

# 北京东六环超长盾构隧道通风设计方案研究

常默宁\*, 谢飞, 董启伟

(北京市市政工程设计研究总院有限公司, 北京 100082)

**摘要:** 为解决北京市东六环路隧道通风问题, 结合工程实际, 综合考虑隧道需风量、环评要求、工程造价、办公和居住功能组团等影响因素, 对隧道通风排烟方案进行综合比选, 最终确定采用全纵向通风+重点排烟+空气净化(明挖段纵向排烟)方案, 并利用隧道通风模拟软件 IDA-RTV 对制约采用全纵向通风方案的关键因素进行模拟分析。研究表明, 该方案可提供人员尚可接受的隧道内环境, 隧道污染物排放质量浓度满足环评要求。该研究成果可为今后同类型工程通风方案比选提供工程实例, 具有较高的参考价值。

**关键词:** 超长盾构隧道; 通风设计; IDA-RTV 模拟; 纵向通风; 空气净化; 重点排烟

中图分类号: U 455.43

文献标志码: A

## Research on Ventilation Design Scheme of Extra-long Shield Tunnel of Beijing East Sixth Ring Road

Chang Moning\*, Xie Fei, Dong Qiwei

(Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Beijing 100082, China)

**Abstract:** In order to solve the ventilation problem of the East Sixth Ring Road Tunnel in Beijing, combined with the actual engineering, and considered the factors such as tunnel air demand, environmental impact assessment (EIA) requirements, project cost, office and residential functional groups, a comprehensive comparison and selection of tunnel ventilation and smoke exhaust schemes were carried out. Finally, the full longitudinal ventilation+key smoke exhaust+air purification (longitudinal smoke exhaust in open cut sections) scheme was determined. The key factors restricting the adoption of the full longitudinal ventilation scheme were simulated and analyzed by the tunnel ventilation simulation software IDA-RTV. The research results indicate that this scheme can provide an acceptable tunnel environment for personnel, and the quality concentration of tunnel pollutant emissions meets the requirements of EIA. This research result can provide engineering examples for the comparison and selection of ventilation schemes for similar projects with high reference value in future.

**Key words:** ultra long shield tunnel; ventilation design; IDA-RTV simulation; vertical ventilation; air purification; key smoke exhaust

国内主流隧道通风方式以纵向通风为主, 具体通风方式的确定受隧道断面形式、隧道长度、断面尺寸、需风量、地理位置和工程造价等多种因素的

影响。近年来, 随着我国高速公路建设的快速发展, 国内 5 000 m 以上长大隧道越来越多, 长大隧道通风问题一直是值得深入研究的问题<sup>[1-12]</sup>。

收稿日期: 2024-07-23

作者简介: 常默宁, 女, 工程师, 硕士, 主要从事隧道通风排烟研究工作, E-mail: changmomo0622@163.com。

引文格式: 常默宁, 谢飞, 董启伟. 北京东六环超长盾构隧道通风设计方案研究[J]. 市政技术, 2025, 43(1): 183-192. (CHANG M N, XIE F, DONG Q W. Research on ventilation design scheme of extra-long shield tunnel of Beijing East Sixth Ring Road[J]. Journal of municipal technology, 2025, 43(1): 183-192.)

以宁攀高速火山隧道为例,该隧道全长 7 192 m,隧道左线采用分段纵向通风方式,右线上坡段坡度较小,污染物排放量低于隧道左线,故采用全纵向通风方式<sup>[13]</sup>。南大梁高速华蓥山隧道全长约 8 150 m,原通风方案采用分段纵向通风方式,经过对污染物排放进行分析和对运营节能进行综合考虑后,确定运营期间左线采用全纵向通风方式,右线阶段性采用全纵向通风方式<sup>[14]</sup>。上海长江隧道全长 8 100 m,由于地理位置特殊,江中不具备修建竖井的条件,且随着汽车尾气排放限值的降低,稀释污染物需风量减小,因此,该隧道采用全纵向通风方式,设计断面风速为 7.5 m/s<sup>[15]</sup>。从上述实例中可以看出,随着汽车尾气排放限值的降低,隧道通风区段得以拓长,长 5 000 m 以上采用全纵向通风方式的隧道逐渐增多。

基于此,依托北京市东六环路隧道工程,通过

对该隧道通风排烟方案进行综合比选,最终确定采用全纵向通风+重点排烟+空气净化的方案。该隧道建成后全纵向通风区段长 9 160 m,将超过上海长江隧道,成为国内最长的采用全纵向通风方式的隧道。此外,通过 IDA-RTV 模拟软件对隧道内环境进行模拟分析,进一步论证该隧道采用全纵向通风方案的技术可行性,以期为国内超长隧道工程拓展通风区段长度和今后同类型工程通风方案比选提供参考。

## 1 工程概况

东六环路隧道位于北京市城市副中心,南起京津公路,北至潞苑二街,全长 9 160 m,公路等级为 A+级高速公路,设计车速为 80 km/h。隧道沿副中心“创新发展轴”规划设计,沿线有城市绿心、行政办公中心、副中心站和宋庄艺术中心等环境敏感点。该隧道纵断面见图 1,横断面见图 2。

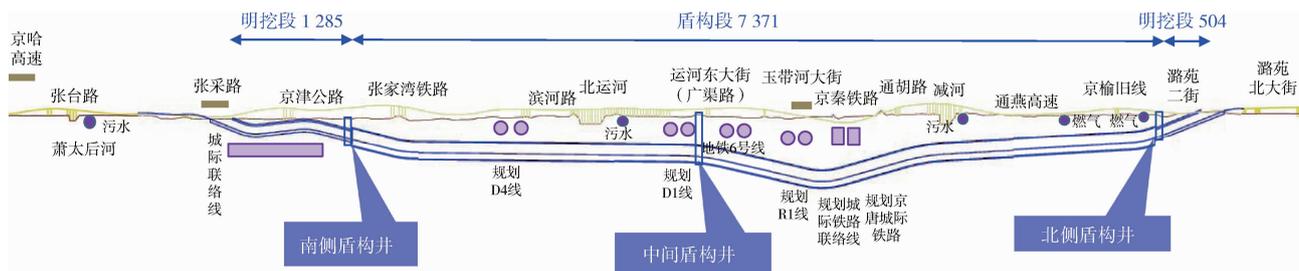


图 1 东六环路隧道纵断面(m)

Fig. 1 Vertical section of the East Sixth Ring Road Tunnel

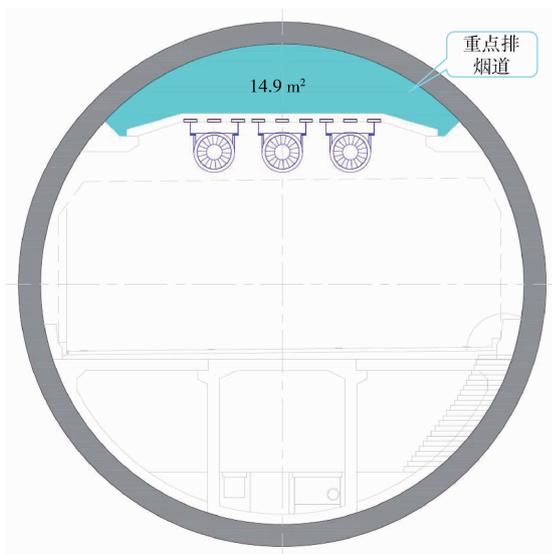


图 2 东六环路隧道横断面

Fig. 2 Cross section of the East Sixth Ring Road Tunnel

## 2 隧道通风系统设计

### 2.1 隧道通风设计标准

隧道通风设计需综合考虑正常运营工况、阻滞工况和火灾工况。其中,正常运营工况和阻滞工况需同时满足安全标准、卫生标准和舒适性标准要求。该工程采用 JTG/T D70/2-02—2014《公路隧道通风设计细则》<sup>[16]</sup>作为设计依据,隧道设计标准见表 1。

该项目所在区域空气环境属二类区,需执行 GB 3095—2012《环境空气质量标准》及 2018 年修改单中二级标准。环境空气质量标准限值见表 2。

### 2.2 设计交通量

根据交通量预测近期(2024 年)交通量为 81 623 pcu/d,呈逐年递增趋势,远期(2044 年)交通量为 93 913 pcu/d。车型比例受北京市城市副中心地

表 1 隧道设计标准

Tab. 1 Tunnel design standards

项目	交通工况	标准值
烟尘设计浓度/ $m^{-1}$	车速 80 km/h	0.006 5
	车速 70 km/h	0.006 5
	正常运营工况 车速 60 km/h	0.006 5
	车速 50 km/h	0.007 0
	车速 40 km/h	0.007 5
CO 设计含量/ $(cm^3/m^3)$	正常运营工况	100
	阻滞工况 车速 30 km/h	150
NO <sub>2</sub> 设计含量/ $(cm^3/m^3)$		1
隧道内换气次数/(次/h)		3
换气风速/(m/s)		1.5
火灾规模/MW		50

区限行政策和京津冀地区去产能等政策影响,从近期客货比 7:3 调整为远期客货比 9:1,未来隧道内交

表 2 环境空气质量标准限值

Tab. 2 Environmental air quality standard limits

污染物质量浓度	平均时间/h	二级标准
NO <sub>2</sub> /( $\mu g/m^3$ )	24	80
	1	200
CO/( $mg/m^3$ )	24	4
	1	10
颗粒物/( $\mu g/m^3$ )	粒径 $\leq 10 \mu m$	24
	粒径 $\leq 2.5 \mu m$	24
		75

通构成以客运交通为主。高峰小时系数按 0.08 取值,方向分布系数按 53%取值。

### 2.3 需风量计算

根据上述设计标准与交通量预测情况,结合隧道长度、断面和坡度等参数确定隧道需风量。

#### 1) 正常运营工况与阻滞工况

不同工况下隧道需风量见表 3。

表 3 不同工况下隧道需风量

Tab. 3 Tunnel air demand under different working conditions

隧道 线路	正常运营工况			阻滞工况			换气次数 需风量	换气风速 需风量
	稀释 CO 需风量	稀释烟尘需风量	稀释 NO <sub>2</sub> 需风量	稀释 CO 需风量	稀释烟尘需风量	稀释 NO <sub>2</sub> 需风量		
左线	658.1	314.0	258.7	569.4	205.4	287.5	669.5	219.3
右线	640.2	309.7	264.1	592.1	208.4	294.9	669.5	219.3

#### 2) 火灾工况

采用纵向排烟方式时,考虑 Kennedy 公式下临界风速的需风量,经计算,得出 50 MW 火灾时临界风速为 4.0 m/s,纵向排烟需风量为 397 m<sup>3</sup>/s。采用重点排烟方式时,根据轴对称模型进行计算,经计算,得出 50 MW 火灾的烟气生成量为 132.59 m<sup>3</sup>/s,考虑重点排烟时有卷吸效应,故重点排烟量取 180 m<sup>3</sup>/s。

## 3 通风排烟方案

### 3.1 通风方案

隧道通风方式分为纵向、横向、半横向和组合方式,其中纵向通风方式又分为全纵向、竖井送排和集中排出等。横向和半横向通风均需在隧道内布置送、排风道。研究工程盾构直径为 15.4 m,盾构段内可设置断面积为 14.9 m<sup>2</sup> 的送、排风道,最大允许通风量为 200 m<sup>3</sup>/s,不能满足横向或半横向通风的需求,且增大盾构直径会增加工程风险和土建投资,故不对横向和半横向通风方式进行比选。对于采用的纵向通风方式,根据隧道的长度、出风井难度、周边环境和景观等因素进行综合比选。经环评测算,若不采用

环保措施,隧道北洞口瞳里东区庄园的 NO<sub>2</sub> 小时质量浓度超标,小时平均最大贡献值为 241.8  $\mu g/m^3$ ,超标 20.9%,南洞口新华幼儿园的 NO<sub>2</sub> 小时质量浓度超标,小时平均最大贡献值为 211  $\mu g/m^3$ ,超标 5.5%。因此,研究工程进行通风方案比选时采用环保措施,具体比选方案如下:

1) 方案一:全纵向通风方式+隧道出口集中排放(见图 3)。

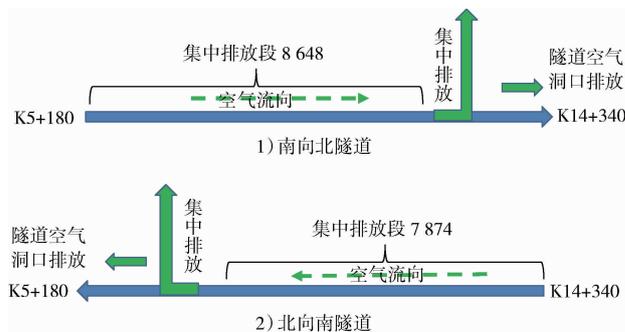


图 3 全纵向通风方式+隧道出口集中排放示意图(m)  
Fig. 3 Schematic diagram of full longitudinal ventilation mode+ centralized discharge at the tunnel exit

利用南、北盾构工作井及其后配套段作为风机房,盾构井区域设置风塔,风机房内设大型轴流风机,隧道洞口和中部设置射流风机。随着隧道内污染物排放量的减少,最大需风量为满足隧道换气次数,经核算,盾构段断面风速为 7.89 m/s,明挖段断面风速为 6.75 m/s,符合规范 10 m/s 的要求。为满足隧道周边敏感点环评要求,在南侧盾构井处设置 50 m 高排风塔,北侧盾构井处设置 40 m 高排风塔。

2)方案二:分段纵向通风方式+隧道中部集中排放(见图 4)。

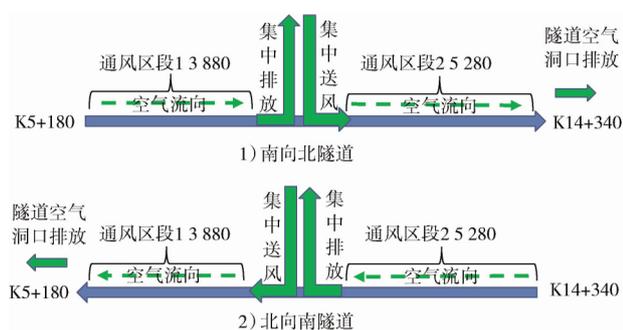


图 4 分段纵向通风方式+隧道中部集中排放示意图(m)  
Fig. 4 Schematic diagram of segmented longitudinal ventilation method+centralized discharge in the middle of the tunnel

将中间盾构工作井作为通风井进行分段送排,将通风区段分为 3 880 m(通风区段 1)和 5 280 m(通风区段 2)2 段,有效地降低了通风区段长度。中间盾构井设置大型轴流风机,2 段通风区段端部设置射流风机。为满足隧道周边环境敏感点要求,需在中间盾构井处设置 43 m 高排风塔。

3)方案三:全纵向通风方式+空气净化(见图 5)。

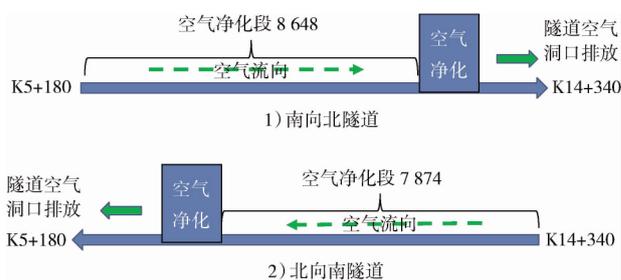


图 5 全纵向通风方式+空气净化示意图(m)  
Fig. 5 Schematic diagram of full vertical ventilation mode+air purification

将方案一中的 2 座排风塔替换为空气净化站<sup>[17-18]</sup>,主要净化烟尘和 NO<sub>2</sub>,处理后的废气经隧道洞口无组织排放,净化风量为 360 m<sup>3</sup>/s(占最大需风量的 55%)时,除尘设计净化效率大于 90%,NO<sub>2</sub> 设计净化效率大于 85%。该方案洞口周边敏感点处污染物质量浓度满足环评要求。

研究工程位于北京市城市副中心“创新发展轴”的核心位置,上方规划为六环公园。按照“六环公园要形成融合生态、绿色交通、文化体育、休闲娱乐等为一体的公共空间体系”的工作要求,将六环公园打造成城市空间质量升级的重要笔墨,充分发挥生态文明引领城市升级的组合作用。因此,在设计时不仅要考虑经济效益,还要综合考虑社会效益,如景观协调性和环保效果等。

该工程设计标准、需风量计算和通风方案的确定均以 JTG/T D70/2-02—2014《公路隧道通风设计细则》<sup>[16]</sup>为设计依据,就上述 3 种通风方案进行综合比较,比选结果见表 4。

表 4 通风方案比选结果

Tab. 4 Comparison and selection results of ventilation schemes

项目	方案一 全纵向通风方式+隧道出口 集中排放	方案二 分段纵向通风方式+隧道中部 集中排放	方案三 全纵向通风方式+空气净化
设计风量	换气次数最多,需风量为 670 m <sup>3</sup> /s	通风区段 1 换气次数最多,需风量为 290 m <sup>3</sup> /s; 通风区段 2 稀释 CO 最多,需风量为 380 m <sup>3</sup> /s	换气次数最多,需风量为 670 m <sup>3</sup> /s
通风区段	单一通风区段,通风区段长 9 160 m	左、右线通风区段,3 880 m(通风区段 1)+5 280 m(通风区段 2)	单一通风区段,通风区段长 9 160 m
断面风速	盾构段断面风速为 7.89 m/s,明挖段断面风速为 6.75 m/s,满足规范 10 m/s 要求	通风区段 2 盾构段断面风速为 4.59 m/s,明挖段断面风速为 3.93 m/s,断面风速较低	盾构段断面风速为 7.89 m/s,明挖段断面风速为 6.75 m/s,满足规范 10 m/s 要求
永久占地	地面设置 2 座排风塔	增加永久占地面积 1 630 m <sup>2</sup> ,设置 1 座排风塔	地面无通风井

续表

项目	方案一	方案二	方案三
	全纵向通风方式+隧道出口集中排放	分段纵向通风方式+隧道中部集中排放	全纵向通风方式+空气净化
隧道洞内环境	隧道内设计污染物含量符合规范要求		
环境指标 隧道周边环境	经环评测算,南、北盾构井处地面排风塔高分别为 50、40 m 时,周边环境达标; 与周边景观结合较差	经环评测算,中间盾构井处地面排风塔高 43 m 时,周边环境达标; 与周边景观结合较差	隧道两端工作井设置 2 套空气净化站,每套处理总需风量的 55%,经环评测算,周边环境达标; 与周边景观结合较好
经济性 设备费	风机 1 266 万元(射流风机 318 台,大型轴流风机 9 台)	风机 1 156 万元(射流风机 123 台,大型轴流风机 13 台)	风机 1 266 万元(射流风机 318 台,大型轴流风机 9 台);设置 2 套净化设备共 9 760 万元,处理风量 720 m <sup>3</sup> /s
土建费	合理利用盾构井空间,排风塔造价(仅考虑结构费用)257 万元	地面风机房土建造价 811 万元,排风塔造价(仅考虑结构费用)140 万元	合理利用盾构井空间,无土建费用
年运行费	717.4 万元(风机)	1 128.5 万元(风机)	717.4(风机)+405.75(空气净化站)=1 123.15 万元
合计	初始投资 1 523 万元,运营费 717.4 万元/年	初始投资 2 107 万元,运营费 1 128.5 万元/年	初始投资 11 026 万元,运营费 1 123.15 万元/年

由表 4 可知,从隧道通风角度出发,3 种通风方案均符合规范要求且具有可行性。从景观角度出发,该工程排风塔位于核心眺望节点(见图6),排风塔高度在 40~50 m 之间,造型突兀,无论是行政办公中心还是对副中心站的观景视线都有影响,与“创新发展轴”定位相矛盾,不建议采用排风塔方案。从环评角度出发,北京市城市副中心属于环境不达标区,主要不达标污染物为 PM<sub>2.5</sub>、NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub> 和 PM<sub>10</sub>,根据 HJ 2.2—2018《环境影响评价技术导则 大气环境》、《建设项目环境保护管理条例》(2017 年 10 月 1 日起施行)等文件要求,环境不达标区建设项目选择大气污染治理设施、预防措施或多方案比选时,

应优先考虑治理效果。方案三提出的空气净化方案优先考虑了治理效果,可有效降低 PM<sub>2.5</sub>、NO<sub>2</sub> 和 PM<sub>10</sub> 排放量,经环评测算,与方案一、二相比,近期(2024 年)NO<sub>x</sub> 削减量为 25.66 kg/d,THC 削减量为 29.30 kg/d;远期(2038 年)NO<sub>x</sub> 削减量为 26.15 kg/d,THC 削减量为 34.11 kg/d;同时方案三采用的空气净化方案属于以新带老措施,NO<sub>x</sub> 对比现状削减量最高可达 34.00 kg/d,THC 对比现状削减量最高可达 23.91 kg/d。因此,方案三较方案一、二更具优势,具有良好的环境社会效益。从经济角度出发,方案三初投资高于方案一、二,运营费用略低于方案二。

经综合比选,尽管方案三初投资大于方案一、二,



图 6 景观眺望系统规划

Fig. 6 Landscape viewing system planning

运营费用也高于方案一,但由于研究工程景观要求较高,且从发展角度看,未来环境收益越来越受重视,因此推荐采用方案三。

### 3.2 排烟方案

隧道排烟分为重点排烟、纵向排烟和组合式排烟。结合隧道结构特点和盾构井设置位置提出 2 种排烟方案:

1) 方案一:分段纵向排烟。

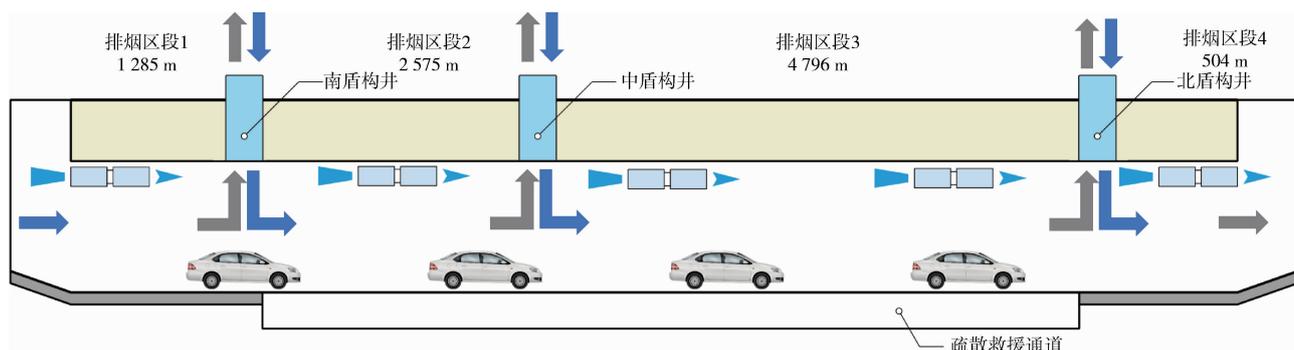


图 7 分段纵向排烟示意图

Fig. 7 Schematic diagram of segmented longitudinal smoke exhaust

利用盾构段上层空间设置重点排烟道进行重点排烟,明挖段采用纵向排烟方式。其中,重点排烟道断面积为  $14.9 \text{ m}^2$ ,排烟口间隔为  $60 \text{ m}$ ,隧道全线共设置排烟口 246 处,每处由 2 个  $4 \text{ m} \times 1 \text{ m}$  的排烟

3 处盾构井的设置分段纵向排烟提供了较为有利的条件,将隧道分为 4 个排烟区段(见图 7),长度分别为 1285、2575、4796、504 m。根据起火点位置开启对应排烟区段处的射流风机和轴流风机,分别从盾构井或洞口处排除烟气,烟气排除方向与行车方向一致。该方案将火灾烟气控制在火源下游,烟气在排烟区段 3 内的行程最长,但仍符合规范要求。

2) 方案二:重点排烟(明挖段纵向排烟)。

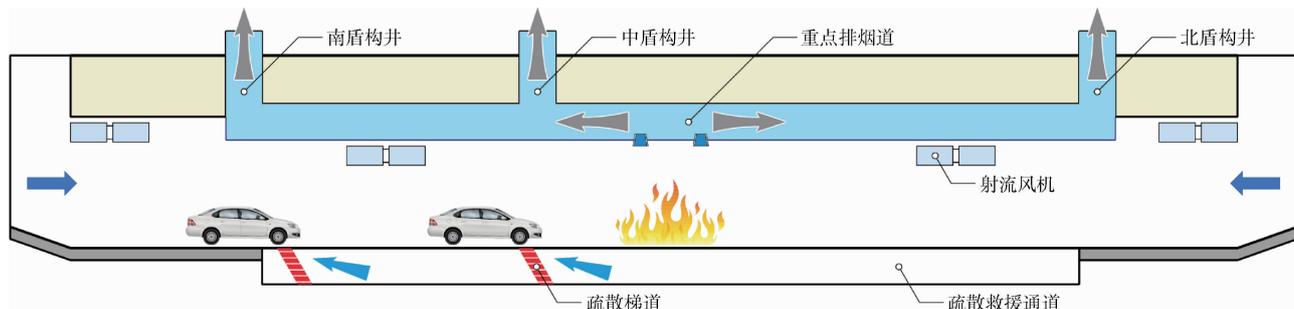


图 8 盾构段重点排烟示意图

Fig. 8 Schematic diagram of key smoke exhaust in shield tunneling section

与方案一相比,该方案盾构段火灾烟气被控制在  $300 \text{ m}$  范围内,有效缩短了烟气在行车空间内的行程,影响人员疏散范围大幅缩小。方案二有效提高了盾构段火灾安全性,且不需额外增加土建费用,因此推荐采用该排烟方案。

综合考虑隧道内环境、火灾安全性和环境评价等因素,推荐采用全纵向通风+重点排烟+空气净化方案。

阀组成。火灾时,开启火灾区域  $300 \text{ m}$  范围内的排烟阀和就近竖井内轴流风机进行重点排烟,使得盾构段烟气经重点排烟道排出隧道。明挖段排烟方式与方案一相同。盾构段重点排烟示意图见图 8。

## 4 通风方案模拟研究

通过上述综合比选,最终确定采用全纵向通风+重点排烟+空气净化方案。重点排烟方案火灾安全性研究已取得了一定的成果,如:李俊梅等<sup>[19]</sup>采用数值模拟的方法研究了不同火源功率、隧道宽度的产烟量和不同排烟口参数设定对烟气控制效果的影响,发现烟气的生成量与火源功率、隧道宽度和烟

气的蔓延长度密切相关。谢飞等<sup>[20]</sup>针对火源与排烟竖井的相对位置对重点排烟效果的影响进行了模拟研究,发现单向排烟方式在一定的排烟量条件下,火源位置越接近排烟竖井,排烟效果就越好。因此,笔者不再针对排烟工况进行数值模拟。全纵向通风方案经理论计算,隧道内污染物质量浓度和隧道断面风速均满足规范设计要求,但通风区段较长,为确保全纵向通风方案的可靠性,采用隧道通风模拟软件 IDA-RTV 对东六环改造工程隧道内环境进行模拟研究。

#### 4.1 模型建立

考虑隧道多点变坡、变断面对通风计算的影响,建立模型由 11 个模块组成,首、尾模块分别为隧道出、入洞口模块,其余 9 个模块根据隧道坡度变化的情况设置。全纵向通风方案 RTV 模型见图 9。

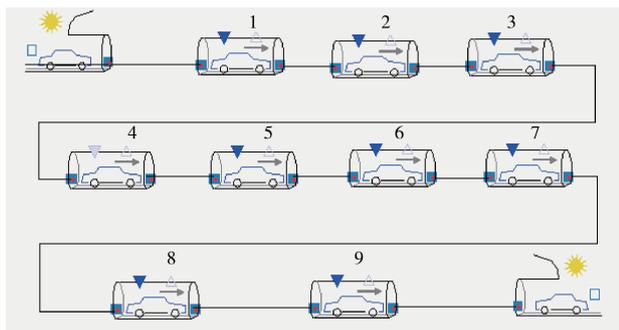


图 9 全纵向通风方案 RTV 模型

Fig. 9 RTV model of longitudinal ventilation scheme

射流风机位置和设计参数根据工程实际确定。全纵向通风方案 RTV 输入界面见图 10。

隧道外污染物背景质量浓度按环评提供数据确定,其中 CO 背景质量浓度为  $1.4 \text{ mg/m}^3$ ,  $\text{NO}_2$  背景质量浓度为  $42 \text{ } \mu\text{g/m}^3$ 。

根据交通专业预测交通量与车型比例情况,近期交通量低于远期交通量,隧道通风需满足远期环控要求。根据理论计算,远期隧道通风为最不利工况。因此,交通量和车型比例按照远期设置。

隧道内车辆组成主要为小客车、中货车和大货车,在模型中输入各类车辆对应的排放因子,按照保守估算原则,排放因子根据《城市地下道路通风工程设计指南》附录二中国的排放因子(相当于国四标准)确定。

#### 4.2 模拟工况

根据理论计算结果确定不同行车速度下风机

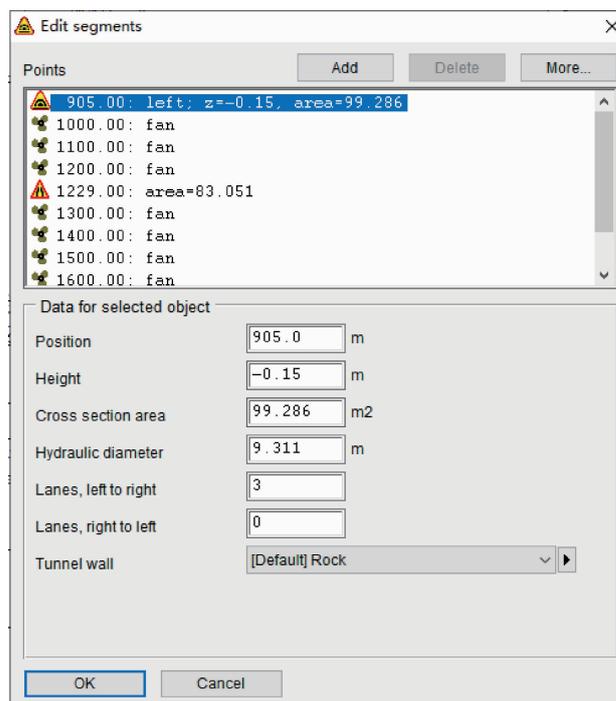


图 10 全纵向通风方案 RTV 输入界面

Fig. 10 RTV input interface for the full longitudinal ventilation scheme

开启台数,并根据行车速度工况分别对隧道断面风速进行模拟计算。不同行车速度下风机开启台数见表 5。

表 5 不同行车速度下风机开启台数

Tab. 5 Number of fans activated at different driving speeds

车速/(km/h)	设计风机台数(隧道右线)
80	12
70	42
60	72
50	96
40	117
30(阻滞)	129

根据隧道通风计算可知,隧道内污染物质量浓度分布最不利工况为阻滞工况。因此,仅对阻滞工况进行模拟。

#### 4.3 模拟结果分析

##### 4.3.1 断面风速

隧道长 8 510~8 910 m 区间内 30 km/h 隧道主线盾构明挖交界段断面风速见图 11。

由图 11 可知,断面变化位置为 8 656 m 处,程序运行 15 min 后,隧道主线盾构明挖交界段断面风速趋于稳定。

Hour	VAir						
	(8510.0), m/s	(8564.0), m/s	(8611.5), m/s	(8657.5), m/s	(8710.0), m/s	(8810.0), m/s	(8910.0), m/s
0.0-0.05	3.67	3.67	3.67	3.14	3.14	3.14	3.14
0.05-0.1	8.01	8.01	8.01	6.85	6.85	6.85	6.85
0.1-0.15	8.30	8.30	8.30	7.10	7.10	7.10	7.10
0.15-0.2	8.31	8.30	8.31	7.10	7.10	7.11	7.11
0.2-0.25	8.31	8.30	8.31	7.10	7.10	7.11	7.11
0.25-0.3	8.31	8.31	8.31	7.10	7.10	7.11	7.11
0.3-0.35	8.31	8.31	8.31	7.10	7.11	7.11	7.11
0.35-0.4	8.31	8.31	8.31	7.11	7.11	7.11	7.11
0.4-0.45	8.31	8.31	8.31	7.11	7.11	7.11	7.11
0.45-0.5	8.31	8.31	8.31	7.11	7.11	7.11	7.11
0.5-0.55	8.31	8.31	8.31	7.11	7.11	7.11	7.11
0.55-0.6	8.31	8.31	8.31	7.11	7.11	7.11	7.11
0.6-0.65	8.31	8.31	8.31	7.11	7.11	7.11	7.11
0.65-0.7	8.31	8.31	8.31	7.11	7.11	7.11	7.11
0.7-0.75	8.31	8.31	8.31	7.11	7.11	7.11	7.11
0.75-0.8	8.31	8.31	8.31	7.11	7.11	7.11	7.11
0.8-0.85	8.31	8.31	8.31	7.11	7.11	7.11	7.11
0.85-0.9	8.31	8.31	8.31	7.11	7.11	7.11	7.11
0.9-0.95	8.31	8.31	8.31	7.11	7.11	7.11	7.11
0.95-1.0	8.31	8.31	8.31	7.11	7.11	7.11	7.11
mean	8.06	8.06	8.06	6.89	6.89	6.90	6.90
mean*1.000000003	8.06	8.06	8.06	6.89	6.89	6.90	6.90

图 11 隧道主线盾构明挖交界断面风速

Fig. 11 Wind speed at the section of the main tunnel shield excavation boundary section

各工况隧道断面风速计算结果见表 6。

表 6 各工况隧道断面风速计算结果

Tab. 6 Calculation results of wind speed at tunnel sections under various working conditions

车速/(km/h)	明挖段断面风速/(m/s)	盾构段断面风速/(m/s)
80	7.36	8.61
70	7.26	8.49
60	7.24	8.46
50	7.16	8.37
40	7.12	8.33
30(阻滞)	7.14	8.35

由表 6 可知,明挖段与盾构段断面风速均不随车速变化而变化,原因是各车速工况下设计最大需

风量均为换气次数最多,各行车速度下最大需风量相同,断面风速趋近相同。明挖段平均断面风速约为 7.21 m/s,盾构段平均断面风速约为 8.44 m/s,断面风速模拟结果较理论计算结果偏大,但仍小于 10 m/s,符合规范要求。

#### 4.3.2 隧道内污染物质量浓度

由于隧道右线在北侧盾构井(距离隧道进口 8 648 m)处设置顶装式空气净化站,空气净化站可净化处理 NO<sub>2</sub> 和烟尘,因此隧道内的 NO<sub>2</sub> 和烟尘均向空气净化站上游移动,在空气净化站入口处达到峰值,CO 最大质量浓度仍出现在洞口处。隧道全线污染物质量浓度分布情况见图 12~14。

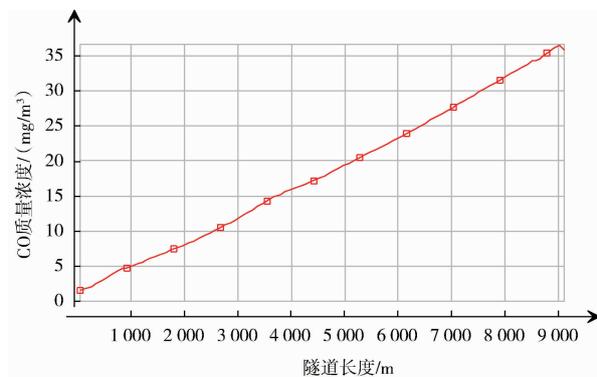
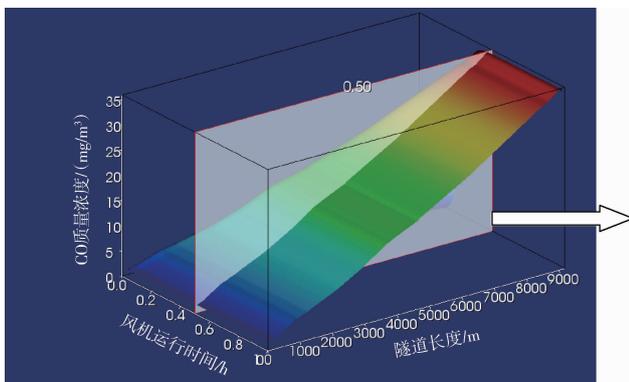


图 12 隧道全线 CO 质量浓度分布

Fig. 12 Distribution of CO mass concentration along the entire tunnel

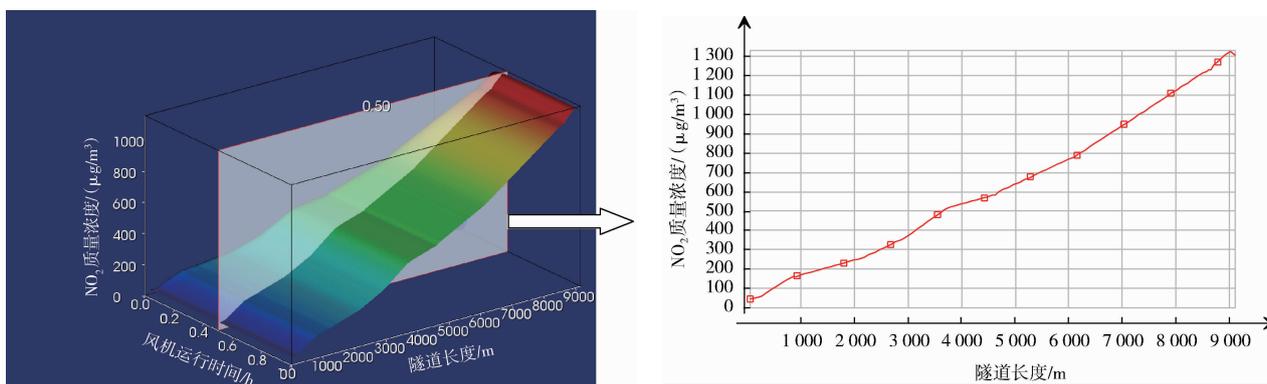
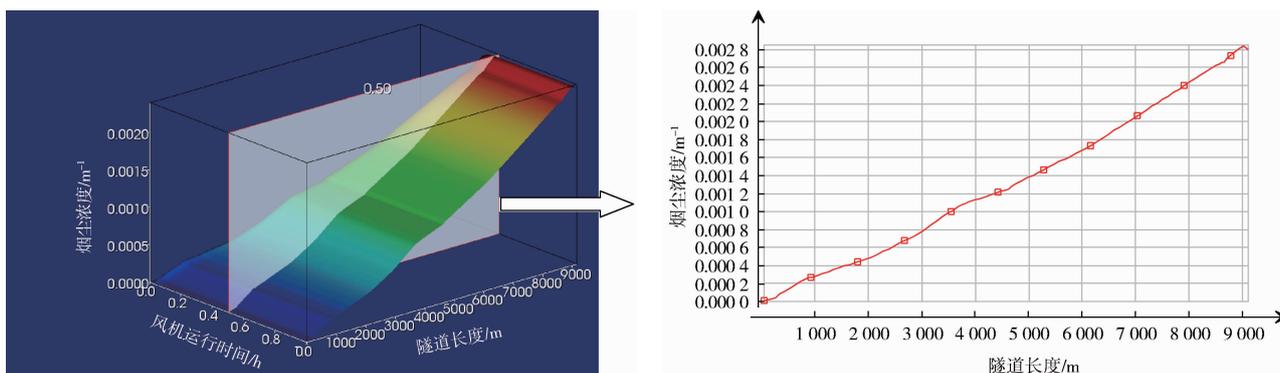
图 13 隧道全线  $\text{NO}_2$  质量浓度分布Fig. 13 Distribution of  $\text{NO}_2$  mass concentration along the entire tunnel

图 14 隧道全线烟尘浓度分布

Fig. 14 Distribution of smoke and dust concentration along the entire tunnel

由图 12~14 可知,系统运行 0.5 h 时达到稳定状态,此时 CO 的质量浓度峰值为  $35.91 \text{ mg/m}^3$  ( $37.14 \text{ cm}^3/\text{m}^3$ ),  $\text{NO}_2$  和烟尘的质量浓度峰值分别为  $1069.9 \text{ } \mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $0.522 \text{ cm}^3/\text{m}^3$ ) 和  $0.0022 \text{ m}^{-1}$ 。可以看出,隧道内全线污染物质量浓度远低于规范要求限值。分析其原因是规范规定的污染物基准排放量是综合考虑各地区发展水平等多种因素后确定的,具有时代背景,直接将这些数据应用于我国发达地区进行需风量计算,则稀释污染物所需需风量偏大;而模拟计算的污染物基准排放量参照国四标准,排放量更贴近实际,根据表 3 确定需风量,则污染物质量浓度较低。

## 5 结论与展望

结合工程实际,考虑隧道需风量、环评要求、工程造价和地理位置等影响因素,经过综合比选,最终确定采用全纵向通风+重点排烟+空气净化方案,并对制约采用全纵向通风方案的关键因素进行了

模拟研究,研究结果表明:

1) 当隧道较长,断面较大时,换气次数和需风量是制约通风区段长度拓展的关键因素,就研究工程而言,隧道纵向通风区段长度可突破至 9 160 m。若不考虑换气次数的影响,根据 IDA-RTV 软件的模拟结果可知,随着车辆尾气污染物排放量的降低,隧道稀释污染物质量浓度达到卫生标准的需风量要求大大降低,可进一步拓展隧道通风区段长度。

2) 对于环境、景观要求较高的地区,可考虑采用空气净化设施。空气净化站的设置,可使隧道外污染物排放质量浓度满足环评要求,改善空气净化段出口处隧道内环境,且能起到以新带老、节能减排的作用。

3) 该工程在全纵向通风的基础上设置重点排烟,大大缩短了烟气在隧道内蔓延的行程,提高了火灾工况下人员逃生的安全性。

4) 规范规定的污染物基准排放量与国四标准相比,较为保守,且随着新能源车的普及,污染物排放量会进一步降低。

5)该工程通车后建议对隧道运营情况和隧道内环境检测数据开展专题研究,以优化运营策略,节约运营费用。

### [参考文献]

- [1] 张迪. 盾构法道路隧道运营通风设计关键技术[J]. 隧道建设, 2014, 34(11): 1062-1070. (ZHANG D. Key technologies for operation ventilation design of road tunnels constructed by shield method[J]. Tunnel construction, 2014, 34(11): 1062-1070.)
- [2] 胡清华. 武汉东湖隧道通风方案研究[J]. 暖通空调, 2016, 46(5): 22-26. (HU Q H. Study on ventilation scheme of Wuhan East Lake tunnel[J]. Heating ventilating & air conditioning, 2016, 46(5): 22-26.)
- [3] 胡清华. 武汉三阳路地铁合建越江隧道通风设计[J]. 隧道建设, 2017, 37(1): 62-67. (HU Q H. Design of ventilation of Yangtze River-crossing highway-metro integrated tunnel on Sanyang road in Wuhan[J]. Tunnel construction, 2017, 37(1): 62-67.)
- [4] ASSOCIATION W R. Road tunnels: vehicle emissions and air demand for ventilation[R]. France: World Road Association, 2012: 19-31.
- [5] 梁艳, 魏志华, 唐春华. 汕头苏埃隧道运营通风系统设计[J]. 暖通空调, 2021, 51(3): 78-83, 94. (LIANG Y, WEI Z H, TANG C H. Operation ventilation system design for Shantou Suai Tunnel[J]. Heating ventilating & air conditioning, 2021, 51(3): 78-83, 94.)
- [6] 夏永旭. 我国长大公路隧道通风中的几个问题[J]. 公路, 2003(5): 146-149. (XIA Y X. Research on effect of excavation of highway through cut on structure of a neighboring railway tunnel[J]. Highway, 2003(5): 146-149.)
- [7] 车轮飞. 公路隧道通风系统设计工程实录[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015: 17-24. (CHE L F. Record analysis of ventilation system design of highway tunnel[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015: 17-24.)
- [8] 孙继洋. 山西太古路特长隧道通风方案优化研究[D]. 西安: 长安大学, 2012. (SUN J Y. Research and optimization ventilation scheme for super-long highway tunnel of Shanxi Taigu[D]. Xi'an: Chang'an University, 2012.)
- [9] 郑暄, 李凡, 李雪. 交通风作用下的隧道运营通风研究[J]. 地下空间与工程学报, 2021, 17(4): 1322-1327. (ZHENG X, LI F, LI X. Study on the traffic wind effect for the ventilation of highway tunnel operation[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2021, 17(4): 1322-1327.)
- [10] 北京市市政工程设计研究总院有限公司, 等. 城市地下道路通风工程设计指南[M]. 北京: 中国城市出版社, 2016: 132-166. (Beijing General Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., et al. Design guide for ventilation engineering of urban underground roads[M]. Beijing: China City Press, 2016: 132-166.)
- [11] 李琼, 陈超, 许淑惠, 等. 交通风对不同结构城市地下道路污染物扩散影响的比较研究[J]. 环境污染与防治, 2018, 40(11): 1214-1218, 1223. (LI Q, CHEN C, XU S H, et al. Comparative research on pollutant dispersion based on traffic force in urban straight tunnel and bifurcation tunnel[J]. Environmental pollution & control, 2018, 40(11): 1214-1218, 1223.)
- [12] 赵红莉, 徐志胜, 彭锦志, 等. 纵向排烟与集中排烟下烟气控制效果的对比研究[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(1): 196-201. (ZHAO H L, XU Z S, PENG J Z, et al. Comparative study between the longitudinal ventilation smoke control mode and the central smoke exhaust mode[J]. Journal of safety and environment, 2012, 12(1): 196-201.)
- [13] 雷帅. 火山特长公路隧道通风方案比选研究[J]. 四川建材, 2020, 46(7): 136-137. (LEI S. Comparison and selection of ventilation schemes for volcano extra long highway tunnels[J]. Sichuan building materials, 2020, 46(7): 136-137.)
- [14] 付朝辉, 曾艳华, 何涛. 8 km 特长公路隧道通风系统优化配置[J]. 交通运输工程与信息学报, 2020, 18(2): 10-17. (FU Z H, ZENG Y H, HE T. Optimized ventilation system for an extra-long highway tunnel[J]. Journal of transportation engineering and information, 2020, 18(2): 10-17.)
- [15] 曹文宏, 中伟强. 超大特长盾构法隧道工程设计: 上海长江隧道工程设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010: 237-262. (CAO W H, ZHONG W Q. Design of ultra large and extra long shield tunnel engineering: design of Shanghai Yangtze River tunnel engineering[M]. Beijing: China architecture & building press, 2010: 237-262.)
- [16] 中华人民共和国交通运输部. 公路隧道通风设计细则: JTG/T D70/2-02—2014[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2014: 15-62. (Ministry of Transport of the People's Republic of China. Guidelines for design of ventilation of highway tunnels: JTG/T D70/2-02—2014[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2014: 15-62.)
- [17] 杨洪海, 郭浩, 崔兴华, 等. 静电除尘器在公路隧道中的试验研究[J]. 现代隧道技术, 2019, 56(1): 164-168. (YANG H H, GUO H, CUI X H, et al. Experimental study on electrostatic precipitator for air cleaning system in road tunnels[J]. Modern tunnelling technology, 2019, 56(1): 164-168.)
- [18] 郭志杰, 张灿程. 静电除尘在天山胜利隧道通风中的应用研究[J]. 现代隧道技术, 2020, 57(2): 73-79. (GUO Z J, ZHANG C C. Application of electrostatic precipitation technology to Shengli tunnel in Tianshan[J]. Modern tunnelling technology, 2020, 57(2): 73-79.)
- [19] 李俊梅, 涂登凯, 李炎锋, 等. 隧道火灾中重点排烟的排烟量及排烟口布置[J]. 北京工业大学学报, 2023, 49(3): 363-370. (LI J M, TU D K, LI Y F, et al. Smoke exhaust rate and exhaust vent distribution of the point exhaust system in tunnel fire[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2023, 49(3): 363-370.)
- [20] 谢飞, 董启伟, 常默宁, 等. 火源与排烟竖井的相对位置对重点排烟效果的影响研究[J]. 消防科学与技术, 2021, 40(2): 213-216. (XIE F, DONG Q W, CHANG M N, et al. Study on the influence of the relative position of fire source and smoke exhaust shaft on point smoke exhaust effect[J]. Fire science and technology, 2021, 40(2): 213-216.)

其他作者: 谢飞, 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事隧道通风排烟研究工作。  
董启伟, 男, 工程师, 硕士, 主要从事隧道通风排烟研究工作。