

文章编号: 1001-1986(2010)06-0043-05

特长隧道岩溶涌水量预测方法分析

郭纯青¹, 胡君春², 李庆松³

(1. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 广西 桂林 541004; 2. 云南省煤炭地质勘查院, 云南 昆明 650218; 3. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004)

摘要: 由于岩溶区隧道穿越空间的复杂性、多变性和特殊性, 加之地区差异性和水文循环系统的不确定性, 各类预测方法均存在其自身的缺点, 致使涌水量预测与实际存在一定差异。从水文机理和岩溶水的运动特征出发, 结合岩溶区快速补给与慢速补给的差异与特征, 采用水均衡法、地下水径流模数法和隧道涌水专家评判系统 3 种方法, 对金奎地特长隧道岩溶涌水进行预测分析。结果显示, 水均衡法计算结果值最大, 径流模数法计算结果值最小, 专家评判系统计算结果值在二者之间。经验证, 专家评判系统更为精确, 该方法强调次降雨对隧道岩溶涌水的作用, 提高了隧道岩溶涌水量预测的精度。

关键词: 滇池补水工程; 金奎地隧道; 岩溶涌水; 岩溶灾害

中图分类号: P641 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2010.06.009

Forecast and analysis of karst water bursting disaster in extra-long tunnel

GUO Chunqing¹, HU Junchun², LI Qingsong³

(1. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China;

2. Coal Geology Prospecting Institute of Yunnan Province, Kunming 650218, China;

3. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin 541004, China)

Abstract: Due to complexity, variability and specificity of tunnel through a karst area, added by regional differences and the uncertainty of the hydrological cycle, all kinds of forecasting methods have their own shortcomings, resulting in some difference between the forecasted water inflow and the actual water inflow. The paper, by combining the differences and characteristics of rapid and slow water recharge in karst area and from the hydrogeological mechanism and characteristics of karst water movement, used three methods, i.e., water balance method, groundwater runoff modulus method and Expert's Judging System to predict and analyze karst water bursting in Jinkuidi extra-long tunnel. The water volume calculated by water balance method was the biggest, that calculated by runoff modulus was the smallest, and that given by the expert system was medium. Mutual verification proved that the expert judging system was the most precise, the method emphasizes the effect of precipitation on karst water bursting in tunnel and increases the precision of karst water inflow prediction in tunnel.

Key words: Dianchi water recharge project; Jinkuidi extra-long tunnel; karst water bursting; karst disaster

据不完全统计, 国内外隧道涌水量超过 $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的大型涌突水事件中, 70% 都发生在岩溶隧道中。而在我国 30 余座岩溶长隧道中, 约 40% 发生过大于 $1.0 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的严重涌突水。众所周知, 由于岩溶发育的不均匀性及由此导致的岩溶管道化、河系化, 使得岩溶隧道涌水预测十分困难, 因此, 岩溶隧道涌水仍然是未来涌水预测的重点和难点^[1]。目前, 随着各学科快速发展, 特别是计算机的出现与高速发展, 为解复杂数学问题提供了强大支撑。隧道涌水预测的方法也不断更新, 方法多

种多样。主要有近似方法、地下水动力学法、水均衡法、降雨入渗法、地下水径流模数法、数值法和非线性理论方法^[2-6]等。此外, 还有地球物理化学法、灰色理论、模糊数学、数理化理论和虚拟变量多元回归方法等随机数学方法^[7-13]。但是鉴于岩溶区隧道穿越空间的复杂性、多变性和特殊性, 加之地区差异性和水文循环系统的不确定性, 各类预测方法都存在其自身的缺点, 致使涌水量预测与实际存在一定差异。本文在不同降雨频率与极端气候条件下, 结合岩溶发育特征、岩溶地下水系统和岩溶补给条

收稿日期: 2010-02-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(40972158)

作者简介: 郭纯青(1955—), 男, 辽宁沈阳人, 教授, 从事岩溶水文水资源、岩溶灾害及生态安全研究。

件,采用水均衡法、地下水径流模数法和隧道岩溶涌水专家评判系统 3 种方法,对金奎地特长隧道岩溶涌水进行预测分析。通过验证与对比,隧道岩溶涌水专家评判系统更为精确。

1 地质概况^[14]

金奎地隧道是牛栏江—滇池补水工程的重要输水通道(4+477.30~19+767.32),长 15.16 km,为特长隧道。隧道走向 S34°W 转 S55°W 接转 S25°W,拟设隧道断面为 3.5 m×4.4 m,为无压洞输水,入口底板高程为 1 970.523 m,出口底板高程为 1 962.943 m,底坡坡降为 0.5‰。

金奎地隧道经过区地形起伏较大,依次经过金奎地梁子、海嘎、沙溪、诺嘎梁子、石盆凹子,出口位于竹园冲沟,地形坡度 10°~45°,地势总体北、北东高,南、南西低,洞线分布高程 1 950~2 263 m,线路最高峰为金奎地梁子,山顶高程为 2 270.4 m,隧道最大埋深约 284 m。沿线地貌按成因可划分为:岩溶中山地貌、构造侵蚀中山地貌、构造侵蚀—溶蚀中山地貌和侵蚀—堆积山间河谷地貌。地下水类型有岩溶水、基岩裂隙水和孔隙水,受降水补给。隧道沿线地层出露较多,从寒武系—新生界第四系地层均有出露。岩性较复杂。隧道线位于刚纪村向

斜的南东翼,在洞线的北东发育区域性断裂鲁冲—车乌逆冲(F₁₁₂)断裂,距洞线最近处约 470 m,对隧道围岩完整性有影响。

1.1 岩溶发育特征

岩溶地貌形态为残留峰丛夹溶蚀凹地,而在岸坡、河槽地带以落水洞、水平溶洞发育为主。溶沟溶槽次之,在雨季成为地表水的汇流径流通道。溶洞、伏流进出口、暗河管道等规模大的岩溶形态分布都集中分布于河谷中。

1.2 岩溶水文地质特征

金奎地隧道穿越区有松散岩类孔隙水、基岩裂隙水、碳酸盐岩岩溶水 3 种类型。地下水主要接受大气降水补给,输水线路最低排泄基准面为牛栏江,其补给、径流、排泄受地形地貌、地层岩性、地质构造等条件控制明显(图 1)。但由于在纯碳酸盐岩分布区,岩溶水文地质条件和结构复杂,由表层岩溶带、垂直入渗带、水平径流带等多类型岩溶赋水空间,控制了地下水的补、径、排路径,不同降雨强度明显控制和影响地下水的补给径流排泄,较为突出的是岩溶区的快速补给与慢速补给,有些地段以表层岩溶水方式排泄、有些地方以溢洪方式排泄、而另有些地方以悬挂水的方式排泄,最终以各种各样的径途汇入牛栏江。

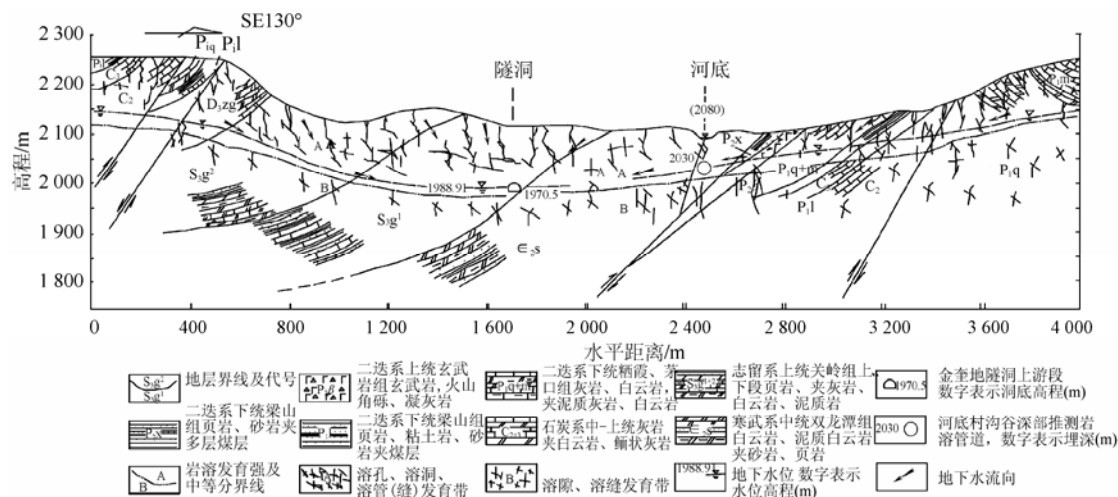


图 1 金奎地隧道(河底)水文地质剖面图

Fig. 1 Hydrological section of Jinkuidi tunnel (river bed)

2 隧道涌水量预测

2.1 计算参数

降雨量主要参考寻甸气象站近 50 a 的统计数据。针对气候变化的不确定性与隧道涌水的特殊性、多变性和瞬时性,对 24 h 最大降水量 142.4 mm/d(历史极端气候,1964 年 7 月 1 日)、多年日平均降雨量

71.9 mm 和多年平均各月降雨量(表 1)等 3 种降雨情况进行计算。根据金奎地隧道的地质条件(表 2),划分不同的计算单元及计算分区(图 2)。

2.2 隧道涌水量计算

2.2.1 水均衡法

水均衡法是根据水均衡原理,查明岩溶隧道施

表 1 寻甸多年平均各月降雨量特征值
Table 1 The average monthly rainfall of many years

mm

月份	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	全年
降雨量	14.2	15.4	15.6	26.3	91.7	199.8	202.6	187.4	137.0	84.6	36.2	11.1	1 022.1

表 2 金奎地隧道穿越地层统计表
Table 2 Strata penetrated by Jinkuidi tunnel

编号	隧道穿越地层的岩性	岩溶发育情况	隧道所处水力分带
I ₁	P ₁ q+m 灰岩、白云质灰岩、泥晶灰岩，白云岩	强发育区	包气带
I ₂	P ₁ q+m 灰岩、白云质灰岩、泥晶灰岩，白云岩	强发育区	饱水带
I ₃₋₁	D ₃ zg 白云岩、夹泥质白云岩、砾岩、页岩	中等发育	饱水带
I ₃₋₂	S ₃ g ² 页岩夹泥质灰岩、泥质白云岩、夹页岩、砂岩	强发育区	饱水带
I ₄	D ₃ zg 白云岩、夹泥质白云岩、砾岩、页岩	强发育区	饱水带
I ₅	C ₂₊₃ 灰岩夹白云岩、泥晶灰岩、鲕状灰岩 C ₁ d ^s 灰岩夹白云岩、泥晶灰岩 C ₁ b 灰岩、白云质灰岩夹白云岩	强发育区	饱水带

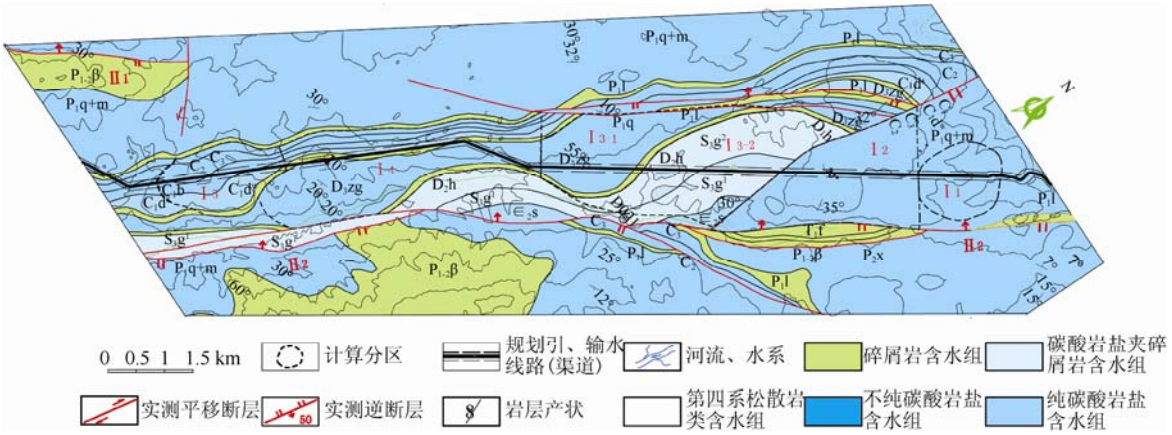


图 2 金奎地隧道岩溶涌水计算分区图

Fig. 2 Zonation for calculating karst water inflow in Jinkuidi tunnel

工期水均衡各收入、支出部分之间的关系，进而获得施工段的涌水量。水均衡法能给出任意条件下进入施工地段的总的“可能涌水量”而不能用来计算单独岩溶隧道的涌水量。当施工地段地下水的形成条件较简单时，采用水均衡法有良好的效果，如分水岭地段、小型自流盆地等。水均衡法的关键是均衡式的建立，即均衡要素的测定。但是在解决这一问题时，遇到了一个困难，就是天然条件下的水均衡关系在岩溶隧道的施工过程中常常遭受强烈的破坏，如强烈的降压疏干使地下水运动的速度和水力坡降增大等等。水均衡法虽然有种种不足，但它有一个最大的特点，就是能在查明有保证的根本补给来源的情况下，确定岩溶隧道的极限涌水量值。因此，在补给源有限时，它可以作为核对其他方法计算结果的一种补充性计算方法。

根据 DL/T5338-2006《水电水利工程喀斯特工程地质勘察技术规程》的规定，并结合工作区工程地质条件、水文地质条件，采用“水均衡法”进行隧道岩溶涌水量的预测，采用式(1)计算。

$$Q=(1\ 000\alpha A H_s/86\ 400d)S\ ,\quad (1)$$

式中 Q 为洞室或洞群涌水量 m^3/s ； α 是入渗系数，一般可采用 0.3~0.6； A 为汇水面积， km^2 ， H_s 是降水量， mm ； d 为计算时段天数； S 是涌入洞室水量占地下水径流总量的份额，一般为 0.1~0.4。计算中，充分考虑岩溶含水岩组类型、岩溶发育程度以及地形地貌等特点，计算结果见表 3。

2.2.2 地下水径流模数法

根据大气降渗补给的泉流量或由地下水补给的河流流量，求出隧道通过地段的地表径流模数，并将之视为隧道流域的地下水径流模数，然后再通过确定隧道的汇水面积，便可宏观、概略的预测隧道的正常涌水量。该方法的条件依据与水均衡法的条件相似。经过划分、统计和归类有效渗入水量，综合研究分析后，划分计算区，确定计算编号及涌水计算长度(图 2)。径流模数值，主要根据 1：20 万水文地质资料图取值。涌水量是径流模数值与汇水面积的乘积，径流模数的汇水面积参考专家评判系统降雨入渗面积及野外调查现

表 3 各月涌水量计算结果
Table 3 Calculated monthly water inflow m³/s

编号	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
I ₁	0.023	0.025	0.026	0.043	0.150	0.327	0.331	0.306	0.224	0.138	0.059	0.018
I ₂	0.063	0.068	0.069	0.116	0.406	0.885	0.897	0.830	0.607	0.375	0.160	0.049
I ₃₋₁	0.045	0.049	0.049	0.083	0.290	0.633	0.642	0.593	0.434	0.268	0.115	0.035
I ₃₋₂	0.059	0.064	0.065	0.110	0.384	0.836	0.848	0.784	0.573	0.354	0.152	0.046
I ₄	0.096	0.104	0.105	0.178	0.620	1.351	1.369	1.267	0.926	0.572	0.245	0.075
I ₅	0.028	0.030	0.030	0.051	0.179	0.390	0.396	0.366	0.268	0.165	0.071	0.022
合计	0.314	0.341	0.345	0.582	2.029	4.421	4.483	4.147	3.031	1.872	0.801	0.246

场判定,定为专家评判系统降雨入渗面积的 2 倍。
计算结果见表 4。

表 4 地下水径流模数法计算表
Table 4 Water inflow calculated by groundwater runoff modulus method

编号	计算长度 /km	计算面积 /km ²	径流模数 /L·(s ⁻¹ ·km ⁻²)	涌水量 /m ³ ·s ⁻¹
I ₁	1.528 6	3.14	18.12	0.057
I ₂	2.355 0	8.5	18.12	0.154
I ₃₋₁	2.305 8	6.84	7.56	0.052
I ₃₋₂	2.206 8	9.04	4.8	0.043
I ₄	4.506 9	14.6	7.56	0.110
I ₅	2.256 89	4.22	15.61	0.066
合计	15.159 99			0.482

2.2.3 隧道岩溶涌水专家评判系统^[15]

隧道岩溶涌水专家评判系统是从岩溶发育特征和岩溶地下水流态出发,全面诠释隧道与岩溶地下水的相互作用,是一种较实用的预测方法。其方法为,首先,通过准确的隧道工程剖面确定硐身是否揭露区域强岩溶层。隧道硐身是否揭露这些岩溶层,揭露宽度多少,是判断突水的首要条件。第二,岩溶层确定后,必须从区域角度调查该层中的岩溶水系统及类型,此时必须通过扩大范围调查及专门性工作,查清岩溶水系统的来龙去脉,往往远离隧道线的暗河也会在地下深处与隧道联通。第三,必须通过钻孔水文地质观测,确定硐身所处的水动力分带,这是决定涌水特征及涌水量评价方法的重要因素。最后通过综合调查、岩溶结构面三维分析及深

岩溶研究判断隧道揭露溶洞、溶隙的规模和位置。计算步骤,先分析判断隧道所处岩溶地下水动力分带;其次,依据隧道所处岩溶地下水动力分带,确定计算公式。**a.** 岩溶隧道位于包气带,涌水量预测采用式(2)计算,计算结果为隧道涌水量;**b.** 岩溶隧道位于饱水带,涌水量采用式(2)与式(3)联合计算,此时, Q_f 与 Q_s 的代数和为隧道涌水量。

$$Q_f=NAFa/T \quad , \quad (2)$$

式中 N 为涌水系数; A 为降雨量,mm; F 为补给区汇水面积,km²; a 为降雨入渗系数; T 为降雨周期,d。

$$Q_s=NF\mu H/t \quad , \quad (3)$$

式中 μ 为岩石孔隙度; H 为隧道底板以上含水层厚度,m; t 为疏干时间,d。

本次对金奎地隧道所穿越地层岩溶发育情况及硐体所处位置(表 2)、计算分区(图 2)和计算选取参数(表 5)系统分析,结合相应的公式,其计算结果见表 6。

表 5 专家评判系统选取参数统计及计算区划分表
Table 5 Parameters and division of calculated areas of expert judging system

编号	面积 /km ²	降雨入 渗系数	涌水 系数	含水层 厚度 水头/m	岩石 孔隙度	隧道所处水 动力分带
I ₁	1.57	0.22	0.19			包气带
I ₂	4.25	0.27	0.24	33.00	0.000 5	饱水带
I ₃₋₁	3.42	0.22	0.19	38.00	0.000 5	饱水带
I ₃₋₂	4.52	0.18	0.15	20.00	0.000 5	饱水带
I ₄	7.3	0.2	0.17	74.00	0.000 5	饱水带
I ₅	2.11	0.22	0.19	48.00	0.000 6	饱水带

表 6 各施工时段岩溶涌水量预测结果
Table 6 Predicted water inflow in different working intervals

施工段		涌水量/m ³ ·s ⁻¹											
编号	长度/km	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月
I ₁	1.528 6	0.01	0.01	0.01	0.02	0.07	0.15	0.15	0.14	0.10	0.06	0.03	0.01
I ₂	2.355 0	0.08	0.09	0.09	0.12	0.33	0.68	0.68	0.64	0.48	0.31	0.15	0.07
I ₃₋₁	2.305 8	0.05	0.05	0.05	0.07	0.18	0.36	0.36	0.34	0.26	0.17	0.09	0.05
I ₃₋₂	2.206 8	0.04	0.04	0.04	0.05	0.15	0.30	0.30	0.28	0.21	0.14	0.07	0.03
I ₄	4.506 9	0.15	0.15	0.15	0.18	0.37	0.68	0.69	0.64	0.50	0.35	0.21	0.14
I ₅	2.256 9	0.04	0.04	0.04	0.05	0.12	0.23	0.23	0.22	0.17	0.11	0.06	0.04
合计	15.16	0.37	0.38	0.39	0.50	1.22	2.40	2.43	2.26	1.71	1.14	0.61	0.34

经过 3 种不同方法计算，按多年平均月降雨量绘制曲线图 3(水均衡法和专家评判系统法)，可以直观看出：各涌水高峰值均出现在 6—8 月，即出现在丰水期。隧道开挖应该避开，选择枯水期施工，即在 1—2 月和 12 月。分析对比 3 种计算结果(表 7)，水均衡法计算结果值最大，径流模数法计算结果值最小，专家评判系统计算结果值在二者之间；各段涌水风险性和涌水量值排序是一致的。

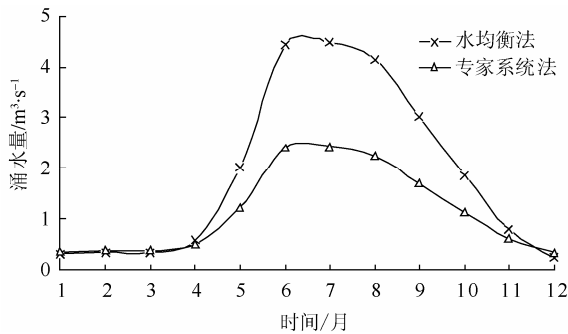


图 3 水均衡法与专家系统法计算结果对比图

Fig. 3 Comparison of calculated results of water balance method and expert system

表 7 3 种方法计算结果对比表 m^3/s

Table 7 Comparison of the three calculation methods

编号	水均衡法		专家评判系统法		地下水径流模数法 *
	降雨量为 71.9 mm	降雨量为 142.4 mm	降雨量为 71.9 mm	降雨量为 142.4 mm	
I ₁	0.12	0.23	0.055	0.108	0.057
I ₂	0.32	0.63	0.268	0.493	0.154
I ₃₋₁	0.23	0.45	0.148	0.264	0.052
I ₃₋₂	0.30	0.60	0.117	0.217	0.043
I ₄	0.49	0.96	0.313	0.515	0.110
I ₅	0.14	0.28	0.100	0.172	0.066
小计	1.59	3.15	1.001	1.769	0.482

*地下水径流模数法不需要降雨量。

3 结 论

a. 水均衡法能给出任意条件下进入施工地段的总的“可能涌水量”，而不能用来计算单独岩溶隧道的涌水量。

b. 地下水径流模数法根据大气降水补给的泉流量或由地下水补给的河流流量，求出隧道通过地段的地表径流模数，并将之视为隧道流域的地下水径流模数，然后再通过确定隧道的汇水面积，便可

宏观、概略的预测隧道的正常涌水量。

c. 隧道岩溶涌水专家评判系统综合水均衡法与径流模数法的特征，细致刻画出不同隧道所穿越段的各种形态特征和空间关系，较为客观和准确描述了岩溶地下水流与隧道的相互作用，并结合岩溶发育特征、岩溶地下水系统和岩溶补给条件，其预测结果客观反应不同隧道在不同降雨条件下的涌水量，该方法在一定程度上提高了隧道岩溶涌水量的预测精度。

参考文献

- [1] 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[J]. 水文地质工程地质, 2002, 29(4): 50-54.
- [2] 付开隆. 渝遂高速公路中梁山隧道岩溶塌陷及涌水量分析[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(2): 107-110.
- [3] 李忠,杨杰,李峰,等. 新保纳隧道涌水防治的研究[J]. 石家庄铁道学院学报, 2001, 14(1): 7-10.
- [4] 朱大力,李秋枫. 预测隧道涌水量的方法[J]. 工程勘察, 2000(4): 20-24.
- [5] 聂志宏,张弥,白李妍. 用经验公式计算隧道用水量[J]. 铁道标准设计, 2000(20): 6-7.
- [6] 董兴文. 矿井最大涌水量计算与参数确定[J]. 工程勘察, 1995(1): 24-28.
- [7] 黄涛,杨立中. 渗流-应力-温度耦合下裂隙围岩隧道涌水量的预测[J]. 西南交通大学学报, 1999, 34(5): 554-559.
- [8] 王延福,靳德武,曾艳京,等. 岩溶矿井煤层底板突水系统的非线性特征初步分析[J]. 中国岩溶, 1998, 17(4): 331-341.
- [9] 张瑾,王延福,曾燕京. 神经网络专家系统在煤矿突水预测中的应用[J]. 微电子学与计算机, 1995(5): 13-19.
- [10] 温树林,吴世林. TSP203 在云南元磨高速公路隧道超前地质预报中的应用[J]. 地球物理学进展, 2003, 18(3): 465-471.
- [11] 程学军,蔡美峰,李长洪. 灰色—突变模型及其在声发射监测预报中的应用[J]. 中国矿业, 1997, 6(2): 37-39.
- [12] 吴慈生,白勤虎,王新元. 基于模糊聚类分析的矿井突水预测及危险性评价[J]. 中国安全科学学报, 1995, 5(增刊): 79-83.
- [13] 王玉振,王连国,周文安. 用数量化理论建立矿井涌水危险性评价模型[J]. 系统工程理论与实践, 1996, 16(4): 75-81.
- [14] 云南省牛栏江—滇池补水工程库区、泵站及输水线路(干河—糟家湾段)岩溶水文地质专题研究报告[R]. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 桂林理工大学, 2009.
- [15] 韩行瑞. 岩溶隧道涌水及其专家评判系统[J]. 中国岩溶, 2004, 23(3): 209-218.