

DOI: 10.5846/stxb201810262312

吕玉香, 蒋勇军, 王正雄, 胡伟. 西南岩溶槽谷区隧道建设的水文生态环境效应研究进展. 生态学报, 2020, 40(6): 1851-1864.

Lü Y X, Jiang Y J, Wang Z X, Hu W. Review on the hydrology and the ecological and environmental effects of tunnel construction in the karst valley of Southwest China. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(6): 1851-1864.

# 西南岩溶槽谷区隧道建设的水文生态环境效应研究进展

吕玉香<sup>1,2</sup>, 蒋勇军<sup>2,\*</sup>, 王正雄<sup>2</sup>, 胡伟<sup>1</sup>

1 重庆市地质矿产勘查开发局 208 水文地质工程地质队(重庆市地质灾害防治工程勘查设计院), 重庆 400700

2 西南大学地理科学学院岩溶环境重庆市重点实验室, 重庆 400715

**摘要:**西南岩溶槽谷区隧道分布密集, 隧道突水引发了一系列的生态环境问题。梳理了隧道建设产生的生态环境效应现状, 包括: 改变水资源分布格局及水文过程, 诱发地质灾害, 降低土地质量和引起土壤污染, 影响植被生长与分布等。在隧道影响水文和水资源方面已有丰富的研究成果, 而在对土壤和植被的影响研究方面缺乏统一认识。指出了未来研究的总体趋势和方向: 隧道影响水资源分布格局与水文过程的水文地质模式, 降水、地表水、土壤水、地下水及隧道水的转换过程与地下水流场演化机制, 岩溶隧道区植被生理过程与多样性变化等。

**关键词:**岩溶槽谷区; 隧道突水; 水文效应; 生态效应

## Review on the hydrology and the ecological and environmental effects of tunnel construction in the karst valley of Southwest China

LÜ Yuxiang<sup>1,2</sup>, JIANG Yongjun<sup>2,\*</sup>, WANG Zhengxiong<sup>2</sup>, HU Wei<sup>1</sup>

1 Hydrogeology & Engineering Team 208, Chongqing Bureau of Geological Exploration (Chongqing Reconnaissance and Design Academy of Geological Disasters Prevention and Treatment Engineering), Chongqing 400700, China

2 Chongqing Key Laboratory of Karst Environment, School of Geographical Sciences, Southwest University, Chongqing 400715, China

**Abstract:** Tunnels are densely distributed in the karst valley area of Southwest China, and tunnel water inrush has caused a series of ecological and environmental problems. This paper reviews the current status of the ecological and environmental effects caused by tunnel construction, including changes in the distribution patterns and hydrological processes of water resources that may induce geological disasters, reduce land quality, increase soil pollution, and affect vegetation growth and distribution. There are multiple studies on the impact of tunnels on hydrology and water resources, but there is no unified understanding regarding the impact of tunnels on soil and vegetation. The general trends and direction of future research are as follows: a hydrogeological model of water resource distribution patterns and the hydrological processes affected by tunnels; the transformation processes of precipitation, surface water, soil water, groundwater, and tunnel water; the evolution mechanism of the groundwater field; physiological processes and diversity changes in the vegetation of the karst valley area.

**Key Words:** karst valley; tunnel water inrush; hydrological effect; ecological effect

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFC0502306); 重庆市院士基金项目(cstc2018jcyj-yszx0013)

收稿日期: 2018-10-26; 网络出版日期: 2019-12-17

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jiangyj@swu.edu.cn

随着社会经济的快速发展及高速公路、铁路网的不断完善,我国隧道工程建设得到了前所未有的迅速发展。我国已是世界上隧道及地下工程规模最大、数量最多、地质条件和结构形式最复杂、修建技术发展速度最快的国家<sup>[1]</sup>。据交通运输部政府信息公开网:截至 2017 年底,全国运营铁路隧道 14547 座,总长 15326 km,比 2016 年底增加 465 座,1206 km;全国大陆运营公路隧道 16229 座,总长 15285 km,比 2016 年底增加 1048 座,1245 km。在过去的十年里,我国每年平均新修建的隧道多达 900 km<sup>[2]</sup>。

近年来,随着西部大开发的加速发展及一带一路战略的提出,公路、铁路建设向地形地质条件复杂的西南岩溶地区发展趋势明显。据统计,我国已建成隧道中有约 30%穿越了岩溶地层,这些隧道一般埋深较大,岩溶发育,施工过程中常发生岩爆、塌方、突水等大型地质灾害,其中以岩溶突水最为常见,发生率为 80%,因突水引起的施工地质灾害造成停工的时间约占施工总工期的 30%<sup>[3-4]</sup>。

西南岩溶槽谷区具有紧密式箱型背斜/向斜构造发育、岩层倾角大、碳酸盐岩与非碳酸盐岩互层、高位蓄水构造频繁出露等特点<sup>[5]</sup>,致使其斜坡区石漠化问题突出、水资源时空分布不均、旱涝灾害频发、生态环境脆弱、人地矛盾突出,严重影响了当地社会经济发展及生态文明建设。该区隧道分布密集,岩溶隧道突水导致地表地下水疏干及地面塌陷,对生态环境造成了极大影响。近年来,水文地质工程地质科学工作者通过开展大量的科学观测、资料分析和数值模拟,对隧道建设引发的水文效应形成了一定的认识,如降低地下水水位,改变水资源分布格局,改变地下水流场,加速水循环过程。但由于岩溶槽谷区地质条件的复杂性,隧道群的相互干扰,观测资料的局限性,关于隧道影响土壤、植被的特征、规律、机制等方面缺乏系统的研究。因此,有必要梳理国内外已有研究成果,归纳隧道建设对水文、生态、环境的影响特征,总结规律,剖析机制机理,并指出今后有待深化研究的问题和方向。本文将为深化隧道建设引发的水文生态环境效应这一科学问题的认识、提升隧道设计施工水平及科学应对隧道建设对生态环境造成的不利影响提供参考。

## 1 西南岩溶槽谷区地质背景及隧道建设概况

西南岩溶槽谷区分布在黔东北、湘西、鄂西以及渝中、渝东南、渝东北等地的 130 个县,面积  $43.608 \times 10^4$  km<sup>2</sup>。构造上主要位于扬子准地台的川黔褶皱带和大巴山褶皱带,地层从震旦系-三叠系均有出露,碳酸盐岩与碎屑岩整体相间分布,局部集中出露,碳酸盐岩分布面积  $14.76 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,总厚度数千米(图 1)。宏观地貌上位于第二级阶梯和第三级阶梯的过渡地带,为褶皱构造形成的槽谷相隔的侵蚀条状的中低山山地,侵蚀-溶蚀地貌形态主要包括槽谷、峡谷、台地、洼地等,平均海拔 500—2500 m。属于中亚热带东亚季风气候,植被类型为中亚热带湿润常绿阔叶林<sup>[6-7]</sup>。

复杂的地形地质条件及经济、交通压力致使该区的隧道建设迅速发展,据不完全统计,截至 2017 年底,区内高速铁路 4000 km,穿越岩溶含水层的运营铁路隧道 975 座,总长 1271.792 km(表 1);截止到 2015 年底,区内高速公路 6800 km,穿越岩溶含水层的运营公路长隧道及特长隧道 421 座,长度 1060.024 km(表 2)。在人口、城镇分布密集的隔挡式槽谷区,隧道分布密度最高。

## 2 隧道建设引起的水文生态环境效应

目前,西南岩溶槽谷区隧道的防排水设计,仍然是“防排结合,以排为主”。因此,突、涌水是岩溶区隧道施工最常见的工程地质问题。据不完全统计,国内外隧道涌水量超过  $1.0 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/d 的大型涌突水事件中,70%都发生在岩溶隧道中<sup>[8]</sup>。而在西南岩溶槽谷区,最大涌水量  $>1.0 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/h 者达十余条(表 3),宜万铁路齐岳山隧道最大涌水量高达  $1800 \times 10^4$  m<sup>3</sup>/h。

隧道涌水致使地表井、泉、地下河被疏干,引发了一系列严重的生态环境和社会问题。如西班牙南部一条高速铁路隧道在掘进过程中发生突水,水量 800 L/s,致使当地泉水被疏干,引发了公众抗议<sup>[9]</sup>。在重庆中梁山、明月山、铜锣山和缙云山“四山”地区,因修建隧道致使井、泉减少或消失共计 363 处,导致水田旱化面积超过 3300 hm<sup>2</sup>,对当地居民生产生活造成了严重影响<sup>[10]</sup>。

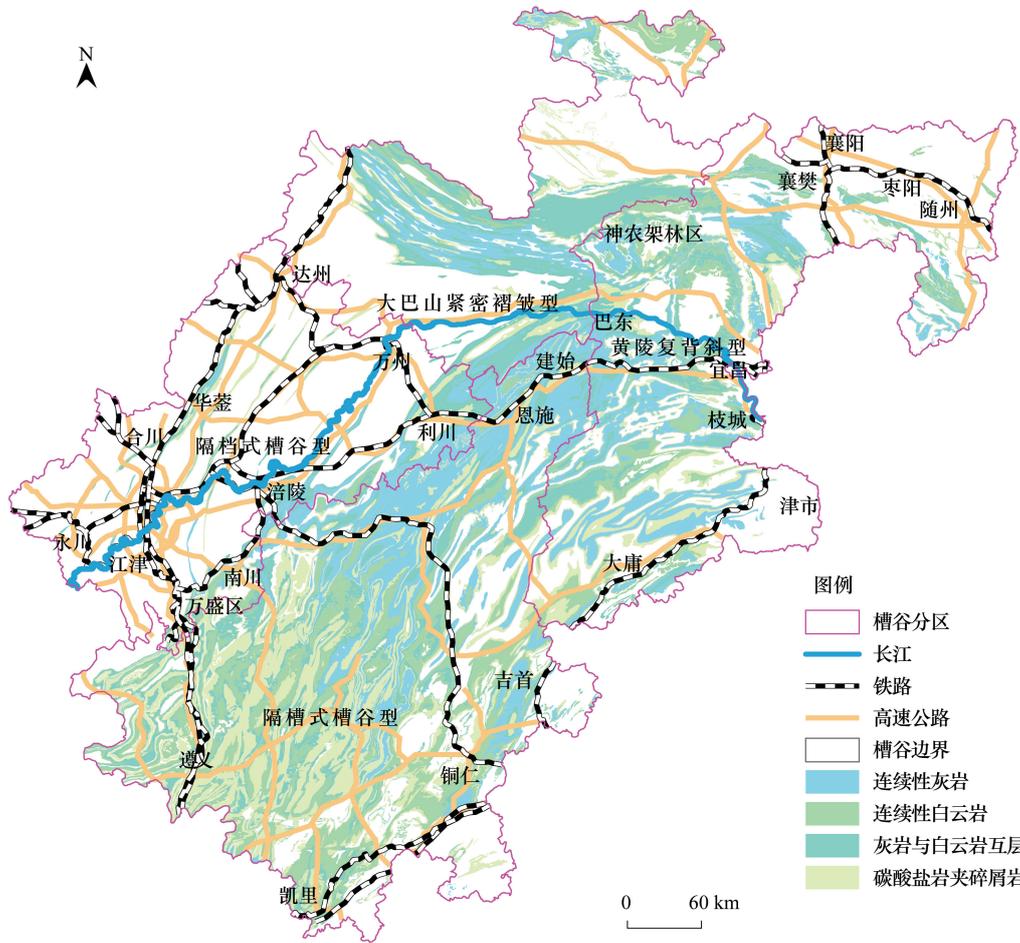


图 1 西南岩溶槽谷区交通及碳酸盐岩分布

Fig.1 Traffic and carbonate distribution in karst valley area of Southwest China

表 1 西南岩溶槽谷区铁路隧道统计表

Table 1 Statistics of railway tunnels in southwest karst valley area

线路名称 Line name	隧道数 Number of tunnels	长度 Length/km	备注 Remarks
渝黔高铁 Chongqing-Guizhou high-speed Railway	115	169.882	所有隧道
川黔铁路 Sichuan-Guizhou Railway	115	34	所有隧道
沪昆高铁 Shanghai-Kunming high-speed Railway	127	171.062	所有隧道
沪昆铁路 Shanghai-Kunming Railway	185	71.8	所有隧道
襄渝二线 Hubei-Chongqing second Railway	5	25.594	未统计短隧道
襄渝铁路 Hubei-Chongqing Railway	1	5.334	未统计短隧道
汉沪蓉高铁 Han-Hu-Rong High-speed Railway	230	519.724	所有隧道
成渝高铁 Chengdu-Chongqing High-speed Railway	2	10.818	未统计短隧道
成渝铁路 Chengdu-Chongqing Railway	0	0	未统计短隧道
达万铁路 Da-Wan Railway	0	0	未统计短隧道
三万铁路 San-Wan Railway	3	13.668	未统计短隧道
遂渝铁路 Sui -Yu Railway	0	0	未统计短隧道
兰渝铁路 Lanzhou-Chongqing Railway	2	8.91	未统计短隧道
渝怀铁路 Chongqing-Huaihua Railway	190	241	所有隧道
总计 Total	975	1271.792	

0.5 km 以下为短隧道,0.5—3 km 为中隧道,3—10 km 为长隧道,10 km 以上为特长隧道

表 2 西南岩溶槽谷区高速公路隧道统计

Table 2 Statistics of expressway tunnels in southwest karst valley area

省/直辖市 Provinces/municipalities directly under the Central Government	隧道数 Number of tunnels	长度 Length/km	备注 Remarks
重庆 Chongqing	164	424.8	未统计短隧道
贵州 Guizhou	88	158.648	未统计短隧道
湖北 Hubei	124	331.547	未统计短隧道
湖南 Hunan	17	54.695	未统计短隧道
四川 Sichuan	28	90.334	未统计短隧道
总计 Total	421	1060.024	未统计短隧道

0.5 km 以下为短隧道,0.5—1 km 为中隧道,1—3 km 为长隧道,3 km 以上为特长隧道

表 3 西南岩溶槽谷区涌水量大于  $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$  的岩溶隧道统计Table 3 Statistics of karst tunnels with water inflow greater than  $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$  in karst valley area of Southwest China

隧道 Tunnel	铁路/公路 Railway/Highway	长度 Length/m	最大涌水量 Maximum water inflow/ ( $1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{h}$ )
野三关隧道 Yesanguan Tunnel	宜万铁路	13864	>10
圆梁山隧道 Yuanliang Mountain Tunnel	渝怀铁路	11068	350
齐岳山隧道 Qiyue Mountain Tunnel	宜万铁路	10528	1800
彭水隧道 Pengshui Tunnel	渝怀铁路	9028	1.58
马路菁隧道 Malujing Tunnel	宜万铁路	7879	30
大巴山隧道 Daba Mountain Tunnel	襄渝铁路	5333.7	610
华蓥山隧道 Huaying Mountain Tunnel	沪蓉高速	4684	1.44
歌乐山隧道 Gele Mountain Tunnel	渝怀铁路	4050	130
中梁山隧道 Zhongliang Mountain Tunnel	渝合高速	4100	1080
中梁山隧道 Zhongliang Mountain Tunnel	襄渝铁路	3885	34
大娄山隧道 Dalou Mountain Tunnel	川黔铁路	2870	19.2

隧道施工贯穿了裂隙、断裂、揭穿了溶洞,并产生了新的裂隙,致使大量地表水地下水通过裂隙、断裂排入隧道,隧道成为新的集中排水点。宜万铁路野三关隧道在施工期间曾发生严重突水、涌泥、涌砂、涌砾及洞内塌方事故,其主要原因即是地表水通过洼地、落水洞进入地下河后,向下运移至孙家垭断裂、叶朝湾断裂及望碑断裂之间破碎岩体处,经由岩体中的构造裂隙导入断裂,地下水再顺断裂面而下,至隧道顶部产生突水引起的<sup>[11-12]</sup>。

动态监测、示踪试验及数值模拟是定量评估隧道的影响程度的有效手段。王勐等通过现场观测证实,渝怀铁路圆梁山隧道对相距 12.4 km 的毛家院子暗河产生了影响<sup>[13]</sup>。Vincenzi 等利用示踪试验确定了断裂带是补给源与排水隧道之间的主要水力通道<sup>[14]</sup>。Jin 等利用三维有限元模型预测了南温泉背斜槽谷区一处隧道的涌水量及影响范围,利用监测手段证明隧道涌水主要来自地表涂山湖,并通过控制隧道周围岩石的渗透系数,减少了隧道排水量,有效控制了对地下水系统的影响<sup>[15-16]</sup>。

隧道排水不仅疏干了大量地表水、地下水,引发了地面塌陷,降低了地下水位,而且改变了含水层的结构,加速了水循环及水文地球化学过程,从而改变了隧址区的水动力场及水化学场,产生了一系列生态环境效应。

## 2.1 改变水资源分布格局及水文过程

### 2.1.1 疏干地表地下水,改变水资源分布格局

隧道大量排水打破了隧址区原有的水资源平衡状态,降低了地下水位,疏干了地表水与天然泉点,形成了降落漏斗,且降落漏斗会随着排水时间的延续而扩展,直至隧道排水量完全靠来自边界的补给保证为止(图 2),这些过程加剧了岩溶水资源分布的不均一性,从而改变了水资源空间分布格局。

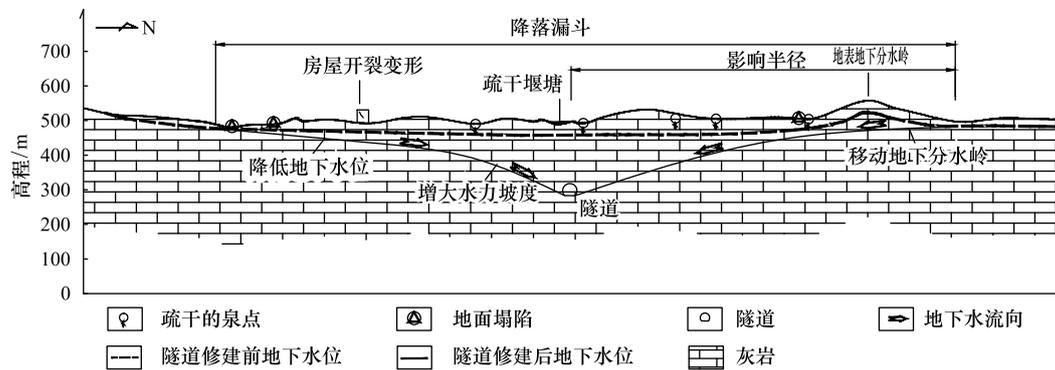


图2 隧道排水影响水资源及水文过程纵剖面示意图

Fig.2 Schematic diagram of longitudinal profile of water resources and hydrological processes affected by tunnel drainage

由于岩溶发育的不均一性,隧道地下水的疏干导致水资源的流失也会表现出各向异性,如建于1972年重庆中梁山隧道形成了南北向的不对称漏斗<sup>[17]</sup>,疏干区面积约11 km<sup>2</sup>,北侧疏干面积远大于南部,这种不对称降落漏斗的形成是地下水自北向南流的缘故;修建于重庆铜锣峡背斜岩溶槽谷区的玉峰山隧道,其轴线附近泉点疏干程度差异极大,隧道轴线两侧影响范围较不对称,东翼疏干程度明显大于西翼<sup>[18]</sup>;在温塘峡背斜、观音峡背斜、明月峡背斜的岩溶槽谷区也有类似的情况,岩层倾角较陡的一翼疏干程度也较大<sup>[19]</sup>。

关于隧道疏干地表地下水、降低地下水位已积累了丰富的实测数据,并形成了改变水资源分布格局的统一认识,但在不同类型的岩溶槽谷区,水文地质结构不同,隧道对水资源分布格局的影响程度存在差异,因此,有必要加强梳理总结,建立不同类型槽谷区隧道影响水资源分布格局与水文过程的水文地质模式。另外,已有研究注重隧道对水资源空间分布的影响,对地表、地下水量年内分配及多年变化的影响缺乏研究。

### 2.1.2 改变地下水流场

隧道排水改变了隧址区水动力条件,并以其为中心构成新的势汇,局部水力梯度的显著提高,显著改变了地下水径流模式。在岩溶槽谷区,地下水径流模式多数为轴部汇流型、翼部分流型及径向径流型。隧道开挖后,由于其集水和汇水作用,岩溶地下水不断排入隧道中,地下流速、流向水随之改变(图2)。曹锐等通过示踪试验及动态监测发现,黄泥垭隧道工程改变了地下水流场,隧址区地下水接收隧道顶部大气降水垂直入渗补给,由背斜两翼分流型转变为近源垂直补给、径流型<sup>[20]</sup>。

同时,隧道施工排水可能会动用地下水静储量,增大补给量,扩展地下水补给边界,从而改变区域地下水流场。若采取封堵措施,若干年后,区域地下水流场可能会恢复到之前的状态;若隧道贯通后持续稳定排水,则地下水流场会达到一种新的平衡状态。Vincenzi等通过示踪试验证实了隧道与地表多个出水点之间的水力联系,最大线性距离为1.4 km,流速可达135 m/d,几条水流通道均通过了隧道修建之前的地下水分水岭(山脊),证明隧道已经完全改变了区域水流系统<sup>[21]</sup>。

由于隧址区钻孔及天然泉点出露有限,多通过地下水模拟软件来研究区域地下水流场的变化,可在一定程度上定性呈现流场的变化过程。龚睿运用三维数值模拟软件Visual Modflow模拟排水、堵水工况下成渝客运专线歌乐山隧道开挖引起的降落漏斗范围及水力坡度的变化<sup>[22]</sup>。由于岩溶含水介质的非均质性及模型本身的不确定性,使其在模拟岩溶含水层的适用性有限,模拟结果往往并不理想。加强对现有模型的改进及监测手段的研发,是需要长期努力的方向。

另外,在阻挡式岩溶槽谷区,人口、工矿企业分布密集,交通压力较大,同一水文地质单元往往有多条平行隧道,形成隧道群,隧道群对地下水流场的影响过程更为复杂,也是将来研究的重点与难点。

### 2.1.3 加速水循环过程

隧址区水循环过程加快主要有两个方面的原因:一是区内水动力条件的改变致使地下水运动速度加快;

二是隧道施工贯通了裂隙、断裂,揭穿了溶洞,改变了含水层结构(图3),增加了地下水径流、排泄通道<sup>[23]</sup>。另外,部分隧道长期排水也会加速碳酸岩的溶蚀,致使岩体渗透性增强<sup>[24]</sup>,反过来又加速了水循环。

岩溶含水层特殊的裂隙、管道网状结构致使隧道涌水对降雨的响应更为及时<sup>[9]</sup>,径流过程更为迅速<sup>[25]</sup>,影响范围更大。在意大利北部7条高速铁路隧道的系统观测和示踪试验表明,在碎屑岩地层中,隧道涌水影响半径为200 m,地下水平均流速为3.6 m/d,而在岩溶地层中的影响半径达到2.3—4.0 km,地下水平均流速为39 m/d<sup>[14]</sup>。

水循环过程加快表现在:隧道疏干地下水,部分天然状态下相对隔水(或弱透水)的地层在重力作用下变为透水层,由此造成相邻含水层间的水量交换,如渝怀铁路圆梁山隧道施工使3个具相对独立性的含水层发生了水力联系<sup>[26]</sup>,穿越二叠系的隧道造成地表三叠系中的泉点干枯,暗河流量大幅减少;隧道排水形成了降落漏斗,使补给含水层腾出了接受外界补给水量的空间,加强了地表流水向地下水的入渗转化,这些过程也将加剧地表水土的流失,从而产生一系列负效应<sup>[27]</sup>。

隧道排水加速水循环过程,现有研究多是定性的描述,缺乏对降水、地表径流、壤中流、地下径流“四水”转化的定量及过程研究。岩溶地区对降雨有很强的吸收能力,只有在大雨或暴雨的情况下才有坡面流的产生,而其余形式的降雨都被表层带吸收<sup>[28]</sup>,隧道排水是否对隧址区的产流机制有影响,目前未见相关研究。

#### 2.1.4 加速水文地球化学作用及改变水质

隧道排水导致含水层水压力降低,地球化学平衡条件发生变化<sup>[23]</sup>。同时,地下水循环过程加速促进了水岩相互作用,从而改变地下水化学成分<sup>[29]</sup>,隧道促使不同含水层间地下水混合,也会改变地下水化学特征。日本学者Li等在研究日本松本市隧道工程施工时,对地下水位和化学成分的变化规律进行研究,发现井水化学成分的变化较之于地下水位变化更为明显<sup>[30]</sup>。

隧道建设极易造成水质污染,一方面,隧道大量涌水,疏干了充水围岩,加速了水循环交替,促进了氧化作用,使地下水中某些金属元素含量增加或pH值发生显著变化;另一方面,施工环境中被污染的其他水体极易进入地下水。同时,被污染的地下水直接排入周围环境,也会引起地表水和地下水二次污染。Chae等对韩国首尔地铁隧道渗出地下水的水化学研究表明,隧道可使城市地下水质量显著下降<sup>[31]</sup>。渝怀铁路歌乐山隧道施工期间的五个水质监测点中,有四个水质处于劣V类<sup>[32]</sup>。隧道施工产生的粉尘,施工机械产生的漏油,注浆止水材料和喷锚支护材料,也可污染周边地表水<sup>[33]</sup>。尤其是含有有害成分的加固剂,其泄漏液对水环境的影响最为显著。有研究表明,使用含有丙烯酰胺的加固剂,隧道排水中的丙烯酰胺含量可达95500 μg/L,可能会给鱼类或其他水生生物带来急性致死作用<sup>[34]</sup>。隧道穿越不良地质时,如煤系地层,将使该层中带有的硫化物氧化,生成硫酸根和氢离子,引起地下水化学异常,后者使含钙矿物水解或溶解生成钙离子,从而导致水化学类型的改变和矿化度的升高<sup>[35-36]</sup>。

以上研究表明,隧道建设加速了水岩相互作用,是否会进一步引起区域水文地球化学场时空演化特征变化,尚需要观测资料证实。另外,隧道排水能否进一步促进岩溶作用进行,尚有待深入系统研究。

## 2.2 诱发地质灾害

### 2.2.1 隧道突水

隧道突水、突泥问题在西南岩溶槽谷区极为普遍<sup>[37-38]</sup>。在统计的48座长度大于3 km的穿越岩溶地层的铁路隧道中,90%以上岩溶长隧道都不同程度的发生过岩溶突水、突泥灾害<sup>[39]</sup>。如成昆铁路线427座隧道中,93.5%的隧道在施工期间发生过不同程度的涌突水灾害,13座隧道发生严重涌水,其中8座隧道涌水量超过10000 m<sup>3</sup>/d<sup>[40]</sup>。

岩溶隧道突水实质就是裂隙岩体含水结构、水动力系统 and 围岩力学平衡状态因隧道开挖而发生急剧变化,存储在地下水体的能量瞬间释放,并以流体的形式高速向隧道内运移的一种动力破坏现象。岩溶突水的力学机制主要体现在4个方面,即突水蓄势期岩溶水对裂隙岩体的软化溶蚀作用、水压对裂隙岩体的劈裂作用,突水失稳期水流的冲刷扩径作用、水压对突水量的动力控制作用<sup>[41]</sup>。从物质成分来看,西南地区岩溶隧

道已发生的岩溶突涌水灾害包括涌水(或突水)、突水突泥、突水突石等,突水灾害总是与突泥、突石等相伴而生。隧道涌水过程中,水流携带大量的泥砂使涌水快速下降,沉积物淤塞涌水口、隧道或涌水通道,致使涌水暂时中断,当涌水通道中的水位上升至一定高度时,水压力作用又将堵塞物破坏,造成多期次涌水<sup>[42]</sup>。

隧道突水受到多种因素影响。基于隧道工程与岩溶管道(溶洞)的空间位置关系,根据隧道受水压、岩溶充填物与隧道围岩塑性区范围等影响的渐进破坏过程不同,刘招伟<sup>[43]</sup>提出了隧道岩溶突水的6类地质模式:横向断面交错模式(顶位交错、底位交错、上侧位交错、下侧位交错)、纵向断面交叉模式(上侧位交叉、下侧位交叉)。降雨是诱发突水、突泥的重要因素,降雨一方面提供了突水、突泥水源及动力条件,另一方面,提高了地下水位,增加了溶洞中的静水压力,加速了溶洞中的黄色粘土的软化、液化,增大了围岩及支护体的载荷,降低了围岩的稳定性,促使隧址区发生突涌。重庆省道202线通渝隧道在2002至2004年施工期间先后发生7次特大涌水<sup>[44]</sup>,一般都是在连续降雨或暴雨后发生。对于深埋型的岩溶隧道,极易发生高压突水、突泥问题,其主要特点是压力高、水量大、持续时间长,因此,对隧道的危险性极大,往往会造成巨大的、无法估计的损失<sup>[39]</sup>。宜万线齐岳山在施工过程中曾多次遇到高压突水、突泥问题,水压达3.5 MPa<sup>[45-46]</sup>。渝怀铁路圆梁山隧道5个溶洞均出现了涌水突泥现象,由钻孔中射出的水流数十米,2#溶洞水压力为2.73 MPa<sup>[47]</sup>。

总之,隧址区岩溶发育程度及富水性是发生岩溶突水的关键因素,隧道的相对位置、埋深及施工季节是岩溶突水也是影响岩溶突水的重要条件。岩溶突水具有突发性、高压性,且水量大,不仅会造成经济损失和人员伤亡,而且带来了一系列生态环境负效应。

### 2.2.2 地面塌陷

隧道排水引起上覆松散土层内有效应力的改变和动水压力的增加是地面塌陷的最根本原因。地下水位急剧变化带和强径流带往往是塌陷产生的敏感区,而水动力条件的改变是产生岩溶塌陷的主要诱导因素(图3),这已为不少实际资料所证实。隧道排水引发的地面塌陷发育过程可分为三个阶段。第一阶段:天然状态下,地下水保持自然水位并相对稳定,基岩在溶蚀作用下形成落水洞或漏斗,此时土体还受到岩溶水的浮力和土体自身抗滑力的作用,使得上覆土体处于基本稳定状态;第二阶段:隧道大量排水,地下水位迅速下降,水流过程对地表覆盖土层及岩溶管道中土体的产生潜蚀和运移,逐渐形成土洞,地表土体在重力作用下出现拉裂缝、下沉迹象。施工中炮震产生的震动气压和液压破坏性大,加强了深、浅部岩溶管道的连通性<sup>[48]</sup>;第三阶段:随着土洞进一步发育,顶板土层逐渐变薄,当真空负压、土体自重等致塌力大于抗塌力时,塌陷发生。

据不完全统计,建于西南岩溶区的铁路长隧道中,几乎均不同程度地遇到了岩溶塌陷,给隧道的施工造成了一定影响,其中,发生过较大岩溶塌陷的隧道有10座之多,占总数的40%<sup>[49]</sup>。地面塌陷受降雨影响明显,降雨使得地下水位升高,水力坡度增大,涌水携带大量泥沙,加快了地面塌陷的发展<sup>[50]</sup>。大量研究表明,地面塌陷发生或者塌陷扩大的主要时间都是在雨季<sup>[51-52]</sup>。对于双线或多线隧道,隧道间距和建设顺序对地面塌陷量、形态和范围有较大影响。平行排列的隧道地面大塌陷规模比单线隧道大,范围广。随着隧道间距的减小,将产生群洞效应,塌陷量呈现增大的趋势<sup>[53-55]</sup>。

### 2.2.3 地质灾害风险评价及超前地质预报

目前,对岩溶隧道工程诱发地质灾害风险评价及超前地质预报已经取得很大进展。模糊数学法、层次分析法、神经网络模型、小波分析方法及其组合被广泛应用于岩溶隧道的风险评估<sup>[56-62]</sup>。各种方法均有利弊,在实际研究中,往往采用几种方法的组合以求得评价或预测结果的合理性和科学性。超前地质预报方法主要

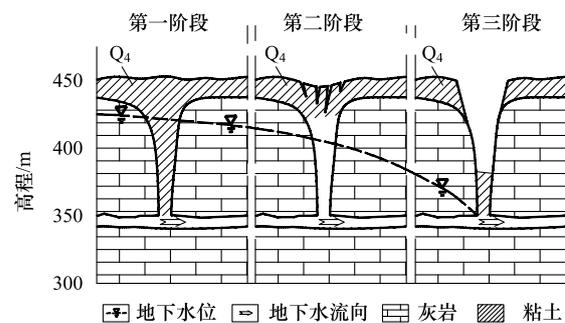


图3 隧道排水引发地面塌陷示意图

Fig. 3 Schematic diagram of ground collapse caused by tunnel drainage

有 TSP、地质雷达、瞬变电磁、陆地声纳、红外探测仪及综合超前预报技术<sup>[63-68]</sup>,鉴于已有方法的局限性,李术才等提出基于风险分级的综合超前地质预报技术<sup>[69]</sup>。葛颜慧等优化了综合超前地质预报的预报方案和流程,提高了岩溶水位置探查的准确性,并成功预报了沪蓉西高速公路乌池坝隧道掌子面前方的岩溶水<sup>[70]</sup>。Liu 等提出了一种改进的时移电阻率反演方法,用于监测地下水运移特征,并在广西岑西隧道中进行了成功应用<sup>[71]</sup>。

综上,对岩溶隧道诱发地质灾害的规模、成因机制、风险评价及超前地质预报已有广泛而深入的研究,但隧道施工过程中地质灾害仍时有发生,不少岩溶隧道运营期每到雨季就会发生突涌水,因此,改善隧道设计理念,提高超前地质预报的准确性,加强岩溶隧道(群)的区域稳定性及隧道长期运行的风险性的评估与研究,均是需要长期努力的方向。

### 2.3 降低土壤质量和引起土壤污染

隧道排水加速水土流失,采用“以排为主”的衡广复线南岭隧道泥砂流失严重,隧道建成后,隧址区内水土流失速度比自然风化时的速度快了将近 6000 倍;大瑶山隧道建成后,地面水土以每年约 5.4 cm 的速度流失,近似于自然风化时速度的 5.4 万倍<sup>[72]</sup>。水土流失致使土壤层变薄,养分及水分损失,肥力下降<sup>[73]</sup>,土壤质量下降。隧道排水疏干地表水、降低地下水位,土壤含水率也随之降低;地下水位下降及降雨淋溶作用增强都促使土壤养分转移至土壤深层或者地下水中;土壤有机质含量降低,导致土壤酸化<sup>[33]</sup>。

土壤污染源主要是由于隧道施工弃渣和排污废水。对歌乐山隧址区的土壤环境调查研究发现,主要污染物为 Pb、Cr、Zn、Cd、TNT、石油类、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>,且存在复合污染的可能,污染物主要累积在土壤表层,随着土壤深度增加,污染因子含量减少<sup>[74]</sup>。

地铁隧道对土壤温度场的影响是近年来的研究热点,研究方法主要为现场实测,实验台缩尺模型模拟,理论分析和数值模拟等<sup>[75-81]</sup>。地铁运行致使土壤温度上升,土壤含水率减小,蓄热性能降低,并随时间和空间变化呈现一定的规律性。通过实验与数值模拟发现,上海某地铁温度场的变化主要发生在运营后 1—10 年,在此期间,随年限的增加,土壤热库峰值不断升高,峰值位置和热库厚度不断加深,10 年以后温度场趋于稳定。土壤容积含水率的变化主要发生在隧道壁面 3.5 m 的范围之内,随着年限的推移,容积含水率逐年减少,直到趋于稳定;新建地铁区间隧道的年蓄热量为远期年蓄热量的 11.6 倍<sup>[82]</sup>。

综上,隧道排水对土壤的影响主要体现在加速土壤流失、降低土壤养分与含水率、引起土壤污染等方面,未见对土壤 CO<sub>2</sub>、土壤水地球化学特征的长期系统观测与研究,隧道排水对土壤质量的影响机制尚不明确。

### 2.4 影响植被生长与分布

岩溶地区因其富钙的岩、水、气循环系统,以及“土在楼上、水在楼下”的双层结构,造成其土壤贫瘠,保水能力差<sup>[83]</sup>,植被覆盖率低,生态系统抗干扰能力低。由于岩溶槽谷区缺乏系统的地表水文网,天然植被生态系统主要依靠消耗地下水资源来维持,因此,植被对地下水变化响应极为敏感。

地下水是植物分布和生长最重要的限制资源,影响天然植被生长的土壤水分和盐分与地下水位高低密切相关<sup>[84-85]</sup>,地下水位的降低可能导致植物枯萎、死亡。因此,有学者提出了“地下水生态水位”、“地下水生态平衡埋深”等概念<sup>[86-87]</sup>,确定植物进行光合等生理作用的地下水位埋深阈值<sup>[88]</sup>,并基于植被生态需水,确定了隧道所允许排放的最大水量<sup>[89-90]</sup>。

遥感技术是监测隧道建设和运营过程中的环境问题的重要手段之一。通过对成渝高速公路中梁山隧道修建前、修建中和运营三年后同一季节的遥感影像数据进行解译,发现修建后自然植被覆盖率降低了 21.529%,运营三年后自然植被覆盖率上升了 1.311%<sup>[91]</sup>。

由隧道开挖引起地下水位下降,进而导致植物产量下降、化学组分变化<sup>[92-94]</sup>,以及生长速率下降<sup>[95]</sup>已被不少研究证实。地下水位的下降致使植物根系吸水策略和效率发生改变,使其根系逐步向深部发育,吸收深部土壤水和地下水。通过对比研究发现,隧道影响区植物吸收表层岩溶水的比例在雨季和旱季分别为 33%、76%,而隧道未影响区植物吸收表层岩溶水的比例在雨季和旱季分别为 24%、59%。结果也表明,隧道

开挖降低了岩溶地区土壤含水量,改变了岩溶地区植物的吸水规律<sup>[96]</sup>。甚至有研究尝试利用树轮作为指示隧道开挖引起地下水位下降的指标<sup>[97]</sup>,这将为评估岩溶地区隧道开挖对树木生长及生态环境的影响起到重要作用。

另外,隧道通车可作为植物种子迁徙的途径和载体,增加了物种入侵的可能性,导致生物多样性发生改变<sup>[98-99]</sup>。有研究发现,某高速公路隧道内的植物种子种类约有 32.3%并不生活在隧道入口附近<sup>[98]</sup>。

综上,隧道建设对岩溶槽谷区植被的影响主要体现在 4 个方面:一是隧道排水降低地下水位,减少了土壤含水量,影响植物吸收水分、养分;二是隧道建设改变了地下水水化学成分,影响植物吸收养分;三是隧道排水引起了地面塌陷,加速了地表水土流失与石漠化,改变了植被生长环境,影响了植被生长与空间分布;四是隧道通车为物种入侵提供了可能,可能会影响植物种类。已有研究主要关注隧道影响植物生长速率、产量、植被覆盖度的变化,隧道建设对植被利用水的策略与效率影响、隧道长期排水是否会导致植被演替研究缺乏。已有研究仅发现隧道内植物种子种类增多,是否会造成物种入侵和植物多样性的变化,仍然需要观测资料证实。

## 2.5 生态环境影响评价

隧道对生态环境的影响是多方面的,已有大量研究集中在隧道修筑导致地下水运移所产生的生态环境效应的具体表现形式以及影响范围上,其主要方法有现场调查、综合评述、动态监测、示踪试验及数值模拟(表 4)。定量化综合评价隧道施工引起的生态环境效应研究仍然比较薄弱,目前主要采用的方法有综合指数法、模糊综合评判法、层次分析法、简单关联函数及有限元分析法等(表 4)。生态环境影响评价为优化隧道工程选址、确保隧道施工和运营安全以及保护隧址区生态环境提供了一定的科学依据,但目前缺乏普适性的岩溶隧道生态环境影响评价体系,且评价指标需经隧道修建后连续观测进行修正。对于如何定量评价隧道排水的生态环境效应及优化评价指标,仍然有待深入研究。

表 4 隧道建设的生态环境影响评价方法

Table 4 Eco-environmental impact assessment method for tunnel construction

方法 Methods	研究区 Research area	文献 Literature	主要结论 Main conclusions
综合评述 Comprehensive review	山岭隧道	王石春等 <sup>[100]</sup>	隧道环境评估的范围应扩大至隧道两侧各 1000—5000 m
化学热力学方法 Chemical thermodynamic	圆梁山隧道	陈强等 <sup>[101]</sup>	评价结果显示隧址区地下水对碳酸盐岩与混凝土具有弱侵蚀性
涌水量监测 Water inflow monitoring	圆梁山隧道	王勳等 <sup>[13]</sup>	隧道揭露的含水溶洞突水对当地水环境影响最大,也是地表降水对隧道支护产生影响的主要通道
综合指数和模糊综合评判法 Comprehensive index and fuzzy comprehensive evaluation	渝怀铁路歌乐山隧道	李耐霞 <sup>[32]</sup>	隧道施工过程在短期内对地表受纳水体的水质有一定影响,但随着施工方法的改进,水质逐步恢复至正常水平;隧道施工没有使地下水位发生下降,水质没有恶化趋势。
水质监测 Water quality monitoring	韩国首尔地铁隧道	Chae 等 <sup>[31]</sup>	隧道可使城市地下水质量显著下降
动态监测 Dynamic monitoring	西班牙南部岩溶区一座的高铁隧道	Gisbert 等 <sup>[9]</sup>	隧道涌水导致造成当地民众饮用水和灌溉用水枯竭
示踪试验 Tracer test	意大利北部高铁隧道	Vincenzi 等 <sup>[14,21]</sup>	断裂带是补给源与排水隧道之间的主要水力通道。在岩溶地层中的影响半径达到 2.3—4.0 km,地下水平均流速为 39 m/d
GMS、MODFLOW、FEMWATER	曾文水库跨流域引水工程	Yang 等 <sup>[102]</sup>	评估了隧道建设对跨流域引水工程区域和局部地下水资源状况的影响
地下水平衡模型 Groundwater Balance Model	西班牙西北部隧道	Raposo 等 <sup>[23]</sup>	隧道开挖产生的水位下降会造成岩土工程、水文、环境和社会影响

续表

方法 Methods	研究区 Research area	文献 Literature	主要结论 Main conclusions
模糊数学和层次分析法 Fuzzy mathematics and analytic hierarchy process	沪蓉高速公路垫-邻支线铜锣山隧道	刘向远 <sup>[103]</sup>	建立了岩溶隧道施工中地下水环境负效应评价的指标体系,对各评价指标进行量化,确定负效应程度属于中等,与实际情况相符
岩溶隧道地下水环境负效应评价系统 Negative effect evaluation system of groundwater environment in karst Tunnel	垫邻高速铜锣山隧道和纳黔高速叙岭关隧道	刘建 <sup>[104]</sup>	论述了岩溶隧道地下水环境负效应指标体系、评价方法体系、可视化评价系统,实现了岩溶隧道地下水环境负效应综合评价
层次分析法 Analytic hierarchy process	岩溶山区隧道	王梅等 <sup>[105]</sup>	该指标体系基本能完整显示隧道施工对生态环境负效应影响程度等级
简单关联函数和物元可拓模型 Simple correlation function and matter element extension model	乌鞘岭隧道群	毛正君 <sup>[106]</sup>	综合评价了乌鞘岭隧道群施工期引起地下水运移的生态环境效应,判定乌鞘岭隧道群施工期生态环境效应属于等级 2,即较弱,但偏向于等级 3,即中等
有限元分析 Finite element analysis	天津地铁隧道	刘庆晨 <sup>[107]</sup>	基坑开挖、地面堆载、承压含水层减压降水这三种扰动方式对既有构筑物产生影响
FLAC 3D	北京地铁 10 号线新建隧道	宋文杰等 <sup>[108]</sup>	新建隧道以及地下水位变化的共同作用下对既有地铁车站结构产生影响

### 3 结论与展望

近年来,随着我国西南地区社会经济的快速发展,岩溶槽谷区隧道建设持续加速。由于隧道工程建设之初生态环保理念欠缺,加之岩溶槽谷区特殊的生态脆弱性,使得隧道建设对西南岩溶槽谷区带来的生态环境负效应更为显著,为区域水资源与生态安全带来了挑战。为了分析隧道建设对水文、生态、环境的影响,国内外学者开展了一系列的研究,并取得了一定的成果。然而已有研究多数停留在隧道建设产生的生态环境效应的具体表现形式以及影响程度上,在隧道建设对土壤物理化学特征、植被生理过程改变、物种入侵、植被演替方面的影响,以及相关研究方法与手段方面还存在不足,隧道建设的生态环境效应相关研究整体上还比较薄弱。在今后的研究中需要加强以下几方面的工作:

#### (1) 隧道影响水资源分布格局与水文过程的水文地质模式及隧道群的排水效应

基于西南岩溶槽谷区不同的地质结构,结合典型案例,分析岩溶隧道施工建设与运营期内水资源分布、水动力和水化学过程与岩溶隧道、地质背景、区域气候之间的关系,揭示不同类型的槽谷区隧道建设的生态水文环境效应,探索岩溶隧道对水资源分布与水文过程作用机制,建立西南岩溶槽谷区隧道影响水资源分布格局与水文过程的概念模式。

岩溶发育易导致隧道突涌水,而隧道排水引起的土壤水分与土壤  $\text{CO}_2$  变化,有可能影响大气-水-土壤-岩石界面的物理化学作用强度,从而影响岩溶作用。运用既有国内外岩溶隧道研究案例,分析岩溶发育诱发的隧道突涌水的模式。通过现场监测与试验,探索隧道排水影响岩溶作用的途径与方式,揭示隧道排水与岩溶作用的互馈作用机制。

另外,已有研究主要关注单个隧道排水产生的水文生态影响,以及新建隧道对既有隧道的影响,隧道群排水引起的水文、生态、环境问题以及隧道群间的相互干扰及叠加效应研究将是未来研究的难点及热点。

#### (2) “五水”转换过程与地下水流场演化机制

隧道排水加速水循环过程,改变地下水流场目前多是定性的描述,缺乏系统的定量及过程研究。建议通过长期水文地质现场监测、试验、数值模拟,分析究隧道改变区域水循环特征和地下水动力条件的途径和方

式,揭示降水、地表水、土壤水、地下水及隧道水之间的转换过程及转化机制;综合研究不同时间尺度上,地表水、土壤水、地下水及隧道水的动态过程及对降雨的响应机制;探索岩溶隧道区地下水流场的演化过程与机制;通过资料分析、现场监测、物理模拟试验、数值模拟等手段,分析水动力条件改变、水文地球化学环境改变、施工材料成分对岩溶水化学特征的影响,研究岩溶隧道区水文地球化学场时空演化机制。

### (3) 土壤质量及土壤水文地球化学特性对隧道建设的响应过程与机制

隧道排水导致水土流失加剧,土壤水分减少,土壤质量下降,已有研究证实了这一影响形式,但其影响机理与过程怎样?隧道排水是否导致土壤微生物群落与功能变化,从而引起土壤质量变化?未见相关研究。建议加强对土壤及土壤水物理、化学、生物、微生物特征的系统监测,探索不同时间、空间尺度上土壤质量及土壤水文地球化学特性对隧道建设的响应过程与机制。

### (4) 岩溶隧道区植被生理过程与多样性变化

利用水化学、同位素及遥感技术等手段,探索隧道干扰条件下植被利用水的策略与效率变化过程与机理,植被覆盖度变化,求证隧址区物种入侵的可能性,揭示隧址区植被可能由水生或乔木植被演替为陆生、旱生或灌木、草本植被的过程。

### (5) 调查、评价、预测与模拟

提升岩溶隧道区水文生态环境现场监测技术,研发系统调查方法;研究隧道区水文生态环境效应的影响因子,建立量化评价指标体系,研究分级分类的评价方法,提出评价标准,对于拟建和在建工程,进行评估预测和现状预测,对已建工程进行反分析、验证和后评估,修正并验证评价方法的科学性与可靠性。针对不同概念模式下的岩溶槽谷区隧道工程,提出预警指标体系方法,并进行工程验证,为西南槽谷区隧道的水文生态环境效应评估提供参考依据。基于现场监测资料、室内模拟实验等,建立并优化模拟模型,合理评估与预测隧道建设引起的水文生态环境效应演变趋势,并评估该趋势对岩溶隧道稳定性的影响。

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] 王梦恕. 中国铁路、隧道与地下空间发展概况. 隧道建设, 2010, 30(4): 351-364.
- [ 2 ] 钟世航, 孙宏志, 李术才, 李貅, 王荣. 隧道及地下工程施工中岩溶裂隙水及断层、溶洞等隐患的探查、预报. 岩石力学与工程学报, 2012, 31(S1): 3298-3327.
- [ 3 ] 李术才, 薛翊国, 张庆松, 李树忱, 李利平, 孙克国, 葛颜慧, 苏茂鑫, 钟世航, 李貅. 高风险岩溶地区隧道施工地质灾害综合预报预警关键技术研究. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(7): 1297-1307.
- [ 4 ] 王梦恕. 对岩溶地区隧道施工水文地质超前预报的意见. 铁道勘察, 2004, 30(1): 7-9, 18-18.
- [ 5 ] 蒋勇军, 刘秀明, 何师意, 何丙辉, 谢建平, 罗维均, 白晓永, 肖琼. 喀斯特槽谷区土地石漠化与综合治理技术研发. 生态学报, 2016, 36(22): 7092-7097.
- [ 6 ] 吴协保, 孙继霖, 林琼, 吴照柏. 我国西南岩溶石漠化土地生态建设分区治理思路与途径探讨. 中国岩溶, 2009, 28(4): 391-396.
- [ 7 ] 王世杰, 张信宝, 白晓永. 中国南方喀斯特地貌分区纲要. 山地学报, 2015, 33(6): 641-648.
- [ 8 ] 徐则民, 黄润秋, 罗杏春. 特长岩溶隧道涌水预测的系统辨识方法. 水文地质工程地质, 2002, 29(4): 50-54.
- [ 9 ] Gisbert J, Vallejos A, González A, Pulido-Bosch A. Environmental and hydrogeological problems in karstic terrains crossed by tunnels: a case study. Environmental Geology, 2009, 58(2): 347-357.
- [ 10 ] 李强. 重庆中梁山地区近邻隧道建设地下水环境效应研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2017.
- [ 11 ] 邬立, 万军伟, 陈刚, 赵璐. 宜万铁路野三关隧道“8.5”突水事故成因分析. 中国岩溶, 2009, 28(2): 212-218.
- [ 12 ] 徐华轩. 野三关隧道施工地质特征及突水灾害防治研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010.
- [ 13 ] 王勳, 许兆义, 王连俊, 李治国. 圆梁山毛坝向斜段隧道涌突水灾害及对地下水的影响. 中国安全科学学报, 2004, 14(5): 6-10.
- [ 14 ] Vincenzi V, Gargini A, Goldscheider N, Piccinini L. Differential hydrogeological effects of draining tunnels through the Northern Apennines, Italy. Rock Mechanics and Rock Engineering, 2014, 47(3): 947-965.
- [ 15 ] Jin X G, Li Y Y, Liu H W, Jin Y. Study on groundwater system effect of tunnel drainage control in karst valley//Lollino G, Manconi A, Guzzetti F, Culshaw M, Bobrowsky P, Luino F, eds. Engineering Geology for Society and Territory - Volume 5: Urban Geology, Sustainable Planning and Landscape Exploitation. Cham: Springer International Publishing, 2015: 571-576.
- [ 16 ] Jin X G, Li Y Y, Luo Y J, Liu H W. Prediction of city tunnel water inflow and its influence on overlain lakes in karst valley. Environmental Earth

- Sciences, 2016, 75(16): 1162.
- [17] 铁道部第二勘测设计院. 襄渝铁路中梁山隧道设计施工资料. 成都: 铁道部第二勘测设计院, 1973.
- [18] 池彦宾, 李庆华, 陈鹏. 铜锣山岩溶发育及隧道对地下水疏干影响特征. 山西建筑, 2015, 41(10): 86-87.
- [19] 付开隆. 渝遂高速公路中梁山隧道岩溶塌陷及涌水量分析. 水文地质工程地质, 2005, 32(2): 107-110.
- [20] 曹锐, 吕玉香, 裴建国. 南川黄泥垭隧道工程对水文地质条件的影响分析. 中国岩溶, 2017, 36(5): 691-696.
- [21] Vincenzi V, Gargini A, Goldscheider N. Using tracer tests and hydrological observations to evaluate effects of tunnel drainage on groundwater and surface waters in the Northern Apennines (Italy). *Hydrogeology Journal*, 2009, 17(1): 135-150.
- [22] 龚睿. 隧道工程建设对隔档式岩溶富水背斜地下水环境的影响研究——以观音峡背斜为例[D]. 成都: 成都理工大学, 2010.
- [23] Raposo J R, Molinero J, Dafonte J. Quantitative evaluation of hydrogeological impact produced by tunnel construction using water balance models. *Engineering Geology*, 2010, 116(3/4): 323-332.
- [24] 王建秀, 朱合华, 杨立中. 岩溶隧道长期排水对围岩渗透性的影响. 岩土力学, 2004, 25(5): 715-718.
- [25] Butscher C, Huggenberger P, Zechner E. Impact of tunneling on regional groundwater flow and implications for swelling of clay - sulfate rocks. *Engineering Geology*, 2011, 117(3/4): 198-206.
- [26] 张倬元, 蒋良文. 倒虹吸形成深饱水带大型充填溶洞的典型实例——圆梁山隧道毛坝向斜深饱水带特大型充填溶洞的形成及充填物成灾机制分析. 工程地质学报, 2010, 18(4): 455-469.
- [27] 王廷亮. 隧道工程地下水处理的环境地质效应. 工程勘察, 2010, 38(12): 43-47.
- [28] 袁道先, 戴爱德. 中国南方裸露型峰丛山区岩溶水系统及其数学模型的研究. 桂林: 广西师范大学出版社, 1996.
- [29] Mossmark F, Ericsson L O, Norin M, Dahlström L O. Hydrochemical changes caused by underground constructions—a case study of the Kattleberg rail tunnel. *Engineering Geology*, 2015, 191: 86-98.
- [30] Li H, Kagami H. Groundwater level and chemistry changes resulting from tunnel construction near Matsumoto City, Japan. *Environmental Geology*, 1997, 31(1/2): 76-84.
- [31] Chae G T, Yun S T, Choi B Y, Yu S Y, Jo H Y, Mayer B, Kim Y J, Lee J Y. Hydrochemistry of urban groundwater, Seoul, Korea: the impact of subway tunnels on groundwater quality. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2008, 101(1/4): 42-52.
- [32] 李耐震. 歌乐山隧道施工过程对水环境影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2004.
- [33] 杨长健. 隧道施工水体污染的集对分析及生物测试验证. 现代交通技术, 2008, 5(5): 85-88.
- [34] Weideborg M, Källqvist T, Ødegård K E, Sverdrup L E, Vik E A. Environmental risk assessment of acrylamide and methylolacrylamide from a grouting agent used in the tunnel construction of Romeriksporten, Norway. *Water Research*, 2001, 35(11): 2645-2652.
- [35] 孙坚, 王连俊, 白明洲. 隧道排水引发的生态环境问题探析. 山西建筑, 2004, 30(11): 167-168.
- [36] 王建秀, 刘丹, 杨立中. 秦岭隧道地下水化学异常对衬砌混凝土的腐蚀及防治对策研究. 现代隧道技术, 2002, 39(4): 33-36.
- [37] Moon J, Jeong S. Effect of highly pervious geological features on ground-water flow into a tunnel. *Engineering Geology*, 2011, 117(3/4): 207-216.
- [38] Zarei H R, Uromeihy A, Sharifzadeh M. Evaluation of high local groundwater inflow to a rock tunnel by characterization of geological features. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2011, 26(2): 364-373.
- [39] 毛邦燕. 现代深部岩溶形成机理及其对越岭隧道工程控制作用评价[D]. 成都: 成都理工大学, 2008.
- [40] 喻成云. 基于统计分析的西南岩溶隧道涌水量预测探析[D]. 成都: 成都理工大学, 2013.
- [41] 李利平, 李术才, 张庆松. 岩溶地区隧道裂隙水突出力学机制研究. 岩土力学, 2010, 31(2): 523-528.
- [42] 杨艳娜. 西南山区岩溶隧道涌突水灾害危险性评价系统研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2009.
- [43] 刘招伟. 圆梁山隧道岩溶突水机理及其防治对策[D]. 北京: 中国地质大学, 2004.
- [44] 顾义磊, 李晓红, 赵瑜, 任松. 通渝隧道涌突泥成因分析. 岩土力学, 2005, 26(6): 920-923.
- [45] 张民庆, 黄鸿健, 殷怀连, 康承磊, 彭斌, 席继红. 齐岳山隧道富水溶槽注浆堵水技术. 现代隧道技术, 2006, 43(3): 47-50.
- [46] 李军民. 齐岳山隧道斜井工区平导高压涌水带的施工技术. 西部探矿工程, 2006, 18(4): 169-170, 173-173.
- [47] 张民庆, 彭峰. 圆梁山隧道毛坝向斜水压力监测分析. 岩土工程学报, 2003, 25(6): 702-705.
- [48] 张海坦, 李庆华, 邓书金. 歌乐山岩溶地面塌陷发育特征. 中国岩溶, 2015, 34(1): 58-63.
- [49] 臧守杰, 慕彦波, 程建铝. 喀斯特地区隧道施工中隧底岩层稳定性评价研究. 水利与建筑工程学报, 2007, 5(3): 43-45.
- [50] 李剑颖. 隧道工程行为的生态效应及其评价. 环境科学与管理, 2010, 35(7): 188-194.
- [51] 吴治生, 傅伯森. 南岭隧道下连溪段岩溶及地表沉陷与地质构造的关系. 水文地质工程地质, 1986, (1): 31-31.
- [52] 孔思丽, 王建国, Nogami T. 都市高密度建筑环境中双隧道盾构法施工引起的地面沉降分析//中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学术会议论文集(上). 北京: 清华大学出版社, 2003: 874-878.
- [53] 胡炜, 曾东洋. 平行盾构隧道施工地表变位影响因素研究. 铁道工程学报, 2007, 24(3): 50-55.
- [54] Chehade F H, Shahrour I. Numerical analysis of the interaction between twin-tunnels: influence of the relative position and construction procedure.

- Tunnelling and Underground Space Technology, 2008, 23(2): 210-214.
- [55] 周罡, 杨新安, 孔少波, 廖立坚. 超小间距隧道施工中的地表沉降研究. 辽宁工程技术大学学报, 2006, 25(5): 717-719.
- [56] 贺志军. 山岭铁路隧道工程施工风险评估及其应用研究[D]. 长沙: 中南大学, 2009.
- [57] 孙谋, 刘维宁. 高风险岩溶隧道掌子面突水机制研究. 岩土力学, 2011, 32(4): 1175-1180.
- [58] 许振浩, 李术才, 李利平, 侯建刚, 隋斌, 石少帅. 基于层次分析法的岩溶隧道突水突泥风险评估. 岩土力学, 2011, 32(6): 1757-1766.
- [59] 李利平, 李术才, 陈军, 李景龙, 许振浩, 石少帅. 基于岩溶突涌水风险评价的隧道施工许可机制及其应用研究. 岩石力学与工程学报, 2011, 30(7): 1345-1355.
- [60] 赵冬梅, 刘金星, 马建峰. 基于模糊小波神经网络的信息安全风险. 华中科技大学学报: 自然科学版, 2009, 37(11): 43-45, 49-49.
- [61] 李志林, 王星华, 谢李钊. 基于模糊小波神经网络的岩溶隧道风险评估及综合超前地质预报技术. 现代地质, 2013, 27(3): 719-726.
- [62] 徐善初, 张世林, 陈建平. 模糊层次评价法在隧道地质灾害评估中的应用. 地下空间与工程学报, 2013, 9(4): 946-953.
- [63] 刘志刚, 刘秀峰. TSP(隧道地震勘探)在隧道隧洞超前预报中的应用与发展. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(8): 1399-1402.
- [64] 吴俊, 毛海和, 应松, 夏才初. 地质雷达在公路隧道短期地质超前预报中的应用. 岩土力学, 2003, 24(S1): 154-157.
- [65] 李貅, 郭文波, 李毓茂. 瞬变电磁法在煤田矿井涌水通道勘察中的应用. 西安工程学院学报, 2000, 22(3): 35-38.
- [66] 钟世航. 陆地声纳法的原理及其在铁路地质勘测和隧道施工中的应用. 中国铁道科学, 1995, 16(4): 48-55.
- [67] 王鹰, 陈强, 魏有仪, 王华. 红外探测技术在圆梁山隧道突水预报中的应用. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 855-857.
- [68] 曲海锋, 刘志刚, 朱合华. 隧道信息化施工中综合超前地质预报技术. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(6): 1246-1251.
- [69] 李术才, 李树忱, 张庆松, 薛翊国, 丁万涛, 钟世航, 何发亮, 林玉山. 岩溶裂隙水与不良地质情况超前预报研究. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(2): 217-225.
- [70] 葛颜慧, 李术才, 张庆松, 李利平, 刘斌. 基于风险评价的岩溶隧道综合超前地质预报技术研究. 岩土工程学报, 2010, 32(7): 1124-1130.
- [71] Liu B, Liu Z Y, Li S C, Fan K R, Nie L C, Zhang X X. An improved Time-Lapse resistivity tomography to monitor and estimate the impact on the groundwater system induced by tunnel excavation. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 66: 107-120.
- [72] 吴治生. 岩溶隧道的环境地质问题. 铁道工程学报, 2006, (1): 70-73, 99-99.
- [73] 李嘉. 铁路长隧道弃碴环境影响分析及其防治措施. 铁道劳动安全卫生与环保, 1998, 25(1): 1-5.
- [74] 刘煌. 歌乐山隧道施工弃渣对土壤环境影响研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2004.
- [75] 龚冀杰. 地铁区间隧道温度特性及其对站台环境的影响[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [76] 李晓昭, 熊志勇, 乔恒君, 马娟, 张学华, 杜茂金. 地铁隧道围岩传热规律的监测分析. 地下空间与工程学报, 2012, 8(1): 105-110.
- [77] 肖琳, 杨成奎, 胡增辉, 李晓昭, 李荣. 地铁隧道围岩内温度分布规律的模型试验及其热导率反算研究. 岩土力学, 2010, 31(S2): 86-91.
- [78] 胡增辉, 李晓昭, 赵晓豹, 肖琳, 王伟. 隧道围岩温度场分布的数值分析及预测. 地下空间与工程学报, 2009, 5(5): 867-872.
- [79] 于连广, 吴喜平, 骆泽彬. 圆形腔体内热杆件轴向同心移动湍流换热模拟. 同济大学学报: 自然科学版, 2010, 38(10): 1501-1505, 1520.
- [80] von Glehn F H, Bluhm S J. Practical aspects of the ventilation of high-speed developing tunnels in hot working environments. Tunnelling and Underground Space Technology, 2000, 15(4): 471-475.
- [81] Cavagnaro M, Brulard J. Aerodynamic and thermal investigations for the new Lyon/Turin Cross-Alpine rail link. Tunnelling and Underground Space Technology, 1997, 12(3): 377-384.
- [82] 王丽慧, 张嫻, 吴喜平, 刘俊. 地铁隧道围岩土壤温度场与蓄热特性的模拟研究. 上海节能, 2018, (3): 164-170.
- [83] 姚长宏, 蒋忠诚, 袁道先. 西南岩溶地区植被喀斯特效应. 地球学报, 2001, 22(2): 159-164.
- [84] 曾晓燕. 岩溶隧道涌水对生态环境的影响[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.
- [85] 徐海量. 流域水文过程与生态环境演变的耦合关系——以塔里木河流域为例[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2005.
- [86] Boutaleb S, Bouchaou L, Hsissou Y, Mudry J, Mania J, Chauve P. Hydrogeologic effects on the quality of water in the Oued Issen watershed, western Upper Atlas Mountains, Morocco. Hydrogeology Journal, 2000, 8(2): 230-238.
- [87] 张惠昌. 干旱区地下水生态平衡埋深. 勘察科学技术, 1992, (6): 9-13.
- [88] Horton J L, Kolb T E, Hart S C. Physiological response to groundwater depth varies among species and with river flow regulation. Ecological Applications, 2001, 11(4): 1046-1059.
- [89] 程盼, 李亮, 邹金锋, 赵炼恒, 罗伟. 基于植被生态需水的隧道排水量确定方法研究. 铁道学报, 2013, 35(7): 107-113.
- [90] 刘翠容, 姚令侃. 隧道工程地下水处理与生态环境保护. 铁道建筑, 2005, (3): 24-27.
- [91] 魏德照, 潘建平. 利用遥感进行隧道建设生态环境动态变化监测. 地理空间信息, 2011, 9(1): 16-19.
- [92] Sjölander-Lindqvist A. Conflicting perspectives on water in a Swedish railway tunnel project. Environmental Values, 2005, 14(2): 221-239.

- [93] Kværner J, Snilsberg P. The Romeriksporten railway tunnel- drainage effects on peatlands in the lake Northern Puttjern area. *Engineering Geology*, 2008, 101(3/4): 75-88.
- [94] Spross J, Larsson S. On the observational method for groundwater control in the Northern Link tunnel project, Stockholm, Sweden. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 2014, 73(2): 401-408.
- [95] 杨长健. 雪峰山隧道隧址区地下水土壤环境影响评价研究[D]. 长沙: 中南大学, 2007.
- [96] Liu J C, Shen L C, Wang Z X, Duan S H, Wu W, Peng X Y, Wu C, Jiang Y J. Response of plants water uptake patterns to tunnels excavation based on stable isotopes in a karst trough valley. *Journal of Hydrology*, 2019, 571: 485-493.
- [97] Zheng W, Wang X L, Tang Y, Liu H, Wang M, Zhang L J. Use of tree rings as indicator for groundwater level drawdown caused by tunnel excavation in Zhongliang Mountains, Chongqing, Southwest China. *Environmental Earth Sciences*, 2017, 76(15): 522.
- [98] Von der Lippe M, Kowarik I. Do cities export biodiversity? Traffic as dispersal vector across urban-rural gradients. *Diversity and Distributions*, 2007, 14(1): 18-25.
- [99] Dark S J. The biogeography of invasive alien plants in California: an application of GIS and spatial regression analysis. *Diversity and Distributions*, 2004, 10(1): 1-9.
- [100] 王石春, 陈光宗. 隧道水文地质环境变化及其对生态环境影响的评估. *世界隧道*, 1998, (5): 8-13.
- [101] 陈强, 朱宝龙, 刘少巍, 魏有仪, 金强国. 岩溶地区地下工程对环境影响的初步分析. *水土保持学报*, 2003, 17(5): 96-99.
- [102] Yang F R, Lee C H, Kung W J. The impact of tunneling construction on the hydrogeological environment of "Tseng-Wen Reservoir Transbasin Diversion Project" in Taiwan. *Engineering Geology*, 2009, 103(1/2): 39-58.
- [103] 刘向远. 岩溶隧道施工中地下水环境负效应评价指标体系研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2007.
- [104] 刘建. 岩溶隧道地下水环境负效应评价体系研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2011.
- [105] 王梅, 郑炜, 郭军. 岩溶山区隧道工程地下水渗漏引起的环境负效应评价指标体系初建. *公路交通技术*, 2015, (6): 135-138.
- [106] 毛正君. 脆弱生态区隧道群施工期地下水运移特征及环境效应研究[D]. 西安: 长安大学, 2013.
- [107] 刘庆晨. 邻近施工对天津既有地铁隧道的影响及保护研究[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- [108] 宋文杰, 董军, 崔玉萍, 刘德华. 多种因素对新建隧道下穿既有地铁车站力学性能影响的研究//第22届全国结构工程学术会议论文集. 乌鲁木齐: 中国力学学会, 工程力学杂志社, 2013.