

# 桂林市岩溶塌陷带的水文地球化学特征及成因

蓝俊康 郭 生

(桂林工学院建设工程系)

**摘 要** 对桂林市岩溶塌陷分布及其水文地球化学环境特征研究表明, 塌陷分布与  $SI_c$  值的关系较密切, 与  $P_{CO_2}$  次之, 而与矿化度、硬度、 $SI_D$  值的关系不明显。塌陷大多数分布在  $SI_c=0.5\sim 1.0$  的区域, 主要与岩溶发育程度、上覆土层厚度及水位迅速下降有关。

**关键词** 岩溶; 塌陷; 水文地球化学; 成因; 广西; 桂林

**中图号** P641.3; P641.134; P642.26

## 1 岩溶塌陷概况

桂林是我国岩溶塌陷比较发育的城市。耕地被毁、鱼塘失水、车间塌陷、房屋开裂倒塌等现象经常出现, 给该市的生产和建设带来极大的不便。据不完全的资料统计, 全市已有塌陷点(群) 80 多处, 塌坑 260 余个。其中瓦窑、大风山一带最为密集, 塌坑密度已达  $5.3$  个/ $km^2$ 。塌陷数量如此之多, 密度如此之大, 已成了该市重要的环境工程地质问题之一。

桂林市的塌陷规模不等, 塌坑形态多种多样, 基本上属于土体塌陷。塌陷有自然的和人为的 2 种成因类型<sup>[1]</sup>, 2 类成因的塌陷数量基本持平。其特点为: (1) 90% 以上的塌陷出现在结构单一, 土层厚度  $1\sim 10m$  的峰林平原及峰丛谷地的地貌单元上, 只有少数出现在漓江两岸的阶地中。(2) 发生时间多在雨季, 即地下水位变幅较大的时期。(3) 多数塌坑发生于水位埋深为  $1\sim 8m$  的区段。

## 2 塌陷带的水文地球化学特征

### 2.1 岩溶水水文地质条件及水化学特征

**2.1.1 水文地质条件** 桂林市为一岩溶河谷盆地。漓江自北而南经市中心贯穿全市, 是市区地下水最低排泄基准面, 也是地下水和地表水外排的主要通道。地下水总的运移方向是由河流的东西两侧向漓江汇集, 只有在洪水猛涨时, 才发生河水向两侧地下含水层倒灌。市区的大部分含水层属于岩溶含水层, 孔隙含水层只出现在漓江两岸浅部, 面积不大。岩溶含水层层位有融县组 ( $D_3r$ )、桂林组 ( $D_3g$ )、岩关组 ( $C_1y$ )、东岗岭组 ( $D_2d$ )、榴江组 ( $D_3l$ )、大塘组 ( $C_1d$ ) 等几种类型的灰岩地层。据市区 1990 年 63 个岩溶水质监测点资料, 这几个地层都有井泉分布, 说明了各种灰岩均不同程度地有岩溶发育。

**2.1.2 水化学特征** 岩溶水质良好(表 1), 水化学类型主要为  $HCO_3-Ca$  型(约占总监测点

1995年6月21日收稿, 9月12日改回。

作一作者简介: 蓝俊康, 男, 1966 年出生, 硕士, 讲师, 水文地质工程地质专业。

表 1 桂林市岩溶水化学成分<sup>①</sup>

Table 1 The component statistics in the karst aquifer of Guilin city

取样 季节	统计 指标	矿化度	总硬度	pH	离子浓度							
					Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N
丰 水 期	最大值	700.95	383.84	7.9	122.6	20.4	36.8	87.0	72.0	214.7	316.6	15.716
	最小值	99.7	81.57	6.65	24.1	0.4	0.2	0	2.8	<2.0	80.5	0.09
	平均值	269.57	215.36	7.27	78.2	4.88	6.3	4.60	16.8	30.24	213.5	2.286
枯 水 期	最大值	745.4	417.4	7.9	132.5	27.7	56.0	70.0	77.74	269.4	328.8	16.940
	最小值	104.23	84.6	6.9	29.0	0.4	0.7	0	2.4	<2.0	82.3	0.045
	平均值	279.83	224.99	7.31	82.53	5.0	10.8	3.0	19.4	30.9	226.97	2.288

①据广西环境水文地质总站, 1990 年对 63 个岩溶水质监测点资料统计, 总硬度以 CaCO<sub>3</sub> 计。

数的 95%), 只有极少数水点因污染影响而出现 HCO<sub>3</sub>-SO<sub>4</sub>-Ca 型水。矿化度、硬度及其它离子浓度的平均值均较低, 其中丰水期比枯水期更低, 具有岩溶含水层受雨水及地表水补给后溶质被“冲稀”的现象, 表明了岩溶含水层具有一定程度的开放性。

2.2 塌陷带的水文地球化学特征

据该市岩溶塌陷与岩溶发育密切相关, 多数塌陷发生于雨季的特点, 选用 1990 年丰水期岩溶水质监测点(共 63 个)资料对塌陷带的水化学特征作分析研究, 采用的方法是: (1) 利用计算机进行计算, 求出各水质点的  $SI_C$  值(方解石饱和指数)、 $SI_D$  值(白云石的饱和指数)及  $P_{CO_2}$  (地下水 CO<sub>2</sub> 分压)值。计算中考虑了地下水温度、活度系数、10 种主要的离子对。具体的编程思路及有关参数值依据文献〔2〕。(2) 绘制  $SI_C$ 、 $P_{CO_2}$  等各种水化学特征值及各离子浓度等值线图, 并与塌陷点分布图迭加, 然后统计出各塌陷点所处的特征值区间。

统计结果(表 2)表明, 近 88% 的塌陷点  $SI_C=0.5\sim1.0$ , 近 75% 的塌陷点  $P_{CO_2}=5\times 10^2\sim10\times 10^2Pa$ , 由此可见,  $SI_C$  值和  $P_{CO_2}$  能较好地反映塌陷分布的情况, 矿化度、总硬度及  $SI_D$  值等则相对较差。

表 2 丰水期岩溶水水化学特征值分区统计

Table 2 The statistics of the characteristic values of the karst water in the rain season

特征值	区 间	塌陷点(群)数	百分数(%)
$SI_C$	<0.5	1	1.21
	0.5~1.0	73	87.95
	1.0~2.0	9	10.84
	>2.0	0	0
$P_{CO_2}$ / $10^2Pa$	<5	1	1.21
	5~10	62	74.77
	10~20	17	20.48
	20~30	3	3.62
	>30	0	0
$SI_D$	<0.05	7	8.43
	0.05~0.1	20	24.10
	>0.1	56	67.47
总硬度 / $mg\cdot L^{-1}$	<100	0	0
	100~150	1	1.21
	150~200	8	9.64
	200~250	40	48.19
	250~300	32	38.55
	300~350	1	1.21
$TDS$ / $mg\cdot L^{-1}$	<100	0	0
	100~200	7	8.43
	200~300	47	56.63
	300~400	28	33.73
	>400	1	1.21

3 塌陷成因分析

3.1  $SI_C$  值

$SI_C$  值是岩溶含水层水岩作用程度的标志, 它是反映岩溶地下水对方解石溶蚀能力的热力学指标。 $SI_C < 1.0$  时溶液对石灰岩有溶蚀性, 反之则已达饱和或过饱和状态。溶液的饱和和需要一定的时间, 水与石灰岩接触的时间越长就越趋近于饱和,  $SI_C$  值也越大。因此  $SI_C$  值的大小大体上反映了地下水与石灰岩相互作用时间的长短。据  $SI_C$  值的大小及其所表现出的塌陷危险性, 将市区岩溶含水层划分为以下 3 个区。

3.1.1  $SI_C < 0.5$  的低值区 该市岩溶水 63 个监测点中有 11 个点  $SI_C$  值  $< 0.5$ , 占总数 17.5%。这些水质点均很靠近补给源 (表 3), 补给情况分为两类: (1) 以雨水补给为主, 如普陀水岩、尧山小屋里、桂钢等。它们均处于裸露的灰岩区 (据桂林市基岩埋深分布图)。

表 3  $SI_C < 0.5$  及  $SI_C > 1.5$  的水质监测点情况  
Table 3 The details of the monitoring well points ( $SI_C < 0.5$  and  $SI_C > 1.5$ )

编号	位 置	含水层岩性	取样深度 / m	井 (孔) 类型	$SI_C$	pH
GⅢ <sub>14</sub>	普陀水岩	D <sub>3</sub> r		抽水溶洞	0.218	6.65
GⅢ <sub>17</sub>	蛟 霞	D <sub>3</sub> r		下降泉	0.26	7.30
GⅢ <sub>48</sub>	筌塘村	D <sub>3</sub> r	>3.55	民 井	0.16	6.9
GⅢ <sub>50</sub>	尧山小屋里	D <sub>3</sub> l		下降泉	0.23	7.6
GⅢ <sub>52</sub>	味精厂	D <sub>3</sub> r	50	供水井	0.266	6.7
GⅢ <sub>54</sub>	汽运公司	D <sub>3</sub> r	7.35	抽水井	0.46	7.0
GⅢ <sub>44</sub>	炮 校	C <sub>1</sub> y	>5.6	抽水井	0.18	7.4
GⅢ <sub>58</sub>	茶科所	D <sub>3</sub> r		下降泉	0.11	6.9
GⅢ <sub>68</sub>	石油六公司	D <sub>3</sub> r	43.0~92.8	供水孔	0.45	6.9
GⅢ <sub>86</sub>	高炮连	D <sub>3</sub> r	7.1	抽水井	0.49	7.3
GⅢ <sub>90</sub>	桂 钢	D <sub>3</sub> g		溶 洞	0.104	6.8
GⅢ <sub>7</sub>	综合电机厂	D <sub>3</sub> r	>4.2	抽水溶洞	4.16	7.9
GⅢ <sub>61</sub>	磨床厂	D <sub>3</sub> g	5.0~5.9	抽水井	1.98	7.55
GⅢ <sub>67</sub>	罐头厂	D <sub>3</sub> g		供水孔	1.659	7.45
GⅢ <sub>69</sub>	环水总站	D <sub>3</sub> r	42.5~100.0	供水孔	1.62	7.5
GⅢ <sub>75</sub>	大头山	D <sub>3</sub> r		抽水溶洞	1.638	7.55
GⅢ <sub>77</sub>	矮山洞	D <sub>3</sub> r		抽水溶洞	2.21	7.6
GⅢ <sub>81</sub>	劳动大学	D <sub>3</sub> r	0.8~8.8	抽水溶洞	1.50	7.55
GⅢ <sub>34</sub>	平挂疗养院	D <sub>3</sub> g	>4.4	抽水溶洞	1.512	7.65

原始资料来源于广西环境水文地质总站, 1990。

有些虽有较薄的盖层, 但很靠近裸露的灰岩区, 盖层厚薄不均, 与大气连通性比较好, 如筌塘村、汽运公司、高炮连等处。这类由当地降雨直接补给与大气有气体交换的区域在地下水位下降时, 难以形成“真空吸蚀效应”。只有在个别低洼之处因有地表水积聚, 可能会发生“潜蚀”作用而引起塌陷, 如桂钢、汽运公司附近 (老人山北侧) 的塌陷, 但这种情况极少。(2) 以河水补给的区域, 如味精厂、石油六公司地带, 虽然其上覆层厚度较大, 亦不处于构造断

裂带部位（据广西地质系列图集），但从地貌上，它们分别处于漓江岸边及朝阳河不远处，其 pH 值不高，推测为河水经河床卵石层及具有二元结构的一级阶地下的砂卵石层经常性地补给岩溶含水层，使岩溶水中  $\text{CaHCO}_3$  等重碳酸盐的浓度一直保持较低水平，pH 值不能提高。这种类型的区域因补给水源充足，一般在抽水时不易引起大的降深，如果其覆盖层厚度比较大（如味精厂）则一般不易塌陷。但因河水涨落的影响，尤其当洪峰来临时，可能由于较大的水力梯度而引起“潜蚀”，如果覆盖层又不很厚时有发生塌陷的可能。如石油六公司附近离朝阳河不远处有一塌陷属此类型。总之，该市的塌陷往往是多种机制综合作用的结果  $SI_C < 0.5$  的区域因缺乏“真空吸蚀效应”，只有在地表水数量充足的情况下才可能发生“潜蚀”，但地表水丰富的情况在  $SI_C < 0.5$ （多是补给区，地势一般不低）区域不太常见，因此  $SI_C$  低值区很少有塌陷发生。

3.1.2  $SI_C > 1.0$  的区域 方解石对水处于过饱和状态，地下水与灰岩之间的相互作用已较久，岩溶含水层基本上不直接获得雨水或地表水的补给，地下水更新速度慢，含水层处于一个比较封闭的环境。对该市  $SI_C > 1.5$  的所有岩溶水监测点统计（表 3）表明，其 pH 均较高（ $> 7.45$ ）。而该市红色粘性土的理化测试表明，其 pH 值一般为 4.9~6.5，且雨水或地表水通过包气带入渗时沿程会溶解包气带中浓度较高的  $\text{CO}_2$  气体而呈弱酸性，因此经常接受雨水或地表水补给的地下水其 pH 值不会偏高。pH 值偏高的地下水说明了其接受当地雨水（或地表水）的补给量较少，地下水与灰岩之间的溶解反应进行比较彻底，在水中  $\text{CaHCO}_3$  及  $\text{MgHCO}_3$  等重碳酸盐（强碱弱酸盐）影响下而呈现弱碱性。表（3）中所列出  $SI_C > 1.5$  的水质监测点多属抽水溶洞（潭），这些溶洞中的地下水主要是通过岩溶管道从其它  $P_{\text{CO}_2}$  值较高的含水层输送过来的，当出露于地表时， $P_{\text{CO}_2}$  减少及温度提高（受太阳光照射及气温影响）、水中  $\text{CO}_2$  气体逸出，使水处于过饱和状态，pH 值也大大提高。该市的岩溶发育规律也证实了这一点。273 个钻孔资料表明，地面下 15~30 m 范围内溶洞多，浅部溶洞数量少且多被充填<sup>〔1〕</sup>。因此抽水溶洞中的地下水主要来自于它处，而与当地降雨补给关系较小。由于  $SI_C > 1.0$  的抽水岩洞洞口周围的岩溶管道相对比较封闭，可以判断洞口周围的土层与地下岩溶管道间很少有溶隙连通（或有联系的通道已被充填），所以在大量抽水或含水层自然疏干（多见于洪水消退时）时难以使附近土层造成“潜蚀”或“真空吸蚀效应”，故  $SI_C > 1.0$  的区域塌陷的数量较少。

3.1.3  $SI_C$  为 0.5~1.0 的区域 当  $SI_C$  居中的情况下，其含水层既能通过岩溶管网从其它地方获得补给，又经常性地接受当地降雨的补充，在入渗水影响下，不断发生溶质被“冲稀”的作用，岩溶含水层能保持着非饱和状态。因此，这些区域中的岩溶含水层岩溶比较发育，而且与上覆土层间又有密切的水力联系，当岩溶水的水位迅速下降时，很容易形成“潜蚀”或“真空吸蚀作用”，如果上覆土层厚度又比较薄，塌陷的危险性就很大，故此区易见塌陷产生。

3.2  $P_{\text{CO}_2}$  值

地下水中的  $\text{CO}_2$  主要是雨水（或地表水）入渗时从包气带带入的，因此  $P_{\text{CO}_2}$  值的大小与包气带中有机物的含量及其氧化情况、温度、土层厚度、包气带表面植物根系的呼吸、水的人渗量等有关。根据桂林市  $P_{\text{CO}_2}$  的分布规律及发生塌陷的危险性大小，把岩溶含水层分为 3 个区域，即  $P_{\text{CO}_2} < 5 \times 10^2 \text{Pa}$  的低值区、 $P_{\text{CO}_2} = 5 \times 10^2 \sim 10 \times 10^2 \text{Pa}$  的中值区  $P_{\text{CO}_2} > 10 \times 10^2 \text{Pa}$  的高值区。

据统计  $P_{\text{CO}_2}$  低值的出现有两种情况：（1）含水量开放性较好，与大气间存在频繁的气体

交换,这类含水层一般位于补给区,尤其是裸露灰岩区。由于其开放性很好,水位迅速下降时难以形成“真空吸蚀作用”,塌陷不易发生。(2)含水层属于比较封闭的情况,而得不到  $\text{CO}_2$  气体的补充,水中原有的  $\text{CO}_2$  气体在与灰岩发生的溶解反应过程中被消耗殆尽。这类岩溶水 pH 往往偏高。过于封闭的含水层因与上覆土层间水力联系较少,不易形成“潜蚀”或“真空吸蚀作用”,因此塌陷也比较少见。据该市 1990 年 63 个监测点资料显示,共有 5 个点的  $P_{\text{CO}_2} < 5 \times 10^2 \text{Pa}$  (表 4),其中有 2 个抽水溶洞(综合电机厂、平桂疗养院)的  $SI_C$  值及 pH 值比较大,由此可知这 2 个溶洞中的水主要来自于它处,洞中水位下降时,对当地覆盖层的影响较小。第三个点尧山小屋里下降泉位于尧山脚下裸露灰岩中,与大气的连通性很好,没有产生塌陷的条件。以上 3 个点附近均无塌陷产生,与前面分析相符。 $P_{\text{CO}_2}$  低值区其余两个点(国家山、炮校)附近塌陷较多,可能因塌陷的影响,地下水与大气的连通性变好, $P_{\text{CO}_2}$  很低。因此, $P_{\text{CO}_2}$  大小与塌陷数量的相关性不如  $SI_C$  值显著。

表 4  $P_{\text{CO}_2} < 5 \times 10^2 \text{Pa}$  的水质监测点情况  
Table 4 The details of the monitoring well points ( $P_{\text{CO}_2} < 5 \times 10^2 \text{Pa}$ )

编号	位 置	含水层位	井(孔)类型	取样深度 / m	$P_{\text{CO}_2} / 10^2 \text{Pa}$	$SI_C$	pH
GⅢ <sub>7</sub>	综合电机厂	D <sub>3</sub> r	抽水溶洞	>4.2	2.65	4.16	7.9
GⅢ <sub>34</sub>	平桂疗养院	D <sub>3</sub> g	抽水溶洞	>4.4	4.6	1.51	7.65
GⅢ <sub>44</sub>	炮 校	D <sub>3</sub> y	抽水井	>5.6	3.0	0.18	7.4
GⅢ <sub>50</sub>	尧山小屋里	D <sub>3</sub> l	下降泉		1.83	0.232	7.6
GⅢ <sub>74</sub>	国家山	D <sub>3</sub> g	抽水溶洞		4.95	0.94	7.5

原始资料来源于广西环境水文地质总站,1990。

从统计的结果(表 2)看, $P_{\text{CO}_2}$  值与塌陷关系比较明显,仅次于  $SI_C$  值,主要原因是,当覆盖层较薄但不缺失时, $P_{\text{CO}_2}$  值常处于中等或中偏低( $5 \times 10^2 \sim 10 \times 10^2 \text{Pa}$ )范围,而这种覆盖层最容易发生塌陷。 $P_{\text{CO}_2}$  高值情况比较复杂,当覆盖层较厚时,如味精厂、石油六公司、中药厂(厚度均  $> 20 \text{m}$ ),受包气带的影响,其  $P_{\text{CO}_2}$  值较大(均  $> 20 \times 10^2 \text{Pa}$ )。当覆盖层很薄甚至缺失,由于植物根系呼吸及有机质氧化的影响, $P_{\text{CO}_2}$  值也较大,如普陀水岩( $P_{\text{CO}_2} = 47 \times 10^2 \text{Pa}$ )。总之, $P_{\text{CO}_2}$  高值点的情况很多,但主要是生物方面,而与地质环境关系不大。

3.3 矿化度、硬度、 $SI_D$  值与塌陷关系

岩溶含水层在未受污染时,矿化度和硬度值差别不大,据水质资料统计,在受到污染时,矿化度和硬度值随污染程度增加而升高。而与影响塌陷的因素关系不明显。岩溶水的  $\text{Ca}^{2+}$  浓度相差不大(1 倍范围内), $SI_D$  值主要与 pH,  $\text{Mg}^{2+}$  浓度值有关,而岩溶水的 pH 值与塌陷关系不甚密切, $\text{Mg}^{2+}$  浓度则主要与碳酸盐中 Mg 的含量及岩石的溶解有关,因此  $SI_D$  值亦难以反映塌陷的规律性及其成因。

4 结 论

- (1)  $SI_C$  值与塌陷关系最密切,该市大多数塌陷点分布于  $SI_C = 0.5 \sim 1.0$  的区域。
- (2)  $SI_C$  值之所以比  $P_{\text{CO}_2}$ 、矿化度、硬度等指标更能反映塌陷成因,是因为  $SI_C$  值受污

染程度、生物等各种非地质因素的影响甚微, 而能较好地反映岩溶的发育程度及岩溶管网与上覆土层的水力联系。

(3) 据易塌陷带  $SI_C$  值的特征分析, 塌陷主要是发生在岩溶管网比较发育、覆盖层较薄、岩溶地下水位迅速下降的区域。

### 参 考 文 献

- 1 涂水源, 张伯禹, 谢代兴等. 桂林环境工程地质. 重庆: 重庆出版社, 1988, 33~85
- 2 沈照理, 朱宛华, 钟佑桑. 水文地球化学基础. 北京: 地质出版社, 1993, 26~33

## THE HYDROGEOCHEMICAL CHARACTERISTICS IN THE KARST COLLAPSE ZONE IN GUILIN CITY

Lan Junkang Guo sheng

(Department of Construction Engineering, Guilin Institute of Technology)

**Abstract** The research on the karst collapse distribution and the hydrogeochemical environmental characteristics of Guilin city shows that  $SI_C$  value is closely related to the collapse distribution, secondly  $P_{CO_2}$ , but the total dissolved solid, the hardness and  $SI_D$  value are weekly related to it. Most collapses are distributed in the region with  $SI_C=0.5\sim 1.0$ . Collapsing is mainly related to the degree of karst development, the thickness of overburden and the high speed of water table drawdown.

**Key words** karst collapse; hydrogeochemistry; genesis; Guangxi; Guilin

### 尾矿绢英(质)粉的用途

有色金属矿山选矿尾矿绢英(质)粉, 是重要的非金属矿产资源, 有很高的潜在应用价值, 综合利用大有作为。

绢英粉可以一定比例代替白炭黑、半补强炭黑, 可用于橡胶工业制造绝缘橡胶制品、防酸碱输送带等, 并可降低成本, 且工艺性能优于轻质碳酸银、陶土和滑石。另外, 绢英粉在塑料特别是工程塑料、油漆、涂料等行业中亦有广泛用途。

对绢英粉进行选矿和深加工, 分选出绢云母和石英单矿物, 其应用价值会更高。石英主要用于玻璃和铸造业。绢云母则因其分散性好、比表面积大、化学性能稳定、 $300\text{ }^{\circ}\text{C}$  以下与酸不反应、热稳定性和绝缘性好, 具抗紫外线及吸收微波等特性, 故大有开发前途。又因绢云母悬浮性好、纯者色白、化学惰性和遮盖力强等特性, 可在生产无光、平光和高光泽油漆时作填充剂, 还可生产防锈、耐腐蚀涂料。高档化妆品使用 30% 的绢云母作填充剂, 其制品柔软、滑爽、富有弹性, 广受消费者欢迎。另外, 绢云母超细加工到小于 5 微米, 通过改性处理可代替价格高的钛白粉, 作为防晒化妆品的眼影膏和特种塑料容器填料。目前这些原料, 国内外市场供应紧俏。

(叶 东)