

# 南方岩溶区公路隧道施工期围岩分级方法及其应用

侯福昌<sup>1,2</sup>, 欧孝夺<sup>1</sup>, 苏建<sup>1</sup>, 唐迎春<sup>1</sup>, 李结全<sup>1,2</sup>, 潘鑫<sup>1</sup>

(1. 广西大学工程防灾与结构安全教育部重点实验室, 南宁 530004; 2. 南宁瑞宇建筑科技有限公司, 南宁 530007)

**摘要:**针对南方岩溶区公路隧道施工期围岩分级特点,分析获得以岩石强度、岩体完整程度、地下水状态、结构面状态、结构面走向与隧道轴线关系和岩溶发育对隧道影响程度为基础的遗传神经网络模型和岩溶发育对隧道影响程度指标评价标准。并将其运用于广西河池六寨—宜州高速公路天生桥隧道和关上二号隧道进行实例验证,将分级结果与专家判定级别进行对比,准确率达93.3%。

**关键词:**公路隧道;南方岩溶区;围岩分级;施工期;遗传神经网络

中图分类号:U459.2

文献标志码:A

文章编号:1674-4764(2012)S1-0258-05

## The Method on Surrounding Rock Classification for Highway Tunnel Construction Period in The Karst Areas of South China

HOU Fuchang<sup>1,2</sup>, OU Xiaoduo<sup>1</sup>, SU Jian<sup>1</sup>, TANG Yingchun<sup>1</sup>, LI Jiequan<sup>1,2</sup>, PAN Xin<sup>1</sup>

(1. Ministry of Education Key Laboratory of Disaster Prevention and Structural Safety, Guangxi University, Nanning 530004,

2. Nanning Ruiyu Architecture and Technology Co. Ltd, Nanning 530007)

**Abstract:** Through the statistical analysis of analyzed the particularity of karst surrounding rock classification, finally obtained the rock classification index system of south karst highway tunnel construction based on rock strength, rock complete coefficient, groundwater state, structural plane state the structural plane strike to tunnel influence, karst development to tunnel influence. And the model is applied to tianshengqiao tunnel and guanshang 2 tunnel with the example verification, and compared with the classification results and experts judgment to get the accuracy is 93.3%.

**Key words:** highway tunnel; karst areas of south china; surrounding rock classification; construction period; genetic neural network

岩溶,又名喀斯特,是指可溶性岩石受含有二氧化碳的流水溶蚀而形成的特殊地质形态。现行隧道设计范围岩分级方法适用于一般岩石,对于特殊围岩(如胀缩性岩土、多年冻土及岩溶发育性岩石)并不适应<sup>[1]</sup>。岩溶在我国分布广泛,主要集中在广西、湖南、贵州、云南及四川南部地区,同时这些地区也是我国公路隧道分布最多的地区。围岩分级贯穿于整个隧道建设过程,但勘察阶段围岩分级的准确度不能满足隧道施工的要求<sup>[2]</sup>,随着隧道的开挖,围岩不断被揭露,更多的地质信息充分暴露出来<sup>[3-6]</sup>。因此,开展施工期围岩分级研究,及时指导隧道施工具有现实意义。

### 1 施工期岩溶围岩分级指标分析

#### 1.1 岩石强度

岩石强度指在外荷载作用下,岩石抵抗变形直至破坏的能力。表达这一性质的定量指标主要有岩石单轴饱和强度和回弹值、点荷载强度等力学指标。岩石单轴饱和强度要求在实验室内测定,显然达不到“快速测定”的需要,回弹试验和点荷载试验数据离散性较大,也不适合作为施工期岩石强度试验方法。建议采用《公路隧道设计规范》中的岩石强度定

性定量评价方法,即根据岩石受锤击后的声音和状态,锤击时的手感,以及岩石浸水后的反应等来综合定性判定岩石强度指标值。

#### 1.2 岩体完整程度

岩体完整程度是指岩体内以裂隙为主的各类地质界面的发育程度以及被裂隙切割成的单元块体的大小。裂隙越多则单元块体越小,其完整程度也就越差。《公路隧道设计规范》以及《工程岩体分级标准》建议采用岩石完整系数 $K_v$ 作为评价岩石完整程度的指标,所以岩溶围岩分级岩石完整程度指标也用岩石完整系数 $K_v$ 来表示。目前在实际工程中较为常用的岩石完整程度试验方法主要有声波测速法、岩石体积节理换算法、规范性定量判别法三种。声波测速法测试繁琐;对于岩石体积节理换算法,研究表明利用每米侧线上裂隙条数来定义岩土体积节理数不够准确<sup>[7]</sup>。建议采用《公路隧道设计规范》中的岩体完整程度定性定量评价方法,即根据岩体的结构面发育程度、主要结构面类型及相应结构类型等对岩体完整程度进行定性划分,再由定性指标与定量指标的对应关系,得出其量化值。

收稿日期:2012-04-12

基金项目:国家自然科学基金资助(51168004);广西自然科学基金重点项目(2010GXNSFD013002);工程防灾与结构安全教育部重点实验室基金项目(2009TMZR005)

作者简介:欧孝夺(1970-),男,博士,博士生导师,主要从事地下工程教学与研究工作,(E-mail)ouxiaoduo@163.com。

### 1.3 地下水状态

地下水会对石灰岩等溶蚀性岩石和结构面中易溶胶结物以及充填物中的细小颗粒产生溶蚀作用,可以使岩石软化、疏松,充填物泥化,强度降低等,对围岩质量产生重要影响。地下水的水压和流量是衡量地下水状态的重要指标,但水压和流量在现场较难把握,往往需要埋设特定的仪器才能测定。建议采用《铁路隧道设计规范》(TB 10003—2005)中地下水分级标准进行地下水状态评价,即根据隧道渗水量和出水状态对地下水进行定性划分,再由定性指标与定量指标的对应关系,得出其量化值。

### 1.4 结构面状态

一般表征岩体抗剪强度性质的定量指标主要是内摩擦角  $\phi$  和粘聚力  $c$ ,由于直接测定结构面内摩擦角和粘聚力比较困难,建议采用《水利水电工程地质勘察规范》(GB 20287—99)中的结构面状态评分标准,即根据岩体的结构面粗糙程度、蚀变程度及填充状态等对岩体结构面状态进行定性划分,再由定性指标与定量指标的对应关系,得出其量化值。

### 1.5 结构面走向与隧道轴线关系

结构面的产状不同,与隧道开挖轴线的构造形迹关系不同,其对隧道稳定性的影响程度也不同。例如具有水平节理的薄层岩层,隧道顶部往往很不稳定,容易出现掉顶等现象;当岩层倾向较陡且走向与隧道轴线夹角很大时,则对围岩稳

定性无不利影响等。建议采用地质罗盘仪现场获得,参照 RMR 系统分级法<sup>[8-9]</sup>中结构面走向与隧道轴线关系指标评价准则进行判定。

### 1.6 岩溶发育对隧道影响程度

岩溶的发育程度直接影响隧道围岩稳定性,其对隧道的影响程度指标是石灰岩等可溶性岩体与一般性岩体最重要的区别。由于可溶性岩石的特殊性,岩溶发育的复杂性,致使岩溶发育对隧道的影响程度准确值很难确定。要解决岩溶发育对隧道的影响程度的划分问题,首先要解决岩溶发育等级的划分。综合岩溶研究成果<sup>[10-11]</sup>,因岩溶发育对围岩稳定性产生影响的因素主要有岩溶发育等级、岩溶充填物质、地下水状态、溶洞规模、溶洞所处方位五个因素。纵观所有岩溶问题,水是产生岩溶问题最重要的因素,本文将地下水状态单独作为一个指标而不作为岩溶发育对隧道影响程度的次指标考虑,所以这里仅讨论其他四个影响因素的划分。

#### 1.6.1 岩溶发育等级划分

勘察阶段的岩溶发育是根据岩溶现象、岩溶密度、钻孔岩溶率来评价,具有很大的局限性。隧道开挖后岩溶形态充分暴露,此时是评价岩溶发育等级合适时机。本文采用文献<sup>[12]</sup>提出的依据采用可溶岩岩性、构造切割情况和地下水径流循环条件评价岩溶发育等级的方法(如表 1 所示)。

表 1 岩溶发育等级影响因素评价表

因素	主要特性	定性描述	系数	
可溶岩性	可溶性是岩溶发育的前提条件。岩石的可溶性越强,就越有利于岩溶发育。在常见的碳酸盐类岩石中,纯石灰岩比白云质灰岩及白云岩易受溶蚀。在各种碳酸盐类岩石分布地区,岩溶主要沿着厚层纯灰岩发育。	纯质石灰岩	岩溶最易发育	0.20
		白云质灰岩及白云岩	岩溶发育次之	0.15
		大理岩	岩溶发育较弱	0.10
		泥质灰岩、泥灰岩及泥质、白云质角砾岩	岩溶发育很弱	0.05
		蚀变灰岩、砂卡岩	岩溶发育甚微	0.01
可溶岩的厚度	厚度越大 仅为可溶性岩石夹层	岩溶发育越有利	0.10	
		岩溶发育不利	0.05	
与非可溶岩接触情况	地下水常常运动汇集于碳酸盐类岩石与非可溶性岩层或岩体的接触带,由于地下水流的汇集并沿着接触带流动,岩溶常沿着可溶岩层与非可溶岩层的接触带发育。	接触	0.10	
		不接触	0.05	
节理、裂隙发育情况	可溶性岩石中的构造裂隙,为地下水的运动提供了有利条件,地下水不断沿着岩石裂隙运动,对可溶岩进行化学溶蚀,形成空洞。	构造裂隙的延伸方向常常控制着地下岩溶的发展方向	0.05	
构造切割情况	层间产生层面张裂隙或层面扭裂隙,为地下水活动提供运移通道;可溶岩与非可溶岩接触带,特别当非可溶岩为相对隔水层时,在地下水作用下,易发育岩溶。	易沿顺层发育岩溶	0.05	
		易沿接触带部位发育岩溶	0.05	
		在断层交叉部位易形成大型溶洞、地下天窗或湖池	0.10	
褶皱	可溶岩层的断层破碎带,特别是张性断层破碎带,利于地下水的运移,地下岩溶特别容易发育,常发育为带有地下暗河等的大型岩溶。在褶皱构造的轴部,纵张裂隙(断层)较多,有利于地下水活动,地下水易沿着张裂隙溶蚀扩展。	沿褶皱轴部,易形成溶蚀裂隙和溶洞,甚至大型岩溶或暗河	0.05	
地下水径流循环条件	地下水径流条件越好、流速越快的区域,岩溶越容易发育,相应的隧道围岩级别就越差。	极好 好 较好 较差 差	0.30 0.20 0.15 0.10 0.05	

该岩溶发育等级评价方法将上表所列的可溶岩性、构造切割情况、地下水径流循环条件 3 项根据“共性提升”的原则,进行得分相乘,其乘积即作为岩溶发育程度评价系数。为体

现岩溶发育对隧道影响程度指标 4 个影响因素之间的并列关系,先将岩溶发育等级评价系数进行归一化处理,然后再作为岩溶发育等级对隧道影响程度的评价系数(如表 2 所示)。

表 2 岩溶发育等级对隧道影响程度  $S_v$  评价表

评价系数	1.00~0.80	0.80~0.40	0.40~0.10	0.10~0.05	0.05~0.00
岩溶发育等级	很发育	发育	较发育	轻微发育	不发育
影响程度	影响极大	影响较大	影响中等	较小影响	几乎不影响

### 1.6.2 岩溶充填物对隧道影响程度划分

岩溶充填物主要由物理沉积和化学沉积组成,岩溶充填物本身的力学性质往往很差,在地下水动力条件和施工扰动的影响下,极易发生隧道坍塌,溶洞中充填物质不同,对隧道的影响程度也不同(如表 3 所示)。

表 3 岩溶充填物对隧道安全影响程度系数  $K_c$ 

充填物类型	对隧道施工稳定性的影响程度	影响系数 $K_c$
无充填	几乎无影响	0.0~0.2
粘土	极严重	0.8~1.0
粘土+块碎(砾)石	很严重	0.6~0.8
砂土	很严重	0.6~0.8
砂土+块碎(砾)石	严重	0.4~0.6
粘土+砂土+块碎(砾)石	很严重	0.6~0.8
块碎(砾)石	较严重	0.2~0.4
碳酸钙沉积物	很严重	0.6~0.8

### 1.6.3 溶洞规模对隧道影响程度划分

南方岩溶区溶洞具有一定的贯通性,岩溶发育管道同时是地下水流通的管道。一般来讲,溶洞规模越大,溶洞充填物质越多,溶洞连通性越好,地下水的流通也越好。对于溶洞规模大小的界限判定,目前鲜有文献涉及。针对于此,本文参照《隧道工程岩体分级》中关于岩溶水规模的判定标准,提出溶洞规模大小的判定标准(如表 4 所示)<sup>[13]</sup>。

表 4 溶洞规模对隧道安全影响系数  $K_w$  评价表

溶洞规模	小	中	大
影响系数 $K_w$	0.1~0.4	0.4~0.7	0.7~1.0

### 1.6.4 溶洞分布位置对隧道影响程度划分

研究成果表明,溶洞的分布位置对隧道围岩稳定性影响

很大<sup>[14]</sup>。分布于隧道顶部的溶洞主要引起围岩径向位移的增大,对拱顶下沉位移的影响程度大于其对侧壁位移的影响程度。分布于隧道侧面的溶洞主要使隧道处于“偏压”状态,使隧道的侧向位移增大。处于隧道底部的溶洞则对隧道围岩稳定性影响甚微。根据以上分析,初步建立溶洞分布位置对隧道影响程度划分标准(如表 5 所示)。

表 5 岩溶分布位置对隧道安全影响程度系数  $K_p$  评价表

溶洞分布位置	影响程度	影响系数 $K_p$
中部或底部	几乎无影响	0.1
侧壁	一般	0.3
顶部	严重	0.6

综上所述,可以获得岩溶发育等级、岩溶充填物、溶洞规模、溶洞分布位置对隧道影响系数,因目前鲜有研究成果涉及各因素对隧道影响的权重比较,本文假定各因素对隧道影响权重相同且相互独立,且 4 个因素对指标六(岩溶发育对隧道影响程度)共同产生影响,故可运用下式:

$$C_k = S_v + K_c + K_w + K_p$$

计算出岩溶发育对隧道影响程度指标  $C_k$  值。

## 2 围岩分级模型的建立及应用

### 2.1 遗传神经网络模型训练集合的建立

根据以上围岩分级指标试验方法,结合瑶寨隧道施工量测获得 47 个经专家论证过的掌子面分级指标数据,将所获数据及专家分级结果作为遗传神经网络训练集合<sup>[15]</sup>。为方便分级模型的应用,将岩石强度、结构面状态和岩溶发育对隧道影响程度 3 个指标数据进行“归一化”处理,获得部分训练结果数据(如表 6 所示)。

表 6 部分围岩分级指标数据

序号	桩号	围岩分级指标						围岩级别
		$H$	$K_v$	$W$	$\lambda$	$\gamma$	$C_k$	
1	YK45+811	0.60	0.40	0.90	0.6	0.3	0.5	IV
2	YK45+813	0.60	0.04	0.85	0.6	0.6	0.2	IV
3	YK45+815	0.35	0.35	0.95	0.5	0.1	0.5	IV
4	YK45+821	0.30	0.40	0.60	0.5	0.1	0.3	V
5	YK45+850	0.40	0.25	0.90	0.5	0.2	0.1	IV
6	YK45+866	0.50	0.35	0.90	0.5	0.2	0.1	IV
7	YK45+880	0.50	0.25	0.90	0.5	0.2	0.0	IV

续表 6 部分围岩分级指标数据

序号	桩号	围岩分级指标						围岩级别
		$H$	$K_v$	$W$	$\lambda$	$\gamma$	$C_k$	
8	YK45+900	0.45	0.35	0.55	0.5	0.2	0.6	V
9	YK45+902	0.20	0.10	0.60	0.5	0.0	0.7	V
10	YK45+965	0.50	0.40	0.85	0.5	0.4	0.1	IV

注:遗传神经网络训练集合只包含了常见的Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ围岩,对于Ⅰ、Ⅱ、Ⅵ级围岩没有遇到。

### 2.2 遗传神经网络模型建立

根据遗传神经网络的计算方法和步骤,运用 MATLAB 构建遗传优化神经网络模型<sup>[16]</sup>,并通过遗传算法获得最优权值赋予神经网络结构进行训练,其结果如图 1、图 2 所示。

能够找到最小误差点。综合以上分析,网络训练误差达到目标要求,且各神经元获得最优解(权阈值)。至此网络模型的第一阶段(学习训练阶段)结束,可以进入第二阶段(工作运用阶段)。

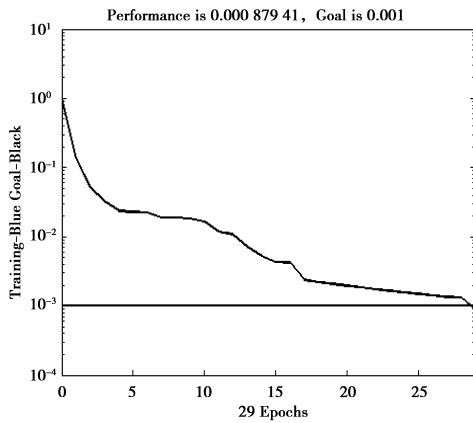


图 1 遗传神经网络模型训练曲线

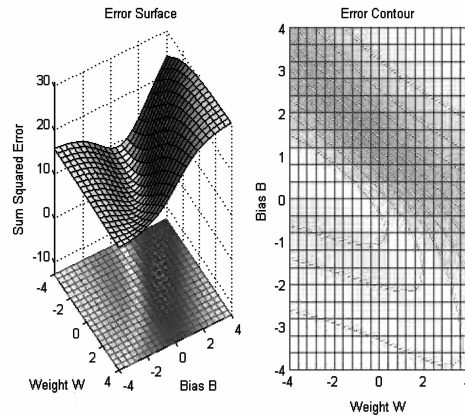


图 2 典型神经元误差曲面图

由图 1 可知,网络经过 29 次训练后达到网络误差收敛于误差目标值 0.001,网络训练终止。由图 2 神经元误差曲面图可以直观地观察网络性能,发现各神经元误差曲面图中

### 2.3 遗传神经网络模型的应用研究

将前面建立的围岩分级模型应用于广西河池六寨—宜州高速公路天生桥隧道和关上二号隧道 15 个掌子面进行围岩分级。其结果如表 7 和图 3 所示。

表 7 围岩分级模型判定结果

隧道	序号	桩号	围岩级别判定结果						评价等级
			I	II	III	IV	V	VI	
天生桥 隧道	1	YK28+606	0.010 5	-0.014 3	0.019 0	0.962 4	0.019 0	0.003 4	IV
	2	ZK28+620	0.001 3	0.004 8	-0.226 5	0.645 0	0.575 5	-0.000 1	IV
	3	ZK28+626	0.004 0	0.000 8	-0.008 5	1.026 9	-0.024 8	0.001 6	IV
	4	ZK28+482	-0.012 2	0.019 2	1.164 8	0.061 0	-0.224 0	-0.008 8	III
	5	YK29+200	0.012 8	-0.012 5	-0.002 7	0.153 2	0.839 1	0.010 1	V
	6	ZK28+485	0.008 1	-0.006 1	0.693 7	0.182 9	0.116 5	0.004 9	III
	7	YK28+650	-0.001 0	0.006 4	-0.008 2	1.011 1	-0.006 6	-0.001 7	IV
	8	YK28+651	0.003 7	0.000 2	-0.036 2	1.060 4	-0.029 8	0.001 7	IV
	9	YK28+635	-0.001 4	0.009 4	0.193 5	0.373 4	0.426 9	-0.001 8	V
	10	ZK29+268	-0.000 2	0.002 0	0.017 8	-0.047 7	1.028 7	-0.000 6	V
关上二 号隧道	11	YK33+411	0.011 0	-0.011 3	0.016 0	0.962 4	0.016 0	0.005 9	IV
	12	YK33+416	0.002 6	0.002 2	0.884 1	-0.199 7	0.309 6	0.001 2	III
	13	YK33+378	0.008 0	-0.003 3	-0.095 6	0.311 7	0.775 7	0.003 5	V
	14	ZK33+227	0.005 5	-0.007 6	-0.020 8	-0.041 2	1.062 1	0.002 0	V
	15	YK33+375	0.016 1	-0.012 8	0.018 0	0.593 4	0.377 7	0.007 6	IV

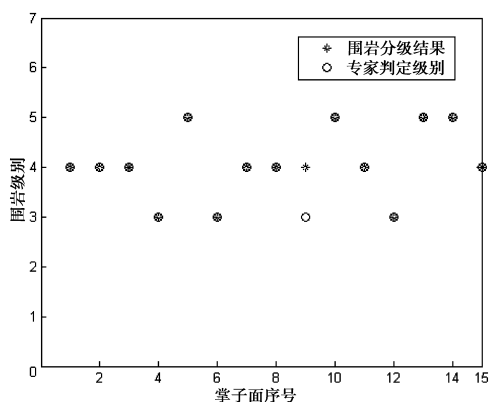


图 3 围岩分级结果与专家判定级别对比图

由表 7 可以看出,天生桥隧道桩号 YK28+606 处围岩级别为 I 级的可能性为 1%, II 级的可能性为 1%, III 级的可能性为 2%, IV 级的可能性为 96.2%, V 级的可能性为 2%, VI 级的可能性为 3%。所以,桩号 YK28+606 处围岩级别应为 IV 级。其他桩号处围岩级别依次类推即可获得。同时,从图 3 天生桥隧道和关上二号隧道 15 个掌子面围岩分级结果与专家判定级别对比发现,围岩分级模型准确率达 93.3%。

### 3 结论

目前,对于岩溶这种特殊岩体的围岩分级研究成果相对较少,理论尚未完善,需要进一步开展研究。本文针对南方岩溶区特点,运用遗传算法和神经网络理论建立南方岩溶区围岩分级模型,并将其成功运用于天生桥隧道和关上二号隧道,得出了以下结论:

1) 论文针对岩溶围岩分级的特殊性,提出采用岩溶发育对隧道影响因素的判定分值来构建岩溶发育对隧道影响程度指标。

2) 利用遗传神经网络理论解决了围岩分级指标和围岩级别之间的“模糊性”问题,有效地降低了人为因素的影响。

3) 将遗传神经网络模型运用于天生桥隧道和关上二号隧道进行可靠性检验,与专家判定级别进行对比,准确率达 93.3%,运用效果良好。

#### 参考文献:

- [1] Eric C D, Ozgur A, Haluk A, et al. Stability charts for the collapse of residual soil in karst[J]. Geotech. Engrg, 2009, 135(7): 925-931.
- [2] 段林娣, 宋成辉. 应用 BP 神经网络进行隧道围岩快速分级[J]. 中国安全科学学报, 2010, 20(2): 41-45.  
DUAN Lindi, SONG Chenghui. Application of BP neural network in the rapid classification of surrounding rock[J]. China Safety Science Journal, 2010, 20(2): 41-45.
- [3] Sapigni M, Berti M, Bethar E, et al. TBM performance estimation using rock mass classifications[J]. Internal Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2002, 39(6): 771-788.
- [4] De V L. SRC rock mass classification of tunnels under high tectonic stress[J]. Engineering Geology, 2003, 69(3): 273-285.
- [5] 余伟健, 高谦, 韩阳. 非线性耦合围岩分类技术及其在金川矿区的应用[J]. 岩土工程学报, 2008, 30(5): 663-669.

YU Weijian, GAO Qian, HAN Yang. Non-linear coupling classification technique of surrounding rock mass and its application in Jingchuan Mine[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008, 30(5): 663-669.

- [6] 陈功奇, 蒋建平, 秦博. 海底隧道围岩稳定性分析现状及方法[J]. 价值工程, 2010(9): 64.  
CHEN Gongqi, JIANG Jianping, Qin Bo. Analysis status and methods of subbottom tunnel surrounding rock stability[J]. Value Engineering, 2010(9): 64.
- [7] 李攀峰, 杨建宏, 杨建, 等. 节理岩体体积节理数  $J_v$  的新计算公式[J]. 工程地质学报, 2009, 2(17): 240-243.  
LI Panfeng, YANG Jianhong, YANG Jian, et al. New formulae for volumetric joint count  $J_v$  of jointed rock mass[J]. Journal of Engineering Geology, 2009, 2(17): 240-243
- [8] Faisal I, Shalabi, Husam A, et al. Elasto-plastic behavior of raghadan tunnel based on RMR and Hoek-Brown classifications[J]. Geotech. Geol. Eng., 2009, 27: 237-248.
- [9] 师伟, 史彦文, 韩常领, 等. RMR 围岩分级法与中国公路隧道围岩分级方法对比[J]. 中外公路, 2009, 29(4): 383-387.  
SHI Wei, SHI Yanwen, HAN Changling, et al. The method comparison between RMR surrounding rock classification and Chinese highway tunnel surrounding rock classification[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2009, 29(4): 383-387.
- [10] Filipponi M, Jianning P Y, Tacher L. Evidence of inception horizons in karst conduit networks[J]. Geomorphology, 2009, 106(1/2): 86-99.
- [11] Hareyani Z, Michael H, De F. Re-evaluation of rock core logging for the prediction of preferred orientations of karst in the Kuala Lumpur Limestone Formation[J]. Engineering Geology, 2011, 117(3/4): 159-169.
- [12] 李苍松, 高波, 王石春. 岩溶围岩分级初步探讨[J]. 工程地质学报, 2006, 6(14): 808-814.  
LI Cangsong, GAO Bo, WANG Shichun. Preliminary classification method for rock mass surrounding karsts[J]. Journal of Engineering Geology, 2006, 6(14): 808-814.
- [13] 王石春. 隧道工程岩体分级[M]. 四川: 西南交通大学出版社, 2007.
- [14] Gupta M C, Singh B K, Singh K N. Engineering geological rock mass classification of punasa tunnel site, Khandwa district, Madhya pradesh[J]. Journal Geological Society of India, 2011, 77: 269-272.
- [15] 孙洁, 刘晓悦. 基于蚁群优化神经网络的巷道围岩稳定性预测[J]. 微电子学与计算机, 2008, 25(5): 117-119.  
SUN Jie, LIU Xiaoyue. Roadway's surrounding rocks stability predicting based on neural network using ant optimization algorithm[J]. Microelectronics & Computer, 2008, 25(5): 117-119.
- [16] 熊辉霞, 张耀庭, 苗雨. 基于 BP 神经网络的体外索力预测及 MATLAB 实现[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2011, 36(1): 71-74.  
XIONG Huixia, ZHANG Yaoting, MIAO Yu. Prediction of the external tendons force based on BP neural network and MATLAB[J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 2011, 36(1): 71-74.