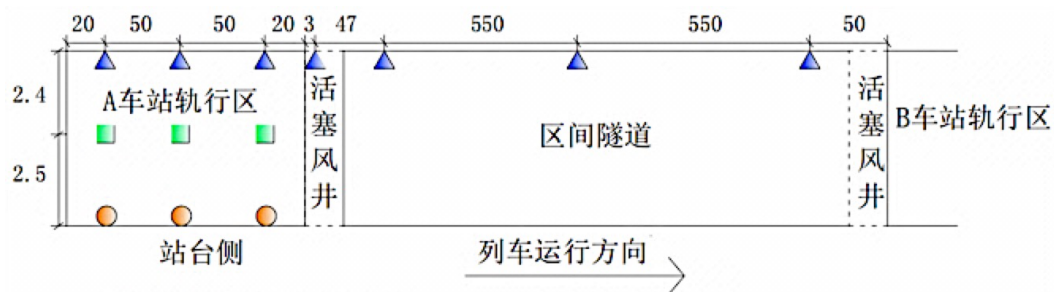
2-2空气侧

2-3土体空气迭代



2-2 区间气温实测

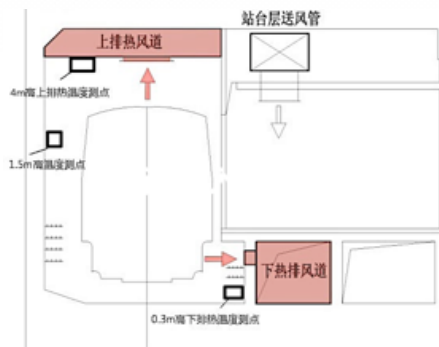
为了找出区间隧道升温最为明显、易引起冷凝器停跳事故的典型部位，为后续轨行区排热系统合理的改造和优化提供重要依据。本次实测在上海地铁1号线A、B两地铁车站之间的隧道布置多个自动记录仪，监测隧道不同位置的空气温度参数，共有7个监测截面，包含13个气温测点。



▲ 代表侧壁1.5m高处断面气温测点

■ 代表上排热风道口处断面气温测点

● 代表下排热风道口处断面气温测点



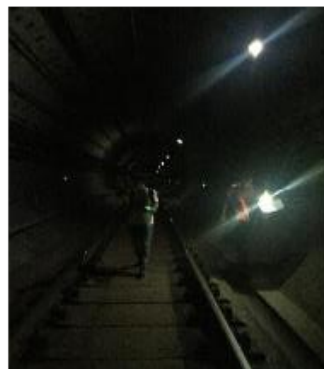
编号	名称	测量范围	精度
1	纽扣温湿度计	温度: $-40^{\circ}\text{C} \sim 85^{\circ}\text{C}$ 相对湿度: $0 \sim 100\%$	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ $\pm 3\% \text{RH}$

隧道相关工作时间点 (年.月.日)

取仪器	19.10.15	20.5.26	20.10.13	21.7.18	21.12.02
装仪器	19.10.18	20.5.27	20.10.16	21.7.20	21.12.03



2-2 区间气温实测



下排热布点

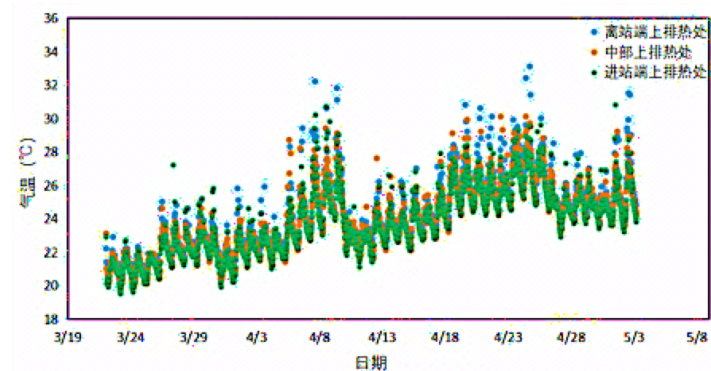
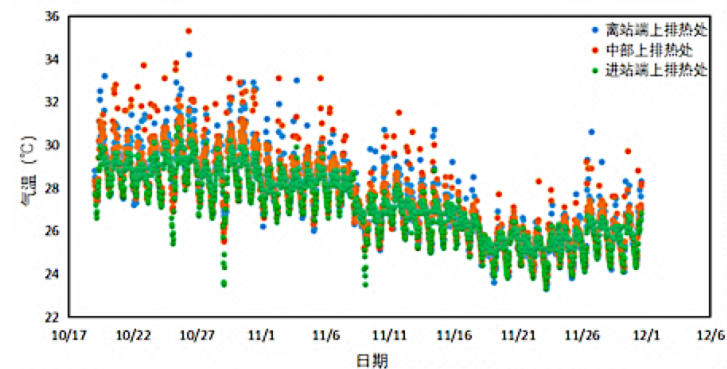
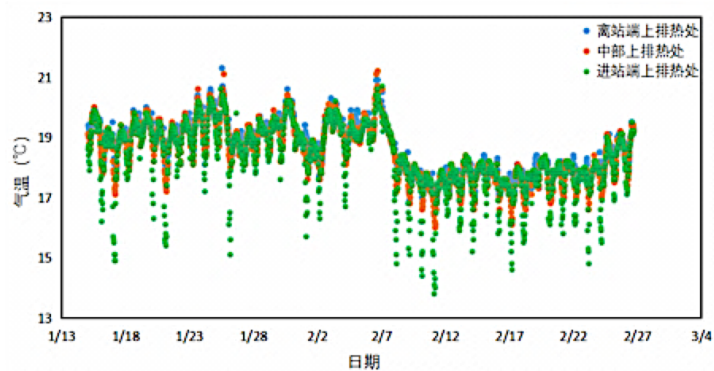
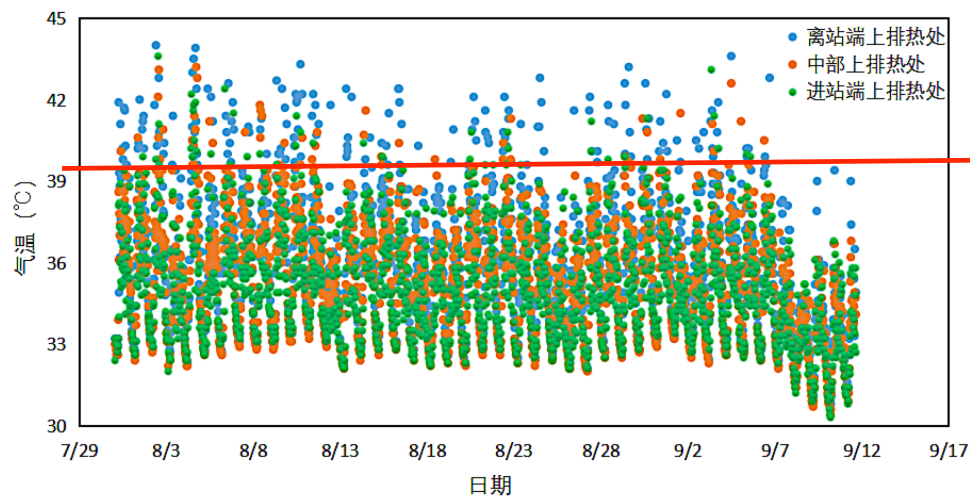
上排热布点

隧道找点

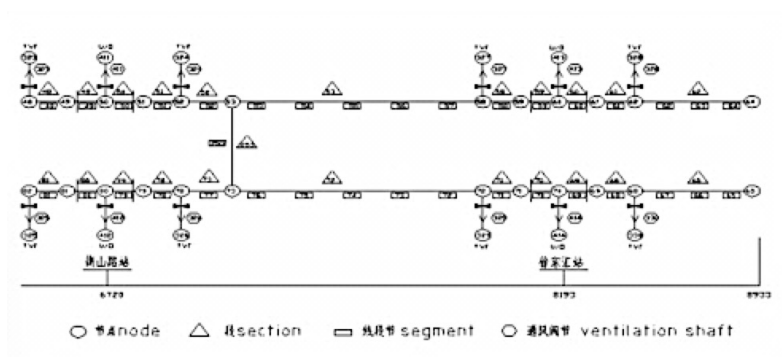
隧道布点



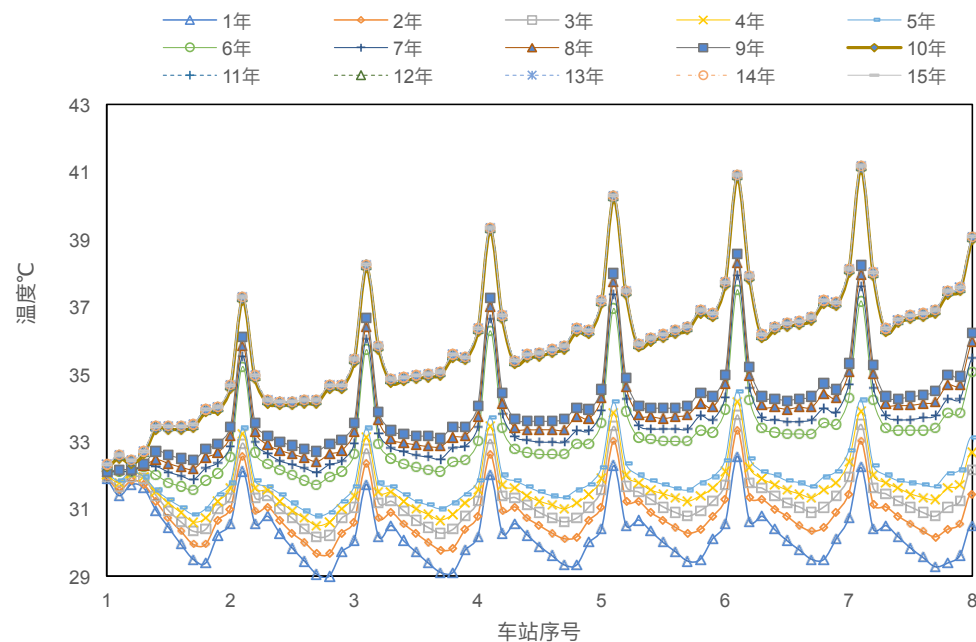
2-2 区间气温实测



2-2 区间气温逐年演化研究-初级阶段



SES模拟，通过等效不同年限的
壁面温度获得区间气温演化特性





02

研究历程

——区间温升随运营年限的演化特性

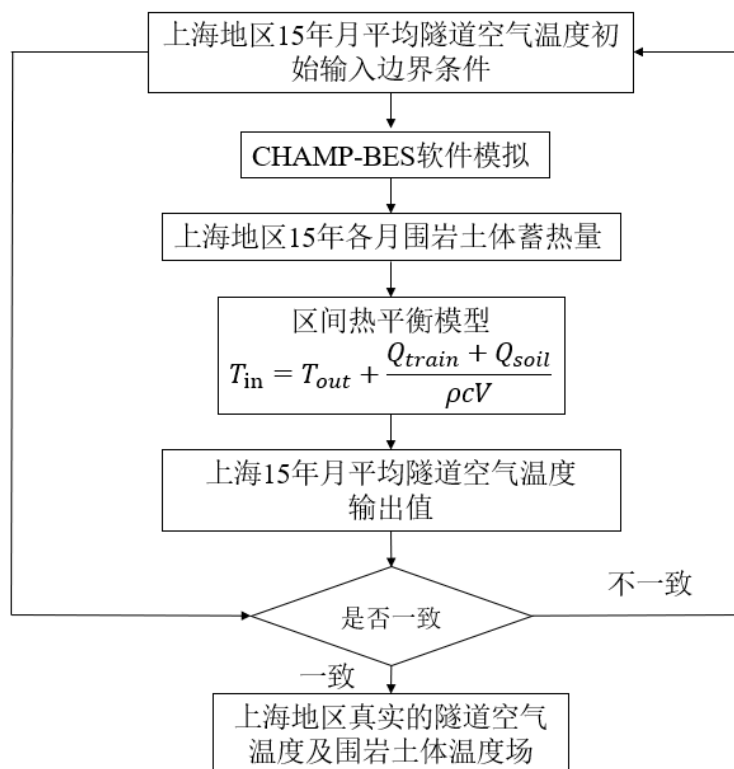
2-1土体侧

2-2空气侧

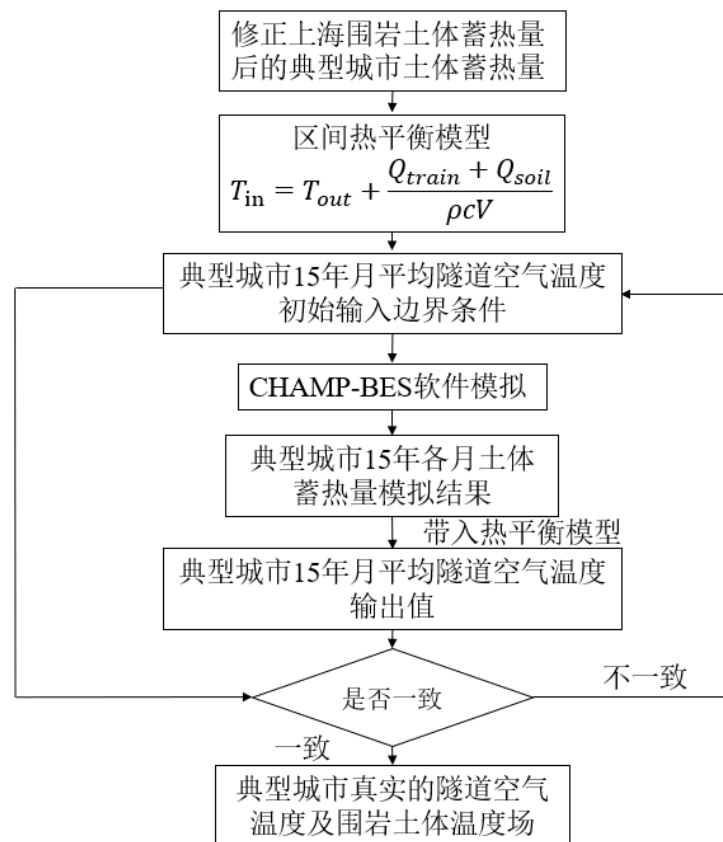
2-3土体空气迭代



2-3 区间气温逐年演化研究-高级阶段



上海区间气温迭代求解方案



代表城市区间气温迭代求解方案

2-3 区间气温逐年演化研究-高级阶段

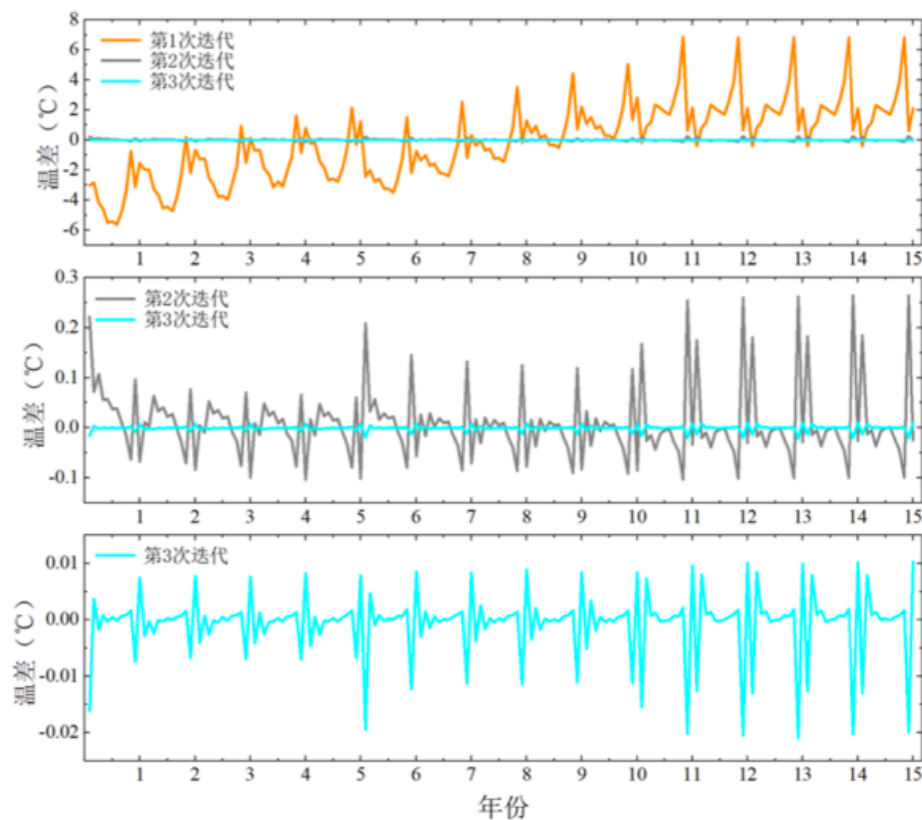


图 4.1 上海月平均区间气温不同迭代次数误差分析

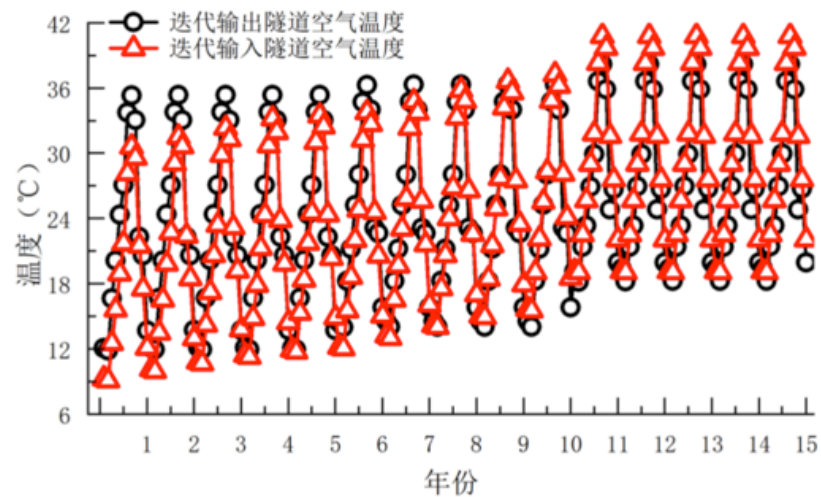
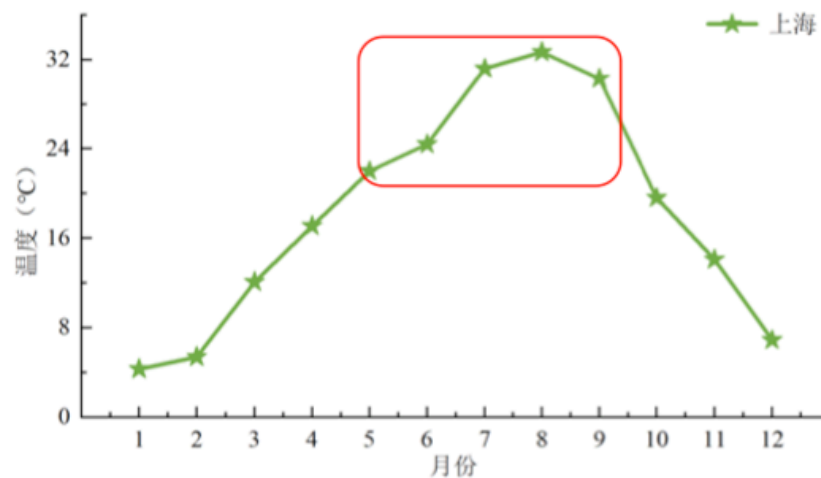
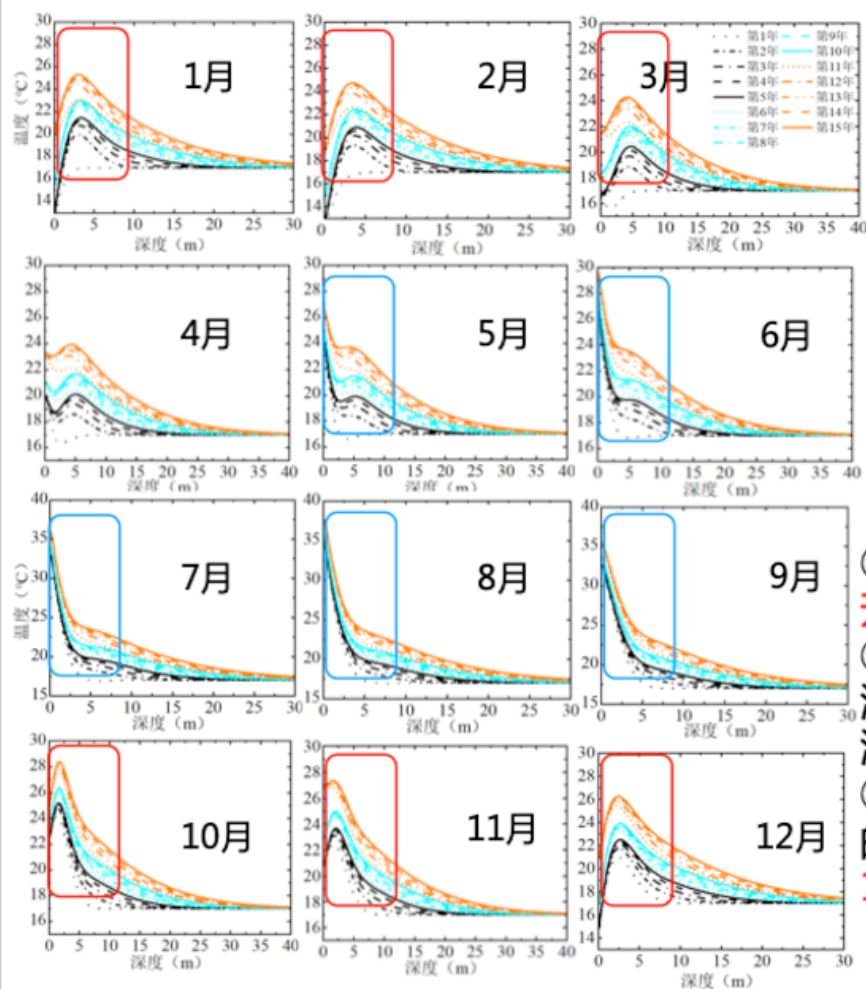


图 4.2 上海初始输入与最终输出月平均区间气温随年限演化特性结果对比

不同月份区间围岩土体温度场随年限演化特性分析

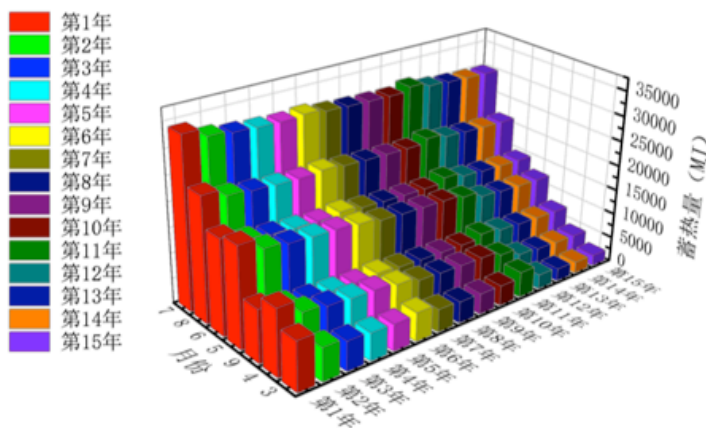


- ①上海不同月份围岩土体内部温度随年限不断**上升**。
- ②受室外空气温度影响，10月~次年3月土体内部温度曲线呈现出**凸**的形态，5月~9月夏季土体内部温度曲线呈现出**凹**的形态。
- ③土体温度峰值由10月份的**28.39 °C**下降到3月份的**24.26 °C**，土体内部峰值出现位置由10月份的**1.5 m**左右移动到3月份**4.5 m**左右。

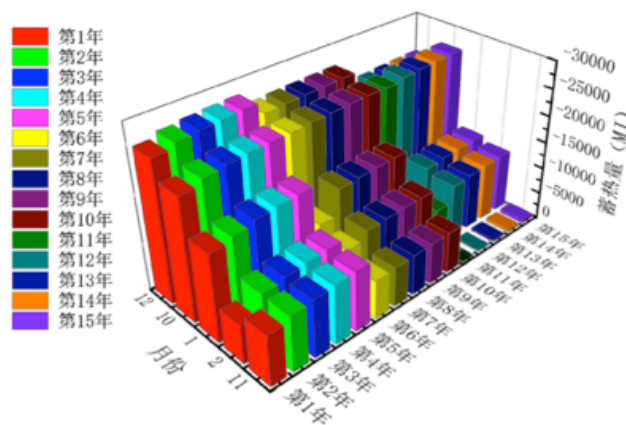
2-3 区间气温逐年演化研究-高级阶段

①上海地铁围岩土体3~8月份土体主要以净蓄热为主，1月、2月及10~12月土体主要以净放热为主。7月土体净蓄热量在30000~34000 MJ范围内，8月份土体净蓄热量在21000~25000 MJ范围内；12月土体净放热量在22000~28000 MJ范围内，10月份土体净放热量在22500~26500 MJ范围内。

②同一个月份的不同年份间的土体净放热量相差不大，在地铁运营第6年和第11年，围岩土体的净放热量会有所减少，净蓄热量会有所增加。



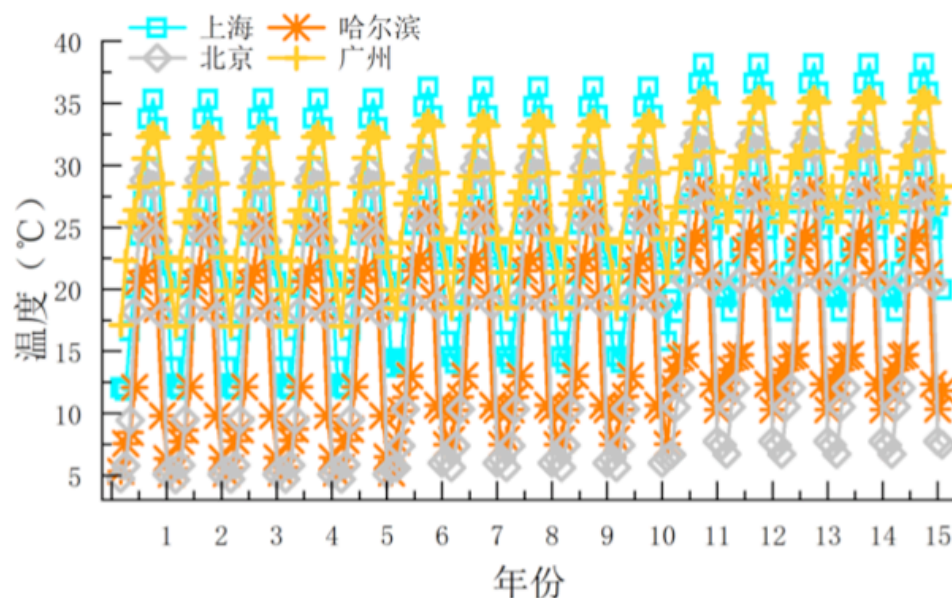
上海不同年限各月土体净蓄热量图



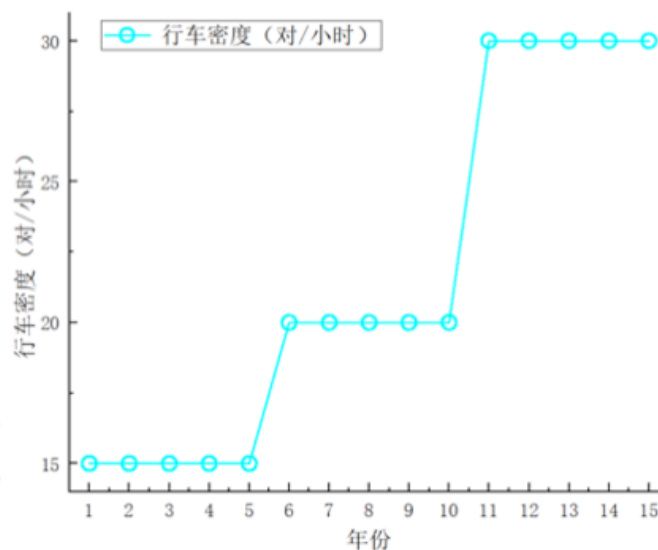
上海不同年限各月土体净放热量图

不同城市区间隧道空气温度随年限演化特性分析

- ①纬度越高，隧道空气的整体温度越低；不同年限下，夏季上海隧道空气温度最高。
- ②中纬度地区隧道空气温度的最大振幅较大，北京围岩壁面温度的最大温度振幅最大，可达 25.86°C ，广州最小仅有 15.57°C 。
- ③隧道空气温度在第6年和第11年隧道空气温度会出现大幅度上升，这是由于列车行车对数增加所致。



不同气候区代表城市隧道空气温度随年限演化图



不同运营时期列车行车密度图

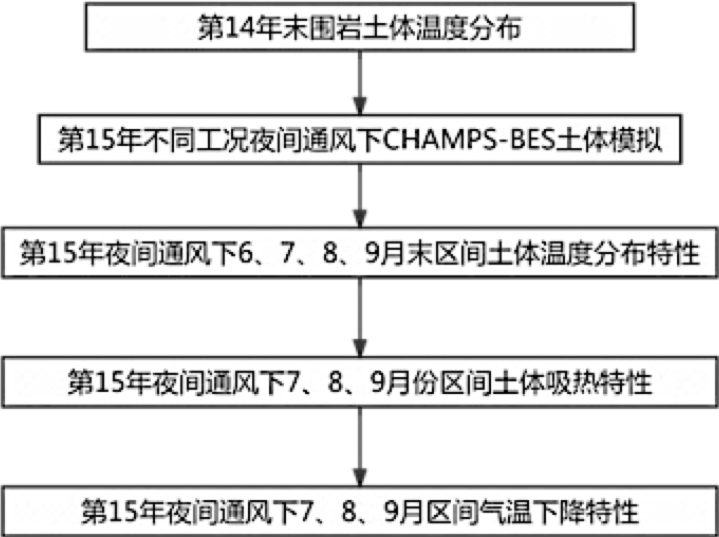


03

调控举措



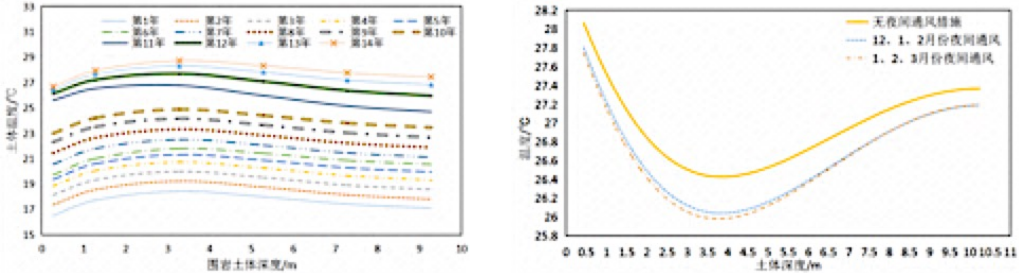
探索路径1-夜间通风（西医 底线思维）



注：以夏季区间温降为目标，避免出现车厢空调停跳的极端现象，此时不考虑夜间通风的成本

工况选择的两个考虑因素（温差维度，时间距离维度）

月份	11月	12月	1月	2月	3月	4月	5月	6月
上海市气象月平均气温（℃）	14.13	6.91	4.32	5.35	12.10	17.06	21.96	24.41
第15年隧道空气温度（℃）	27.61	21.65	19.17	19.05	22.55	25.67	29.05	31.83
室外气温与隧道气温差（℃）	13.48	14.74	14.85	13.70	10.45	8.61	7.09	7.42
与夏季7月份的时间距离	8个月	7个月	6个月	5个月	4个月	3个月	2个月	1个月



	开一个月夜间通风	开两个月夜间通风	开三个月夜间通风
开启时间	1 月份	1、2 月份	1、2、3 月份
7 月隧道空气降温值（℃）	0.24	0.46	0.60
8 月隧道空气降温值（℃）	0.27	0.48	0.63
9 月隧道空气降温值（℃）	0.21	0.39	0.54

综上所述，夜间通风措施可以使隧道气温在整个夏季降低0.72℃-1.77℃，避免列车空调冷凝器停跳等极端事故发生，同时使车站和列车的空调系统能耗降低。

探索路径1-结论与展望 (治未病 中西医结合)

展望 1

结论

对于温升已经超过临界值的区间隧道，为了防止第二年夏季出现因区间温度过高导致的列车空调停跳的极端情况，可以采取夜间通风措施

在冬季气温偏低时候的夜间通风可以使隧道气温在整个夏季降低 0.72°C - 1.77°C

避免了列车空调冷凝器停跳等极端事故发生，同时使车站和列车的空调系统能耗降低

区间温升带来车厢能耗上升，车站能耗上升

控制区间温升的手段的有效性，运行成本



两者博弈的过程，决定了
采取的技术方式
运行的历史年限
运行的时段

探索路径3 单向流轨行区无风道排热系统-首次提出

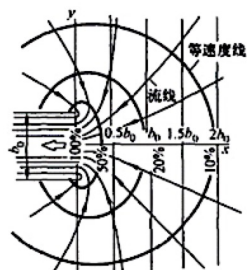


图7 原方案只靠汇流速度衰减快排热效果差

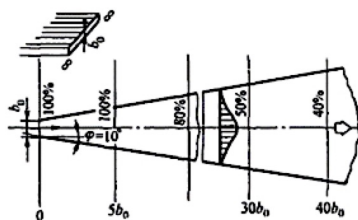
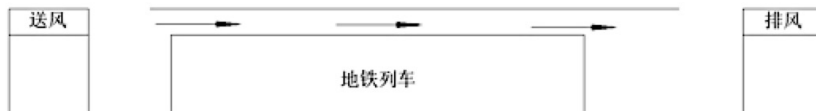
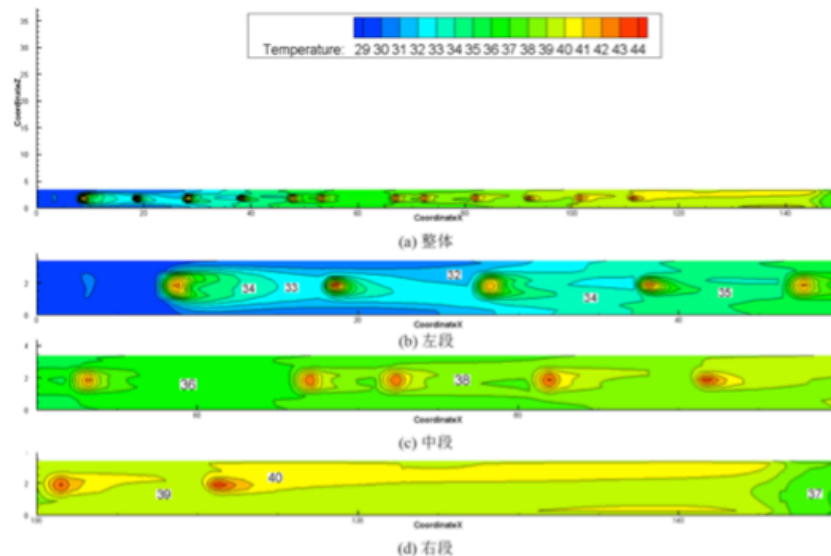


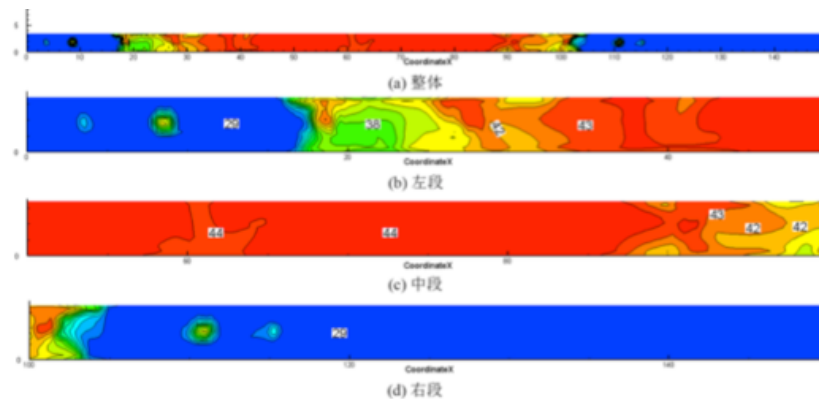
图8 新方案发挥射流优势速度衰减慢利于排热



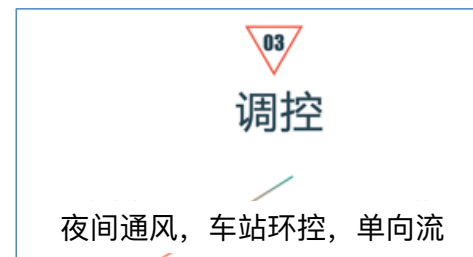
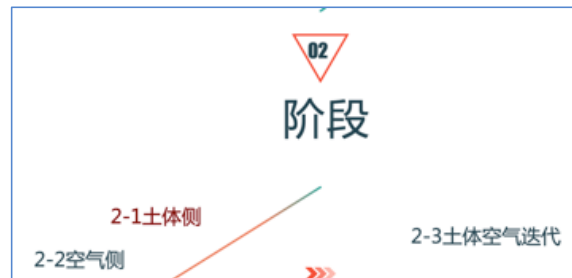
y=4.2m 截面处新型排热方案与既有排热方案温度分布云图



a 新型排热方案



b 既有排热方案（不均匀排风）



感谢各位专家
百忙之中的帮助与指点！
请多多批评指正！