



T/CECS G XXXX: 2026

中国工程建设标准化协会标准

Standard of China Association for Engineering Construction
Standardization

公路隧道水环境效应评价技术规程

Technical Specifications for Water Environmental Impact Assessment of
Highway Tunnels

中国工程建设标准化协会 发布

Issued by China Association for Engineering Construction Standardization

中国工程建设标准化协会标准

公路隧道水环境效应评价技术规程

Technical Specifications for Water Environmental Impact Assessment of
Highway Tunnels

T/CECS G: D××-××-2026

主编单位：安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司
同济大学

发布机构：中国工程建设标准化协会

实施日期：2026 年 XX 月 XX 日

××出版社股份有限公司

前 言

根据中国工程建设标准化协会《关于印发〈2022 年第二批协会标准制订、修订计划〉的通知》（建标协字[2022]40 号）的要求，由安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司和同济大学承担《公路隧道水环境效应评价技术规程》（以下简称“本规程”）的制订工作。

本规程系统总结了国内公路隧道水环境效应评价的成熟经验、内外相关标准和技术成果，广泛征求了全国相关单位和专家的意见，确定了公路隧道水环境效应评价方法、评价程序、评价内容等，为公路隧道水环境效应评价提供技术指导。

本规程分为 11 章，主要内容包括：1 总则、2 术语、3 基本规定、4 基础资料、5 公路隧道水环境效应识别与分析、6 水环境效应评价指标体系、7 评价方法、8 设计、施工、运营期水环境效应评价、9 水环境效应监测与预警、10 水环境保护与修复措施、11 评价报告编制与要求。

请注意本规程的某些内容可能直接或间接涉及专利，本规程的发布机构不承担识别这些专利的责任。

本规程基于通用的公路工程理论及原则编制，适用于本规程提出的应用条件。对于某些特定专项应用条件，使用本规程相关条文时，应对适用性及有效性进行验证。

本规程由中国工程建设标准化协会公路分会负责归口管理，由安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司和同济大学负责具体技术内容的解释，在执行过程中如有意见或建议，请函告本标准日常管理组，中国工程建设标准化协会公路分会（地址：北京市海淀区西土城路 8 号；邮编：100088；电话：010-62079839；传真：010-62079983；电子邮箱：shc@rioh.cn），或安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司 吴华（地址：安徽省合肥市高新区彩虹路 1008 号；邮编：230088；电话：0551-65371567；电子邮箱：wuhua713@ahjkjt.com），以便修订时研用。

主 编 单 位：安徽省交通规划设计研究总院股份有限公司

同济大学

参 编 单 位：安徽省交通控股集团有限公司

云南省交通规划设计研究院股份有限公司

招商局重庆交通科研设计院有限公司

主 编：王 飞、李晓军、黄学文

主要参编人员：丁 蔚、沈洪波、吴 华、姜同虎、张 超、

王安民、李 科、芮 易、俞登华、吕艳云

陈子扬、孙怀远、张 雨、刁浩宇

主 审：王华牢

参与审查人员：×××

目 次

1	总则	1
2	术语	3
3	基本规定	4
3.1	一般规定	4
3.2	工作程序	7
3.3	评价时段	7
3.4	评价范围	8
3.5	评价主体	8
3.6	评价成果形式	8
4	基础资料	10
4.1	一般规定	10
4.2	工程资料	10
4.3	区域地质资料	10
4.4	水文地质资料	11
4.5	生态环境资料	12
4.6	水环境敏感目标资料	13
4.7	既有工程资料	13
4.8	监测资料	14
4.9	资料整理与适用性评价	14
5	公路隧道水环境效应识别与分析	15
5.1	一般规定	15
5.2	地下水水位下降效应	15

5.3	地下水流场改变效应	16
5.4	泉点流量减少或断流效应	17
5.5	地表水漏失效应	17
5.6	地下水水质变化效应	18
5.7	生态敏感目标受影响效应	19
5.8	效应综合分析与清单编制	20
6	水环境效应评价指标体系	21
6.1	一般规定	21
6.2	风险事件指标体系构建	21
6.3	风险事件可能性评价	22
6.4	后果严重程度评价	22
6.5	风险等级判别	24
6.6	评价指标体系应用流程	25
7	水环境效应评价方法	27
7.1	一般规定	27
7.2	层次分析法	27
8	设计、施工、运营期水环境效应评价	30
8.1	一般规定	30
8.2	设计阶段水环境效应评价	30
8.3	施工阶段水环境效应评价	32
8.4	运营阶段水环境效应评价	35
8.5	各阶段评价的衔接与信息传递	38
9	水环境效应监测与预警	39
9.1	一般规定	39

9.2	监测网络布设	39
9.3	监测指标与频率	41
9.4	监测方法与技术要求	43
9.5	监测数据管理与整编	45
9.6	预警体系建立	46
9.7	监测与预警报告	49
9.8	监测设施维护	49
10	水环境保护与修复措施	51
10.1	一般规定	51
10.2	堵水措施	51
10.3	限量排放措施	54
10.4	防渗措施	55
10.5	注浆材料环境友好性要求	56
10.6	生态补水措施	58
10.7	水源替代措施	60
10.8	泉点保护措施	61
10.9	湿地修复措施	62
10.10	措施实施与效果评价	63
11	评价报告编制与要求	65
11.1	一般规定	65
11.2	报告内容组成	66
11.3	章节组成与安排	67
11.4	成果表达要求	71
11.5	图表要求	72

11.6	评价结论	74
11.7	附件要求	76
11.8	报告格式与装订	77
11.9	各阶段报告的衔接与归档	78
11.10	质量控制要求	78
附录 A	宝石岭隧道水环境效应评价案例	80
附录 B	双峰寨隧道水环境效应评价案例	89
附录 C	新场隧道施工期动态验证—取高原则法水环境风险 评价案例	96

1 总则

1.0.1 为规范公路隧道工程建设与运营对地下水及受纳地表水水环境效应的评价工作，预防和减轻隧道工程活动对水环境的影响，保护水资源和生态环境，促进公路交通与生态环境的协调发展，制定本规程。

1.0.2 本规程适用于以钻爆法为主要开挖手段的各等级新建和改扩建公路隧道。

1.0.3 本规程适用于公路隧道设计、建设和运营过程中，由隧道工程活动引起的地下水文地质条件变化及其水环境效应评价。本规程不替代环境影响评价、水土保持评价及结构安全评价等已有专项工作。

1.0.4 本规程适用于建设单位、设计单位、勘察单位、施工单位、运营养护单位及相关咨询单位开展公路隧道水环境效应评价工作。

条文说明

在隧道工程的不同阶段，评价的侧重点和深度有所不同。设计期侧重于水环境效应预测评价、方案比选和工程措施优化；施工期侧重于设计验证、跟踪监测和动态评价；运营期侧重于水环境效应长期影响跟踪、地下水环境变化趋势评价和保护修复措施效果评价。

1.0.5 评价工作应遵循以下原则：

（1）水环境效应评价应遵循“工程建设行为—水文地质条件变化—水环境效应—保护与修复措施”的技术主线。

（2）预防为主、保护优先：应以预防和减轻公路隧道工程建设与运营对水环境的影响作为评价的主要目标。

（3）科学客观、实事求是：应基于客观翔实的数据和科学的分析模型进行评价。

（4）全过程控制、突出重点：应覆盖隧道全生命周期，对关键环节和敏感时期进行重点评价。

（5）定性定量相结合：应在定性分析基础上，尽可能采用定量或半定量的方法进行评价。

1.0.6 公路隧道水环境效应评价除应符合本规程的规定外，尚应符合国家和行业现有有关标准的规定。

2 术语

2.0.1 公路隧道水环境效应 water environment effect of highway tunnel

公路隧道工程建设与运营对隧道影响区域内地下水、地表水的赋存条件、循环过程、化学性质、物理状态及生态功能所产生的有利或不利变化。

2.0.2 水环境敏感目标 water environment protection target

依法设立的饮用水水源保护区、自然保护区、重要湿地、风景名胜区、水产种质资源保护区等涉及水环境保护的区域，以及对水文变化敏感的生态区域。

2.0.3 水文地质单元 hydrogeological unit

水文地质学中用于分析地下水系统的基本空间单位，指具有统一补给、径流和排泄条件的地下水区域。

2.0.4 地下水疏干 groundwater dewatering

因隧道开挖形成新的排泄基准面，导致地下水位持续下降，含水层被疏干的现象。

2.0.5 地表水漏失 surface water loss

隧道施工或运营导致地下水补给减少或径流途径改变，引发地表水体水量减少或干涸的现象。

2.0.6 泉点流量衰减 spring flow recession

泉水在无降水补给（或补给停止后）的时段内，其出流流量随时间推移而逐渐减少的过程。

2.0.7 评价工作等级 assessment grade

根据隧道工程规模、水文地质条件复杂程度及水环境敏感程度，对水环境效应评价工作深度和广度的分级。

3 基本规定

3.1 一般规定

3.1.1 公路隧道水环境效应评价应对公路隧道工程在设计期、施工期和运营期的水环境效应进行分析、预测和评估,提出预防或者减轻不良影响的对策和措施,制定水环境影响跟踪监测计划,为水环境保护提供科学依据。

3.1.2 评价必要性判定

3.1.2.1 以钻爆法为主要开挖手段的各等级新建和改扩建公路隧道,在可行性研究阶段宜结合地下水情况依据本规程进行评价必要性判定。

3.1.2.2 符合下列任一条件的隧道工程可不按本规程进行水环境影响评价:

(1) 已开展专项环境影响评价的特长隧道、深埋隧道或水下隧道。

(2) 已充分开展专项评价的饮用水水源保护区(含准保护区)、国家公园、自然保护区、重要湿地、风景名胜区等依法设立的水环境敏感目标。

3.1.3 评价工作等级划分

3.1.3.1 满足评价必要性条件的公路隧道工程,在可行性研究阶段均可依据本规程进行评价工作等级划分。

3.1.3.2 评价工作等级的划分应依据工程规模与复杂性、水文地质条件、水环境敏感程度等因素进行判定,可划分为一级、二级、三级,分级原则见表 3.1。表 3.1.1 中三项条件中满足两项及以上,即按该等级执行;当不同条件判定等级不一致时,取最高等级。

表 3.1 公路隧道水环境效应评价工作等级划分表

分级依据	一级	二级	三级
工程规模与复杂性	特长隧道、地质条件极复杂隧道	长隧道、地质条件复杂隧道	中、短隧道,地质条件较简单隧道
水文地质条件	涉及强富水含水层、大型断裂带、岩溶强烈发育区、与地表水体水力联系密切	涉及中等富水含水层、水文地质条件中等复杂	涉及弱富水含水层、水文地质条件简单

水环境敏感程度	集中式饮用水水源（包括已建成的在用、备用、应急水源，在建和规划的饮用水水源）准保护区；除集中式饮用水水源以外的国家或地方政府设定的与地下水环境相关的其他保护区，如热水、矿泉水、温泉等特殊地下水资源保护区	集中式饮用水水源（包括已建成的在用、备用、应急水源，在建和规划的饮用水水源）准保护区以外的补给径流区；未划定准保护区的集中式饮用水水源，其保护区以外的补给径流区；分散式饮用水水源地；特殊地下水资源（如热水、矿泉水、温泉等）保护区以外的分布区等其他未列入上述敏感分级的环境敏感区	上述地区之外的其他地区
---------	---	--	-------------

3.1.3.3 一级评价应符合下列规定

（1）详细掌握调查评价区环境水文地质条件，主要包括含（隔）水层结构及其分布特征、地下水补径排条件、地下水流场、地下水动态变化特征、各含水层之间以及地表水与地下水之间的水力联系等，详细掌握评价区内地下水开发利用现状与规划。

（2）开展地下水环境现状监测，详细掌握调查评价区水环境质量现状和地下水动态监测信息，进行水环境现状评价。

（3）基本查清场地环境水文地质条件，有针对性地开展勘察试验，获取场地水文地质参数。

条文说明

水文地质参数宜通过抽水试验或注水试验获取。当缺乏试验条件时，可参照《公路工程地质勘察规范》（JTG C20）中同类岩性的经验值范围取值，但应在报告中注明参数来源和适用性分析。渗透系数（K）和给水度（ μ ）是隧道涌水量预测最敏感的参数，其取值精度直接影响预测结果的可靠性。

（4）采用数值分析法进行水环境影响预测，对于不宜概化为等效多孔介质的地区，可根据自身特点选择适宜的预测方法。

（5）根据评价结果和场地包气带特征，提出切实可行的水环境保护措施与水环境影响跟踪监测计划，制定应急预案。

3.1.3.4 二级评价应符合下列规定

(1) 基本掌握评价区的环境水文地质条件，主要包括含（隔）水层结构及其分布特征、地下水补径排条件、地下水流场等。了解调查评价区地下水开发利用现状与规划。

(2) 开展水环境现状监测，基本掌握调查评价区水环境质量现状，进行水环境现状评价。

(3) 根据场地环境水文地质条件的掌握情况，有针对性地补充必要的勘察试验。

(4) 根据建设项目特征、水文地质条件及资料掌握情况，采用数值分析法或解析法进行影响预测，评价对水环境保护目标的影响。

条文说明

数值模拟法通过利用计算机求解隧道水环境效应影响的偏微分方程组，适用于水文地质条件复杂、边界不规则、需考虑施工及运营全过程动态影响的情形。

条文说明

解析法计算简便，适用于水文地质条件均匀、边界规则、补给稳定的情形。对于非均质、各向异性明显的含水层，或存在复杂边界条件时，解析法的适用性受限，误差可能较大，应优先采用数值分析法。岩溶地区因存在管道流和裂隙流的双重介质特征，解析法不适用，应采用系统分析法或数值分析法。

(5) 提出切实可行的环境保护措施与水环境影响跟踪监测计划。

3.1.3.5 三级评价应符合下列规定

(1) 了解调查评价区和场地环境水文地质条件。

(2) 基本掌握评价区的补径排条件和水环境质量现状。

(3) 采用解析法或类比分析法进行水环境影响分析与评价。

条文说明

采用类比分析法时，所选类比工程的水文地质条件（地层岩性、构造特征、含水层结构、补给条件）应具有可比性。当存在多个可比工程时，宜取涌水量偏大的工程作为类比对象，以体现风险防范的保守原则。类比工程的选取应说明可比性分析过程和选取理由。

（4）必要时提出切实可行的水环境保护措施与水环境影响跟踪监测计划。

3.1.4 公路隧道水环境效应评价工作启动应满足下列条件：

- （1）满足水环境效应评价必要性。
- （2）隧道设计资料等齐全，能够满足水环境效应评价需要。
- （3）评价单位具备相应的资质和能力，并已签订技术服务合同或任务书。
- （4）评价所需经费、人员、设备及现场作业条件已落实。

3.2 工作程序

3.2.1 公路隧道水环境效应评价程序划分为准备阶段、现状调查阶段、影响预测阶段和评价结论阶段。

3.2.2 准备阶段应了解建设项目工程概况，搜集相关资料，进行初步分析，识别建设项目对水环境可能造成的直接影响；确定评价工作等级、评价范围以及评价重点。

3.2.3 现状调查阶段应开展现场调查、勘探、地下水监测、取样、分析、室内外试验和室内资料分析等工作，识别水环境敏感程度。

3.2.4 影响预测阶段应进行水环境影响预测，评价建设项目对水环境可能造成的影响。

3.2.5 评价结论阶段应综合分析各阶段成果，给出水环境影响评价结论，提出水环境保护措施与防控措施，制定水环境影响跟踪监测计划。

3.3 评价时段

3.3.1 评价时段应覆盖公路隧道设计期、施工期和运营期。

3.3.2 评价不同时段的评价侧重点应有所不同。

3.3.3 设计期侧重于水环境效应预测评价、方案比选和工程措施优化。

3.3.4 施工期侧重于设计验证、跟踪监测和动态评价。

3.3.5 运营期侧重于水环境效应长期影响跟踪、地下水环境变化趋势评价和保护修复措施效果评价。

3.4 评价范围

3.4.1 公路隧道水环境效应评价范围应包括与建设项目相关的水环境保护目标，以能说明水环境的现状，反映调查评价区地下水基本流场特征，满足水环境影响预测和评价为基本原则。

3.4.2 地下水环境影响评价范围应根据隧道工程的水文地质条件确定，应覆盖隧道穿越含水层所在的完整水文地质单元，或扩展至隧道排水影响半径以外；当涉及水源保护区时，评价范围应延伸至水源保护区边界

3.4.3 地表水影响评价范围应延伸至受纳水体下游不少于 1km（有取水口时应至其下游 200 m 远）。

3.5 评价主体

3.5.1 建设单位可根据工程需要组织开展地下水环境效应评价；设计单位、勘察单位、咨询单位或具有相应专业能力的第三方技术单位可承担具体评价工作；对于复杂水文地质条件或敏感区域工程，宜由具备水文地质、环境工程、隧道工程等专业能力的单位或团队共同完成。

条文说明

“具备相应技术能力”是指机构应拥有水文地质、环境工程、隧道工程等相关专业的技术人员，熟悉相关法规标准，并具有类似项目的评价业绩。

3.6 评价成果形式

3.6.1 公路隧道水环境效应评价成果形式可分为专题报告（针对一级评价）和评价专章（针对二、三级评价）。报告应内容全面、数据可靠、分析透彻、结论明确、措施具体。

3.6.2 公路隧道水环境效应评价成果中应形成明确、公正的评价结论。

3.6.3 公路隧道水环境效应评价成果中应明确隧道工程是否满足国家有关法律、标准规范的安全要求。

3.6.4 公路隧道水环境效应评价成果中应明确隧道工程在采取安全对策措施后，对水环境影响是否可接受。

3.6.5 公路隧道水环境效应评价成果中应指明或列出隧道工程影响水环境安全的不利因素。

3.6.6 公路隧道水环境效应评价成果中应提出具体、可操作的保障水环境安全的对策措施建议。

4 基础资料

4.1 一般规定

4.1.1 基础资料的收集与调查应贯穿公路隧道水环境效应评价的全过程，资料应真实、完整、可靠。

4.1.2 资料收集范围应根据公路隧道水环境效应评价范围及评价工作等级确定。

4.2 工程资料

4.2.1 隧道工程基本资料，应包括下列内容：

- (1) 隧道选址、平面布置、纵断面设计、长度、埋深等；
- (2) 隧道断面形式、尺寸、结构断面、支护方案；
- (3) 隧道施工组织设计，包括施工工期、施工方案、施工涌排水方案及辅助坑道布置等。

4.2.2 隧道防排水设计资料，应重点包括下列内容：

- (1) 隧道防排水设计标准及设防等级；
- (2) 隧道防排水系统设计方案；
- (3) 注浆堵水方案，包括超前预注浆、径向注浆及帷幕注浆的范围、参数及注浆材料；
- (4) 隧道施工期、运营期排水方案；
- (5) 施工期涌水处置方案。

4.3 区域地质资料

4.3.1 区域地形地貌资料，应包括下列内容：

- (1) 地形特征，包括山脉走向、河流切割深度、沟谷密度及地形起伏程度；
- (2) 地貌类型及分布，包括构造剥蚀地貌、侵蚀堆积地貌、岩溶地貌等；

(3) 隧道穿越区的地形地貌单元及其与区域地质构造的对应关系。

4.3.2 地层岩性资料，应包括下列内容：

(1) 区域地层层序、岩性组合、地质时代与地层厚度空间分布特征；

(2) 隧道各段穿越的地层岩性条件，重点包括第四系松散层、可溶岩、碎屑岩及变质岩的分布特征；

(3) 各类岩层含水性、透水性分级划分成果。

4.3.3 地质构造资料，应包括下列内容：

(1) 区域地质构造特征，包括褶皱、断裂的产状、规模和空间展布特征；

条文说明

区域地质构造特征应重点查明对地下水赋存和运移起控制作用的断裂和褶皱。其中，张性断裂和扭性断裂往往为导水构造，压性断裂多为阻水构造，应结合构造力学性质分析其对地下水径流路径的影响。在构造破碎带宽度较大或胶结程度较差时，隧道开挖揭露后可能引发较大规模的涌水，应作为水文地质调查的重点段落。

(2) 隧道穿越或邻近的断层破碎带性质（张性、压性、扭性）、宽度、充填物类型及胶结密实程度；

(3) 岩体节理裂隙发育程度、优势产状方位及连通性特征；

(4) 地质构造对地下水赋存运移的控制作用。

4.4 水文地质资料

4.4.1 水文地质单元资料，应包括下列内容：

(1) 水环境影响评价范围内的水文地质单元边界条件；

(2) 各水文地质单元的含水系统结构、组成及赋水特征；

(3) 隧道所属水文地质单元与周边其他水文地质单元的水力联系。

4.4.2 含水层与隔水层资料，应包括下列内容：

- (1) 含水层类型、层位、厚度、埋深及富水性等级；
- (2) 隔水层层位、岩性、厚度、连续性、隔水性能；
- (3) 各含水层之间的水力联系及越流补给条件。

4.4.3 地下水补给、径流、排泄条件资料，应包括下列内容：

- (1) 地下水补给来源及补给强度；
- (2) 地下水径流流向、水力梯度及径流速率，重点查明隧道工程可能截断的地下径流路径；
- (3) 地下水排泄方式、排泄途径及排泄特征；
- (4) 隧道工程建设前后可能改变的区域地下水流场特征。

4.4.4 地下水动态资料，应包括下列内容：

- (1) 地下水位埋藏深度、水位标高及其年动态变幅特征；
- (2) 水环境评价范围内含水层的单位涌水量、渗透系数、导水系数、给水度等水文地质参数；
- (3) 地下水水质现状特征，主要离子组分、pH 值、总硬度、矿化度等基本指标，以及可能受工程影响的特征因子。

4.4.5 抽水试验与示踪试验资料（如有），应包括下列内容：

- (1) 钻孔抽水试验数据及成果参数；
- (2) 连通试验、示踪试验等成果资料，重点查明岩溶管道、裂隙网络的空间连通特征与水力连通关系。

4.5 生态环境资料

4.5.1 生态敏感区资料，应包括下列内容：

- (1) 水环境影响评价范围内湿地、河流源头、湖库等水生态敏感区的分布、范围及保护级别；

(2) 依赖地下水的生态系统的分布及生态需水要求。

4.5.2 植被与土壤资料，应包括下列内容：

(1) 隧道上方及周边的植被类型、覆盖率及对地下水埋深的依存关系；

(2) 区域土壤类型、土层厚度及保水蓄水能力。

4.6 水环境敏感目标资料

4.6.1 饮用水水源及取水设施资料，应包括下列内容：

(1) 集中式饮用水水源地的名称、保护级别、保护范围、取水位置及取水量；

(2) 分散式饮用水水源的位置、井深、水位、供水量及服务人口数量；

(3) 隧道工程与各类水源地的相对空间位置关系，以及位于水源地补给区的可能性分析判定。

4.6.2 泉点及地下水出露点资料，应包括下列内容：

(1) 水环境评价范围内泉点的位置、标高、流量、水质、用途及季节性变化特征；

(2) 泉水类型及所属含水层位；

(3) 隧道工程建设可能造成泉点断流或流量衰减的风险初步判断。

4.6.3 地表水-地下水交互敏感区资料，应包括下列内容：

(1) 隧道穿越河流、水库等地表水体的位置及对应河段、水域的水文特征；

(2) 评价区内地表水与地下水的相互补排关系；

4.7 既有工程资料

4.7.1 邻近隧道或地下工程资料，应包括下列内容：

(1) 水环境评价范围内已建或在建公路隧道、铁路隧道、矿山巷道等地下工程的空间分布及基本情况；

- (2) 上述工程施工期间的涌水、突水事故记录及处置经验;
- (3) 上述工程对区域水环境造成的影响现状及现有监测成果数据。

4.7.2 水利及供水工程资料, 应包括下列内容:

- (1) 水库、拦河坝、引水工程、灌区等水利设施的位置及调度运行方式;
- (2) 区域应急供水设施布局。

4.8 监测资料

4.8.1 已有水环境监测资料, 应包括下列内容:

- (1) 区域地下水长期监测井的水位、水质历史数据;
- (2) 水文站、水环境监测断面的径流量、水质数据;
- (3) 隧道工程勘察阶段完成的水文地质试验及测试资料。

4.8.2 遥感及地质调查资料, 应包括下列内容:

- (1) 基于遥感影像解译提取的地表水体演变、植被覆盖变化等信息;
- (2) 当地居民关于井泉水量变化的走访调查记录及历史旱情资料。

4.9 资料整理与适用性评价

4.9.1 所有收集的基础资料应进行分类、校对、编目和存档, 形成基础资料清单及图件成果。

4.9.2 应对基础资料的时效性、代表性和可靠性进行评价, 明确指出资料的缺失、矛盾或不确定性之处, 并提出补充工作的建议。

5 公路隧道水环境效应识别与分析

5.1 一般规定

5.1.1 公路隧道水环境效应识别与分析应在完成基础资料收集的基础上开展，贯穿设计、施工和运营各阶段。

5.1.2 对于水文地质条件复杂或环境敏感程度高的隧道，应采用清单法、矩阵法或系统分析法进行综合识别。

条文说明

清单法、矩阵法和系统分析法是环境影响识别与评价中常用的系统化分析方法。

清单法（又称核查表法）是将隧道工程可能产生水环境效应的各类活动（如隧道开挖、施工排水、注浆作业、运营期排水等）与可能受影响的环境要素（地下水位、泉点流量、地表水水质等）列出清单表格，逐项判断是否存在影响及其性质。该方法操作简便，适用于初步识别阶段，但难以反映多因素间的交互影响。

矩阵法是通过构建“工程活动—环境要素”二维矩阵，在交叉格中以符号或数值表示影响程度和性质（如“+”表示有利影响，“-”表示不利影响，数值表示影响程度）。矩阵法能够直观展示多工程活动与多环境要素之间的对应关系，是隧道分段进行水环境效应识别时较为实用的方法。

系统分析法是将隧道工程与水环境视为相互关联的系统，通过分析系统内各要素之间的因果关系链（如“施工排水→水位下降→泉点断流→生态影响”），识别直接、间接和累积效应。该方法适用于水文地质条件复杂、效应间存在明显关联或叠加的隧道工程。

实际操作中，建议按“清单法初步筛查→矩阵法系统梳理→系统分析法深入分析”的步骤递进使用。对于一般隧道工程，采用清单法或矩阵法即可满足要求；对于穿越水源地、岩溶发育区或生态敏感区等复杂条件的隧道，应在清单法基础上补充系统分析。

5.2 地下水水位下降效应

5.2.1 隧道施工排水引起的地下水水位下降识别，应包括下列内容：

- (1) 隧道开挖揭穿含水层后，涌水排水导致含水层水头降低的范围和程度；
- (2) 隧道顶部及周边区域地下水位下降幅度及其随时间的变化趋势；
- (3) 水位下降对周边居民饮用水井、企业自备井取水能力的影响。

条文说明

隧道施工排水引起的地下水位下降具有阶段性特征：施工期以短期集中排水为主，水位下降速率较快；运营期以持续渗漏排水为主，水位下降趋于缓慢但累积效应显著。评价中应区分两个阶段分别分析。隧道位于地下水位以上时，施工期可不考虑水位下降影响，但运营期路面径流下渗可能对浅层地下水造成水质影响，仍需关注。

5.2.2 隧道运营期持续排水引起的水位下降识别，应包括下列内容：

- (1) 隧道衬砌排水系统在运营期持续排泄地下水导致的长期水位下降；
- (2) 季节性或长期水位下降对区域水资源储量的累积影响；
- (3) 不同防排水方案地下水位下降程度的差异性分析。

5.2.3 水位下降的影响因素分析，应包括下列内容：

- (1) 隧道埋深与地下水位的关系；
- (2) 含水层富水性、渗透性及补给条件的强弱；
- (3) 施工涌水量及运营排水量的规模与持续时间。

5.3 地下水流场改变效应

5.3.1 地下水径流路径截断效应识别，应包括下列内容：

- (1) 隧道走向与地下水流向的关系，判断隧道是否垂直于或斜交于主流方向；
- (2) 隧道作为地下“挡水墙”对地下径流的阻隔范围和程度；
- (3) 隧道上游区域地下水壅高、下游区域地下水补给减少的现象及影响。

5.3.2 跨流域调水效应识别，应包括下列内容：

(1) 隧道穿越地表分水岭或地下分水岭时，造成地下水由一个流域向另一个流域流失的风险；

(2) 跨流域调水效应对原流域水资源总量及生态环境的影响。

5.3.3 流场改变的影响因素分析，应包括下列内容：

(1) 隧道长度及对水文地质单元边界的切割关系；

(2) 断层破碎带、岩溶管道等优势径流通道与隧道的空间关系；

(3) 区域水力梯度大小及地下水径流强度。

5.4 泉点流量减少或断流效应

5.4.1 泉点效应识别，应包括下列内容：

(1) 水环境影响评价范围内泉点与隧道的相对位置关系；

(2) 泉点所属含水层与隧道揭穿含水层的对应关系；

(3) 隧道排水造成泉点补给区面积缩小或补给量衰减的机理分析。

5.4.2 泉点断流风险分级识别，应包括下列内容：

(1) 隧道位于泉点补给区上游且高程低于泉点出露高程时，应识别为高风险；

(2) 隧道与泉点属于同一水文地质单元且水力联系紧密时，应识别为中风险；

(3) 隧道与泉点之间有连续隔水层分隔时，可识别为低风险或无影响。

5.4.3 泉点效应的社会与生态影响分析，应包括下列内容：

(1) 泉点作为居民饮用水源的功能重要性；

(2) 泉点作为景观或文化标志的价值；

(3) 泉点维持下游湿地或河溪基流的生态功能。

5.5 地表水漏失效应

5.5.1 地表水—地下水转化关系识别，应包括下列内容：

(1) 隧道穿越河流、溪沟、水库等地表水体下方的位置及对应河段的水文特征；

(2) 地表水与地下水之间的补排关系；

(3) 隧道开挖破坏河床隔水层或沟通地表水与地下水之间的水力联系的风险。

5.5.2 地表水漏失效应识别，应包括下列内容：

(1) 隧道施工扰动导致地表水体向下渗漏的水量及对河流径流、水库蓄水的影响；

(2) 岩溶区落水洞、消水洞等垂向通道与隧道连通后，造成地表水快速漏失的风险；

(3) 地表水漏失对下游用水、水生生态及景观功能的影响。

5.5.3 地表水漏失的影响因素分析，应包括下列内容：

(1) 隧道顶部覆盖层的厚度、岩性及隔水性；

(2) 河床或库底的地质结构及抗渗性能；

(3) 施工期震动、爆破对覆盖层或隔水层的扰动破坏程度。

5.6 地下水水质变化效应

5.6.1 施工期水质变化识别，应包括下列内容：

(1) 施工钻孔、爆破、开挖过程产生的岩粉、泥浆等物理污染物进入地下水的风险；

(2) 注浆材料泄漏或扩散造成地下水化学组分变化的可能性；

(3) 施工机械设备漏油、施工废水排放通过裂隙渗入含水层的途径；

(4) 隧道揭穿不同水质含水层后，劣质水混入优质含水层的水质串层风险。

条文说明

水质串层风险是指隧道揭穿不同水质的含水层时,因水头差驱动高矿化度水或受污染水体向优质含水层越流补给,导致优质水源水质劣化的现象。在岩溶地区 and 多层含水层发育地区应重点评估。判断串层风险的关键条件是:隧道是否揭穿了多个含水层、各含水层之间是否存在水力联系的通道(如天窗、构造破碎带、未胶结钻孔等),以及各含水层之间的水头差大小。

5.6.2 运营期水质变化识别,应包括以下内容:

- (1) 隧道冲洗废水、路面径流携带的污染物通过排水系统进入水体的风险;
- (2) 隧道衬砌渗水携带的水泥侵蚀产物对水质的长期影响。

5.6.3 水质变化的影响因素分析,应包括以下内容:

- (1) 含水层的防污性能;
- (2) 污染源的强度、位置及与含水层的连通条件;
- (3) 地下水径流速度及污染物稀释、自净能力。

5.7 生态敏感目标受影响效应

5.7.1 湿地生态效应识别,应包括以下内容:

- (1) 依赖地下水的湿地与隧道的水力联系,判断隧道排水是否造成湿地补给减少;
- (2) 湿地水位下降对湿地植被群落、水鸟栖息地及生态功能的影响。

5.7.2 植被生态效应识别,应包括以下内容:

- (1) 隧道顶部及周边区域植被对地下水埋深的依赖程度;
- (2) 地下水位下降导致土壤含水率降低、植被退化的风险;
- (3) 隧道进出口边坡开挖对地表植被的直接破坏及水土流失问题。

5.7.3 河溪基流效应识别,应包括以下内容:

- (1) 地下水补给型河溪的基流对隧道排水的依赖或敏感关系;

(2) 隧道排水导致河溪基流减少或断流，对水生生物栖息环境的影响。

5.7.4 特殊生态敏感区效应识别，应包括下列内容：

(1) 隧道是否穿越或邻近自然保护区、风景名胜区、水源保护区等法定敏感区；

(2) 隧道建设引起的水环境变化是否触及敏感区的保护目标。

5.8 效应综合分析清单编制

5.8.1 应编制公路隧道水环境效应识别清单，清单应包括下列内容：

(1) 各水环境效应类型的具体表现及发生阶段；

(2) 各效应的作用机理及关键控制因素；

(3) 各效应的初步分级（显著、一般、轻微、无影响）；

(4) 各效应之间的关联性与叠加性。

5.8.2 效应分析应与隧道工程方案进行关联对照，识别高风险段落，为后续重点评价和措施制定提供依据。

5.8.3 对于初步判断可能产生显著水环境效应的隧道，应提出开展专项水文地质试验或动态监测的补充工作建议。

6 水环境效应评价指标体系

6.1 一般规定

6.1.1 公路隧道水环境效应评价应采用风险评价的基本框架，评价指标应涵盖风险事件发生的可能性和后果严重程度两个维度。

6.1.2 评价指标体系应针对隧道工程特点和区域水文地质条件进行构建。

6.1.3 风险事件类型应包括但不限于以下方面：

（1）地质风险，如地面开裂、地面塌陷等；

（2）地下水环境风险，如地下水水质恶化、地下水位超限下降、地下水流场明显改变等；

（3）地表水环境风险，如植被枯萎、泉点流量减少或断流、生态敏感目标受损等、建筑物开裂、沉降等。

6.1.4 评价等级应根据风险事件可能性和后果严重程度的综合判定结果，划分为Ⅰ级（低风险）、Ⅱ级（中风险）、Ⅲ级（高风险）、Ⅳ级（极高风险）四个等级。

6.2 风险事件指标体系构建

6.2.1 风险事件指标体系应按照目标层—准则层—指标层的三级结构进行构建。

6.2.2 目标层为“公路隧道水环境效应综合风险”。

6.2.3 准则层应包括下列两个方面：

（1）风险事件可能性（发生概率）；

（2）后果严重程度（影响程度）。

6.2.4 风险事件可能性的指标层，应根据不同风险事件类型分别选取。

6.2.5 后果严重程度的指标层，应根据受影响对象的敏感程度和重要性统一选取。

6.3 风险事件可能性评价

6.3.1 风险事件可能性应按表 6.1 划分为五个等级。

表 6.1 风险事件可能性分级

等级	可能性描述	发生概率范围	定性判断
1	极高	$P \geq 0.8$	几乎必然发生
2	高	$0.6 \leq P < 0.8$	很可能会发生
3	中等	$0.4 \leq P < 0.4$	可能发生
4	低	$0.2 \leq P < 0.4$	不太可能发生
5	极低	$P < 0.2$	几乎不可能发生

6.3.2 各风险事件的发生可能性应选取相应的专业方法进行评估，评估结果按第 7 章的规定进行综合计算，得到隧道各段水环境风险可能性当量，最后对照表 6.1 确定风险事件可能性等级。

6.4 后果严重程度评价

6.4.1 当多种后果同时产生时，宜采用后果当量估计法确定风险事件后果严重程度等级，综合考虑人员伤亡、直接经济损失、社会影响、环境影响、工期延误等，如式（6.1）所示：

$$DC = \left(C_{R1} + \frac{C_{R2}}{3} + \frac{C_{R3}}{60} \right) + \frac{C_Z}{400} + C_S + C_H + C_G \quad (6.1)$$

式中：

DC ——风险事件后果当量值；

C_{R1} ——死亡人数；

C_{R2} ——重伤人数；

C_{R3} ——轻伤人数；

C_Z ——直接经济损失（万元），不包括人员伤亡所支出的费用；

C_S ——社会影响，取值见表 6.2；

C_H ——环境影响，取值见表 6.3；

C_G ——工期延误，取值见表 6.4。

表 6.2 社会影响当量取值

后果等级	社会影响	C_S 取值
1	群众均无意见	0
2	绝大部分群众理解支持,但极少数人有意见,矛盾易化解	1/3
3	小部分群众有意见、反映较强烈,可能引发矛盾冲突	1
4	大部分群众有意见、反映较强烈,可能引发小规模群体性事件,媒体一般关注	3
5	绝大部分群众有意见、反映强烈,可能引发大规模群体性事件,媒体高度关注	10

表 6.3 环境影响当量取值

后果等级	自然环境影响	社会环境影响	C_H 取值
1	施工区域生态环境基本不受影响	对重要建筑物、水库、民房等无影响	0
2	涉及范围很小,施工区域生态环境产生很小污染或破坏	对重要建筑物、水库、民房等影响很小	1/3
3	涉及范围较小,邻近区域生态环境产生轻度污染或破坏	对重要建筑物、水库、民房等影响较小	1
4	涉及范围较大,周边生态环境产生较重污染或破坏	对重要建筑物、水库、民房等影响较大	3
5	涉及范围很大,周边生态环境产生严重污染或破坏	库、民房等影响严重	10

表 6.4 工期延误当量取值

后果等级	非控制工期工程	控制工期工程	C_G 取值
	延误时间（月）	延误时间（月）	

1	<1	<0.33	0
2	1-3	0.33-1	1/3
3	3-9	1-3	1
4	9-24	3-8	3
5	≥24	≥8	10

6.4.2 后果严重程度应按表 6.5 划分为五个等级：

表 6.5 后果严重程度分级

等级	严重程度描述	损失特征	定性判断
1	可忽略	无实质影响或影响可自然恢复	轻微
2	轻度	局部影响，可采取措施恢复	一般
3	中度	较大范围影响，需专门治理	较重
4	重度	大范围影响，难以完全恢复	严重
5	灾难性	不可逆损害，危及供水安全或生态系统	极严重

6.4.2.1 将 DC 值归一化后，对照表 6.5 确定后果严重程度等级。例如，将 DC 值归一化至 $[0,1]$ 区间后，当 DC 值处于 $[0,0.2)$ 时，取后果严重程度为 1 级；当 DC 值处于 $[0.2,0.4)$ 时，取后果严重程度为 2 级；当 DC 值处于 $[0.4,0.6)$ 时，取后果严重程度为 3 级；当 DC 值处于 $[0.6,0.8)$ 时，取后果严重程度为 4 级；当 DC 值处于 $[0.8,1.0]$ 时，取后果严重程度为 5 级。

6.4.3 后果严重程度的评价应符合下列规定：

- (1) 应综合考虑影响的范围、持续时间、可恢复性及受体的敏感程度；
- (2) 当某一风险事件影响多个受体时，应按最严重受体的等级确定后果等级。

6.5 风险等级判别

6.5.1 风险事件的风险等级应根据可能性等级和后果严重程度等级，按表 6.6 进行综合判别。

表 6.6 水环境效应风险等级判别矩阵

可能性等级		后果严重程度等级				
		可忽略	轻度	中度	重度	灾难性
		1	2	3	4	5
极高	5	高风险 (III)	高风险 (III)	极高风险 (IV)	极高风险 (IV)	极高风险 (IV)
高	4	中风险 (II)	高风险 (III)	高风险 (III)	极高风险 (IV)	极高风险 (IV)
中等	3	中风险 (II)	中风险 (II)	高风险 (III)	高风险 (III)	极高风险 (IV)
低	2	低风险 (I)	中风险 (II)	中风险 (II)	高风险 (III)	高风险 (III)
极低	1	低风险 (I)	低风险 (I)	中风险 (II)	中风险 (II)	高风险 (III)

6.5.2 各风险等级的基本定义如下：

(1) I 级（低风险）：可接受风险。在常规管理和监测条件下可进行工程建设，无需采取额外专项措施；

(2) II 级（中风险）：可容忍风险。应采取针对性防治措施，加强监测，必要时进行方案优化；

(3) III 级（高风险）：不可接受风险。必须采取强化防治措施，调整工程方案或施工工艺，并制定专项应急预案；

(4) IV 级（极高风险）：禁止或严格控制风险。应优先考虑工程选线避让；若无法避让，须经专题论证并采取最高等级防护措施后，方可实施。

6.5.3 综合评价规则：

(1) 当同一隧道穿越不同水文地质单元时，应分段进行风险等级判别；

(2) 当同一单元内存在多个风险事件时，应取各事件风险等级的最高值作为该单元的综合风险等级。

6.6 评价指标体系应用流程

6.6.1 水环境效应评价指标体系的应用应遵循下列流程：

(1) 指标选取：根据隧道工程特点和区域环境敏感程度，选取适用的评价指标；

(2) 数据获取：收集各指标对应的基础数据，必要时补充勘察试验；

(3) 可能性评价：按 6.3 条确定各风险事件的可能性等级；

(4) 后果评价：按 6.4 条确定各风险事件的后果严重程度等级；

(5) 等级判别：按 6.5 条确定各风险事件的风险等级；

(6) 等级汇总：形成隧道水环境效应风险等级清单及分布图。

6.6.2 评价结果应以文字、表格及图件形式呈现，明确标识高风险段落及主要风险事件类型，为后续保护措施的制定提供依据。

7 水环境效应评价方法

7.1 一般规定

7.1.1 公路隧道水环境效应评价应贯穿工程设计、施工和运营全过程，各阶段评价内容应相互衔接、逐次深化。

7.1.2 评价方法应根据隧道工程特点、水文地质条件复杂程度和评价等级综合确定，并符合下列基本要求：

(1) 设计阶段以预测评价为主，采用解析法、数值法或类比法进行定量或半定量预测；

条文说明

解析法是利用描述水环境中溶质迁移、水流运动等过程的数学解析解进行预测和计算，以确定工程建设对水环境的影响是否在可接受范围内的方法。该方法适用于水文地质条件较为规则、概化后的理想化模型。

数值法是利用经验公式、数值计算软件、模拟软件等进行计算，确定是否满足水环境安全需要的方法。

类比法是通过调研类似工程案例，横向对比相关技术指标及其数值，确定水环境安全是否能得到保障的方法。

(2) 施工阶段以验证与动态评价为主，采用实测数据对比、反演分析和趋势判断等方法；

(3) 运营阶段以跟踪评价为主，采用长期监测数据分析、趋势拟合和效果比对等方法。

7.1.3 各阶段评价成果应形成专门评价报告，并作为下一阶段评价的输入依据。

7.1.4 当工程方案、施工工艺或环境条件发生重大变化时，应重新开展相应阶段的评价工作。

7.2 层次分析法

7.2.1 若其他评价方法不可行，推荐采用层次分析法进行水环境效应风险评价：

(1) 构建层次结构模型：目标层为风险事件可能性，准则层为各影响因素，指标层为可量化的评价指标；

(2) 构建判断矩阵：通过两两比较指标重要性来确定指标 i 相对于指标 j 的比值。可采用 1-9 标度法进行取值确定两指标间相对重要程度，见表 7.1，建立判断矩阵表，判断矩阵中 a_{ij} 表示指标 i 相对于指标 j 的重要程度。

表 7.1 指标两两比较的标度

标度值 a_{ij}	含义
1	表示两个指标相比，前者与后者同等重要
3	表示两个指标相比，前者比后者稍重要
5	表示两个指标相比，前者比后者明显重要
7	表示两个指标相比，前者比后者强烈重要
9	表示两个指标相比，前者比后者极端重要
2,4,6,8	表示上述相邻判断的中间值
倒数	指标一与指标二比较结果是指标二与指标一重要性比较结果的倒数

(3) 权重向量计算：首先对判断矩阵按列进行归一化处理：

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (6.2)$$

随后对归一化矩阵 $B = [b_{ij}]$ 的各行求算术平均，得到指标的相对权重：

$$w_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n b_{ij} \quad (6.3)$$

式中： n 为判断矩阵阶数； a_{ij} 为指标 i 相对于 j 的重要性比值； b_{ij} 为对第 j 列归一化后的矩阵元素； w_i 为指标 i 的权重； $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ 为权重向量。

(4) 一致性检验：通过式 (6.4) 计算判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max}$ ，计算 CI 进行一致性检验，随机一致性指标 RI 见表 7.2，若 $CI/RI < 0.1$ ，则判断矩阵符合要求，否则应写入新的矩阵，重新进行计算。所有判断矩阵符合要求时，计算各层次指标的组合同权重。

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(Aw)_i}{nw_i} \quad (6.4)$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - 1}{(n - 1)} \quad (6.5)$$

式中: CI 为判断矩阵的一般一致性指标; n 为判断矩阵的阶数。

表 7.2 随机一致性指标 RI 取值表

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

7.2.2 综合评分与风险判别: 对各风险事件进行量化评价, 计算各评估单元(或区段)的综合后果当量和综合可能性当量。具体来说, 对于第 i 区段的第 k 个风险指标, 记其后果严重程度当量为 $DC_{k,i}$, 可能性当量为 $DH_{k,i}$, 同时该指标在准则层内具有权重 w_k 。则该区段的整体风险可通过对各指标分值加权求和获得, 即分别计算综合后果当量(CDC_i)和综合可能性当量(CDH_i)公式表达为;

$$CDC_i = \sum_{k=1}^n (w_k \times DC_{k,i}) \quad (6.6)$$

$$CDH_i = \sum_{k=1}^n (w_k \times DH_{k,i}) \quad (6.7)$$

7.2.3 在计算出各区段的综合后果当量和可能性当量后, 可利用预先构建的风险矩阵对整体风险等级进行判定。先对可能性和后果两个维度的加权分值分别进行判断, 再依据风险矩阵中预设的分隔标准, 确定每个区段对应的风险等级。

8 设计、施工、运营期水环境效应评价

8.1 一般规定

8.1.1 各阶段评价应采用第 7 章规定的评价方法开展具体评价工作。

8.1.2 各阶段评价应形成独立的评价报告或专题章节，并纳入相应的工程文件：

- (1) 设计阶段评价报告应纳入工程可行性研究报告及初步设计文件；
- (2) 施工阶段评价报告应纳入施工组织设计及竣工文件；
- (3) 运营阶段评价报告应作为运营期环境保护管理的基础文件。

8.1.3 当发生下列情况之一时，应重新开展或补充相应阶段的评价工作：

- (1) 工程选线、埋深或防排水方案发生重大调整；
- (2) 施工过程中揭露的水文地质条件与原设计依据发生重大变化；
- (3) 运营期监测发现水环境效应超出设计预期或出现新的影响类型；
- (4) 隧道周边区域新增水环境敏感目标。

8.2 设计阶段水环境效应评价

8.2.1 评价目标与内容

8.2.1.1 设计阶段水环境效应评价的目标是：预测隧道建设可能引发的水环境效应类型及程度，比选优化工程方案，确定水环境保护措施，为工程设计提供依据。

8.2.1.2 设计阶段评价应包括下列基本内容：

- (1) 基础资料的收集与复核；
- (2) 水环境效应的识别与分析；
- (3) 各风险事件的可能性及后果预测；
- (4) 不同工程方案的水环境效应比选；

- (5) 推荐方案的工程措施及保护措施确定；
- (6) 施工期及运营期水环境监测方案的初步设计。

8.2.2 评价工作程序

8.2.2.1 设计阶段水环境效应评价应按下列程序进行：

- (1) 工程可行性研究阶段：以资料收集和初步分析为主，完成水环境效应初步识别，进行路线方案比选，排除高风险不可接受方案；
- (2) 初步设计阶段：以补充勘察和专题评价为主，完成详细预测和风险等级判定，确定防排水方案和保护措施；
- (3) 施工图设计阶段：以措施细化和施工要求为主，完成监测方案设计、注浆参数确定和施工工艺要求。

8.2.2.2 各阶段评价深度应与工程设计深度相匹配，并应符合表 8.1 的规定：

表 8.1 随机一致性指标 RI 取值表

评价内容	工可阶段	初步设计阶段	施工图设计阶段
资料收集	区域性资料	详查资料	补充勘察资料
水文地质条件	初步判断	详细查明	参数确定
涌水量预测	类比法估算	类比法估算	修正预测
风险等级判定	初步分级	详细分级	段落分级
措施设计	原则性要求	方案设计	施工图及参数

条文说明

工可阶段资料有限，水环境效应评价以定性或半定量为主，目的在于排除水环境风险不可接受的路线方案；初步设计阶段应完成详细预测和措施方案设计；施工图设计阶段则需细化注浆参数、排水系统布置等技术细节，使措施具备可施工性。各阶段不宜跳级或简化，否则可能导致评价深度不足、措施缺乏依据。

8.2.3 方案比选要求

8.2.3.1 当存在多个隧道工程方案时，应按下列要求进行水环境效应比选：

(1) 应计算各方案对区域水资源总量、敏感目标影响程度、水质风险等关键指标的量化差异；

(2) 应将第 6 章确定的风险等级作为方案比选的核心依据；

(3) 比选结果应明确推荐方案及淘汰方案的水环境效应理由。

8.2.4 评价成果

8.2.4.1 设计阶段水环境效应评价成果应包括下列内容：

(1) 水环境效应评价报告；

(2) 隧道水环境效应风险等级分布图；

(3) 隧道防排水设计方案及水环境保护措施专题图件；

(4) 施工期及运营期水环境监测方案；

(5) 涌水突涌水应急预案框架。

8.2.4.2 水环境效应评价报告应经专家评审或第三方审查，并作为设计文件审查的必要内容。

8.3 施工阶段水环境效应评价

8.3.1 评价目标与内容

8.3.1.1 施工阶段水环境效应评价的目标是：验证设计阶段预测结果的准确性，跟踪监测水环境动态变化，动态调整保护措施，确保施工期水环境影响可控。

8.3.1.2 施工阶段评价应包括下列基本内容：

(1) 施工期水环境跟踪监测数据的系统采集与分析；

(2) 设计阶段预测结果与实测数据的对比验证；

(3) 水文地质参数的反演修正和后续段落影响预测更新；

(4) 水环境保护措施效果评估与动态调整；

(5) 异常涌水或水环境事件的应急评价。

8.3.2 评价工作程序

8.3.2.1 施工阶段水环境效应评价应按下列程序进行：

- (1) 施工准备阶段：复核监测方案，建立初始数据基准；
- (2) 施工推进阶段：按段落开展跟踪监测，定期进行设计验证和动态评价；
- (3) 施工结束阶段：开展施工期总结评价，评估施工期水环境影响程度及恢复情况，为运营期评价提供初始状态数据。

8.3.2.2 动态评价的频率应符合下列规定：

- (1) 正常情况下，每掘进 100 m~200 m 应进行一次动态评价；
- (2) 穿越断层破碎带、岩溶发育段、水源地补给区等高风险段落时，应加密至每掘进 20 m~50 m 评价一次；
- (3) 出现异常涌水、水位突降等事件时，应立即开展应急评价。

8.3.3 设计验证与参数反演

8.3.3.1 设计验证应采用实测值与设计阶段预测值对比的方法，并应符合下列规定：

- (1) 实际涌水量与设计预测值偏差超过 30%时，应重新进行水文地质参数反演；

条文说明

偏差阈值设定为 30%，参考了类似地下工程水文地质参数反演的工程实践经验。当实测值与预测值偏差在此范围内时，一般认为预测模型基本可靠；超过此范围则表明原水文地质认识存在较大偏差，需重新审视模型概化和参数取值的合理性。对于岩溶发育区，因地质条件变异性大，此阈值可适当放宽至 40%。

- (2) 实际水位变化与预测变化趋势不一致时，应分析差异原因（地质条件变化、边界条件差异等）；

(3) 原判定的风险等级与实际监测结果不符时，应及时调整风险等级。

8.3.3.2 参数反演应符合下列规定：

(1) 应采用实测的涌水量、水位变化数据，反演修正渗透系数、给水度等水文地质参数；

(2) 反演参数后应重新进行后续未施工段落的影响预测；

(3) 反演成果应形成参数修正报告，并作为后续施工和运营期评价的依据。

8.3.4 措施动态调整

8.3.4.1 当监测发现水环境效应超出设计预期或触发了预警阈值时，应及时启动措施调整程序。

8.3.4.2 措施调整应符合下列规定：

(1) 涌水量超过设计允许值时，应增补注浆堵水或加强超前预注浆；

(2) 敏感目标水位下降超过预警值时，应优化施工排水方案、减少排水量或启动应急补水；

(3) 水质污染超标时，应调整施工工艺、加强废水处理或改变注浆材料；

(4) 措施调整后应持续监测验证效果，必要时应再次调整。

8.3.5 评价结果

8.3.5.1 施工阶段水环境效应评价成果应包括下列内容：

(1) 施工期水环境跟踪监测报告（可按月、季度或段落提交）；

(2) 设计验证与参数反演报告；

(3) 措施调整记录及效果评估报告；

(4) 施工期水环境效应总结评价报告（竣工前提交）。

8.3.5.2 施工期水环境效应总结评价报告应纳入隧道工程竣工文件，并作为运营期评价的初始状态依据。

8.4 运营阶段水环境效应评价

8.4.1 评价目标与内容

8.4.1.1 运营阶段水环境效应评价的目标是：长期跟踪隧道排水对水环境的持续影响，分析变化趋势，评价保护修复措施效果，预测中长期风险，保障水环境安全。

8.4.1.2 运营阶段评价应包括下列基本内容：

- (1) 运营期水环境长期监测数据的系统采集与分析；
- (2) 地下水环境变化趋势评价（年际变化、季节变化、空间分布变化）；
- (3) 隧道排水对区域水资源总量及敏感目标影响的持续评估；
- (4) 水环境保护及修复措施的效果评价；
- (5) 中长期水环境风险预测及预警。

8.4.2 评价工作程序

8.4.2.1 运营阶段水环境效应评价应按下列程序进行：

- (1) 运营初期（通车后 1~3 年）：以监测数据积累和初始趋势判断为主，重点验证设计阶段预测的长期影响是否与实际相符；
- (2) 运营中期（通车后 4~10 年）：以趋势分析和措施效果评价为主，判断地下水环境是否趋于稳定；
- (3) 运营远期（通车 10 年后）：以长期影响累积效应评价和中长期风险预测为主，提出必要的修复或补救措施。

8.4.2.2 评价周期应符合下列规定：

- (1) 隧道通车运营后前 5 年，应每年开展一次全面评价；
- (2) 运营 5 年后，如地下水环境指标趋于稳定，可每 2~3 年评价一次；

(3) 当出现异常变化(如泉点断流、水位持续下降、水质恶化)或发生环境事故时,应立即开展专项评价;

(4) 当隧道周边区域新增水环境敏感目标时,应及时开展补充评价。

8.4.3 趋势评价要求

8.4.3.1 地下水水位趋势评价应符合下列规定:

- (1) 应分析各监测点地下水位的年际变化曲线,判断是否存在持续下降趋势;
- (2) 应计算区域地下水流场的年际变化,判断降落漏斗是否在持续扩大;
- (3) 应评估地下水位下降对井泉、植被、湿地等敏感目标的影响程度。

8.4.3.2 泉点流量趋势评价应符合下列规定:

- (1) 应分析受影响泉点的流量年际变化,判断是否出现流量衰减或断流;
- (2) 应评估泉点流量变化与隧道排水量的相关性;
- (3) 对于已断流的重要泉点,应评估恢复的可能性和所需条件。

8.4.3.3 水质趋势评价应符合下列规定:

- (1) 应分析各监测点水质指标的时空变化规律;
- (2) 应判断是否存在长期累积性的水质恶化趋势;
- (3) 应评估水质变化对下游用水功能的影响。

8.4.4 措施效果评价要求

8.4.4.1 当运营期采取水环境保护或修复措施(如生态导水、回灌、补偿供水等)后,应开展专项效果评价。

8.4.4.2 效果评价应采用“有无对比法”或“前后对比法”,对比分析措施实施前后关键指标的变化。

8.4.4.3 效果评价应符合下列规定：

- (1) 应对照措施的设计目标，评价各项指标的达标情况；
- (2) 应分析措施未能达到预期效果的原因，提出改进建议；
- (3) 对于效果显著的措施，应总结可推广的技术经验；
- (4) 对于效果不佳的措施，应提出替代方案或优化措施。

8.4.5 中长期风险预测与预警

8.4.5.1 应基于运营期监测数据，开展中长期（10 年～30 年尺度）水环境效应预测。

8.4.5.2 中长期预测应符合下列规定：

- (1) 应采用趋势外推法或更新后的数值模型，预测在持续排水条件下的最终平衡状态。
- (2) 应评估中长期生态累积效应（如植被退化、湿地萎缩、壤盐渍化等）；
- (3) 应预测极端气候条件下的水环境风险。

8.4.5.3 应建立运营期水环境预警系统，确定各关键指标的预警阈值。

8.4.5.4 当预警被触发时，应启动运营期应急预案，包括但不限于：减少运营排水（封堵部分排水孔）、启动回灌设施、扩大补偿供水范围、实施生态修复等措施。

8.4.6 评价成果

8.4.6.1 运营阶段水环境效应评价成果应包括下列内容：

- (1) 年度或周期性水环境效应评价报告；
- (2) 水环境趋势分析专题报告（可按 5 年或 10 年周期编制）；
- (3) 保护修复措施效果评价报告；

(4) 中长期风险预测报告及预警方案。

8.4.6.2 评价成果应报送隧道运营单位及生态环境主管部门，作为运营期环境管理的依据。

8.5 各阶段评价的衔接与信息传递

8.5.1 各阶段评价工作的核心数据应纳入统一的信息管理平台或数据库，确保数据的完整性和可追溯性。

8.5.2 各阶段之间的信息传递应符合下列规定：

- (1) 设计阶段的预测模型、水文地质参数及监测方案应移交至施工阶段；
- (2) 施工阶段反演修正后的参数及修正模型应移交至运营阶段；
- (3) 运营阶段发现的问题及经验应反馈至后续类似工程的设计阶段。

8.5.3 各阶段评价工作的主要衔接内容可参照表 8.2 执行

表 8.2 各阶段水环境效应评价衔接内容表

传递内容	设计→施工	施工→运营
预测模型及参数	预测模型、水文地质参数	反演修正后的参数
风险等级判定	各段落风险等级分布	施工验证后的修正等级
监测方案	监测点位、频率、指标	运营期保留监测井、延续监测
保护措施设计	注浆参数、防排水设计	运营期保留措施及维护要求
初始状态数据	施工前水环境相关数据	施工结束后竣工状态数据

9 水环境效应监测与预警

9.1 一般规定

9.1.1 公路隧道水环境效应监测与预警应贯穿勘察、施工、运营全过程，为水环境效应评价、保护措施优化和风险管控提供数据支撑。

9.1.2 监测与预警工作应包括下列内容：

- (1) 监测网络的布设与维护；
- (2) 监测指标的确定与数据采集；
- (3) 监测数据的整编、分析与报送；
- (4) 预警阈值体系的建立；
- (5) 预警触发后的响应与处置。

9.1.3 监测工作应与设计阶段的监测方案、施工阶段的动态监测、运营阶段的长期跟踪监测有机衔接，形成统一的监测数据链。

9.1.4 监测数据应纳入水环境效应信息管理平台，实现数据的集中存储、动态查询、趋势分析和预警发布。

9.2 监测网络布设

9.2.1 一般规定

9.2.1.1 监测网络的布设应根据隧道工程特点、水文地质条件、环境敏感程度及评价等级综合确定，并满足下列基本要求：

- (1) 能够反映隧道影响范围内地下水水位、水量、水质的时空变化规律；
- (2) 能够有效监测敏感目标（井、泉、湿地、地表水体等）的变化情况；
- (3) 能够为设计验证、参数反演和趋势分析提供足够的数据支撑；

(4) 布设方案应经济合理，便于长期运维。

9.2.1.2 监测网络应分为施工期监测网络和运营期监测网络，两期监测网络应保持延续性，运营期应保留部分施工期监测点。

9.2.2 监测断面与监测点布设

9.2.2.1 监测断面的布设应符合下列规定：

(1) 应沿隧道轴线方向布设不少于 3 个监测断面，分别位于隧道进口段、中部段和出口段；

(2) 在水文地质条件复杂段落（断层破碎带、岩溶发育段、含水层变化段）应加密布设监测断面；

(3) 在水环境敏感段落（如水源地补给区、泉域分布区）应布设专门的监测断面。

条文说明

实际工程中应根据水文地质条件的复杂程度和敏感目标的分布确定监测断面布设方案。一级评价应至少保证隧道影响范围内沿轴线方向有连续的监测断面控制，每个断面至少覆盖隧道左右两侧，以形成二维流场的有效控制。运营期可利用施工期保留的部分监测井延续监测，以保证数据序列的连续性。

9.2.2.2 监测点的布设应符合下列规定：

(1) 地下水监测井应布设在隧道轴线两侧，每条监测断面上不宜少于 3 个监测井（隧道两侧及顶部各一个）；

(2) 监测井深度应穿透主要含水层，或与隧道埋深相适应；

(3) 可利用沿线既有民井、机井作为监测点，但应评估其代表性和适用性；

(4) 泉点监测应包括影响范围内所有重要泉点，特别是具有饮用、生态功能的泉点；

(5) 地表水监测点应布设在隧道穿越河流的上游和下游，以及可能受影响的湖泊、水库。

9.2.3 背景监测点与对照监测点

9.2.3.1 应在隧道影响范围以外（水文地质单元边界以外或隧道影响半径 2 倍距离以上）布设不少于 1 个背景监测点，用于获取区域地下水天然动态背景值。

9.2.3.2 应在隧道影响范围内但可能受隧道影响较小的区域布设对照监测点，用于区分隧道影响与其他因素（气候、区域开采等）的影响。

9.3 监测指标与频率

9.3.1 监测指标

9.3.1.1 地下水监测指标应包括下列内容：

（1）水位（必测项）：地下水位埋深、标高，作为判断地下水环境影响范围和影响程度的重要指标；

（2）水质（必测项）：pH、总硬度、溶解性总固体、高锰酸盐指数、氨氮、硝酸盐、亚硝酸盐、硫酸盐、氯化物、铁、锰，以及根据工程特点选测的特征因子（如注浆材料特征离子、石油类等），作为判断工程活动是否引起污染迁移或水化学环境变化的重要依据。

（3）辅助指标：隧道涌水量（分区分段计量）、单井出水量（如适用）、泉点流量、地表水流量等。此外，植被退化、湿地萎缩、泉点断流等生态表现，可作为水环境效应的间接表征。

9.3.1.2 泉点监测指标应包括下列内容：

（1）泉点流量（必测项）；

（2）泉点水温、水质（根据泉点功能确定）；

（3）泉点断流或干涸记录。

9.3.1.3 地表水监测指标应包括下列内容：

（1）水位、流量（或径流量）；

- (2) 水温、pH、溶解氧、高锰酸盐指数、氨氮、总磷、石油类。

9.3.1.4 生态敏感目标监测指标应包括下列内容：

- (1) 湿地面积、水位及植被状况（每年不少于 1 次）；
- (2) 依赖地下水的植被覆盖度及长势（可采用遥感监测）；
- (3) 隧道顶部土壤含水量（代表性点位）。

9.3.2 监测频率

9.3.2.1 施工期监测频率应符合下列规定：

- (1) 地下水位：施工影响范围内监测点每日 1 次，影响范围外每周 1~2 次；
- (2) 隧道涌水量：每日记录，穿越高风险段落时应实时监测；
- (3) 地下水水质：每季度 1 次，穿越水源地段落时应加密至每月 1 次；
- (4) 泉点流量：每旬 1 次，雨季应加密至每周 1 次；
- (5) 地表水：每月 1 次，丰水期和枯水期各增加 1 次。

9.3.2.2 运营期监测频率应符合下列规定：

- (1) 地下水位：每周 1 次，稳定后可调整为每月 1 次；
- (2) 隧道排水量：连续记录，按月汇总统计；
- (3) 地下水水质：每半年 1 次，水质稳定后可调整为每年 1 次；
- (4) 泉点流量：每月 1 次，重要泉点应加密至每旬 1 次；
- (5) 地表水：每季度 1 次。

9.3.2.3 下列情况应加密监测频率：

- (1) 穿越断层破碎带、岩溶发育段等高风险段落时；

(2) 涌水量异常增大或水位突然下降时;

(3) 临近或穿越水源地保护区时;

(4) 出现极端天气(如强降雨)时。

9.4 监测方法与技术要求

9.4.1 地下水位监测

9.4.1.1 地下水位监测应采用自动水位计或人工测钟进行, 并符合下列规定:

(1) 自动水位计精度不宜低于 0.5 cm, 数据采集频率不宜低于每小时 1 次;

(2) 人工监测应采用钢尺水位计或电测水位计, 读数精确至 1 cm;

(3) 监测点应设置固定基准点, 每次测量应记录监测时间、水位埋深及井口高程。

9.4.1.2 重要监测点(如水源地、敏感泉域上游)应配置自动水位记录仪, 并具备数据远程传输功能。

9.4.2 隧道涌水量监测

9.4.2.1 隧道涌水量监测应符合下列规定:

(1) 应在隧道内排水沟或集水坑处设置流量计量设备;

(2) 宜按里程分段设置计量点, 分段计量涌水量;

(3) 流量计精度不宜低于 $\pm 5\%$;

(4) 应区分正常涌水与施工用水(如钻孔用水、养护用水)。

9.4.2.2 涌水量记录应包括出水量、出水位置(里程)、出水形态(渗水、滴水、淋水、涌水)及水质变化情况。

9.4.3 泉点流量监测

9.4.3.1 泉点流量监测应根据泉点出流形态选择合适的方法:

- (1) 流量较大 ($>1\text{ L/s}$) 的泉点可采用三角堰、矩形堰或流量计测量;
- (2) 流量较小 ($<1\text{ L/s}$) 的泉点可采用容积法 (用量筒或容器接水计时);
- (3) 难以直接测量的泉点可采用测流槽或间接估算法。

9.4.3.2 泉点流量监测应避免降雨径流干扰, 宜在连续晴天 3 天后测量。

9.4.4 水质监测

9.4.4.1 水质样品的采集、保存和运输应符合 HJ 164-2020 (地下水环境监测技术规范) 和 HJ 91.2-2022 (地表水环境监测技术规范) 的相关要求。

9.4.4.2 水质监测应采用国家或行业标准分析方法, 现场可测试的指标 (pH、水温、溶解氧等) 应在现场测定。

9.4.4.3 注浆材料特征因子的监测应根据注浆材料类型确定, 常见类型见表 9.1。

表 9.1 注浆材料类型及特征监测因子

注浆材料类型	特征监测因子
水泥浆液	pH、钙离子、硫酸盐
水泥-水玻璃双液浆	pH、硅酸盐
化学浆液	COD、氨氮、特征有机组分

9.4.5 生态敏感目标监测

9.4.5.1 湿地监测宜采用遥感监测与地面核查相结合的方法:

- (1) 每年获取不少于 1 期高分辨率遥感影像 (宜在丰水期);
- (2) 地面核查应包括湿地边界标定、水位测量及植被样方调查。

9.4.5.2 植被监测应符合下列规定:

(1) 可采用遥感植被指数分析植被覆盖度变化；

(2) 关键区域（隧道正上方及周边）应设置固定样方，每年调查一次植物种类、盖度及长势。

9.5 监测数据管理与整编

9.5.1 数据记录与报送

9.5.1.1 监测数据应采用统一格式记录，记录内容包括：监测点编号、位置（坐标及高程）、监测时间、监测数据、监测人员及备注。

9.5.1.2 监测数据应按下列时限报送：

(1) 施工期：每周报送一次监测数据汇总表，异常情况应在 2 小时内报告；

(2) 运营期：每月报送一次监测数据汇总表，异常情况应在 24 小时内报告。

9.5.1.3 监测数据应由监测单位负责人审核签字，并建立纸质和电子双重存档。

9.5.2 数据整编与分析

9.5.2.1 监测数据应定期进行整编，整编内容包括：

(1) 监测数据的完整性检查（缺测、异常值标识等）；

(2) 监测数据的统计（最大值、最小值、平均值、变幅等）；

(3) 监测数据的时间序列图、空间分布图的绘制；

(4) 与设计阶段预测值、施工阶段反演值的对比分析。

9.5.2.2 数据整编报告应作为水环境效应评价的基础文件，按下列周期编制：

(1) 施工期：每月编制一期监测简报，每季度编制一期监测报告；

(2) 运营期：每半年编制一期监测简报，每年编制一期监测报告。

9.5.3 监测数据信息平台

9.5.3.1 宜建立公路隧道水环境效应监测数据信息平台，平台应具备下列功能：

- (1) 监测数据的实时录入、自动校验与存储；
- (2) 监测数据的可视化展示（水位等值线图、趋势曲线、空间分布图等）；
- (3) 监测数据与预警阈值的自动比对及预警触发；
- (4) 数据导出及报告自动生成功能。

9.5.3.2 信息平台应设置不同权限（监测人员、设计单位、施工单位、运营单位、监管部门），确保数据安全和信息共享。

9.6 预警体系建立

9.6.1 一般规定

9.6.1.1 应基于水环境效应评价的风险等级和监测数据，建立分级预警体系，实现水环境风险的动态管控。

9.6.1.2 预警体系应包括预警阈值、预警等级、预警发布流程和应急响应措施四个核心要素。

9.6.1.3 预警阈值应根据设计阶段的预测结果、施工前背景值及保护目标的水位、水量、水质要求综合确定。

9.6.2 预警阈值

9.6.2.1 地下水水位预警阈值应符合下列规定：

(1) 蓝色预警（关注级）：水位下降至设计预测值的 1.2 倍，或水位降深超过设计允许降深的 80%；

(2) 黄色预警（警告级）：水位下降至设计预测值的 1.5 倍，或水位降深达到设计允许降深；

(3) 橙色预警（警戒级）：水位下降至设计预测值的 2.0 倍，或水位降深超过设计允许降深的 1.2 倍，或敏感点水位出现明显异常变化；

(4) 红色预警（应急级）：水位持续下降威胁到居民饮用水井取水能力，或重要泉点出现断流迹象。

9.6.2.2 隧道涌水量预警阈值应符合下列规定：

- (1) 黄色预警：涌水量超过设计预测正常涌水量的 1.5 倍；
- (2) 橙色预警：涌水量超过设计预测正常涌水量的 2.0 倍；
- (3) 红色预警：涌水量超过设计预测最大涌水量，或出现突涌水事故。

9.6.2.3 泉点流量预警阈值应符合下列规定：

- (1) 黄色预警：泉点流量较背景值下降 30%；
- (2) 橙色预警：泉点流量较背景值下降 50%；
- (3) 红色预警：泉点流量较背景值下降 80%，或出现断流。

9.6.2.4 水质预警阈值应符合下列规定：

- (1) 黄色预警：特征因子浓度达到标准限值的 70%；
- (2) 橙色预警：特征因子浓度达到标准限值；
- (3) 红色预警：特征因子浓度超过标准限值的 1.2 倍，或出现水质型缺水风险。

9.6.2.5 各评价等级隧道的预警阈值应结合敏感目标的重要性适当调整。涉及集中式饮用水水源地的，预警阈值应适当收严。

9.6.3 预警等级

9.6.3.1 预警等级应按表 9.2 划分为四个等级。

表 9.2 水环境效应预警等级划分

预警等级	等级标识	颜色标识	说明
IV 级	关注级	蓝色	指标出现异常趋势，需关注并加强监测
III 级	警告级	黄色	指标接近控制阈值，需采取预防措施
II 级	警戒级	橙色	指标达到或超过控制阈值，需采取控制措施
I 级	应急级	红色	指标严重超标或出现安全事故，需启动应急预案

9.6.4 预警发布与响应

9.6.4.1 预警发布应符合下列规定：

- (1) 蓝色、黄色预警由监测单位发布，通报施工或运营单位；
- (2) 橙色预警由监测单位报建设单位确认后发布，通报设计、施工、监理、环保等相关单位；
- (3) 红色预警由建设单位启动应急程序，同时报告生态环境主管部门。

9.6.4.2 预警响应应符合下列规定：

- (1) 蓝色预警响应：加密监测频率，分析异常原因，评估发展趋势；
- (2) 黄色预警响应：加密监测频率，核查防排水措施有效性，调整施工或运营参数；
- (3) 橙色预警响应：暂停高风险段落施工，增补注浆堵水或调整排水方案，启动补偿供水准备；
- (4) 红色预警响应：停止相关段落施工，启动应急供水，采取工程抢险措施。

9.6.4.3 预警解除应符合下列规定：

(1) 预警触发条件消除，且连续 3 个监测周期数据稳定在阈值以内，可解除预警；

(2) 预警解除应由原发布单位确认后发布。

9.7 监测与预警报告

9.7.1 监测与预警工作应形成下列报告：

(1) 施工期监测月报、季报、年报；

(2) 运营期监测半年报、年报；

(3) 预警专项报告（预警触发时编制）；

(4) 监测工作总结报告（施工结束及运营阶段结束时编制）。

9.7.2 监测报告应包括下列内容：

(1) 监测工作概况（监测点位、频率、方法等）；

(2) 监测数据统计与分析（含图表）；

(3) 与设计预测值、背景值的对比分析；

(4) 存在的问题及建议；

(5) 预警情况记录（如有）。

9.7.3 预警专项报告应包括下列内容：

(1) 预警触发时间、等级及依据；

(2) 异常情况描述；

(3) 已采取的应急措施及效果；

(4) 后续处置建议。

9.8 监测设施维护

9.8.1 监测设施（监测井、流量计、水位计、水质采样设备等）应定期检查与维护，确保设施完好、数据准确。

9.8.2 监测井维护应符合下列规定：

- （1）每半年检查一次监测井井盖、井管及标识完好情况；
- （2）每年进行一次清淤洗井，清除井内沉淀物；
- （3）每 2 年进行一次透水试验，检验监测井的灵敏性。

9.8.3 运营期保留的监测设施应纳入隧道运营维护体系，明确维护责任单位和维护经费来源。

9.8.4 监测设施若因工程或自然原因损毁，应及时修复或重建，并记录相关情况。

10 水环境保护与修复措施

10.1 一般规定

10.1.1 水环境保护与修复措施的制定应以水环境效应评价结果和风险等级为依据，遵循“预防为主、防治结合、因地制宜、动态调整”的原则。

10.1.2 措施类型应包括下列三类：

- （1）预防性措施：在工程设计阶段纳入，从源头减少水环境效应；
- （2）工程控制措施：在施工和运营阶段实施，控制水环境影响的范围和程度；
- （3）修复性措施：针对已产生的水环境影响，实施补偿或修复。

10.1.3 措施的选择应根据风险等级按表 10.1 确定基本策略。

表 10.1 措施选择与风险等级对应表

风险等级	基本策略	措施要求
I 级（低风险）	常规防护	常规防排水设计，常规监测
II 级（中风险）	针对防护	针对性堵水、限排措施，加强监测
III 级（高风险）	强化控制	强化注浆帷幕、全封闭衬砌，加密监测，制定应急预案
IV 级（极高风险）	优先避让	优先改线避让；无法避让时采取最高等级综合措施

10.1.4 措施实施后应开展效果评价，评价方法应符合第 7 章的规定。

10.2 堵水措施

10.2.1 一般规定

10.2.1.1 堵水措施是通过注浆、衬砌等手段封堵地下水进入隧道的通道，减少施工期和运营期排水量，是隧道水环境保护的核心措施。

10.2.1.2 堵水措施应遵循“以堵为主、限量排放”的设计原则，在水环境敏感区域应采取全封闭或强堵水方案。

10.2.2 超前预注浆

10.2.2.1 超前预注浆适用于下列情形：

- (1) 隧道穿越断层破碎带、岩溶发育带、富水地层等高渗透性段落；
- (2) 风险等级为Ⅲ级及以上段落；
- (3) 隧道顶部存在重要水源地或敏感泉点；
- (4) 设计预测涌水量较大，可能造成显著水环境影响的段落。

10.2.2.2 超前预注浆设计应符合下列规定：

- (1) 注浆范围应覆盖隧道开挖轮廓线以外 3 m~8 m（根据地层条件确定）；
- (2) 注浆帷幕的渗透系数宜降至 1×10^{-5} cm/s 以下；
- (3) 注浆材料应优先选用环保型材料，避免对地下水水质造成二次污染；
- (4) 应设置注浆效果检查孔，注浆后涌水量应控制在设计允许范围内。

10.2.2.3 超前预注浆的效果评价应符合下列规定：

- (1) 注浆前后应进行压水试验，对比渗透系数变化；
- (2) 注浆后开挖段落的实际涌水量不应超过设计允许值；
- (3) 注浆效果不满足要求时，应实施补充注浆。

10.2.3 径向注浆

10.2.3.1 径向注浆适用于下列情形：

- (1) 隧道开挖后局部出水较大，超前预注浆不足的补充；
- (2) 衬砌施作前的局部渗水处理；
- (3) 运营期衬砌渗漏水的封堵。

10.2.3.2 径向注浆应符合下列规定：

- (1) 注浆孔应沿出水点周围呈放射状布设；
- (2) 注浆压力应根据衬砌结构和围岩条件确定，不宜大于 1.0 MPa；
- (3) 注浆材料宜选用水泥浆液或水泥-水玻璃双液浆。

10.2.4 帷幕注浆

10.2.4.1 帷幕注浆适用于下列特殊情形：

- (1) 高压富水断层带，常规注浆难以形成有效止水圈；
- (2) 岩溶管道水发育段落，需在隧道周边形成封闭止水帷幕；
- (3) 风险等级为IV级且无法避让的段落。

10.2.4.2 帷幕注浆设计应符合下列规定：

- (1) 帷幕厚度（径向范围）不宜小于 5 m~10 m；
- (2) 应采用多孔、多序注浆工艺，注浆孔排数不宜少于 3 排；
- (3) 注浆材料宜采用水泥-水玻璃双液浆或超细水泥浆，必要时添加抗分散剂；
- (4) 应通过检查孔取芯和压水试验验证帷幕的连续性和止水效果。

10.2.5 堵水效果评价

10.2.5.1 堵水效果评价指标应包括下列内容：

(1) 涌水量削减率 = (措施前涌水量 - 措施后涌水量) / 措施前涌水量 × 100%;

(2) 注浆帷幕渗透系数 (应达到设计要求);

(3) 隧道周边地下水位恢复情况。

10.2.5.2 堵水效果评价等级可按下列标准划分:

表 10.2 堵水效果评价等级划分

涌水量削减率	评价等级
≥90%	优
80%~90%	良
70%~80%	中
<70%	差

条文说明

堵水效果评价等级划分参考了类似地下工程的注浆效果验收标准。涌水量削减率≥90%视为优,表明注浆帷幕基本封堵了地下水进入隧道的通道;80%~90%为良,表明尚有少量渗漏但总体可控;低于70%则表明注浆效果不理想,应分析原因并实施补充注浆。对于水环境敏感区域(水源地补给区),涌水量削减率不宜低于90%。

10.3 限量排放措施

10.3.1 一般规定

10.3.1.1 限量排放是指通过对隧道排水量进行控制,使其不超过水环境可承受的阈值,适用于无法完全封堵但需控制影响的段落。

10.3.1.2 限量排放措施应与堵水措施配合使用,不应作为替代堵水的唯一措施。

10.3.2 允许排水量确定

10.3.2.1 允许排水量应根据水环境效应评价结果和保护目标要求综合确定,并符合下列规定:

- (1) 应以不影响泉点正常出流、不影响居民取水井水位为下限；
- (2) 应以不造成地表水体径流量明显减少为控制目标；
- (3) 涉及生态敏感区时，应满足生态需水要求。

10.3.2.2 允许排水量应按不同段落分别确定，并纳入施工和运营管理。

10.3.3 限量排放控制措施

10.3.3.1 限量排放控制措施应包括下列内容：

- (1) 排水阀门控制：在排水管道上设置流量调节阀门，按允许排水量进行控制；
- (2) 分段排水管理：对不同段落涌水分别收集、分别排放，避免集中排放造成局部影响过大；
- (3) 涌水回用：将隧道涌水回用于施工用水、景观补水或回灌，减少外排总量；
- (4) 季节性调控：枯水期应进一步减少排水量，丰水期可适当放宽。

10.4 防渗措施

10.4.1 一般规定

10.4.1.1 防渗措施是通过衬砌、防水层等结构措施，阻隔隧道内外水力联系，减少地下水渗入和隧道排水。

10.4.1.2 防渗措施应根据水环境敏感程度和水文地质条件，按表 10.3 选择衬砌类型。

表 10.3 衬砌防渗类型选择

防渗等级	衬砌类型	适用条件
一级防渗	全封闭衬砌+复合防水板	风险等级Ⅲ级及以上、水源地保护区
二级防渗	全封闭衬砌	风险等级Ⅱ级、一般敏感区
三级防渗	排水式衬砌	风险等级Ⅰ级、非敏感区

10.4.2 全封闭衬砌

10.4.2.1 全封闭衬砌适用于需要切断隧道与含水层水力联系、禁止或严格限制排水的段落。

10.4.2.2 全封闭衬砌应符合下列规定：

- （1）应设置复合防水层（土工布+防水板）；
- （2）防水板厚度不宜小于 1.5 mm，搭接宽度不宜小于 10 cm；
- （3）衬砌混凝土抗渗等级不宜低于 P10；
- （4）施工缝、变形缝应设置止水带，并进行注浆密封处理。

10.4.2.3 全封闭衬砌的防渗效果应在衬砌完成后进行渗水量检测，渗水量不宜大于 0.05 L/(m²·d)。

10.4.3 排水式衬砌

10.4.3.1 排水式衬砌适用于允许适量排水、但需控制排水路径和排放去向的段落。

10.4.3.2 排水式衬砌应符合下列规定：

- （1）应在衬砌背后设置排水盲沟或排水管，将渗水集中收集；
- （2）排水系统应有过滤层，防止细颗粒流失；
- （3）收集的涌水应经沉淀处理后排放或回用。

10.5 注浆材料环境友好性要求

10.5.1 一般规定

10.5.1.1 注浆材料的选用应兼顾堵水效果和环境影响，优先选用环境友好型注浆材料。

10.5.1.2 在水环境敏感区域（水源地保护区、泉域补给区），禁止使用有毒有害的化学浆液。

10.5.2 注浆材料环境评价

10.5.2.1 注浆材料的环境评价应包括下列内容：

- （1）材料本身及其反应产物的毒性、生物降解性；
- （2）材料对地下水水质的影响（pH、COD、重金属溶出等）；
- （3）材料在含水层中的迁移性和持久性。

10.5.2.2 常用注浆材料的环境友好性分类及适用敏感区如下：

表 10.4 常用注浆材料的环境友好性分类及适用敏感区

材料类型	环境友好性	适用敏感区
水泥浆液	优	所有区域
水泥-水玻璃双液浆	良	所有区域
超细水泥浆	优	所有区域
丙烯酸盐浆液	中	一般敏感区
聚氨酯浆液	差	非敏感区
木质素浆液	良	经评估后可用

10.5.3 注浆过程水质保护

10.5.3.1 注浆施工期间应监测周边地下水水质，监测频率不应低于每日 1 次。

10.5.3.2 当发现水质异常（pH 突变、COD 升高等）时，应立即停止注浆，查明原因并采取补救措施。

10.6 生态补水措施

10.6.1 一般规定

10.6.1.1 生态补水是指通过人工手段向受隧道排水影响的湿地、泉点、河溪等生态敏感目标补充水量，维持其生态功能。

10.6.1.2 生态补水适用于下列情形：

- (1) 隧道排水导致泉点流量减少或断流，且难以通过堵水恢复；
- (2) 隧道排水导致湿地面积萎缩或功能退化；
- (3) 隧道排水导致河溪基流减少，影响水生生态。

10.6.2 补水量确定

10.6.2.1 补水量应根据下列要求综合确定：

(1) 泉点补水：应以维持泉点最低生态流量为目标，最低生态流量宜取天然流量的 30%~50%；

条文说明

最低生态流量取天然流量的 30%~50%，参考了《河湖生态需水评估导则》（试行）（SL/Z 479）和国内外同类工程经验。对于干旱半干旱地区，或泉点具有重要饮用功能时，宜取上限值（50%）；对于湿润地区或泉点主要为景观功能时，可取下限值（30%）。具体取值应根据泉点所在区域的生态保护要求和季节性变化特征综合确定。

(2) 湿地补水：应以维持湿地最小水面面积和生态功能为目标，补水量应满足湿地蒸散发和渗漏损失；

(3) 河溪补水：应以维持河流生态基流为目标，生态基流可按多年平均流量的 10%~20%确定。

10.6.2.2 补水量应通过水量平衡计算确定，计算公式如下：

$$Q_{\text{sup}} = Q_{\text{eco}} - (Q_{\text{nat}} - Q_{\text{loss}}) \quad (10.1)$$

式中：

Q_{sup} ——需补水量；

Q_{eco} ——生态需水量；

Q_{nat} ——天然补给量（扣除隧道排水影响后）；

Q_{loss} ——其他损失水量。

10.6.3 补水水源与方式

10.6.3.1 补水水源应优先选用下列来源：

- （1）隧道涌水自身（经处理后回补）；
- （2）邻近地表水体（河流、水库）；
- （3）区域供水系统（作为备选方案）。

10.6.3.2 补水方式应符合下列规定：

- （1）泉点补水可采用人工回灌或管道输送至泉点上游补给区；
- （2）湿地补水可采用引水渠道或管道直接补给；
- （3）补水水质应满足受水体的水质要求，不应造成二次污染。

10.6.4 生态补水效果评价

10.6.4.1 生态补水效果评价指标应包括：

- （1）泉点流量恢复率 = 补水后流量 / 天然流量 $\times$ 100%；
- （2）湿地水面面积恢复率 = 补水后面积 / 天然面积 $\times$ 100%；
- （3）河溪生态基流保证率。

10.6.4.2 效果评价应在补水措施实施后持续进行，评价周期不应少于1个水文年。

10.7 水源替代措施

10.7.1 一般规定

10.7.1.1 水源替代是指当隧道工程不可避免地影响居民饮用水源时，通过替代水源保障居民用水安全的措施。

10.7.1.2 水源替代适用于下列情形：

- (1) 隧道排水导致居民水井干涸或水质恶化，且无法通过堵水、补水等措施恢复；
- (2) 影响人口较多，社会影响较大；
- (3) 风险等级为III级及以上且涉及居民饮用水源。

10.7.2 水源替代方案设计

10.7.2.1 水源替代方案应包括下列内容：

- (1) 替代水源的选择（新建集中供水工程、建设蓄水池、送水车送水等）；
- (2) 替代水源的水量、水质保证方案；
- (3) 替代水源的建设和运行维护计划；
- (4) 受影响居民的沟通与补偿方案。

10.7.2.2 替代水源的选择应符合下列优先顺序：

- (1) 接入区域集中供水管网（优先）；
- (2) 新建深井取水（穿越浅层含水层影响后，取用深层水）；
- (3) 修建蓄水池收集雨水或引水；
- (4) 定期送水车送水（临时措施）。

10.7.3 水源替代的实施要求

10.7.3.1 水源替代措施应在隧道施工对水源产生影响之前完成，确保居民用水不断。

10.7.3.2 替代水源水质应符合《生活饮用水卫生标准》（GB 5749）的要求。

10.7.3.3 替代水源的运行维护费用应明确责任主体和资金来源，原则上由隧道建设或运营单位承担。

10.7.4 水源替代效果评价

10.7.4.1 水源替代效果评价指标应包括：

（1）供水保障率 = 实际供水量 / 受影响居民需水量 × 100%；

（2）水质达标率 = 达标监测次数 / 总监测次数 × 100%；

（3）用户满意度（问卷调查）。

10.8 泉点保护措施

10.8.1 一般规定

10.8.1.1 泉点保护措施是指针对可能受隧道排水影响的泉点，采取的工程和非工程保护措施。

10.8.1.2 泉点保护应贯穿设计、施工、运营全过程，优先采取预防性措施，避免泉点断流。

10.8.2 预防性保护措施

10.8.2.1 设计阶段的泉点预防性保护措施应包括：

（1）优化隧道选线，尽量避让重要泉点的补给区；

（2）加大隧道埋深，增加隧道与泉水出露点之间的隔水层厚度；

（3）在泉点补给区范围内采用全封闭衬砌和强注浆堵水设计。

10.8.2.2 施工阶段的泉点预防性保护措施应包括：

- (1) 在泉点补给区上游加强超前地质预报和注浆堵水；
- (2) 控制施工排水量，避免大流量排水导致泉点流量急剧下降；
- (3) 建立泉点流量动态监测，一旦发现流量下降超限，立即启动预警和应急措施。

10.8.3 泉点修复措施

10.8.3.1 当泉点断流或流量严重下降后，可采取下列修复措施：

- (1) 补给区回灌：在泉点上游补给区实施人工回灌，抬高地下水位；
- (2) 泉口清淤疏通：清理泉口及泉道淤积物，改善出流条件；
- (3) 导水措施：若隧道切断了地下水径流通道，可设置导水管道跨隧道引水；
- (4) 人工泉建设：在泉点附近打井抽取同层地下水，模拟泉点出流。

10.8.3.2 泉点修复措施的效果评价应以泉点流量恢复率、水质恢复程度为主要指标。

10.9 湿地修复措施

10.9.1 一般规定

10.9.1.1 湿地修复措施是指针对隧道排水导致的湿地退化，采取的生态修复工程。

10.9.1.2 湿地修复应遵循“自然恢复为主、人工干预为辅”的原则，优先恢复湿地水文条件。

10.9.2 湿地水文修复

10.9.2.1 湿地水文修复应包括下列内容：

- (1) 恢复湿地水源补给（通过生态补水、引水渠道等）；
- (2) 修复湿地水文连通性（疏通淤塞河道、拆除阻水构筑物）；
- (3) 调控湿地水位（设置水位调控设施，维持适宜水位）。

10.9.2.2 湿地水位的调控目标应根据湿地类型和生态功能确定：

表 10.5 湿地水位的调控目标

湿地类型	适宜水深	允许变幅
芦苇沼泽	0.3 m~0.8 m	±0.2 m
草甸湿地	0.1 m~0.3 m	±0.1 m
泥炭沼泽	地表湿润至 0.2 m	±0.1 m
湖泊湿地	1.0 m~3.0 m	±0.5 m

10.9.3 湿地生态修复

10.9.3.1 水文条件恢复后，湿地生态修复应包括：

- （1）湿地植被恢复（种植本地水生植物）；
- （2）湿地底质改良（清理污染物、补充营养土）；
- （3）湿地生物多样性恢复（引入底栖动物、鱼类等）。

10.9.3.2 湿地修复效果评价指标应包括：

- （1）湿地水面面积恢复率；
- （2）湿地植被覆盖率；
- （3）湿地鸟类种类和数量；
- （4）水质达标情况。

10.10 措施实施与效果评价

10.10.1 措施实施管理

10.10.1.1 各项水环境保护与修复措施应编制专项实施方案，明确措施内容、技术参数、施工工期、责任单位和验收标准。

10.10.1.2 措施实施过程应留存完整的施工记录、影像资料和检测报告，作为效果

评价的依据。

10.10.2 措施效果评价

10.10.2.1 措施实施后应开展效果评价，评价方法应符合第 7 章的规定。

10.10.2.2 效果评价应包括下列内容：

- （1）措施实施前后关键指标的变化对比（涌水量、水位、泉流量、水质等）；
- （2）措施效果的达标情况分析；
- （3）措施存在的问题及优化建议。

10.10.2.3 当措施效果未达到预期时，应分析原因并采取补充措施。

10.10.2.4 效果评价报告应报送隧道建设或运营单位，并纳入工程档案。

11 评价报告编制与要求

11.1 一般规定

11.1.1 公路隧道水环境效应评价报告应按照设计阶段、施工阶段、运营阶段分别编制，也可根据工程需要编制综合性评价报告。

11.1.2 评价报告的编制应符合下列基本要求：

- (1) 内容完整、数据真实、结论明确；
- (2) 文字简洁、条理清晰、逻辑严密；
- (3) 图件规范、表格清晰、附件齐全；
- (4) 评价结论应具有明确的工程指导意义。

11.1.3 评价报告应由具备相应技术能力的单位编制，编制单位对报告的真实性、准确性和完整性负责。

11.1.4 各阶段评价报告的编制时点和适用范围应符合表 11.1 的规定。

表 11.1 各阶段评价报告编制要求

报告类型	编制时点	适用范围	备案要求
设计阶段评价报告	工可研、初步设计、施工图设计阶段	方案比选、措施设计	纳入设计文件审查
施工阶段评价报告	施工准备期、施工过程中、完工后	动态评价、措施调整	纳入竣工文件
运营阶段评价报告	运营期定期编制	长期跟踪、趋势评价	报送运营管理单位及环保部门
综合总结评价报告	工程完工或运营一定周期后	全面总结、经验反馈	纳入工程档案

11.2 报告内容组成

11.2.1 基本内容

11.2.1.1 水环境效应评价报告应包括下列基本内容：

- (1) 前言（任务来源、评价目的、工作依据）；
- (2) 工程概况；
- (3) 区域环境概况；
- (4) 基础资料整编与分析；
- (5) 水环境效应识别与分析；
- (6) 水环境效应预测与评价；
- (7) 水环境风险等级判定；
- (8) 水环境保护与修复措施；
- (9) 水环境监测方案；
- (10) 评价结论与建议；
- (11) 附件。

11.2.1.2 各阶段评价报告可根据阶段特点对上述内容进行侧重和调整，但不应缺少与阶段评价目标相关的核心内容。

11.2.2 设计阶段评价报告特殊内容

11.2.2.1 设计阶段评价报告除基本内容外，还应包括下列特殊内容：

- (1) 不同路线方案（或埋深方案）的水环境效应比选；
- (2) 防排水设计方案及水环境保护措施专题；
- (3) 施工期和运营期水环境监测方案设计；

- (4) 允许排水量的确定依据；
- (5) 涌水突涌水应急预案框架。

11.2.3 施工阶段评价报告特殊内容

11.2.3.1 施工阶段评价报告除基本内容外，还应包括下列特殊内容：

- (1) 施工期水环境跟踪监测数据汇总与分析；
- (2) 设计预测与实测数据的对比验证；
- (3) 水文地质参数反演及模型修正；
- (4) 措施动态调整记录及效果评估；
- (5) 预警触发与响应情况记录；
- (6) 施工期水环境效应总结。

11.2.4 运营阶段评价报告特殊内容

11.2.4.1 运营阶段评价报告除基本内容外，还应包括下列特殊内容：

- (1) 运营期水环境长期监测数据趋势分析；
- (2) 隧道排水对水环境持续影响的评估；
- (3) 保护修复措施效果评价；
- (4) 中长期水环境风险预测；
- (5) 运营期预警记录及处置情况；
- (6) 后续管理建议。

11.3 章节组成与安排

11.3.1 章节结构

11.3.1.1 评价报告的章节结构宜按下列方式编排：

- (1) 第 1 章 前言
- (2) 第 2 章 工程概况
- (3) 第 3 章 区域环境概况
- (4) 第 4 章 基础资料整编与分析
- (5) 第 5 章 水环境效应识别与分析
- (6) 第 6 章 水环境效应预测与评价
- (7) 第 7 章 水环境风险等级判定
- (8) 第 8 章 水环境保护与修复措施
- (9) 第 9 章 水环境监测方案
- (10) 第 10 章 评价结论与建议
- (11) 参考文献
- (12) 附件

11.3.1.2 各章可根据工程实际情况设置若干节和条，但应保持结构清晰、层级分明。

11.3.2 各章内容要点

11.3.2.1 第 1 章 前言，应包括以下内容：

- (1) 任务来源（委托单位、任务书或合同编号）；
- (2) 评价目的和评价任务；
- (3) 评价工作依据（法律法规、技术标准、相关规划、技术文件）；
- (4) 评价工作程序和工作过程；
- (5) 评价工作主要完成人员及分工。

11.3.2.2 第2章 工程概况，应包括下列内容：

- (1) 隧道工程位置、长度、埋深、断面形式；
- (2) 隧道地质概况；
- (3) 隧道防排水设计；
- (4) 隧道施工方案（工期、施工方法、辅助坑道）；
- (5) 工程敏感因素分析。

11.3.2.3 第3章 区域环境概况，应包括下列内容：

- (1) 自然地理概况（地形地貌、气象水文）；
- (2) 区域地质条件；
- (3) 区域水文地质条件；
- (4) 生态环境概况；
- (5) 水环境敏感目标分布。

11.3.2.4 第4章 基础资料整编与分析，应包括下列内容：

- (1) 资料收集情况综述；
- (2) 工程资料整编；
- (3) 地质及水文地质资料整编；
- (4) 生态环境资料整编；
- (5) 敏感目标资料整编；
- (6) 资料适用性分析与补充工作建议。

11.3.2.5 第5章 水环境效应识别与分析，应包括下列内容：

- (1) 水环境效应类型识别;
- (2) 各效应的作用机理分析;
- (3) 关键影响因素分析;
- (4) 效应综合分析 with 清单编制。

11.3.2.6 第 6 章 水环境效应预测与评价, 应包括下列内容:

- (1) 涌水量预测及评价;
- (2) 地下水位变化预测及评价;
- (3) 泉点流量变化预测及评价;
- (4) 地表水漏失预测及评价;
- (5) 水质变化预测及评价;
- (6) 生态敏感目标影响预测及评价。

11.3.2.7 第 7 章 水环境风险等级判定, 应包括下列内容:

- (1) 风险事件可能性评价;
- (2) 后果严重程度评价;
- (3) 各段落风险等级判定;
- (4) 风险等级分布图;
- (5) 主要风险因素分析。

11.3.2.8 第 8 章 水环境保护与修复措施, 应包括下列内容:

- (1) 预防性措施;
- (2) 堵水措施;

- (3) 限量排放措施;
- (4) 防渗措施;
- (5) 生态补水措施;
- (6) 水源替代措施;
- (7) 泉点保护与修复措施;
- (8) 湿地修复措施;
- (9) 措施汇总与实施计划。

11.3.2.9 第 9 章 水环境监测方案，应包括下列内容：

- (1) 监测网络布设;
- (2) 监测指标与频率;
- (3) 监测方法与技术要求;
- (4) 预警阈值与预警等级;
- (5) 监测数据管理方案;
- (6) 监测设施维护要求。

11.3.2.10 第 10 章 评价结论与建议，应包括下列内容：

- (1) 主要评价结论;
- (2) 措施建议;
- (3) 尚存问题与不确定性说明;
- (4) 后续工作建议。

11.4 成果表达要求

11.4.1 文字表达

11.4.1.1 评价报告应采用规范的技术语言，表述准确、简明、无歧义。

11.4.1.2 评价报告中的术语和符号应符合本标准第 3 章的规定，使用标准术语和法定计量单位。

11.4.1.3 评价报告中应避免使用“可能”“大概”“也许”等模糊用语，评价结论应明确肯定。

11.4.2 数据表达

11.4.2.1 监测数据应以表格形式汇总，表格应包括下列要素：

- (1) 表号与表名；
- (2) 监测点编号、位置、时间、数据值；
- (3) 计量单位；
- (4) 数据来源及备注。

11.4.2.2 预测数据应给出取值范围，并说明不确定性来源。

11.4.2.3 对比分析数据应同时列出设计值（或预测值）与实测值，并计算偏差率。

11.4.3 统计表达

11.4.3.1 数据统计分析应包括下列内容：

- (1) 样本数量、最大值、最小值、平均值、标准差；
- (2) 变化趋势（上升/下降/稳定）；
- (3) 达标率或超标情况。

11.4.3.2 统计结果应以表格或图形方式呈现，并配以必要的文字说明。

11.5 图表要求

11.5.1 一般规定

11.5.1.1 评价报告应附有必要的图件和表格，图表应清晰、规范、自明性强。

11.5.1.2 图表应有编号和标题，图号和图名置于图下方，表号和表名置于表上方。

11.5.1.3 图表中使用的符号、缩略语应在图注或表注中说明。

11.5.2 图件要求

11.5.2.1 评价报告应附下列基本图件：

- (1) 隧道工程地理位置图；
- (2) 隧道工程地质纵断面图；
- (3) 区域水文地质图；
- (4) 水环境敏感目标分布图；
- (5) 地下水监测点位布设图；
- (6) 隧道水环境风险等级分布图；
- (7) 隧道水环境风险等级分布图；
- (8) 地下水位等值线图；
- (9) 水位、泉流量变化过程曲线图；
- (10) 水环境保护措施布置图。

11.5.2.2 图件应符合下列制图要求：

- (1) 比例尺应适中，清晰可读；
- (2) 地形等高线、地质界线、隧道轴线、监测点位置等要素应清晰标注；
- (3) 图例应完整，包含图中所有符号和颜色的含义；
- (4) 剖面图应标明剖面位置、方向、高程基准；

(5) 等值线图应标明等值线间隔和数值。

11.5.2.3 图件宜采用标准地理底图或工程平面图作为底图，坐标系应采用国家大地坐标系（CGCS2000）或工程独立坐标系。

11.5.3 表格要求

11.5.3.1 评价报告应附下列基本表格：

- (1) 监测点基本信息一览表；
- (2) 水文地质参数汇总表；
- (3) 涌水量预测结果汇总表；
- (4) 敏感目标影响预测汇总表；
- (5) 风险事件可能性评价表；
- (6) 后果严重程度评价表；
- (7) 风险等级判定汇总表；
- (8) 监测数据统计汇总表；
- (9) 水环境保护措施一览表；
- (10) 预警阈值与响应措施对应表。

11.5.3.2 表格应符合下列制表要求：

- (1) 表头应明确，各列应有明确的属性名称和计量单位；
- (2) 表格内不应出现空白单元格，无数据项应标注“—”或“无”；
- (3) 表格注释应置于表格下方；
- (4) 跨页表格应重复表头。

11.6 评价结论

11.6.1 结论内容

11.6.1.1 评价结论应针对评价目标，给出明确、具体的结论性意见，应包括下列内容：

(1) 水环境效应结论：

- 隧道建设可能引发的主要水环境效应类型及程度；
- 各段落的涌水量预测值（正常涌水量、最大涌水量）；
- 对泉点、井、地表水体等敏感目标的影响程度预测；
- 水质影响评估结论。

(2) 风险等级结论：

- 各段落的水环境风险等级（Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级、Ⅳ级）；
- 主要风险事件及高风险段落；
- 不可接受风险段落清单。

(3) 措施结论：

- 推荐的水环境保护措施方案；
- 需要重点关注和控制的段落及措施；
- 监测方案要点。

(4) 总体评价结论：

- 隧道工程水环境效应的总体可接受性；
- 在落实推荐措施条件下的工程可行性。

11.6.1.2 评价结论应单独成章，条理清晰，不宜在结论中出现新的分析或讨论。

11.6.2 结论表述要求

11.6.2.1 评价结论应采用确定性表述，避免使用模糊语言。示例：

- 正确表述：“隧道穿越 F1 断层段落，正常涌水量预测值为 XXXX m³/d，最大涌水量预测值为 XXXX m³/d。”
- 错误表述：“隧道穿越 F1 断层段落，涌水量可能较大。”

11.6.2.2 涉及风险的结论，应明确风险等级和可接受性。示例：

- “隧道 K10+000~K12+500 段落，水环境风险等级为Ⅲ级（高风险），属于不可接受风险，须采取强注浆帷幕+全封闭衬砌措施，并制定专项应急预案。”

11.6.2.3 当存在不确定因素时，应在结论中单独说明，不应将不确定性隐含在结论性表述中。

11.7 附件要求

11.7.1 附件组成

11.7.1.1 评价报告应附必要的附件，附件应包括下列内容：

- （1）相关文件（任务委托书、合同、评审意见等）；
- （2）专题研究报告（如有）；
- （3）水文地质勘察报告（摘要或全文）；
- （4）水文地质试验报告（抽水试验、注水试验、连通试验等）；
- （5）监测数据汇编（原始数据、统计报表）；
- （6）数值模型文件说明（模型范围、参数、边界条件、校准结果）；
- （7）专家评审意见及修改说明；
- （8）其他必要的支撑材料。

11.7.1.2 附件较多时，可单独装订成册，正文中注明附件编号和名称。

11.7.2 附件格式要求

11.7.2.1 附件应有附件编号和附件名称，附件的编排顺序应与正文中引用的顺序一致。

11.7.2.2 原始监测数据可作为数据光盘或电子文件附于报告后，但报告中应附有数据统计汇总表。

11.7.2.3 专题研究报告应作为独立附件，其格式应符合本标准的报告编制要求。

11.8 报告格式与装订

11.8.1 格式要求

11.8.1.1 评价报告应采用 A4 幅面纸张,页边距上、下、左、右均不宜小于 2.5 cm。

11.8.1.2 正文汉字宜采用宋体或仿宋体,西文和数字宜采用 Times New Roman 字体。正文字号不宜小于小四号(12pt)。

11.8.1.3 报告应有封面、扉页、目录、正文、参考文献和附件。封面应包含下列信息:

- (1) 报告名称(如“XX 隧道工程水环境效应评价报告(设计阶段)”);
- (2) 工程名称;
- (3) 编制单位全称(加盖公章);
- (4) 编制日期。

11.8.1.4 扉页应包含下列信息:

- (1) 报告名称;
- (2) 工程名称;
- (3) 编制单位全称;
- (4) 资质证书编号(如适用);
- (5) 法定代表人、技术负责人、项目负责人签字;
- (6) 编制人员名单;
- (7) 编制日期。

11.8.2 装订要求

11.8.2.1 评价报告应采用胶装或线装方式装订,不应使用活页夹、订书钉等简易

装订方式。

11.8.2.2 报告正文与附件可合并装订，也可分开装订。分开装订时，应在正文和附件封面注明“正文”和“附件”字样。

11.8.2.3 正式提交的评价报告宜同时提供纸质版和电子版。电子版应采用 PDF 格式，内容与纸质版完全一致。

11.9 各阶段报告的衔接与归档

11.9.1 报告衔接

11.9.1.1 施工阶段评价报告应引用设计阶段评价报告的主要结论和预测结果，并说明变化情况。

11.9.1.2 运营阶段评价报告应引用施工阶段评价报告的最终结论和竣工监测数据，作为运营期评价的初始状态。

11.9.1.3 各阶段报告之间的矛盾或差异应在报告中予以说明和解释。

11.9.2 报告归档

11.9.2.1 各阶段评价报告应纳入工程档案管理，保存期限不应低于工程设计使用年限。

11.9.2.2 归档的报告应包括最终版本及所有修改记录，确保归档资料的完整性和可追溯性。

11.9.2.3 评价报告宜纳入工程信息化管理系统，实现电子化归档和远程查询。

11.10 质量控制要求

11.10.1 内部审核

11.10.1.1 评价报告在正式提交前应经过编制单位内部审核，审核应包括下列内容：

（1）数据准确性审核；

(2) 方法适用性审核;

(3) 结论合理性审核;

(4) 格式规范性审核。

11.10.1.2 内部审核应有书面记录, 审核人应签字确认。

11.10.2 外部审查

11.10.2.1 重要阶段的评价报告(如设计阶段、施工阶段总结评价)应通过专家评审或第三方审查。

11.10.2.2 评审意见及修改说明应作为报告附件一并归档。

11.10.3 报告修改与版本管理

11.10.3.1 评价报告修改后应更新版本号, 版本号的编制规则为: $V_{x.y}$ (x 为主版本号, y 为次版本号)。

11.10.3.2 报告封面及扉页应注明版本号和修改日期, 并附版本修改记录表。

11.10.3.3 废止的旧版本应予以标识并归档保存, 不应随意销毁。

附录 A 宝石岭隧道水环境效应评价案例

本附录依据正文关于水环境效应识别、可能性评价、后果严重程度评价和风险等级判别的要求，对宝石岭隧道开展案例化说明。与原案例相比，本附录不再仅采用层次分析法，而是采用清单法识别风险事件，并采用风险矩阵法完成风险等级判定，使案例过程与正文第 5 章、第 6 章和第 10 章的要求形成闭合。

A.1 工程概况

宝石岭隧道位于安徽省黄山市祁门县安凌镇,如图 A.1。隧址区地貌属皖南中低山区,地形以低山丘陵为主,整体地势表现为“两边低、中间高”。隧道为分离式公路隧道,左幅长 3933 m,最大埋深 364 m;右幅长 3931 m,最大埋深 366 m,如图 A.2。

隧址区岩性主要包括灰岩、花岗岩、页岩等,局部穿越断层破碎带。灰岩段节理裂隙较发育,局部可能存在裂隙水或小型溶蚀空间;页岩及炭质页岩段岩体较破碎,遇地下水活动时易形成局部渗水、股状出水或涌水现象。隧道建设过程中,开挖活动可能改变地下水原有补给、径流和排泄条件,并对地表水、地下水水量、水位、水质及水生态产生一定影响。



图 A.1 宝石岭隧道位置

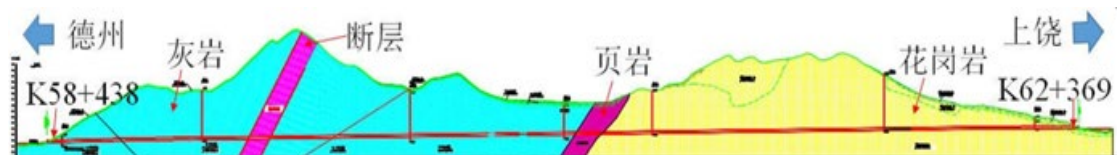


图 A.2 宝石岭隧道纵断面图

A.2 评价范围、评价时段与评价单元

宝石岭隧道水环境效应评价范围以能够说明地下水环境现状、反映地下水基本流场特征、识别地下水和地表水保护目标、满足影响预测和风险判定为原则。一般调查评价范围以隧道工程边界两侧分别向外延伸 200 m 为基础；对于断层破碎带、灰岩裂隙发育段、施工涌水集中段以及与地表水体可能存在水力联系的地段，应结合地下水补给、径流、排泄条件适当扩大。

评价时段覆盖设计期、施工期和运营期。设计期重点评价线位、埋深、支护与防排水设计对水环境风险的控制作用；施工期重点评价开挖揭露后的涌水、水位变化、水质扰动和措施有效性；运营期重点评价长期稳定排水、排水系统运行和累积性水环境效应。

表 A.1 宝石岭隧道评价单元与主要风险源

编号	评价单元	长度	主要风险源与识别依据
A1	ZK60+410~ ZK60+440	30 m	中风化炭质页岩，岩体完整性较差，节理裂隙发育，遇水软化后可能形成局部渗流通道，对局部地下水排泄条件产生影响。
A2	ZK60+450~ ZK60+530	80 m	中风化灰岩及炭质页岩组合地层，岩性变化明显，灰岩裂隙含水 and 局部溶

			蚀裂隙发育可能性较高。
A3	K60+160~K60+189	29 m	地下水相对富集及裂隙发育区，围岩破碎程度较高，施工中已出现大量涌水，是本案例重点风险评价单元。
A4	K60+328~K60+408	80 m	围岩含水条件较明显，局部可能发育软弱夹层、小型溶蚀空间或裂隙导水带，存在扰动补径排关系的风险。

A.3 风险事件识别

风险事件识别以隧道工程活动为主线，将工程扰动、水文地质条件和水环境敏感目标进行对应分析。对宝石岭隧道，主要风险事件见表 A.2。

表 A.2 宝石岭隧道水环境风险事件识别清单

编号	风险事件	主要影响对象	适用评价单元	识别依据
R1	隧道开挖排水导致地下水位下降或局部疏干	含水层、地下水位、周边井泉	A1~A4	施工排水改变隧道附近地下水排泄边界，富水裂隙段和破碎段更易发生水位响应。

R2	裂隙或岩溶导水通道被揭露后改变地下水径流路径	地下水流场、补给—径流—排泄关系	A2、A3、A4	灰岩、页岩组合地层及裂隙发育区可能形成新的导水通道。
R3	泉点、溪沟或地表水补给量减少	泉点、溪沟、地表水体、生态基流	A2、A3、A4	隧道排水可能削弱局部地下水向地表水体或泉点的补给。
R4	施工废水或涌水排放引起受纳水体水质扰动	施工排水受纳水体	A1~A4	施工涌水、含泥废水和洞内施工废水若处理不足，可能造成短时水质扰动。
R5	运营期长期排水或排水系统失效造成累积影响	地下水均衡、衬砌渗漏、排水系统	A2、A3、A4	运营期长期排水及排水系统堵塞、失效情景可能形成累积性影响。

A.4 可能性、后果严重程度与风险矩阵

可能性等级依据导水构造发育程度、含水层富水性、预测或实测涌水量、隧道与补径排通道关系及工程控制条件综合判定。后果严重程度依据受影响对象的重要性、影响范围、恢复难度、生态影响和社会影响综合判定。

表 A.3 风险事件可能性等级判定

等级	可能性描述	判定说明
H1	极低	缺少明确水力联系，含水层富水性弱，预测涌水量小，常规措施即可控制。

H2	低	存在局部裂隙水活动，但导水构造不发育，影响范围有限。
H3	中等	存在较明确水力联系或局部导水构造，施工中可能出现股状出水或水位响应。
H4	高	穿越富水裂隙、岩溶裂隙或断层破碎带，可能产生明显涌水或流场改变。
H5	极高	直接揭露强导水构造或主要补径排通道，发生显著水环境效应的可能性很高。

表 A.4 后果严重程度等级判定

等级	后果描述	判定说明
C1	轻微	影响范围小，受体敏感性低，停止扰动或常规治理后可较快恢复。
C2	一般	对局部水位、水量或水质产生轻微影响，经常规治理可恢复。
C3	较严重	可能影响井泉、溪沟或局部地下水均衡，需专项监测和针对性措施控制。
C4	严重	可能影响重要泉点、水源或生态基流，恢复周期较长，需强化工程控制。

C5	特别严重	可能造成重要水源失效、重要生态系统退化或难以恢复的水环境损害。
----	------	---------------------------------

表 A.5 风险等级判别矩阵

可能性/后果	C1 轻微	C2 一般	C3 较严重	C4 严重	C5 特别严重
H1 极低	I级	I级	I级	II级	II级
H2 低	I级	I级	II级	II级	III级
H3 中等	I级	II级	II级	III级	III级
H4 高	II级	II级	III级	III级	IV级
H5 极高	II级	III级	III级	IV级	IV级

A.5 风险等级清单与评价结果

表 A.6 宝石岭隧道风险等级清单

评价单元	主导风险事件	可能性	后果	风险等级	评价结论
A1	R1、R4	H3 中等	C2 一般	II级（中风险）	以炭质页岩遇水软化、局部渗水和施工废水扰动为主，采取常规防排水、废水处理和监测后总体可控。

A2	R1、R2、R3	H4 高	C3 较严重	Ⅲ级（高风险）	灰岩—页岩组合地层裂隙含水 and 局部溶蚀发育可能性较高，应作为设计和施工期重点控制段。
A3	R1、R2、R3、R4	H4 高	C4 严重	Ⅲ级（高风险）	施工中已出现大量涌水，表明局部导水结构明显，应重点控制涌水、流场改变和排水水质风险。
A4	R1、R2、R5	H3 中等	C3 较严重	Ⅱ级（中风险）	含水条件较明显，局部构造或软弱夹层可能扰动补径排关系，需加强施工期与运营期连续监测。

从风险等级看，A2 和 A3 为高风险单元，A1 和 A4 为中风险单元。A3 段是宝石岭隧道水环境风险控制的核心区段，评价重点应由单纯的效应指数判定转为“风险事件—可能性—后果—风险等级—措施”的闭环管控。

A.6 后续保护措施与跟踪监测

表 A.7 宝石岭隧道后续保护措施

阶段	主要措施	适用风险事件	跟踪要求
设计阶段	复核 A2、A3 段涌水预测和水力联系；优化防排水设防等级；对裂隙发育和岩溶可能发育段提出超前预注浆、径向注浆或帷幕注浆设计要求。	R1、R2、R3	将风险等级成果反馈至防排水设计、注浆参数和监测点位布设。
施工准备阶段	建立地下水位、泉点流量、溪沟流量和排水水质本底监测；完善施工废水处理设施和异常涌水应急预案。	R1、R3、R4	形成施工前水环境初始状态，为施工期动态评价提供对照。
施工阶段	执行“先探后掘、以堵为主、限量排放、动态调整”；对 A3 段和其他集中出水段实施超前地质预报、探放水、注浆堵水和效果检查。	R1、R2、R4	当涌水量、水位降幅或水质指标超过预警阈值时，应立即复核风险等级并调整措施。
运营阶段	保留重点监测井、泉点和排水口监测；定期检查排水系统、衬砌渗漏和水质变化；必要时采取补充注浆、生态补水或替代供水措施。	R3、R5	运营期至少覆盖一个完整水文年，重点跟踪 A2、A3、A4 段长期排水影响。

A.7 评价结论

宝石岭隧道水环境风险主要受灰岩裂隙发育、炭质页岩破碎、局部导水结构和施工涌水控制。采用清单—矩阵法后，案例能够明确每一评价单元的主导风险事件、发生可能性、后果严重程度和管控等级。A2、A3 段应作为高风险单元实施强化控制，A1、A4 段应按中风险单元加强监测和针对性措施。

本案例表明，附录评价成果不宜仅停留在效应指数或综合赋值结果，应进一步形成风险等级清单、分阶段措施和跟踪评价要求，才能与正文风险评价框架保持一致。

附录 B 双峰寨隧道水环境效应评价案例

本附录依据正文第 6 章风险评价框架，采用“加权综合法+风险矩阵法”开展双峰寨隧道水环境效应评价。加权综合法用于将可能性指标和后果严重程度指标分别量化，风险矩阵法用于确定最终风险等级。该方法对应正文第 6.3.3 条关于加权综合法的要求，可作为第 7 章评价方法的案例补充。

与附录 A 相比，本附录更强调半定量评价过程，适用于评价区段较少、主要控制因素相对清晰、需要对各区段进行排序和分级管控的隧道工程。

B.1 工程概况

双峰寨隧道位于安徽省安庆市岳西县境内，为分离式特长隧道。隧道右线长度 4237 m，最大埋深约 415 m；隧道左线长度 4233 m，最大埋深约 416 m。隧址区属大别山中低山区，微地貌单元以中山为主，地形起伏较大，整体表现为两端低、中部高，最低点位于出洞口附近。

隧址区岩性主要为中风化花岗片麻岩，局部发育石英正长斑岩岩脉，并主要穿越三条断层带。花岗片麻岩整体岩性较坚硬，但受构造作用影响，局部岩体破碎，节理裂隙发育，断层破碎带内岩体完整性差、渗透性增强，可能形成地下水富集和导水通道。隧道埋深较大，开挖后可能改变局部地下水补给、径流和排泄条件，并对地下水位、涌水量、地表水补给及水环境稳定性产生一定影响。

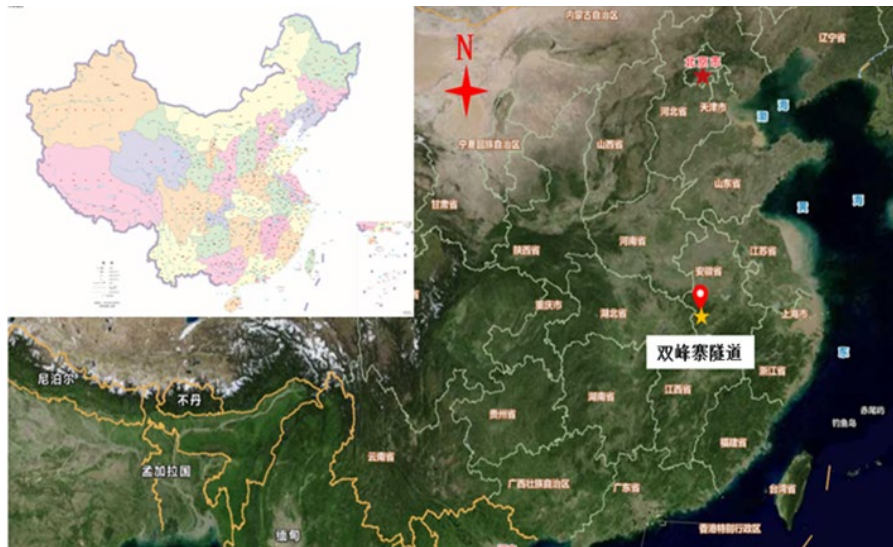


图 B.1 双峰寨隧道位置

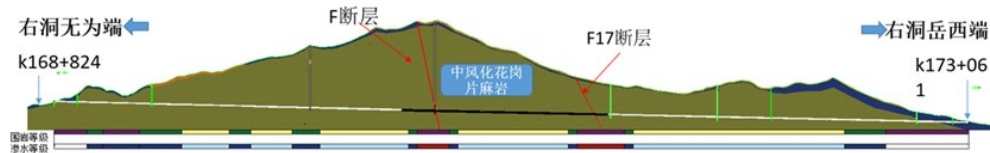


图 B.2 双峰寨隧道纵断面图

B.2 评价范围、评价时段与评价单元

双峰寨隧道水环境效应评价范围以隧道工程边界两侧分别向外延伸 200 m 作为基本调查评价范围。对于断层破碎带、岩体破碎段、裂隙发育段以及与地表水体可能存在水力联系的区段，应结合地下水补给、径流、排泄条件适当扩大。

评价时段覆盖设计期、施工期和运营期。设计期重点关注线位、埋深、防排水设计和涌水预测；施工期重点关注断层破碎带揭露后的集中出水、施工废水处理和水环境动态变化；运营期重点关注长期排水、衬砌渗漏、排水系统运行和维护失效情景。

表 B.1 双峰寨隧道评价单元与主要风险源

编号	评价单元	长度	主要风险源与识别依据
B1	ZK169+430～ ZK169+650	220 m	中风化花岗片麻岩一般裂隙发育区段，隧道开挖可能对局部裂隙水排泄条件产生一定影响。
B2	ZK169+650～ ZK169+750	100 m	花岗片麻岩与石英正长斑岩岩脉接触带，局部裂隙集中并可能形成导水通道。
B3	ZK170+520～ ZK170+670	250 m	穿越断层破碎带，岩体破碎至极破碎，结构面发育，地下水连通性和渗透性增强。

B.3 加权综合评价方法

本案例分别建立可能性指标组和后果严重程度指标组。各指标按 1～5 分赋值，分值越高表示风险事件发生可能性越大或后果越严重。可能性综合值 H 和后果严重程度综合值 D 分别按式 (B.1) 和式 (B.2) 计算：

$$H = \sum (w_i \times h_i) \quad (\text{B.1})$$

$$H = \sum (v_j \times d_j) \quad (\text{B.2})$$

式中： w_i 、 v_j 分别为可能性指标和后果指标权重； h_i 、 d_j 分别为对应指标赋值。该赋值过程仅用于正文可能性评价和后果严重程度评价的半定量表达，最终风险等级仍按风险矩阵判定。

表 B.2 加权综合评价指标及赋值依据

类别	指标	权重	1 分	3 分	5 分
可能性	含水层富水性	0.20	弱	中等	强
可能性	导水构造发育程度	0.25	不发育	较发育	强发育
可能性	隧道与补径排通道关系	0.20	无明显关系	局部邻近或穿越	直接穿越关键通道
可能性	预测或实测涌水强度	0.20	小	中等	大
可能性	工程控制条件	0.15	可靠	一般	薄弱
后果	水源和井泉重要性	0.25	低	一般	高
后果	地表水和生态敏感性	0.20	低	一般	高
后果	影响范围	0.20	小	中等	大
后果	恢复难度	0.20	易恢复	恢复周期较长	难恢复
后果	社会与施工影响	0.15	轻微	一般	显著

表 B.3 综合值与等级对应关系

综合值范围	可能性等级	后果严重程度等级
$1.0 \leq H/D < 1.8$	H1 极低	C1 轻微
$1.8 \leq H/D < 2.6$	H2 低	C2 一般
$2.6 \leq H/D < 3.4$	H3 中等	C3 较严重
$3.4 \leq H/D < 4.2$	H4 高	C4 严重
$4.2 \leq H/D \leq 5.0$	H5 极高	C5 特别严重

B.4 可能性、后果严重程度与风险等级评价

表 B.4 双峰寨隧道可能性与后果严重程度计算结果

评价单元	H 值	可能性等级	可能性主要依据	D 值	后果等级	后果主要依据
B1	2.35	H2 低	一般花岗岩片麻岩段裂隙水活动存在但导水构造不强，工程控制条件较好。	2.20	C2 一般	影响范围较小，对水源和生态敏感目标影响有限。
B2	3.05	H3 中等	岩脉接触带及局部破碎段可能形成裂隙集中带，存在	2.85	C3 较严重	可能影响局部地下水排泄和施工排水接纳环境，恢复

			一定涌水和导水风险。			难度中等。
B3	4.05	H4 高	断层破碎带岩体破碎至极破碎，导水构造发育，开挖后易形成集中排泄通道。	3.70	C4 严重	可能引起地下水流场改变、涌水增大和施工期水环境压力，恢复周期较长。

表 B.5 双峰寨隧道风险等级清单

评价单元	主要风险事件	可能性	后果	风险等级	评价结论
B1	一般裂隙水排泄条件改变、施工排水水质扰动	H2 低	C2 一般	I级（低风险）	采取常规防排水设计、施工废水处理和常规监测后，水环境效应总体可控。
B2	岩性接触带局部导水、地下水位局部下降、施工排水扰动	H3 中等	C3 较严重	II级（中风险）	应开展针对性探水、局部注浆和施工期水位、水质监测。

B3	断层破碎带集中涌水、地下水径流路径改变、运营期长期排水累积影响	H4 高	C4 严重	III级（高风险）	应作为重点控制段，采取强化注浆、限量排放、加密监测和应急处置措施。
----	---------------------------------	------	-------	-----------	-----------------------------------

B.5 后续保护措施与跟踪评价

表 B.6 双峰寨隧道后续保护措施

风险等级	适用单元	保护与防控措施	跟踪评价要求
I级（低风险）	B1	采用常规防排水和施工废水处理措施；施工期记录渗水、涌水和排水水质变化。	按常规频率开展地下水位、涌水量和排水水质监测。
II级（中风险）	B2	对岩性接触带开展超前地质预报和必要探水；局部出水段采用径向注浆或补强支护；加强排水沉淀处理。	施工期加密监测地下水位、涌水量和受纳水体水质，评价结果反馈施工措施调整。
III级（高风险）	B3	实施超前预注浆或帷幕注浆，控制断层破碎带涌水；建立异常涌水应急预案；必要时调整开挖工法和支护参数。	施工期开展动态风险复核；运营期保留重点监测点，跟踪长期排水、衬砌渗漏和排水系统运行状态。

附录 C 新场隧道施工期动态验证—取高原则法水环境风险评价案例

本附录依据新场隧道设计说明、涌水汇报材料、情况说明及现场照片，给出施工期动态评价案例。与附录 A、附录 B 不同，本案例以施工揭露信息和实测涌水过程为核心，采用“动态验证—取高原则法”对设计阶段风险判断进行修正，体现正文关于施工期验证、动态评价、风险等级清单和后续保护措施的要求。

本案例的重点不在于重新建立完整的指标权重体系，而在于说明当施工期实测涌水量、出水压力或水文地质条件明显偏离设计预测时，应及时提高风险事件可能性等级，重新判定风险等级，并将评价结果反馈至探水、注浆、排水、监测和应急处置措施。

C.1 工程概况

新场隧道位于云南省昭通市境内，进口位于镇雄县杉树乡细沙村，出口位于彝良县海子乡新场村。隧道为分离式特长公路隧道，右线起讫桩号为 K137+078～K142+462，长 5384 m；左线起讫桩号为 ZK137+060～ZK142+447，长 5387 m。隧道区海拔高程约 1460～2248 m，相对高差约 788 m，属构造剥蚀中山及岩溶化山地地貌区。

隧道洞身主要穿越玄武岩、灰岩、页岩、白云岩、石英砂岩、泥质粉砂岩等地层。设计资料显示，隧址区岩溶中等程度发育，地下水主要包括第四系松散岩类孔隙水、基岩风化带网状裂隙水、基岩裂隙孔隙水和岩溶水，其中基岩裂隙孔隙水和岩溶水对隧道工程影响较大。区内降水集中于 6～10 月，约占全年降水量的 70%～80%，为地下水补给旺盛期。

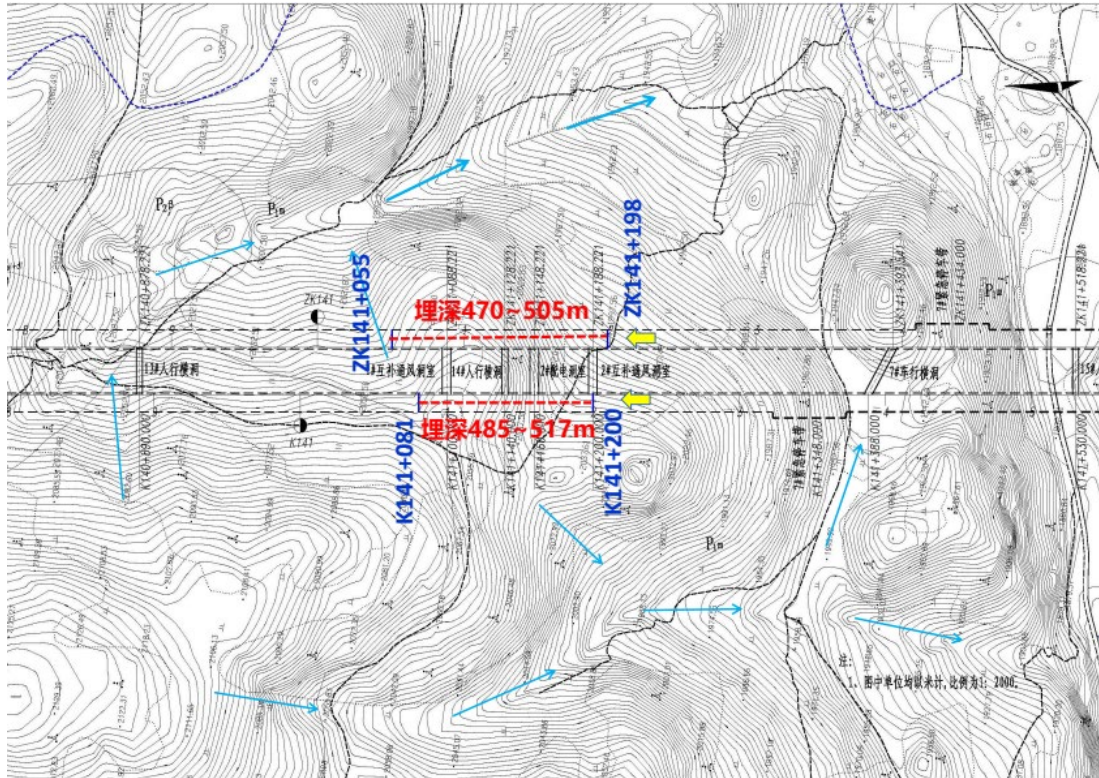


图 C.1 新场隧道涌水位置示意图

C.2 施工期涌水过程与评价对象

设计资料中，K140+914~K141+283、ZK140+908~ZK141+278 一带主要穿越中风化灰岩，地下水类型为岩溶水和基岩裂隙水，设计描述为“水量贫乏、可能存在点滴状出水，局部可能存在溶洞水”。实际施工过程中，该段附近出现持续递增的掌子面涌水，说明岩溶裂隙水或隐伏导水通道对施工期水环境效应的控制作用强于设计阶段常规判断。

2020 年 11 月 19 日，右幅施工至 K141+200 掌子面时出现涌水；2020 年 12 月 16 日施工至 K141+081 时涌水量明显增大。2020 年 12 月 9 日，左幅施工至 ZK141+198 掌子面时出现涌水；2020 年 12 月 28 日施工至 ZK141+104 时涌水量再次增大；2021 年 1 月 13 日开挖钻孔过程中渗水再次增大且孔内出水有压力，现场暂停开挖钻孔并实施超前探孔。

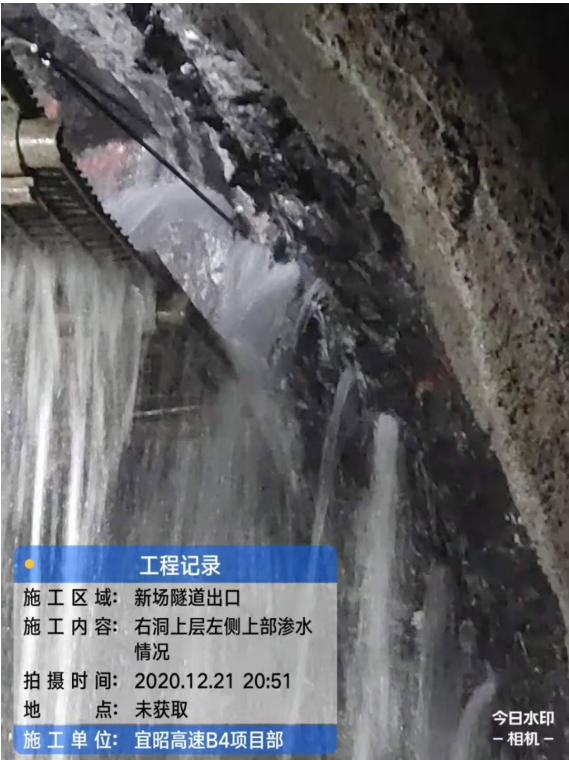


图 C.2 新场隧道涌水位置示意图



图 C.3 新场隧道洞内积水与排水条件

表 C.1 新场隧道施工期涌水动态记录

时间	位置或桩号	现场现象	估算涌水量	评价意义
2020-11-19～ 2020-12-16	右幅 K141+200 附近	掌子面装药钻孔出现涌水，随掘进递增；设置 DN250 PE 管 1 趟及多台水泵抽排。	约 200 m ³ /h	设计阶段“点滴状出水”判断需施工期复核，可能性等级不宜低估。
2020-12-16	右幅 K141+081 附近	掌子面涌水量明显增大，增加 DN250 PE 管 1 趟及 3 台 22 kW 污水泵。	约 400 m ³ /h	折合约 9600 m ³ /d，显著高于常规预测量，应按高风险事件处理。
2020-12-09～ 2020-12-28	左幅 ZK141+198 附近	掌子面出现涌水并随掘进递增，配置多台水泵抽排。	约 180 m ³ /h	左幅同一水文地质段出现响应，表明风险具有左右洞联动性。
2020-12-28	左幅 ZK141+104 附近	掌子面涌水量再次明显增大，增加排水管路和水泵。	约 220 m ³ /h	需开展动态评价并校核排水能力。
2021-01-13～ 2021-01-15	左幅掌子面	开挖钻孔过程中渗水再次增大，孔内出水有压力，暂停开挖钻孔，实施 50 m 超前探孔。	约 400 m ³ /h	压力水和超前探孔信息触发高原则，可能性等级应上调。

C.3 评价范围、评价时段与评价单元

本案例评价范围以实际涌水段为核心，向前后相邻岩溶、裂隙和破碎围岩段

扩展，重点覆盖 K140+914~K141+530、ZK140+908~ZK141+521 及其可能受影响的上下游地下水径流通道。评价时段以施工期动态评价为主，并延伸至运营期长期排水和排水系统维护阶段。

表 C.2 新场隧道施工期动态评价单元

编号	评价单元	主要地层与水文地质条件	评价重点
C1	K140+914~ K141+283、 ZK140+908~ ZK141+278	中风化灰岩，溶隙、裂隙较发育，设计为岩溶水、基岩裂隙水段；实际右幅 K141+200、K141+081 和左幅 ZK141+198 附近发生大流量涌水。	施工期突增涌水、压力水、左右洞联动和地下水径流路径改变。
C2	K141+283~ K141+333、 ZK141+278~ ZK141+328	中风化灰岩，溶隙、裂隙较发育，岩体较破碎；设计认为可能点滴状出水。	涌水向相邻灰岩裂隙段扩展的可能性及后续探水验证。
C3	K141+333~ K141+530、 ZK141+328~ ZK141+521	中风化页岩，裂隙发育、岩体破碎，地下水以基岩裂隙水为主。	相邻软弱破碎段受涌水扰动后的围岩稳定和排水组织。
C4	K141+530~ K141+912、 ZK141+521~ ZK141+884	中风化石英砂岩，裂隙发育，地下水较丰富，设计认为可能存在涌流状、淋雨状出水。	后续施工揭露时的涌水预测复核和运营期长期排水影响。

C.4 动态验证—取高原则法

动态验证—取高原则法是指在设计阶段评价成果基础上，将施工期超前地质预报、掌子面出水、实测涌水量、水压特征、排水能力和监测数据作为动态修正依据。当实测信息显示风险水平高于设计阶段预测时，风险事件可能性等级应按较高等级取值；当多项证据同时指向不利情景时，应采用取高原则确定最终风险等级。

表 C.3 施工期动态修正判据

触发条件	动态修正规则	适用说明
掌子面出现持续递增涌水，且排水系统需明显增设管路或水泵	可能性等级不低于 H4（高）	表明局部含水构造或补给通道被揭露，设计阶段预测需复核。
单洞估算涌水量达到或超过约 200 m³/h	可能性等级不低于 H4（高），后果等级不低于 C3（较严重）	对施工组织、反坡排水、围岩稳定和水环境扰动均有明显影响。
单洞估算涌水量达到约 400 m³/h，或钻孔出水有压力	可能性等级按 H5（极高）取值	反映存在较强导水裂隙、岩溶水或压力水通道，应启动专项处置。
左右洞相近桩号先后出现类似涌水过程	考虑水力联系和连通性，风险等级按较不利洞室取高	用于识别左右洞联动和局部地下水系统连通风险。
排水外排可能影响受纳水体水质或洞内积水影响施工安全	后果等级上调一级或按 C4（严重）控制	用于将水量风险、水质风险和施工安全风险综合考虑。

C.5 风险等级清单与评价结果

表 C.4 新场隧道风险等级清单

评价单元	主要风险事件	可能性	后果	风险等级	评价结论
C1	深埋灰岩岩溶裂隙突增涌水、压力水揭露、地下水径流路径改变、施工排水压力增大	H5 极高	C4 严重	IV级（极高风险）	实际涌水量最高约 400 m ³ /h 并出现压力水，应作为施工期水环境风险核心控制单元。
C2	相邻灰岩裂隙段涌水扩展、局部溶洞水揭露、掌子面排水能力不足	H4 高	C3 较严重	III级（高风险）	与 C1 相邻且地层相近，应开展连续超前探水和动态风险复核。
C3	软弱破碎页岩段受涌水扰动后围岩稳定性下降、施工废水和泥水外排	H3 中等	C3 较严重	II级（中风险）	以围岩稳定、泥水处理和排水组织为主，需结合 C1、C2 处置效果动态调整。
C4	后续裂隙砂岩段可能出现涌流状出水、运营期长期排水累积影响	H3 中等	C3 较严重	II级（中风险）	应提前复核涌水预测和排水能力，运营期保留重点监测。

与设计阶段相比，施工期实际涌水过程表明 C1 单元的风险等级应由常规岩

溶裂隙水段动态上调为IV级（极高风险）。该结果说明，附录案例应体现施工期评价对设计阶段预测的验证和修正，而不能仅停留于静态指标赋值。

C.6 后续保护措施与跟踪评价

表 C.5 新场隧道后续保护措施

阶段	主要措施	适用风险事件	跟踪评价要求
施工即时处置	暂停高风险掌子面盲目掘进；实施超前探孔、必要的物探复核和水压/水量测试；根据探测结果确定注浆堵水、限量排放和开挖步距。	压力水、突增涌水、溶洞水揭露	每循环记录探孔出水、水压、涌水量和水质，作为下一循环风险等级判定依据。
工程控制措施	对 C1 及相邻 C2 段实施超前预注浆、径向注浆或帷幕注浆；完善集水坑、分段接力和备用水泵配置；反坡施工段按实际水量校核排水管径和泵站能力。	大流量涌水、反坡排水能力不足	注浆后开展涌水量对比和效果检查，若仍超过控制值应补充注浆或调整施工方法。
水环境保护措施	施工涌水和含泥废水分类收集，经沉淀、絮凝或必要处理后达标排放；雨季加强排口巡查，防止高浊度水直接进入沟谷或溪流。	施工排水水质扰动、受纳水体影响	监测 pH、悬浮物、浊度和流量，异常时及时调整处理工艺。
长期跟踪措施	运营期保留 C1、C2 段排水量、衬砌渗	长期排水累积影响、排水系统失效	运营初期至少覆盖一个丰水期和一个枯水

	漏、洞内排水系统和洞外受纳水体监测；根据长期排水变化复核地下水均衡影响。		期，形成运营期水环境效应跟踪评价。
--	--------------------------------------	--	-------------------

C.7 评价结论

新场隧道案例表明，深埋灰岩岩溶裂隙段在设计阶段可能被判定为水量贫乏或点滴状出水，但施工揭露后仍可能因隐伏导水裂隙、局部岩溶水和压力水通道而出现突增涌水。右幅和左幅相近桩号先后出现递增涌水，且最大估算涌水量约 $400 \text{ m}^3/\text{h}$ ，说明该段具有明显的施工期动态风险特征。

采用动态验证—取高原则法后，案例能够将设计资料、施工实测、现场处置和后续监测连接起来，形成“设计预测—施工验证—风险修正—措施调整—跟踪评价”的闭合链条。该方法可作为清单一矩阵法和加权综合—风险矩阵法之外的补充案例，用于解决专家提出的附录方法单一、缺少可能性和后果评价、缺少风险等级清单及保护措施的问题。