

雁门关公路隧道通风方案研究

夏永旭、张进县¹、王永东、胡学富¹、赵峰、靖搏¹

(长安大学公路学院, 710064, 西安)
(陕西金路交通科技发展有限公司¹, 710068, 西安)

摘要: 从地理环境、气候条件、工程地质、交通流量、土建投资、运营费用以及防火救灾功能等方面, 详细研究了雁门关公路隧道的 7 种通风方式, 通过多方案的技术经济比较, 给出了雁门关公路隧道的通风方案。通过数值模拟方法, 给出了推荐方案的隧道风压、风速和污染物浓度变化曲线。

关键词: 雁门关, 公路隧道, 通风, 方案

雁门关公路隧道位于二河国道主干线山西省境内的新广武—原平高速公路上, 双洞单向交通, 两洞轴线相距 40m。隧道区域地形复杂, 山岭险峻, 峰峦叠嶂, 中间段隧道最大埋深超过 1000m。右线(上行线)设计长度 5235m, 进口标高 1471.64m, 出口标高 1389.14m, 平均海拔高度 1430.39m。左线(下行线)设计长度 5160m, 进口标高 1389.26m, 出口标高 1472.34m, 平均海拔高度 1430.80m。两隧道内均设有人字坡, 右线进口段 420m 坡度为 1.56%, 其余 4815m 为 -1.84%; 左线进口 4830m 坡度为 1.84%, 其余 330m 为 -1.7%。隧道内设计最大行车速度 80km/h, 隧道区域夏季平均温度 20℃。

1. 需风量的计算

根据交通量预测, 2014 年交通量为 15300 辆/日(标准车), 2024 年交通量为 22700 辆/日(标准车)。右左线车辆比例系数 0.51:0.49, 高峰小时交通量占总交通量 10%。表 1 列出了各种类型车辆的比例分配情况。

表 1 各种类型车辆实际所占比例

燃油类型	汽油车						柴油车					
	拖挂	大客	中货	轻货	中客	小客	集装	拖挂	大客	大货	中货	轻货
比例 (%)	0.156	0.297	2.423	6.453	8.128	43.772	0.547	13.645	6.127	10.513	5.173	2.766
合计	61.229%						38.771%					

根据《公路隧道通风照明设计规范》(JTJ026.1-1999)^[1], 取一氧化碳(CO)允许浓度

$$\delta = 250 \text{ppm} \quad (\text{正常运营}) \quad (1)$$

$$\delta = 300 \text{ppm} \quad (\text{交通阻塞}) \quad (2)$$

烟雾允许透过率

$$k = 0.007 \text{m}^{-1} \quad (3)$$

则隧道内的汽车污染物

$$Q_{co} = \frac{1}{3.6 \times 10^6} \cdot q_{co} \cdot f_a \cdot f_d \cdot f_h \cdot f_{ih} \cdot L \cdot \sum_{m=1}^n (N_m \cdot f_m) \quad (4)$$

式中, Q_{co} 为隧道全长 CO 排放量, m^3/s ; q_{co} 为 CO 基准排放量, 取 $0.01m^3/辆 \cdot km$; f_a 为考虑 CO 的车况系数, 取 1.0; f_d 为车密度系数; f_h 为考虑 CO 的海拔高度系数; 取 1.56; f_m 为考虑 CO 的车型系数; f_{ih} 考虑 CO 的纵坡—车速系数; n 为车型类别数; N_m 相应的车型交通量, 辆/h。

稀释 CO 的需风量按下式计算

$$Q_{reg(co)} = \frac{Q_{co}}{\delta} \cdot \frac{P_o}{P} \cdot \frac{T}{T_o} \times 10^6 \quad (5)$$

式中, $Q_{reg(co)}$ 隧道全长稀释 CO 的需风量, m^3/s ; P_o 标准大气压, 取 $101.325kN/m^2$; 隧址设计气压 p , 取 $84.50kN/m^2$; T_o 标准气温, 取 $273K$; T 为隧道夏季的设计气温, 取 $293K$; δ 为 CO 允许浓度, 按式 (1)、(2) 取值。L 为隧道长度, 取 $5235m$ 。

隧道内烟雾排放量, 可通过下式计算

$$Q_{VI} = \frac{1}{3.6 \times 10^6} \cdot q_{VI} \cdot f_{a(VI)} \cdot f_d \cdot f_{h(VI)} \cdot f_{i(VI)} \cdot L \cdot \sum_{m=1}^{n_D} (N_{mi} \cdot f_{m(VI)}) \quad (6)$$

式中, Q_{VI} 隧道全长烟雾排放量, m^3/s ; q_{VI} 烟雾基准排放量, 取 $2.5m^3/辆 \cdot km$; $f_{a(VI)}$ 考虑烟雾的车况系数, 取 1; $f_{h(VI)}$ 考虑烟雾的海拔高度系数, 取 1.31; $f_{i(VI)}$ 考虑烟雾的纵坡—车速系数; $f_{m(VI)}$ 考虑烟雾的车型系数; n_D 柴油车车型类别数, 取 6; N_m 相应的车型交通量, 辆/h。

稀释烟雾的需风量为

$$Q_{req(VI)} = \frac{Q_{VI}}{K} \quad (7)$$

式中, $Q_{req(VI)}$ 隧道全长稀释烟雾的需风量, m^3/s ; K 烟雾设计浓度, m^{-1} , 按公式 (1-3) 取值。

通过上述计算, 则得到雁门关公路隧道的需风量如表 2。

表 2 雁门关公路隧道需风量控制表

需风量 近、远期 (m^3/s)	右、左线	
	右线	左线
2014 年	334.2	676.4
2024 年	415.5	839.8

2. 通风方案研究

2.1. 研究的原则

雁门关公路隧道长达 $5235m$, 交通流大型柴油车所占比例比较大, 隧道内有长达 $4830m$ 的较大坡度。因此, 在通风方案研究时, 不仅要结合隧道所处的地形、地质、正常运营、交通阻塞以及防火救灾, 而且要考虑到长期运营的经济效益。故确定雁门关公路隧道通风方案研究的原则如下:

(1) 先期建设投资与后期运营费用并重原则

国内外长大公路隧道的工程实践表明, 通风的土建与设备费用约占整个隧道工程费用的 30%, 隧道通风的动力头损失与隧道的长度立方成正比。因此, 在确定隧道通风方案时, 不仅要考虑到尽可能减少近期通风主体工程的费用和通风设备的投资, 而且要十分重视降低后期运营成本。因为每年的运营费用, 将是一个十分巨大的数字, 它将直接影响到整个隧道的

运营效益和服务水平。

(2) 近、远期工程相结合的原则

雁门关公路隧道的交通量预测分为两个阶段，前期为 2014 年，远期为 2024 年。所以在进行通风方案研究时，除了土建工程一次完成外，通风设备将分期购置和安装，这样既避免了一次设备投入费用过大，造成设备闲置，又为结合未来实际汽车排污水平，进一步优化设备配置留有空间。

(3) 正常运营和防灾救灾相结合的原则

公路隧道通风方案的设计，除要满足交通运营通风外，还必须满足火灾发生时的通风需求。即把正常运营和火灾时的通风看作是通风系统的两种不同工况。因此，在通风方案研究时，对于隧道防火区段的划分、横通道的设置、火灾时的风机控制、烟流的排出路径、横通道的开启与关闭、逃生通道的空气补给、避难洞的新风需求等，都应仔细考虑。

(4) 通风方案研究和技术设计相结合原则

由于雁门关公路隧道的初步设计已经完成，本次的通风方案是在初步设计评审后的基础上进行。所以，在通风方案研究时，除了要将重点放在通风方案的研究上外，另外，必须注意通风方案的研究和通风技术设计相结合，尽可能为完善初步设计和施工图设计服务。在具体的方案研究中，卫生标准和允许烟雾透过率是所有通风方案的约束条件；充分利用双洞单向交通的汽车交通，采用分段纵向通风方式是方案研究的指导思想；地形、地貌、地质等自然条件是通风系统构思的重要因素和结构选择的基础。

2.2 通风方案介绍

(1) 右线

A1 方案：全射流纵向通风

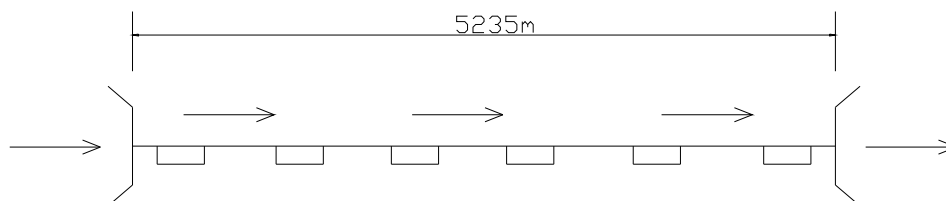


图 1 全射流纵向通风

由于右线大部分为下坡，需风量较小，加之隧道通风断面较大，所以可采用全射流纵向通风，如图 1 所示。该方案的优点是没有竖井，仅有射流风机，通风工程量小，通风设备安装简便。射流风机可以分期采购和安装，不会造成设备闲置。该方案的缺点是没有自己单独的火灾区段划分，防火救灾有困难，一旦发生火灾，烧失长度很长。

B1 方案：单竖井(k111+220)送排式加射流风机纵向通风

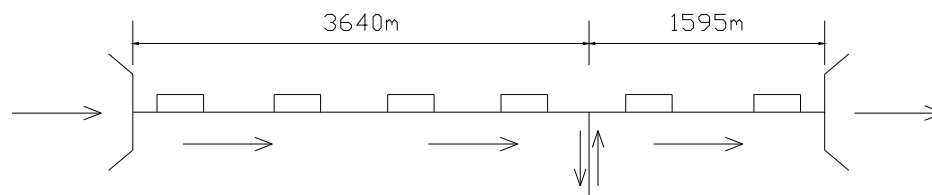


图 2 单竖井送排式加射流风机

如图 2 所示，在 k111+220 处设置一竖井，竖井深度 240m，直径 5.0m，中间设置隔板，将其分为两个通风井，一个为送风井，另一个为排风井。隧道内再布置射流风机调压。该方案的优点是多了一个竖井，且竖井靠近右线出口，能合理有效地降低隧道内的废气浓度，并且有利于防火救灾。但是必须修建风机房，上山便道长达 9.0km。更为不利的是竖井附近位置围岩均为 II 类，地质条件较差。

C1 方案：单竖井(k110+920)送排式加射流风机纵向通风

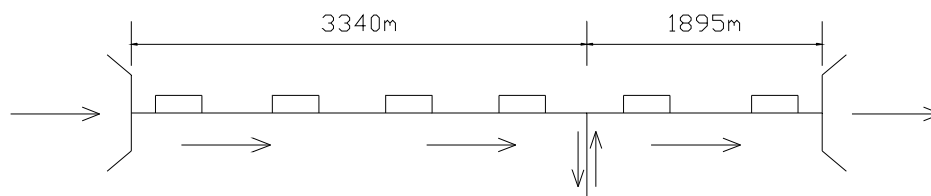


图 3 单竖井送排式加射流风机

为了改变 B1 方案竖井围岩地质较差的情况，如图 3 所示，将 B1 方案的竖井向中间移了 300m，即在 k110+920 处设置一竖井，竖井深度 376.45m，直径 5.0m。和 B1 方案比较，该方案的主要优点是竖井附近围岩地质条件好，达 V 类以上，施工困难小。但是竖井长度增加了 136.45m。

(2) 左线

A2 方案：双竖井送排式加射流风机纵向通风

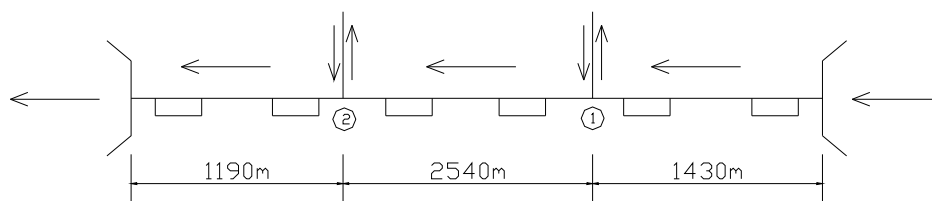


图 4 双竖井送排式加射流风机纵向通风

此方案为双竖井送排式加射流风机，将隧道分为三段，通风示意图为图 4。① # 竖井位于 k111+400，竖井深度 239m，直径 6.4m；② # 竖井位于 k108+860m，长度 157m，直径 6.4m。此方案由于采用了双竖井，所以分段长度较短，防火区段划分合理。不足的是土建工程量较大，施工便道达 18km，且竖井位置围岩也为 II 类，地质条件较差。

B2 方案：双斜井送排式加射流风机纵向通风

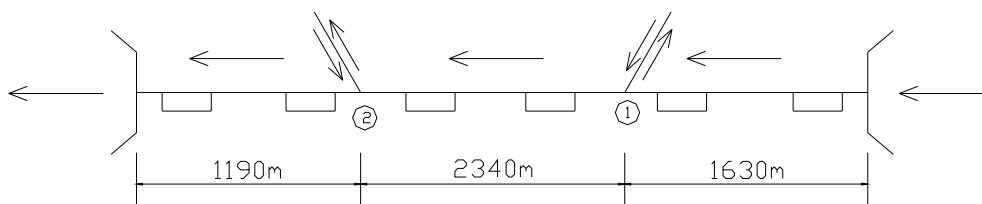


图 5 双斜井送排式纵向通风

该方案在方案 A2 的基础上，将双竖井换为双斜井，中间段比 A2 方案短 200m。斜井长度分别为 245m 和 410m，直径为 6.4m，倾角分别为 22.786 度和 23.89 度，如图 5。好处是井口标高比竖井有所降低，但井长分别增加 88m 和 171m，且由于倾角大，施工比较困难。
C2 方案：双竖井送排式加射流风机纵向通风

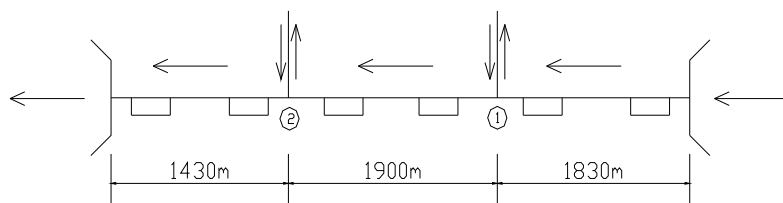


图 6 双竖井送排式加射流风机纵向通风

此方案通风示意图为图 6。为了改变 A2 方案中竖井地质条件较差，不利于施工的情况，在 A2 方案的基础上，将竖井位置进行了调整。即① # 竖井位于 k111+000，竖井长度 336.922m，直径 6.4m；② # 竖井位于 k109+100m，长度 221.962m，直径 6.4m。此方案与 A2 方案相比，由于两竖井向中间移动，使得分段长度较均匀，利于防火区段合理的划分，且竖井位置围岩地质条件较好，便于施工。不足的是竖井长度增加较多，土建工程量较大，施工便道达 20km。
D2 方案：斜竖井送排式加射流风机纵向通风

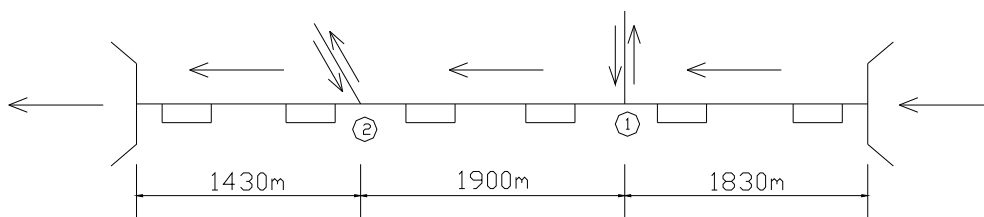


图 7 双斜井送排式纵向通风

该方案在方案 C2 的基础上，将② # 竖井换为斜井。斜井长度分别为 391.177m，直径为 6.4m，倾角为 19.766 度，如图 7。好处是井口标高比竖井有所降低，但井长增加了 169.215 m，且由于倾角大，施工较困难。

上述七方案从技术上均可行。但是最终方案的选择，还必须在详细的通风计算的基础上，对竖井位置地质、土建规模、风机配置、防火救灾功能、运营费用各个方面进行全面分析比较后，才能确定。

2.3. 通风计算结果

通风方案的计算，按照一元流理论进行。计算公式中的有关计算参数，严格按照《公路隧道通风照明设计规范》(JTJ026.1-1999)^[1]的有关规定选取。限于篇幅，略去通风计算的有关公式、各个方案的风压、风速、隧道污染物浓度的分布以及通风阻力损失、风机需求功率等。

不同通风方案的比较，除了技术可行性外，土建及运营费用的经济性，防灾救灾功能的合理性，都必须考虑。其中经济费用是十分重要的一个因素。国内外已有的经验，长大公路隧道的通风土建和设备费用要占整个项目的 30%左右。为了方案比较，表 3 给出了不同通风方案的相关费用。

表 3

不同通风方案费用汇总

单位：万元

近 远期	项目	土建费	设备费	运营费	合计
	费用				
2014 年	A1	0	154	5064	5218
	B1	2174	250	5796	8220
	C1	2617	296	5316	8229
	A2	3824	706	12480	17010
	B2	4592	820	13464	18876
	C2	4265	680	12876	17821
	D2	4719	700	13212	18631
2024 年	A1	0	224	13848	14072
	B1	2174	318	16656	19148
	C1	2617	364	16608	19589
	A2	3824	890	39048	43762
	B2	4592	944	44304	49840
	C2	4265	784	36552	41601
	D2	4719	804	38424	43947
备 注	1. 每天风机运行时间为 14 小时；2. 每度电费 1.0 元。3. 运营费用 2014 年按 10 年计，2024 年按 20 年计。				

2.4. 推荐方案

表 4

不同组合通风方案费用汇总

单位：万元

近 远期	项目	土建费	设备费	运营费	合计
	费用				
2014 年	A1-A2	3824	860	17544	22228
	A1-C2	4265	834	17940	23039
	B1-A2	5953	956	18276	25185
	C1-C2	6832	976	18192	26000
2024 年	A1-A2	3824	1114	53896	57834
	A1-C2	4265	1008	50400	55673
	B1-A2	5953	1208	55704	62865
	C1-C2	6832	1148	53160	61140
备 注	1. 每天风机运行时间为 14 小时；2. 每度电费 1.0 元。3. 运营费用 2014 年按 10 年计，2024 年按 20 年计。				

考察上述七个方案，结合通风效果、防火救灾、土建费用、施工难度，设备投入、运营成本，可以看到右线的三个方案都可以考虑。而左线的 A2、C2 方案可以考虑。因为 B2 的双竖井方案和的 D2 的竖井加斜井方案都存在土建工程量大，施工有一定的难度，运营费用高的缺点，所以直接舍弃。这样，再将上述五个方案进行组合比较。比较结果见表 4。从表中可以看到，仅考虑土建和设备费用，A1-A2 方案最低。考虑 10 年运营费用，仍然是 A1-A2 方案最低，考虑 20 年运营费用，却是 A1-C2 方案最低。但是从竖井位置的围岩地质及地面条件、防火救灾功能，以及长远运营费用等因素来考虑，显然是 C1-C2 方案最好。故而将 C1-C2 方案作为推荐方案，见图 8，B1-A2 方案为比较方案，见图 9。

图 10 和图 11 给出了利用数值方法计算得到的推荐方案的隧道风压、风速、污染物浓度分布变化图。可以看到所计算得到的风压分布曲线合理，隧道最小风速满足火灾临界风速要求，隧道污染物浓度分布符合规范[1]要求。

3. 结语

本文根据雁门关公路隧道的实际情况，提出了七种通风方式，通过技术和经济详细研究，给出了左线双竖井和右线单竖井方案，并提出了相应的比较方案。

本文的研究只是为配合雁门关公路隧道的初步设计所进行，有关雁门关公路隧道通风方案的优化设计，特别是关于防火救灾预案的研究尚需做大量细致的研究工作。

感谢中交一院缪怀甫高工在本文研究过程的帮助。

参考文献

- [1] 交通部编.《公路隧道通风照明设计规范》(JTJ026.1-1999),北京:人民交通出版社
- [2] 中交一院.雁门关公路隧道初步设计文件,2001
- [3] 夏永旭、胡学富等.雁门关公路隧道通风方案研究报告,2001.6
- [4] 夏永旭、杨忠、黄骤屹.我国长大公路隧道建设的有关技术问题,现代隧道技术,2001.6
- [5] 夏永旭、王永东、赵峰.秦岭终南山公路隧道通风方案讨论,长安大学学报,Vol.22(2002).5
- [6] 夏永旭、戴国平.现代公路隧道的发展,2001年全国公路隧道学术会议论文集,人民交通出版社,2001.10

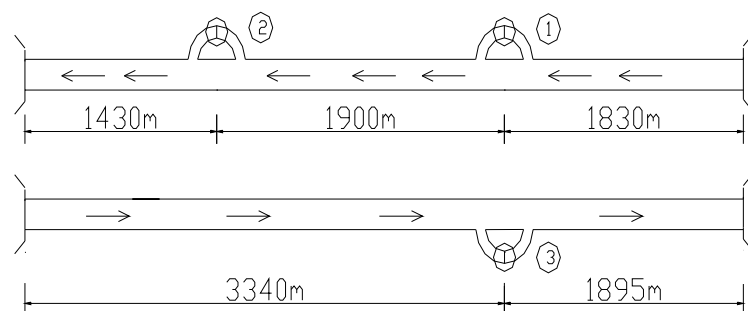


图 8 雁门关公路隧道通风推荐方案

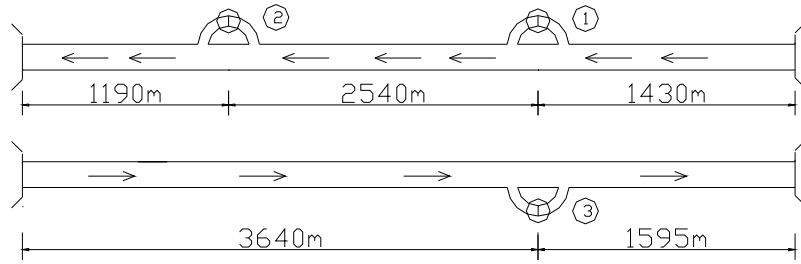


图9 雁门关公路隧道通风比较方案

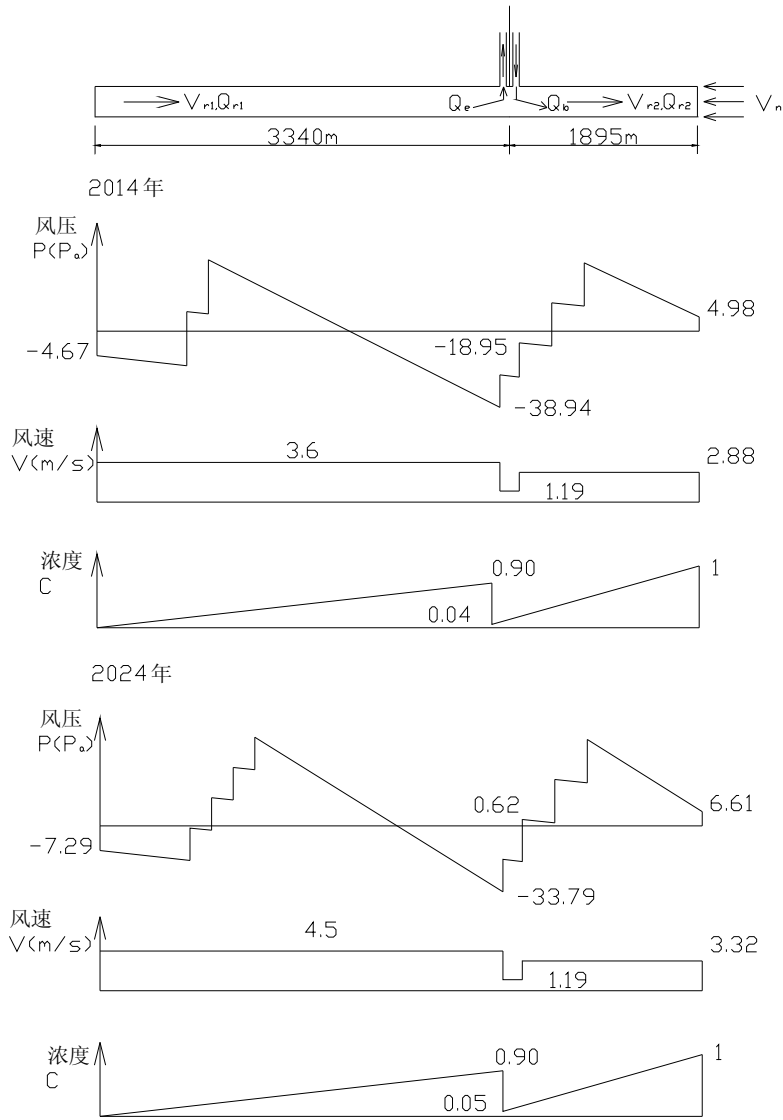


图 10 右线隧道的风压、风速、浓度变化图

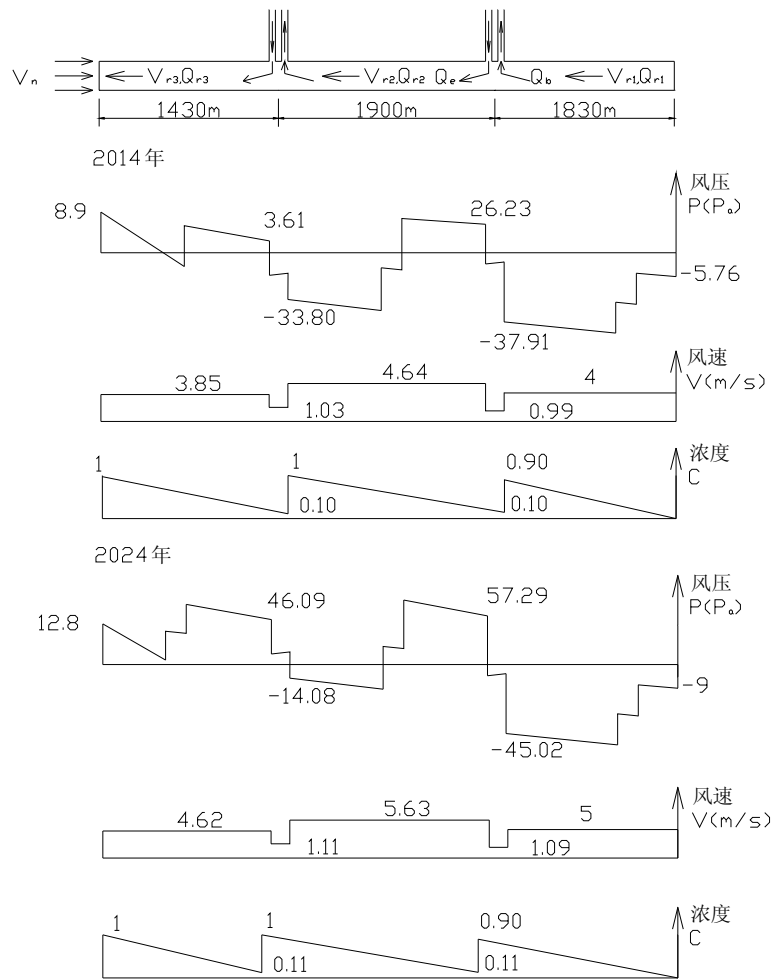


图 11 左线隧道的风压、风速、浓度变化图