

# 长距离物料运输编组与调度模型开发

王建<sup>1</sup> 王利明<sup>2,3\*</sup> 王军<sup>1</sup> 刘永胜<sup>2,3</sup> 赵海雷<sup>2,3</sup> 张洁<sup>4</sup>

1. 新疆水发建设集团有限公司, 中国·新疆 乌鲁木齐 830000
2. 盾构及掘进技术国家重点实验室, 中国·河南 郑州 450001
3. 中铁隧道局集团有限公司广州, 中国·广东 广州 511458
4. 中国土木工程学会, 中国·北京 100000

**摘要:** 为解决长距离隧洞 TBM 掘进施工中物料运输车辆编组调度难、车辆等待错车时间长等问题, 依托新疆某供水工程 KS 隧洞, 根据 TBM 掘进和边顶拱衬砌施工两种施工模式, 基于长距离隧道施工车辆智能调度管理系统, 设计了两种工况下运输车辆编组及调度流程, 建立了基于混凝土浇筑强度和作业时长为目标的车辆运行时长调度模型。

**关键词:** TBM; 边顶拱衬砌; 物料运输编组; 车辆调度; 错车平台

## Long-distance material transportation grouping, scheduling model development and application

Wang Jian<sup>1</sup>, Wang Liming<sup>2,3\*</sup>, Wang Jun<sup>1</sup>, Liu Yongsheng<sup>2,3</sup>, Zhao Hailei<sup>2,3</sup>, Zhang Jie<sup>4</sup>

1. Xinjiang Shuifa Construction Group Co., Ltd., China Xinjiang Urumqi 830000
2. State Key Laboratory of Shield Machine and Boring Technology, China Henan Zhengzhou 450001
3. China Railway Tunnel Group Co., Ltd. Guangzhou, China Guangdong Guangzhou 511458
4. China Civil Engineering Society, China Beijing 100000

**Abstract:** In order to solve the problems of difficult scheduling of material transportation vehicles and long waiting time for staggered vehicles in long-distance tunnel TBM boring construction, relying on the KS tunnel of a water supply project in Xinjiang, based on two construction modes of TBM boring and side arch lining construction, and based on the intelligent scheduling management system of long-distance tunneling construction vehicles, the scheduling process of transportation vehicles in the two conditions is designed, and the vehicle operation time scheduling model is established based on the objectives of concrete pouring strength and operation time.

**Keywords:** TBM; Side roof arch lining; Material transportation grouping; Vehicle scheduling; Staggered platforms

## 0 引言

随着“一带一路”倡议和西部大开发的持续深入实施, 全断面硬岩掘进机(TBM)工法在超特长隧道工程得到越来越多成功应用, 如新疆 YEGS 二期输水工程总长 540 km, 正洞采用 18 台 TBM 集群施工, 单机最长掘进距离达 26km<sup>[1,2]</sup>。虽然超特长隧道施工时可以发挥 TBM 施工速度快、对地质条件适应性强的特点, 但施工中物料运输调度的效果确实也是影响施工进度及安全及成本控制的关键。

长距离物料运输不畅时极易导致车辆拥堵、运输效率低, 进而影响 TBM 正常掘进和衬砌混凝土浇筑作业等, 多运输车辆编组及智能调度可在掌握车辆运行状态、车辆

运载能力的基础上, 对车辆运输量、车辆行驶调度进行智能化统筹管理, 提升长距离物料运输效率, 降低多车行驶风险<sup>[3]</sup>。在调度策略方面, 目前主要通过设定一系列的规则来决定车辆的调度顺序和路径。然而, 这种方法的灵活性和应对突发事件的能力有限, 目前一些学者尝试采用基于 AI 的智能调度系统对施工进度、物料供应、设备状态等多方面的数据进行分析, 实现更为灵活和高效的调度管理, 如: 梁峻海等<sup>[4]</sup> 依托大直径盾构施工的隧道工程, 开展了单车道物料运输车辆的调度模型研究; 白云<sup>[5]</sup> 采用拉格朗日乘子法建立车辆运输最优模型, 解决了隧道工程双轨单线道岔最优布设问题; 朱鹏浩等<sup>[6]</sup> 通过粒子算法和神经网络相结合的方法开展了隧道事故图像识别技术研究, 开发

了隧道智能巡检系统。

综上所述, TBM 隧道施工车辆的编组调度研究已经取得了一定的进展, 但仍面临许多挑战。本文基于新疆 YEGS 二期输水工程超长距离 TBM 隧洞, 开展多车辆物料运输的车辆编组、智能化调度等研究, 实现更为高效、安全、经济的 TBM 隧道施工车辆调度策略, 为我国隧道工程高质量发展建设提供可靠的技术支撑。

### 1 工程概况

新疆某供水工程 KS 隧洞全长 283.3km, 其中某标段 TBM 正洞长 20km、开挖直径 7.03m, 隧道围岩主要为凝灰岩、凝灰岩夹角砾岩、花岗岩等。岩石强度最高为 200MPa, 岩体完整性较好。TBM 掘进及边顶拱衬砌施工时, 正洞物料运输采用双轨单线机车运输模式, 长距离运输时间隔一定的距离设置一处错车平台进行车辆会车, 固定错车平台全长 213m, 错车段 71m。移动式错车平台全长 88.5m, 错车段长度 50m。如图 1 所示。

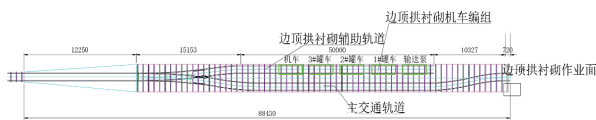


图1 固定错车平台布局示意图

### 2 调度方案

#### 2.1 编组及调度方案

TBM 掘进所需物料主要包括锚杆、钢拱架、喷射混凝土、钢筋网、水泥、外加剂、粉煤灰、润滑油等材料, 运输车辆为有轨机车编组, 包括内燃机车、平板车、混凝土罐车、人车。物料需求及调度涉及的作业区域主要包括初期支护作业区、TBM 主机室(现场工程师)、洞内调度

室、洞内物料转运区、洞外物料堆放区、运输编组等。

TBM 掘进时物料调度流程如图 2 所示, 具体为:

- (1) 根据车辆类型、材料类型确定单车运输量。
- (2) 根据 TBM 作业区材料库存情况、下步循环作业所需物料, 在 TBM 主控室调度子系统中输入物料需求计划。
- (3) 智能调度系统根据单车运输量和物料需求计划, 对运输车辆进行编组, 并向洞内调度室下达指令。
- (4) 调度中心根据需求计划、建议编组等确定实际运输编组。
- (5) 调度系统对实际运输编组与计划运输编组是否一致进行判断, 如不一致, 则对系统运行编组进行调整。如一致, 则对运输车辆进行调度。

(6) 车辆运行时智能调度流程主要包括三个场景。调度室显示大屏主要是展示车辆实时位置和车速、防碰撞预警统计、车辆运行分析等。行驶车辆主要通过车载终端对驾驶员进行播报, 主要包括车辆会车、防碰撞、超速、溜车等。在有 TBM 后方设有旋转平台的无轨运输时, 旋转平台处主要对车辆达到、等待、进入、驶出、平台旋转等进行调度指令播报。

边顶拱衬砌施工时物料调度流程如图 3 所示, 具体为:

- (1) 在智能调度系统中输入隧道参数。如, 错车平台数量  $m$ 、固定错车平均间距  $L$ 、最后一个错车平台至衬砌台车的距离  $L_1$ 、平均车速  $V_{车}$ 、机车数量  $N$  车、每日计划浇筑的混凝土数量  $V_{计划}$ 。
- (2) 系统根据当日混凝土浇筑计划, 计算确定运输混凝土灌数  $N_{灌}$ 。

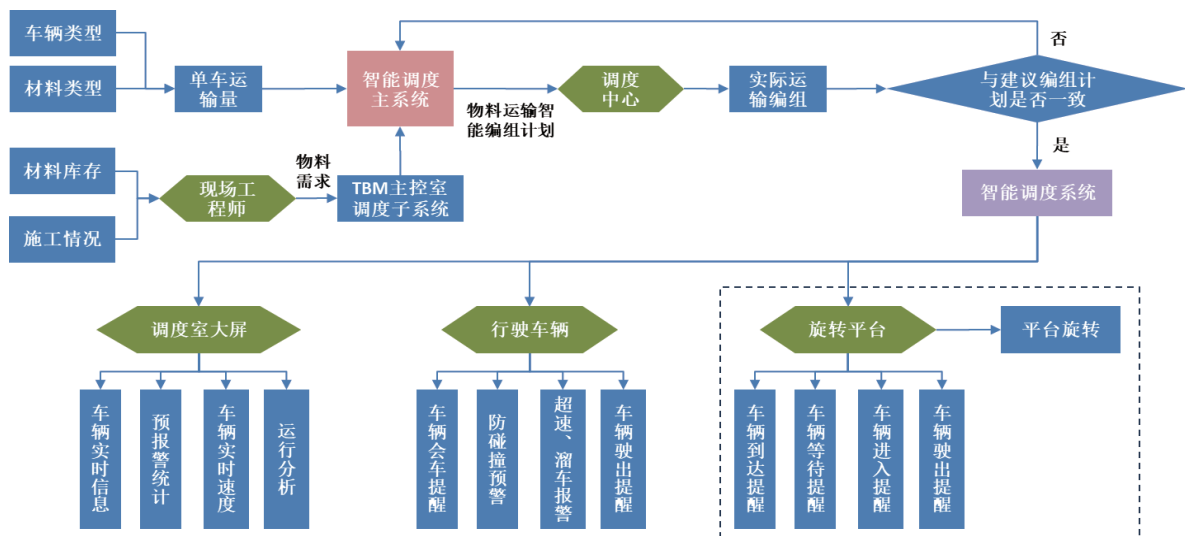


图2 TBM掘进物料运输编组及调度流程

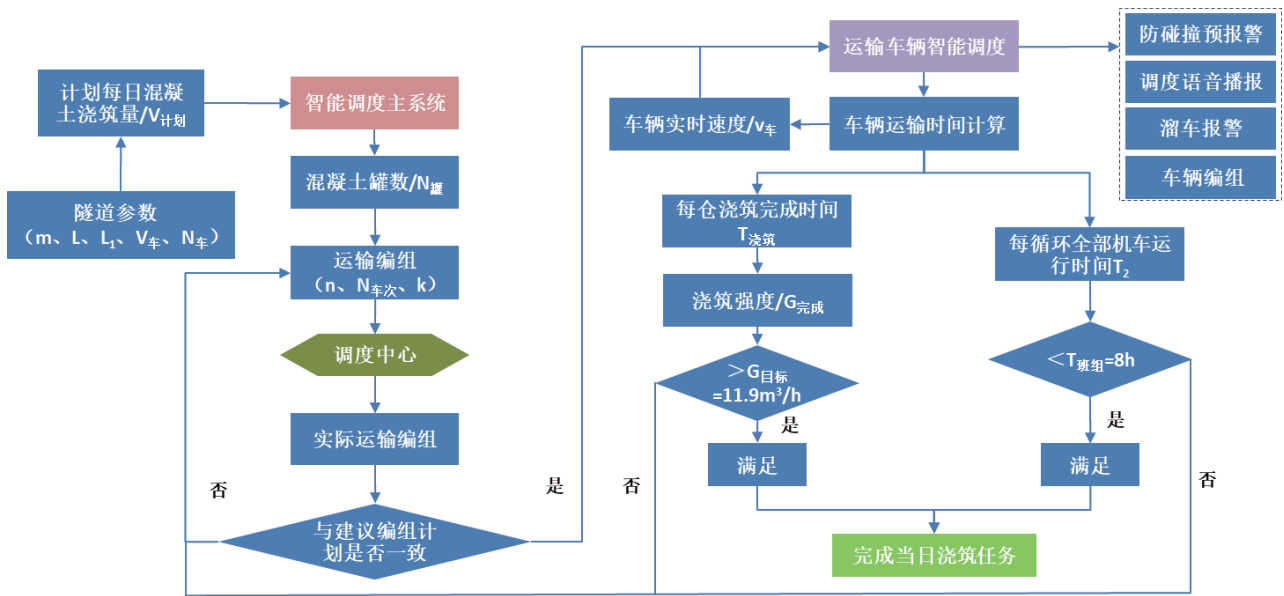


图3 边顶拱混凝土衬砌物料运输编组及调度流程

(3) 系统根据浇筑计划及车辆情况，计算确定运输编组，如每机车牵引混凝土罐数  $n$ 、所需机车车次  $N$  车次、运输编组循环次数  $k$ ，并在系统界面显示建议编组。

(4) 调度中心人员根据物料需求及建议编组进行物料调度和车辆编组，完成物料装车后，在系统确认该班次具体运输编组。

(5) 系统根据实际运输编组进行判断，如果施工现场没有按照系统建议的编组进行运输，则根据实际编组返回计算剩余运输编组；如果按照系统建议编组进行运输，则继续执行调度系统。

(6) 调度系统根据车辆实时位置、车辆实时速度、错车平台及作业面位置等信息，对多车辆行驶进行防碰撞预警、溜车报警、跟进、等待、错车等智能调度。

(7) 根据车辆运输时间计算每仓混凝土浇筑完成时间  $T_{浇筑}$ ，进而计算混凝土浇筑强度  $G_{完成}$ ，如果  $G_{完成} > G_{目标}$ ，则该仓混凝土浇筑认为完成，否则进行重新编组。

(8) 根据车辆运输时间计算每循环全部机车运行时间  $T_2$ ，如果  $T_2$  小于  $T_{班组}$ ，则该机车运输循环满足要求，否则进行重新编组。

(9)  $G_{完成}$ 、 $T_2$  均满足要求是，完成当然浇筑认为，满足该日混凝土运输计划。

### 2.2 车辆运行调度模型建立

由于输水隧洞断面尺寸小、TBM 掘进施工占用空间大，因此，长距离输水隧洞在 TBM 掘进施工贯通后，再进行边顶拱混凝土衬砌作业。边顶拱混凝土浇筑施工时，长距离隧道一般设置 2 个浇筑作业面，在作业面 1 浇筑边顶拱衬砌时，衬砌台车下方移动错车平台只允许 1 辆机车作业，第二辆机车可停在 6# 固定错车平台处，等待第一辆机车浇筑完成返回 6# 错车平台后，方可进入作业面 1。由于错车平台之间的线路为单车道，因此，其他机车行驶时，只允许在错车平台处会车。混凝土运输线路示意图如图 4 所示。

机车在 6# 错车平台到衬砌台车之间的往返行驶时间  $t$  为：

$$t = \frac{2L_1}{v_{车}} \quad (\text{公式 1})$$

式中： $L_1$  为衬砌台车前方最后 1 个错车平台到衬砌台车的距离，km； $v_{车}$  为车辆平均行驶速度，km/h。

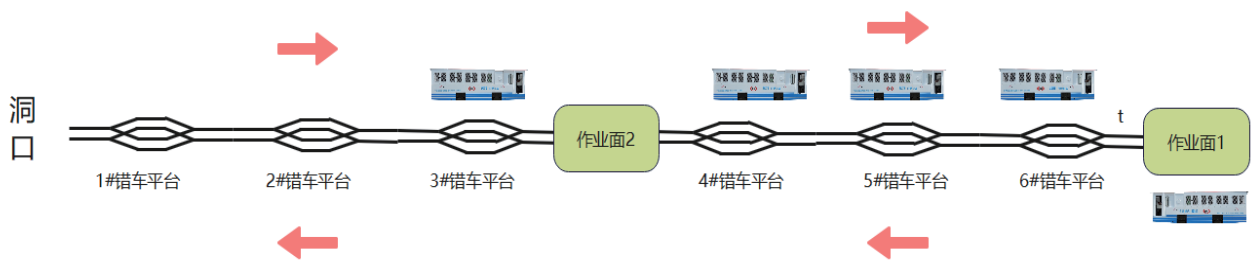


图4 混凝土运输示意图

L	m	L1	V计划	N罐	n	N车次	k	G计划 (m³/h)	G仓 (m³/h)	η (%)	是否满足	T完(h)	T班组(h)	是否满足
2	9	1	80	10	1	10	3	18.46	11.90	55.13	是	7.73	8.00	是
			80	10	2	5	2	20.00	11.90	68.07	是	7.40	8.00	是
2	8	2	80	10	1	10	3	14.12	11.90	18.66	是	8.73	8.00	否
			80	10	2	5	2	16.00	11.90	34.45	是	8.07	8.00	否
2.5	7	1.5	80	10	1	10	3	16.00	11.90	34.45	是	8.32	8.00	否
			80	10	2	5	2	17.78	11.90	49.41	是	7.82	8.00	是
2.5	6	2.5	80	10	1	10	3	12.63	11.90	6.13	是	9.23	8.00	否
			80	10	2	5	2	14.55	11.90	22.27	是	8.40	8.00	否
3	6	1	80	10	1	10	3	18.46	11.90	55.13	是	7.73	8.00	是
			80	10	2	5	2	20.00	11.90	68.07	是	7.40	8.00	是
3	5	3	80	10	1	10	3	11.43	11.90	-3.95	否	9.90	8.00	否
			80	10	2	5	2	13.33	11.90	12.02	是	8.90	8.00	否
3.5	5	1.5	80	10	1	10	3	16.00	11.90	34.45	是	8.32	8.00	否
			80	10	2	5	2	17.78	11.90	49.41	是	7.82	8.00	是
3.5	4	3.5	80	10	1	10	3	10.43	11.90	-12.35	否	10.40	8.00	否
			80	10	2	5	2	12.31	11.90	3.45	是	9.23	8.00	否

从第 1 辆机车牵引混凝土罐车开始进入正洞至 1 仓 (作业面 1) 混凝土浇筑完毕的时间  $T_1$  为:

$$T_1 = m \times \frac{L}{v_{车}} + t \times N_{罐} + 0.3 \times N - \frac{t}{2} + t_0 \quad (公式 2)$$

式中:  $m$  为衬砌台车前方错车平台数量, 个;  $L$  为固定错车平台间距, km;  $N_{机车}$  为浇筑 1 仓边顶拱施工所用机车数量, 台;  $N_{罐}$  为浇筑 1 仓边顶拱施工所用混凝土罐数, 个;  $t_0$  为混凝土装罐即等待进洞时间, h。

最后 1 辆机车浇筑完毕返回隧洞口时, 整个机车编组用时  $T_2$  为:

$$T_2 = 2m \times \frac{L}{v_{车}} + t \times N_{罐} + 0.3 \times N = T_1 + m \times \frac{L}{v_{车}} + t/2 \quad (公式 3)$$

如果 4 辆机车时每辆机车牵引 3 个混凝土灌, 那么只需要 2 辆机车各牵引 3 个混凝土罐车, 2 辆机车牵引 3 个混凝土罐车, 该列编组 1 个循环混凝土运量刚好为  $80m^3$ 。如果个别车辆牵引混凝土罐车较少时, 部分机车就需要进行第二次运输, 整体达到  $80 m^3$  运输量。

循环运输时, 第 1 辆浇筑完返程 + 装料 + 次循环到最后一个错车平台时间  $T_3$  为:

$$T_3 = 2m \times \frac{L}{v_{车}} + \frac{L_1}{v} + t_0 \quad (公式 4)$$

除首循环首车外全部浇筑完时间为  $T_4$ , 当每循环只有 1 辆车时, 取 0。

$$T_4 = T_1 - t_1 \quad (公式 5)$$

式中:  $t_1$  为第 1 辆车混凝土浇筑时间,  $t_1 = 0.3n_1$ ;  $n_1$  为第 1 辆车牵引混凝土灌数, 个。

浇筑完 1 仓混凝土, 机车编组循环间隔时间  $T_5$  为:

$$T_5 = T_4 - T_3 \quad (公式 6)$$

全部浇筑完 1 仓混凝土所用时间  $T_{浇筑}$  为:

$$T_{浇筑} = T_1 + (k-1)T_5 + t_{x1} + t_{x2} + \dots + t_{xk} \quad (公式 7)$$

式中:  $t_{xi}$  为每机车到达及浇筑时间, h;  $k$  为循环次数。

$$t_{xi} = \begin{cases} \frac{L_1}{v_{车}} + 0.3n_1 \geq & k-1 \quad 1 \\ 0 < & k-1 \quad 1 \end{cases} \quad (公式 8)$$

全部浇筑完 1 仓混凝土 + 所用车辆返回到洞口调度区时, 机车编组所用时间  $T_{完}$  为:

$$T_{完} = T_1 + (k-1)T_5 + t_{x1} + t_{x2} + \dots + m \frac{L}{v_{车}} + \frac{t}{2} = T_{浇筑} + m \frac{L}{v_{车}} + \frac{t}{2} \quad (公式 9)$$

当日计划边顶拱浇筑强度为  $G_{计划}$ , 即:

$$G_{\text{翻}} = \frac{V_{\text{翻}}}{N_{\text{罐}} \times t + 0.3N} \quad (\text{公式 } 10)$$

则浇筑效率提升  $\eta$

$$\eta = \frac{G_{\text{翻}} - G}{G_{\text{仓}}} \times 100\% \quad (\text{公式 } 11)$$

式中： $V_{\text{计划}}$ 为调度计划混凝土运输量， $\text{m}^3$ ； $G_{\text{计划}}$ 为调度计划单位时间内混凝土浇筑量， $\text{m}^3/\text{h}$ ； $G_{\text{仓}}$ 为单位时间内每仓混凝土实际浇筑量，即目标浇筑强度， $\text{m}^3/\text{h}$ 。

在进行车辆编组及调度运行分析时，同时满足下列条件时，该日编组及调度工序满足施工要求：

$$T_{\text{计划}} \leq G_{\text{目标}} \quad (\text{公式 } 12)$$

$$T_{\text{完}} \leq T_{\text{班组}} \quad (\text{公式 } 13)$$

固定错车平台间距为 2km 时（9 个固定错车平台），每机车牵引 2 个罐车，充分调度后浇筑强度为 16 $\text{m}^3/\text{h}$ ，浇筑强度提升最大为 34.45%，浇筑作业时长为 8.07h，超班组作业时长 4.2min，每日可浇筑混凝土 387.36 $\text{m}^3$ ；固定错车平台间距为 2.5km 时（7 个固定错车平台），充分调度后浇筑强度为 14.55 $\text{m}^3/\text{h}$ ，浇筑强度提升最大为 22.27%，浇筑作业时长为 8.40h，超班组作业时长 24min，每日可浇筑混凝土 366.67 $\text{m}^3$ 。

综合，6 辆机车时，每仓混凝土衬砌作业时长均超过班组作业时长，建议第 6 辆机车作为备用机车进行物料编组，

根据上述各方案混凝土浇筑强度和作业时长对比分析可知：

（1）机车数量为变量进行车辆编组方案分析可以知，固定错车平台间距布设为 2.5km，其次为 3km，即 2.5~3km 之间最优。

（2）以 4 辆机车时、每机车牵引 3 个罐车，5 辆机车时、每机车牵引 2 个罐车为最优编组方案。

（3）如果在边顶拱衬砌台车处设置错车平台或混凝土浇筑时允许衬砌台车下方的移动错车平台停放运输编

组，隧洞内固定错车平台间距可适当增大，减少错车平台数量。

### 3 结语

针对新疆某供水工程 KS 隧洞工程长距离 TBM 掘进及边顶拱衬砌浇筑物料运输问题，建立了不同工况下物料运输编组及调度流程，并构建了车辆运行调度模型及现场施工标准。

（1）建立了 TBM 掘进和边顶拱衬砌混凝土浇筑两种工况下物料运输编组及调度流程，并在隧道施工车辆智能调度管理系统基础上，开发了物料运输编组及调度子系统。

（2）根据物料运输车辆、错车平台间距等运输变量，建立了以混凝土浇筑强度、作业时长为目标的车辆运行编组及调度模型，并确定了编组调度满足要求标准。

### 参考文献：

[1] 邓铭江, 谭忠盛. 超特长隧洞 TBM 集群试掘进阶段适应性分析[J]. 隧道建设 (中英文), 2019, 39(01): 1-22.

[2] 邓铭江. 深埋超特长输水隧洞 TBM 集群施工关键技术探析[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(04): 577-587.

[3] 廖少明, 李文勇, 王璇. 盾构隧道快速施工法试验研究[J]. 施工技术, 2002, 31(6): 4.

[4] 梁峻海, 张晓平, 谢维强等. 长距离大直径盾构隧道洞内单车道段车辆调度模型研究[J]. 隧道建设 (中英文), 2018, 38(增刊 2): 209.

[5] 白云. 土压平衡盾构隧道施工运输中的最优化方法[J]. 市政技术, 2002(2): 36.

[6] 朱鹏浩, 张世义, 李军. 基于多传感器融合的隧道智能巡检系统[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(2): 648-655.

基金项目：中国中铁股份有限公司科技研究开发计划（2023- 重大 -19）；中铁隧道局集团科技创新计划（隧研合 2019-10）。

作者简介：王建（1984-），男，正高级工程师，研究方向：水利工程建设技术开发与管理工作。

王利明（1983-），男，正高级工程师，研究方向：隧道及地下工程技术开发方面的工作。