

# 岩溶发育强度垂直分带方法

熊道锟<sup>1</sup> 傅荣华<sup>2</sup>

(1. 四川省华地建设工程有限责任公司, 四川成都 610081; 2. 成都理工大学, 四川成都 610059)

**【摘要】** 讨论了岩溶发育强度分带的现状, 提出了岩溶发育强度垂直分带的原则, 以钻孔岩溶率、溶洞规模和钻孔涌(漏)水量作为定量指标, 以岩组特征、地质构造特征和地下水运动特征作为定性指标, 划分为强烈、中等和微弱 3 个岩溶发育带, 并用类比、主因素判别法及模糊综合评判方法确定岩溶发育的强度等级。

**【关键词】** 岩溶; 垂直分带; 强度; 标准; 模糊综合评判

**【中图分类号】** P 642.25

## Vertical Zonation Method for Intensity of Karst Development

Xiong Daokun<sup>1</sup> Fu Ronghua<sup>2</sup>

(1. Huadi Construction Engineering Lt. Co. of Sichuan Province, Chengdu Sichuan 610081 China;

2. Chengdu University of Technology, Chengdu Sichuan 610059 China)

**【Abstract】** The present situation of the intensity zonation of karst development is discussed, and the regulation of the vertical zonation of karst development is proposed. Through taking the karst rate in borehole, the dimension of karst cave and the outflow or leakage water in borehole as quantitative indices, and the feature of stratum, the feature of geological structure and the flow pattern of groundwater as qualitative indices, karst intensity is classified into intensive, mediate and gentle zones, and the intensity grades of karst development are determined by analogism, main factor and fuzzy comprehensive evaluation method.

**【Key Words】** Karst; vertical zonation; intensity; criterion; fuzzy comprehensive evaluation

### 0 引言

在山区、丘陵区, 甚至在平原区, 基岩都有广泛的分布。据统计, 我国在地表出露以及埋藏在地下浅部的碳酸盐岩约占基岩总面积的 1/3 以上。由于岩溶发育, 碳酸盐岩区的铁路建设、公路建设及水利水电建设常常会碰到岩溶塌陷、隧道涌水、水库渗漏及坝基稳定等岩溶问题<sup>[1,2]</sup>。岩溶发育的强度不同, 工程建设中遇到的岩溶问题不同, 问题的轻重程度也不同, 设计和施工所采取的措施也不相同。所以, 提出岩溶发育强度的划分依据和划分标准, 对岩溶发育进行强度分带, 具有重要的理论意义和实用价值。

### 1 岩溶发育垂直分带的现状及特点

地下水的运动是岩溶发育的重要条件, 从地表向地下深部, 地下水的运动逐渐减缓。相应地, 从地表向地下, 岩溶发育的强度逐渐减弱。在岩溶发育的深度方面, 李大通<sup>[3]</sup>认为, 岩溶发育的深度既不应局限于当地侵蚀基准面或其附近, 也不能无限制地向深部扩展, 笼统地认为它就是可溶岩的底界; 王科等<sup>[4]</sup>认为: 地下水的排泄基准面和地质构造

控制岩溶洞穴的发育深度; 谭周地<sup>[5]</sup>认为: 在岩溶高原峡谷区, 溶洞—溶隙带的下限深度一般仅在谷底以下数十米至 100 m 左右, 在岩溶盆地、谷地地区只有 200~300 m; максимовиц<sup>[6]</sup>认为, 岩溶圈为岩石圈内可作为岩溶发育场所的部分。

岩溶发育强度在区域和垂向上的差异, 前人早已注意到, 并根据其目的和认识水平对岩溶在垂向上的差异作了分带。归纳起来, 主要有 4 种分带(见表 1)。

岩溶发育的垂直分带性已经得到广泛的认同, 但分带的依据不同。有的依据地下水压力和岩层压力的大小划分; 有的依据地下水的运动方式划分, 也有的依据岩溶发育的程度划分; 且分带数量多少和分带的名称不统一。王家骏<sup>[7]</sup>、岳灿坤等、徐国盛<sup>[8]</sup>及周春光等<sup>[9]</sup>的岩溶发育程度垂直分带(见表 1)或多或少地反映了岩溶的发育强度。这些已有的岩溶发育垂直分带主要对岩溶发育强度呈条带状分布的特征进行了描述和划分, 但没有提出分带依据和分带标准, 不是严格意义上的分带。

表1 岩溶发育垂直分带表

分带依据		分带名称						
地下水压力 与岩层压力	E к о в 等	外生岩溶层						
		内生岩溶层						
地下水 运动方式	向	地表岩溶带	顾	垂直渗流岩溶带				
	芳	渗流岩溶带	家	水平潜流岩溶带				
	等	潜流岩溶带	裕	过渡带				
岩溶形态	刘	溶洞带	陈	浅层岩溶带				
	光	溶隙带	伟	中层溶洞带				
	业	溶孔带	海	深层溶洞带				
岩溶发育程度	I 家 骏	浅部强烈岩溶带	岳	强岩溶发育带	徐	周 春 光 等	岩溶强烈发育带	
		中部中等-弱岩溶带	灿	中等岩溶发育带	国		中强岩溶和裂缝较发育层段	岩溶中等发育带
		下部弱-微岩溶带	坤	弱岩溶发育带	盛		弱岩溶和裂缝发育差层段	岩溶弱发育带
			等	等	等		无岩溶和裂缝不发育层段	岩溶不发育带

## 2 分带原则

进行岩溶发育强度垂直分带的主要目的是区分岩溶在垂直方向上发育的相似性和差异性,以便更为准确地评价岩溶化岩层的工程地质性质,指导地下工程和地面工程的设计与施工,达到优化设计、安全施工的目的。岩溶发育强度分带必须以岩溶发育的强弱为基础,根据岩溶发育强度的分带标准,将岩溶发育强度相近而且在空间上互相连接的部分划分为同一个岩溶发育带,将岩溶发育强度差异较大的部分划分为另一个不同的岩溶发育带。由于地质条件不同,地质勘察的精度不同,岩溶发育强度分带的数量可根据实际需要和资料的详略程度确定。本文对岩溶发育的强度作三级划分,即岩溶强烈发育带、岩溶中等发育带和岩溶微弱发育带。

## 3 分带依据

影响岩溶发育的因素较多,形成的岩溶形态也是多种多样。在工程地质勘察中,取得地下岩溶形态特征的资料一般比较困难,由于采用的勘探手段多为地质测绘和钻探。经过分析,选择较容易获得而且能够反映岩溶发育强度的钻孔岩溶率、溶洞规模及地下水涌(漏)水量以及反映岩溶发育条件的岩组类型,控制地层裂隙发育程度的地质构造及影响岩溶发育强弱的地下水运动方式等要素作为岩溶发育强度的分带依据。从钻进过程的观测和岩芯的描述可以直接获得溶洞大小及数量的基础资料,但却难以完全查明溶蚀裂隙的发育情况;钻孔中涌水或漏水量的大小,也反映了岩溶的发育强度。由于勘

探精度的差异和岩溶发育的不均匀性,勘探获得的资料具有不同程度的偶然性,只能反映岩溶发育的轮廓,不能反映岩溶发育的全貌。所以,在进行岩溶发育强度的划分时,还考虑了岩溶发育的主要条件。

### 3.1 钻孔岩溶率

钻孔岩溶率是通过钻探测得的岩溶率,一般为线岩溶率,是对钻孔在钻探过程中探测的溶洞,以及在岩芯上测得的溶隙和溶孔等溶蚀空隙在竖直方向上的比率,是对溶蚀洞穴的大小和数量,溶蚀裂隙的宽度和密集程度以及溶孔的多少和大小的综合量化,是反映岩溶发育强度的综合指标。

### 3.2 溶洞规模

溶洞的大小对工程的设计和施工都有很大的影响。溶洞越大,设计和施工的难度越大。从总体上说,岩溶形成的时间越长,岩溶越发育,形成的溶洞越大。选择溶洞规模的大小作为评价岩溶发育强度的指标,在于突出反映洞穴对工程的影响。

### 3.3 钻孔涌(漏)水量

溶隙、溶孔和溶洞都是地下水运动的通道,地下水量的大小也可以反映岩溶发育的强度。地下水天然流量测井在钻孔的不同孔段测得的涌(漏)水量是溶隙的密度和宽度,溶孔的大小和多少以及溶洞大小的综合反映,用以补充评价岩溶的发育强度。由于在不同地区和不同工程中所采用的勘察方法不同,若未进行钻孔天然流量测井时,也可用钻孔压水试验获得的单位吸水量或分段抽水试验求得的渗透系数的大小作为岩溶发育强度划分的依据<sup>[10,11]</sup>。

### 3.4 岩组特征

岩层是岩溶发育的基础,岩石的成份和结构不同,其可溶性不同,岩溶发育的强度也就不相同。一般说来,灰岩的岩溶发育最强,其次为白云质灰岩和白云岩,再次为泥质灰岩。在结构上,晶粒越粗,岩石的孔隙越大,岩溶发育越强烈。岩层厚度不同,地下水可以活动的空间不同,岩溶的发育强度也不同。在一般情况下,岩溶最发育的是纯碳酸盐岩岩组,夹层型(含非碳酸盐岩夹层)和互层型(碳酸盐岩与非碳酸盐岩互层)的岩溶发育强度随非可溶性岩层的增多而减弱。

### 3.5 地质构造特征

在断层带、断裂影响带及褶皱的轴部,地质构造作用强烈,裂隙纵横交错,岩溶发育强烈。离主要构造带越远,岩溶发育越弱。

### 3.6 地下水运动特征

地下水的运动方式和运动的强度是岩溶发育的主要因素,在当地排泄基准面(侵蚀基准面或非可溶岩界面)之上,地下水交替循环强烈,岩溶发育;在当地排泄基准面之下,地下水的交替循环逐渐减缓,岩溶的发育强度也逐渐减弱。

## 4 分带标准

影响岩溶发育强度的因素众多,岩溶发育强度垂直分带只能选择其中最主要的影响因素作为评价指标。前人的岩溶发育强度分带,大多数没有提出明确的单因素强度划分指标和划分界线,只有王家骏<sup>[7]</sup>和周春光<sup>[9]</sup>作为岩溶发育带的特征列出了钻孔线岩溶率、最大溶洞直径和地下水运动特征等指标及其统计范围(见表2和表3)。从表2和表3可以看出,各指标分布区间的差异较大,其原因主要在于各自都是基于对自己研究区岩溶发育强度的认识,以相对强弱程度定性划分的岩溶发育带,虽然分带的名称相近或者相同,但其标准却不同,指标的统计范围也不同,如在三江口坝基岩溶垂直分带中,甚至出现了河床右侧强烈岩溶带的钻孔线岩溶率比河床左侧中等岩溶带的钻孔线岩溶率还低的情况(见表2)。因此必须提出岩溶发育强度的分带标准,使岩溶发育强度分带具有统一的强弱尺度,使不同的个人在不同地区进行的岩溶发育强度分带具有统一性和可比性。本文参照铁二院在地面上的岩溶发育程度等级划分指标<sup>[12]</sup>(见表4)和周春光的分带指标<sup>[9]</sup>,结合在岩溶勘察中可能采取的勘探手段和可能取得的指标,确定岩溶发育强度分带的定量和定

性指标及强度划分标准见表5。

表2 三江口坝基岩溶垂直分带岩溶率统计(据王家骏<sup>[7]</sup>)

岩溶发育带	钻孔线岩溶率/%	
	河床左侧	河床右侧
强烈岩溶带	16~35	3.8~7.4
中等岩溶带	9.4~15	1.45~10.3
弱岩溶带	3.6~9.3	0.7~7.8
弱—微岩溶带	<1.86	<1.67

表3 斗笠山—恩口煤矿区岩溶发育程度垂直分带(据周春光等<sup>[9]</sup>)

垂直分带	钻孔线岩溶率/%	最大溶洞直径/m	地下水运动特征
岩溶强烈发育带	0.21~21.9	23.5	潜水面以上以垂直运动为主,潜水面下以水平运动为主
岩溶中等发育带	5.77~7.02	6.12	以水平运动为主
岩溶弱发育带	0.66~4.92	0.60	受重力作用向深部渗流为主,循环缓慢
岩溶不发育带	0	0	循环渗流极为缓慢

表4 岩溶发育程度等级及其指标<sup>[12]</sup>

岩溶发育程度	岩溶层组	岩溶现象	岩溶密度个/km <sup>2</sup>	最大泉流量 l/s	钻孔岩溶率/%
极强	厚层块状灰岩及白云质灰岩	地表及地下岩溶形态均很发育,地表有大型溶洞,地下有大规模的暗河或暗河系,以管道水为主	>15	>50	>10
强烈	中厚层灰岩夹白云岩	地表有溶洞,落水洞、漏斗、洼地密集,地下有规模较小的暗河,以管道水为主,兼有裂隙水	5~15	10~50	5~10
中等	中薄层灰岩、白云岩与不纯碳酸盐或碎屑岩互层或夹层	地表有小规模的溶洞,较多的落水洞、漏斗,地下发育裂隙状暗河,以裂隙水为主	1~5	5~10	2~5
微弱	不纯碳酸盐岩与碎屑岩呈互层或夹层	地表及地下多以裂隙为主,有少数落水洞、漏斗和岩溶泉,发育以裂隙水为主的多层含水层	0~1	<5	<2

表5 岩溶发育强度等级及划分标准

岩溶发育强度	定量指标			定性指标		
	钻孔岩溶率/%	溶洞规模/m	涌(漏)水量/(l·s <sup>-1</sup> )	岩组特征	地质构造特征	地下水运动特征
强烈	>5	>5	>1.0	中厚层灰岩、白云质灰岩及白云岩	断裂带、褶皱轴部	垂直循环带、交替循环带及水平循环带上部
中等	2~5	1~5	0.1~1.0	中薄层灰岩、白云岩与不纯碳酸盐或碎屑岩互层或夹层	断裂影响带、陡倾岩层	水平循环带下部
微弱	<2	<1	<0.1	不纯碳酸盐岩与碎屑岩呈互层或夹层	平缓岩层	深部循环带

5 分带方法

由于不同地层中的岩溶发育强度不同,各种地层的分布范围大小不一,选择的勘探方法和研究程度亦不相同。考虑到地层和地区之间资料的差异性,采用不同的分带方法。

5.1 类比判别法

通过比较岩溶发育的地质条件(地形地貌、地层岩性、地质构造、地下水运动等)和岩溶发育历史的相似程度,根据研究程度较高地区可溶岩层的岩溶发育强度分带类比确定研究程度不高、资料不足的可溶岩层的岩溶发育强度等级。采用类比方法进行岩溶发育强度的垂直分带时,可以岩组为单元确定岩溶发育的强度等级。

5.2 主因素判别法

根据岩溶发育强度分带标准中主要指标所属的岩溶发育强度等级,粗略确定各带的岩溶发育强度。

5.3 综合判别法

根据各个指标在岩溶发育强度分带标准中所属的岩溶发育强度等级,采用数学方法计算,综合确定各个带的岩溶发育强度。主要方法有综合指数法、聚类分析法、模糊综合评判法等。本文采用二级模糊综合评判方法,即先对定量指标和定性指标分别进行一级综合评判,再对定量指标和定性指标的一级综合评判结果进行二级综合评判。

1) 确定隶属度

为了突出指标的主要隶属区间,采用非线性隶属度函数,计算模型为

① 钻孔岩溶率的隶属度函数

$$\mu_{11} = \begin{cases} 1 & x \leq 1 \\ 1 - \frac{1}{2}(x-1)^2 & 1 < x \leq 2 \\ \frac{2}{9}(x-3.5)^2 & 2 < x < 3.5 \\ 0 & x \geq 3.5 \end{cases} \quad (1)$$

$$\mu_{12} = \begin{cases} 0 & x \leq 1 \\ \frac{1}{2}(x-1)^2 & 1 < x \leq 2 \\ 1 - \frac{2}{9}(x-3.5)^2 & 2 < x \leq 5 \\ \frac{1}{2}(x-6)^2 & 5 < x < 6 \\ 0 & x \geq 6 \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu_{13} = \begin{cases} 0 & x \leq 3.5 \\ \frac{2}{9}(x-3.5)^2 & 3.5 < x \leq 5 \\ 1 - \frac{1}{2}(x-6)^2 & 5 < x < 6 \\ 1 & x \geq 6 \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\mu_{1j}$  为钻孔岩溶率第  $j$  级岩溶发育强度的隶属度;  $x$  为钻孔岩溶率。

② 溶洞规模的隶属度函数:

$$\mu_{21} = \begin{cases} 1 & y \leq 0.5 \\ 1 - 2(y-0.5)^2 & 0.5 < y \leq 1 \\ \frac{1}{8}(y-3)^2 & 1 < y < 3 \\ 0 & y \geq 3 \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_{22} = \begin{cases} 0 & y \leq 0.5 \\ 2(y-0.5)^2 & 0.5 < y \leq 1 \\ 1 - \frac{1}{8}(y-3)^2 & 1 < y \leq 5 \\ 2(y-5.5)^2 & 5 < y < 5.5 \\ 0 & y \geq 5.5 \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu_{23} = \begin{cases} 0 & y \leq 3 \\ \frac{1}{8}(y-3)^2 & 3 < y \leq 5 \\ 1 - 2(y-5.5)^2 & 5 < y < 5.5 \\ 1 & y \geq 5.5 \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $\mu_{2j}$  为溶洞第  $j$  级岩溶发育强度的隶属度;  $y$  为溶洞直径, m。

③钻孔涌(漏)水量的隶属度函数:

$$\mu_{31} = \begin{cases} 1 & z \leq 0.05 \\ 1 - 200(z - 0.05)^2 & 0.05 < z \leq 0.1 \\ \frac{200}{81}(z - 0.55)^2 & 0.1 < z < 0.55 \\ 0 & z \geq 0.55 \end{cases} \quad (7)$$

$$\mu_{32} = \begin{cases} 0 & z \leq 0.05 \\ 200(z - 0.05)^2 & 0.05 < z \leq 0.1 \\ 1 - \frac{200}{81}(z - 0.55)^2 & 0.1 < z \leq 1 \\ 200(z - 1.05)^2 & 1 < z < 1.05 \\ 0 & z \geq 1.05 \end{cases} \quad (8)$$

$$\mu_{33} = \begin{cases} 0 & z \leq 0.55 \\ \frac{200}{81}(z - 0.55)^2 & 0.55 < z \leq 1 \\ 1 - 200(z - 1.05)^2 & 1 < z < 1.05 \\ 1 & z \geq 1.05 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $\mu_{3j}$ 为钻孔涌水量第 $j$ 级岩溶发育强度的隶属度; $z$ 为钻孔涌(漏)水量。

定性指标隶属度的计算方法是,先根据表5的分带标准和岩溶发育的条件确定指标值,当完全符合岩溶微弱、中等和强烈发育的条件时,指标值分别取1,2和3,过渡条件在标准条件之间取指标值。然后用指标值按线性计算隶属度。如岩组特征基本符合岩溶强烈发育而略偏向于岩溶中等发育条件,指标值取2.8,则属于岩溶发育强烈、中等和微弱的隶属度分别为0.8,0.2和0.0。

定量指标的隶属度组成定量指标隶属度模糊矩阵,定性指标的隶属度构成定性指标隶属度模糊矩阵,分别表示为:

$$R_1 = \mu_{ij} \quad (10)$$

$$R_2 = \mu_{ij}^* \quad (11)$$

式中: $\mu_{ij}$ 为定量指标的隶属度; $\mu_{ij}^*$ 为定性指标的隶属度; $i$ 为第 $i$ 个评价指标(定量指标或定性指标); $j$ 为岩溶发育强度级别。

## 2) 权重值的确定

按照各个指标在岩溶发育强度划分中的重要性确定,较好的方法是专家评分法。本文采用复合权重<sup>[13]</sup>,用基本权重反映不同指标对岩溶发育强度的影响,定量指标钻孔岩溶率、溶洞规模、钻孔涌(漏)水量和定性指标岩组特征、地质构造和地下水运动特征的基本权重根据其在岩溶发育强度分带中的作用确定;用附加权重突出反映其中强度等级较高的指标的作用,附加权重的计算方法为实际指标值与

岩溶发育强度为强烈时的指标分界值的比值。

权重值为各因子的基本权重与附加权重之和的归一化值。即

$$\mu_k = \frac{V_k + W_k}{\sum (V_k + W_k)} \quad (12)$$

式中: $\mu_k$ 为权重; $V_k$ 为基本权重; $W_k$ 为附加权重。

由此得到定量指标的权重矩阵 $A_1$ 和定性指标的权重矩阵 $A_2$ 。

二级模糊综合评判的权值根据勘探程度确定,当勘探程度较低时,定量指标的权值小,定性指标的权值大,反之亦然,但两个权值之和为1。由此得到权值矩阵 $A$ 。

## 3) 综合评判

一级模糊综合评判采用加权平均型,二级模糊综合评判采用主因素决定型<sup>[14]</sup>。其变换为

$$D_1 = A_1 \cdot R_1 \quad (13)$$

$$D_2 = A_2 \cdot R_2 \quad (14)$$

$$R = \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \end{pmatrix} \quad (15)$$

$$D = A \cdot R \quad (16)$$

式中: $D_1$ 为定量指标的评判结果; $D_2$ 为定性指标的评判结果; $R$ 为二级评判的隶属度矩阵; $A$ 为二级评判的权重矩阵; $D$ 为二级评判结果。 $\cdot$ 为加权平均型; $\circ$ 为主因素决定型。

## 6 结 论

岩溶发育具有不均匀性,根据发育强度的差异划分为强烈、中等和微弱3个岩溶发育带,可以更准确地描述碳酸盐岩的工程地质性质,有利于工程的设计和施工。

以钻孔岩溶率、溶洞规模和钻孔涌(漏)水量作为定量指标,岩组特征、地质构造特征和地下水运动特征作为定性指标确定的岩溶发育强度分带标准,为岩溶发育强度划分提供了依据,使岩溶发育强度垂直分带结果具有一致性和可比性。

根据不同的岩溶发育条件和不同的研究程度,采用类比判别法、主因素判别法及模糊综合评判方法确定岩溶发育的强度等级,使评判更科学、结果更合理。

## 参 考 文 献

- 1 邹成杰,等. 水利水电岩溶工程地质. 北京: 水利电力出版社, 1994. 113~195
- 2 熊道锬. 岩溶发育强度分带及其工程地质意义. 四川地质学报, 2004, 24(2): 113~195

(下转第122页)

出现了拉裂破坏区。建议加强此处锚杆及时支护。

3)从表4可以看出,第二期开挖后比第一期开裂体积和塑性耗散能都有较大增长,显示随着开挖的进行,洞周围岩破坏量继续增长。

表4 一、二期开挖围岩破坏指标值 万 m<sup>3</sup>

分期	围岩破坏指标				
	回弹 体积	塑性破 坏体积	开裂 体积	总破 坏量	耗散能量/ (万 kN·m)
1	0	3.476	0.223	3.699	1.303 4
2	0.265	2.526	0.986	3.778	2.724 4

### 2.5.6 工程结论与建议

1)水平层状各向异性岩体,对地下厂房洞室顶拱的围岩稳定影响较大,所以洞室的开挖和支护应引起高度重视。从计算结果来看,在目前的支护条件下,洞室的整体稳定是有保证的,只是在洞室交口处以及主厂房下游边墙吊车梁部位出现相当的拉裂破坏,应当及时加强支护。

2)二期开挖后,洞室顶拱锚杆应力有一定增长,顶拱层面都处于受力状态,锚杆应力都在允许范围内。锚索应力增长不大。

3)二期开挖后,洞室顶拱位移有所增大,但都趋于稳定,洞室顶拱的稳定是有保证的,所采用的锚固支护参数是合理的。

### 3 结论

1)地下工程的数值模拟是一个复杂的问题,由于反演目标函数的复杂性,参数优化反演也是一个难度极大的问题。

2)在工程中建立适当简化模型进行反演计算,虽然有一定的边界误差,但误差是可以接受的,并可以有针对性的以较小的计算代价获得反演参数,预测大型地下洞室群的稳定。

3)岩土介质是一种非均匀、随机性、离散性极强的介质体,有着复杂的本构关系。如何寻找能够准确描述岩土体力学行为的本构关系,如何建立恰当的物理数学模型仍将是艰巨的任务。

4)目前的弹塑性反演分析仍然是基于正演基础的分析,如果能找到只进行一次反演计算即可得到反演参数值的方法将具有重大意义。

### 参 考 文 献

- 1 蔡美峰,何满潮,刘东燕.岩石力学与工程.北京:科学出版社,2002
- 2 孙 钧,蒋树屏,袁 勇,等.岩土学反演问题的随机理论与方法.汕头:汕头大学出版社,1996.3
- 3 李志业,曾艳华.地下结构设计原理与方法.成都:西南交通大学出版社,2003.284
- 4 高 伟,冯夏庭.地下工程围岩参数反演的仿生算法及其工程应用研究.岩石力学与工程学报,2002,21(增2):2521~2526

收稿日期:2005-03-14

(上接第117页)

- 3 李大通.岩溶发育深度浅谈.岩溶科技,1980(1):28~36
- 4 王 科,等.圆梁山隧道毛坝向斜段岩溶洞穴的发育深度探讨.成都理工学院学报,2001,28(2):139~143
- 5 谭周地.河谷深岩溶的成层性——以辽宁观音阁水库为例.中国岩溶,1987,6(2):157~165
- 6 [俄]Ежов,等.岩溶发育的垂直分带性.莫跃支译.水文地质工程地质译丛,1991(6):30~35
- 7 王家骏.岩溶地区坝基岩体质量工程地质分类.中国岩溶,1992,11(2):105~117
- 8 徐国盛,等.济阳坳陷下古生界潜山储集体特征.石油与天然气地质,2002,23(3):248~256
- 9 周春光,等.湘中地区的岩溶发育特征与环境地质问

题——以斗笠山、恩口煤矿为例.湖南地质,1996,15(2):98~102

- 10 雷明信.关于确定地下水活动下限问题的初步探讨.军工勘察,1994(1):38~41
- 11 贾疏源.关于确定地下水活动下限问题讨论的几点意见.军工勘察,1994(4):47~52
- 12 铁道部第二勘测设计院.岩溶工程地质.北京:中国铁道出版社,1984.12
- 13 熊道锟.应用第I型模糊综合评判评价污染地下水水质初探.河北地质学院学报,1986,9(3~4):383~388
- 14 陈贻源.模糊数学.武汉:华中工学院出版社,1984.154~160

收稿日期:2005-02-25