

基于多目标决策——理想区间模型的喀斯特地区 枯水资源承载力评价

戴洪刚, 梁虹, 张美玲

(贵州师范大学 地理与生物科学学院, 贵阳 550001)

摘要: 枯水期的“水少”问题已经成为喀斯特地区社会经济发展的“瓶颈”。首先明确了枯水资源承载力的基本概念, 阐述了枯水资源承载力的内涵及特征, 并以贵阳地区为例, 运用多目标决策——理想区间模型对贵阳地区的枯水资源承载力进行了综合评价, 得出贵阳地区的枯水资源承载力总体较弱, 并提出了相应的措施, 为贵阳地区实现循环经济发展提供一定的理论依据, 以促进其社会、经济、生态、环境、资源的可持续发展。

关键词: 枯水资源承载力; 多目标决策; 理想区间; 喀斯特地区

中图分类号: TV211.1 文献标识码: A 文章编号: 1005-3409(2007)06-0023-04

The Low-flow Water Resource Carrying Capacity Based on a Multi-decision-making Ideal Interval Model in Karst Area

DAI Hong-gang, LIANG Hong, ZHANG Mei-ling

(School of Geography and Biology, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China)

Abstract: The scarce water resource has already become “bottleneck” of regional social economic development of karst area in the drought season. This text defines characteristic of the low-flow water resource carrying capacity. Taking Guiyang as an example, using multi-decision-making ideal interval model to comprehensively assess the low-flow water resource carrying capacity of Guiyang city, that low-flow water resource carrying capacity is relatively weak, and provides the corresponding measures. Thus it offers certain theoretical basis for the circulation economic development of Guiyang, and promote the sustainable development of the society, economy, ecology, environment and resources of Guiyang area.

Key words: water resource carrying capacity; multi-decision-making; ideal interval; karst area

喀斯特地区由于特殊的水文地质地貌条件^[1], 其地表水大部分转入地下, 能利用的地表水很少, 而地下水一般埋藏较深不易被开采利用, 可见, 缺水已经成为喀斯特地区社会经济发展的“瓶颈”, 在枯季尤其严重^[2], 它对喀斯特地区的综合发展和发展规模有着至关重要的影响^[3]。因此枯水资源承载力研究已越来越引起喀斯特地区乃至非喀斯特地区的高度关注。再加上近几年西部地区的城市发展迅速、经济规模扩大、人民生活水平提高, 对水资源的需求有较大的增长, 寻求解决枯水资源与发展相矛盾的途径对于喀斯特地区具有重大的现实意义。可见喀斯特地区枯水资源承载力的研究是社会济生态环境可持续发展中的一个薄弱环节, 亟待进一步解决。本文以贵阳地区为例, 运用多目标决策——理想区间模型进行枯水资源承载力评价, 并提出了提高枯水资源承载力的措施, 为贵阳地区乃至整个喀斯特地区的社会经济生态环境的可持续发展提供了一定的理论基础。

1 枯水资源承载力的概念及特征

对喀斯特地区水资源承载力概念的理解和表述, 不同学

者有着明显的差异, 还没有形成统一认识^[4-6]。在喀斯特地区岩溶发育强烈, 地表水与地下水转化频繁, 枯水期较长再加上原本脆弱的生态环境能利用的枯水资源有限, 因科学技术水平、文化素质和社会观念的影响而导致对枯水资源的开采也存在差异。因此枯水资源承载力可定义为: 某一喀斯特地区的枯水资源在特定的历史发展和社会经济技术阶段, 在一定的时期考虑序列内, 考虑可预见的技术、文化、体制和个人价值选择的影响, 在不破坏喀斯特地区社会和生态系统的前提下, 以维护喀斯特生态、环境良性循环发展为条件, 通过合理分配和有效利用获得最合理的社会、经济与环境协调发展的枯水资源开发利用的最大可承载喀斯特地区农业、工业、城市规模和人口的能力。从定义可以看出, 喀斯特地区枯水资源承载力具有以下几个特征:

(1) 灰色性。由于喀斯特流域具有功能上的耗散结构、流域空间上的动态性、流域边界的开放性, 造成水文现象的变异, 使人们对喀斯特枯水资源的预测目前无法达到确定的范围, 因此, 枯水资源系统是一个灰色系统, 客观存在着复杂

*收稿日期: 2007-01-17

基金项目: 贵州省优秀科技教育人才省长专项基金[黔科教办(2003)04]; 贵州省优秀科技人才培养计划资助项目[黔科合人字(2003)0315]; 贵州省科学技术基金[黔科合J字(2005)2085号]; 贵州师范大学2008-2006年度重点课题科研基金资助

作者简介: 戴洪刚(1979-), 男, 山东潍坊人, 在读硕士研究生, 主要从事喀斯特水文水资源与GIS研究。

通信作者: 梁虹(1959-), 男, 教授, 从事喀斯特地区水文水资源研究。

性和不确定的因素,再加上喀斯特地区社会、经济的发展及环境变化,人类对喀斯特现象及其枯水资源演化等自然规律认识的局限性,具体的承载力评价指标存在着一定的模糊性和不确定性。

(2) 振荡性。由于社会经济发展与环境之间的平衡存在振荡的特性,因而喀斯特地区枯水资源的承载力也不一定总是持续上升或下降,而是具有一种振荡的特性.主要体现在:喀斯特地区,由于在不同的社会历史发展阶段,人类开发利用枯水资源的能力和水平不同,也会有不同的承载能力;枯水资源承载能力的大小也会随着枯水资源的开发阶段、目标和条件不同而变化。

(3) 相对性。喀斯特地区的枯水资源总量及其变化规律是一定的、可以把握和衡量的,但是也并不是一成不变的,人类可以通过社会经济技术活动有限度改变枯水资源承载能力的大小。由于自然条件和社会因素的约束,枯水资源承载能力在某一具体历史发展阶段存在可能的最大承载上限。

(4) 可增强性。随着社会经济的不断发展,喀斯特地区的人们对水资源需求日益增加,在驱动力的驱使下,人们可以通过合理分配和有效利用所获得最合理的社会、经济与环境协调发展的枯水资源来增加枯水资源承载能力。再者,由于枯水资源的量变化幅度不大,人们可以利用有限的枯水资源选择适合自己的社会发展模式,以达到提高喀斯特地区枯水资源承载力的目的。

表 1 贵阳枯季各监测点评价因素指标评价统计值

承载力评价指标	待评价区域									
	南明区	云岩区	花溪区	乌当区	白云区	小河区	清镇市	开阳县	息烽县	修文县
人均水资源可利用量/($\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1}$)	9.437	13.94	12.20	16.30	29.78	16.33	10.62	10.80	14.92	10.38
供水模数/($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)	3.656	8.046	0.2837	0.3463	1.404	2.052	0.2501	0.1556	0.2474	0.1962
耕地面积比重/%	12.79	10.59	46.2	46.83	56.52	11.60	25.82	30.55	26.88	36.33
综合生活用水定额/($\text{L} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	324.0	312.2	95.8	174.1	229.1	294.0	152.4	132.7	132.0	139.4
需水模数/($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)	0.803	2.313	0.1587	0.1651	0.4455	0.485	0.1429	0.1035	0.1302	0.1535
喀斯特面积比重/%	95.20	68.10	94.00	90.60	89.30	79.60	81.70	83.60	80.30	82.50
工业耗水率/%	0.1429	0.2095	0.1371	0.1148	0.1433	0.1304	0.1601	0.1179	0.0627	0.0962
单位面积水资源量/($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	0.0302	0.0295	0.0319	0.0307	0.0276	0.0292	0.0325	0.0325	0.0267	0.0305
万元产值农业耗水/($\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$)	68.22	66.59	471.22	302.65	431.88	139.7	438.35	428.55	583.64	520.34

表 2 贵阳地区枯水资源承载力评价标准

评价指标	iv	㉔	㉕	㉖
	(弱)	(较弱)	(一般)	(强)
人均水资源可利用量/($\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1}$)	< 10	10~ 20	20~ 30	> 30
供水模数/($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)	< 1	1~ 5	5~ 9	> 9
耕地面积比重/%	< 20	20~ 40	40~ 60	> 60
综合生活用水定额/($\text{L} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	< 150	150~ 250	250~ 300	> 300
需水模数/($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)	< 0.15	0.15~ 0.5	0.5~ 1.0	> 1.0
喀斯特面积比重/%	> 90	80~ 90	70~ 80	< 70
工业耗水率/%	< 0.1	0.1~ 0.16	0.16~ 0.22	> 0.22
单位面积水资源量/($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	< 0.025	0.025~ 0.028	0.028~ 0.032	> 0.032
万元产值农业耗水/($\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$)	> 500	500~ 300	300~ 100	< 100

2.1 喀斯特地区枯水资源承载力的评价指标建立

喀斯特地区枯水资源承载能力研究与区域本身的发展目标具有密切关系,而且由多种因素制约,因此在分析喀斯

2 贵阳地区枯水资源承载力评价

贵阳地处黔中山原丘陵中部,长江与珠江分水岭地带,峰丛与碟状洼地、漏斗、伏流、溶洞发育,属中亚热带季风湿润气候,历年平均气温为 15.30℃,平均降水量 1 100~ 1 200 mm。河流多为雨水补给的山区性小河,主要河流有南明河、蒙江、猫跳河等,河流污染比较严重,历年平均总水资源量为 49.759 6 亿 m^3 ,平均历年枯水资源量仅为 2.487 8 亿 m^3 。

由于喀斯特地区枯水资源承载力的评价面对的系统是一个社会-经济-生态-环境-资源复杂巨系统,喀斯特地区的枯水资源承载力由多种因素影响,需要研究喀斯特地区的受喀斯特水文地貌因素影响的枯水资源与社会经济发展、生态环境和其它资源之间的关系,因此枯水资源承载力评价问题是一典型的多目标、多决策的复合系统问题,这就为多目标决策模型进行枯水资源承载力评价提供了理论依据。郦建强^[7]把常用的多目标决策理想点法进行改进,将评价标准处理成理想区间的形式,提出了一种新的评价方法——多目标决策理想区间法(MODMIIM)。MODMIIM 既融入了专家的主观意见,又避免了各分目标之间的比较、评分,解决了在多指标决策中出现的相容或不相容评价指标权重确定较为困难的问题,能得到的最佳评价权重,比较符合实际。以贵阳地区为例,运用多目标决策理想区间法对喀斯特地区枯水资源承载力进行评价,为评价喀斯特地区枯水资源承载力提供有效的方法。

特地区水资源承载力时既要考虑岩溶环境因素,还要考虑社会、政治、经济和人文等综合因素;不能简单的以人口数量和城市建设规模来评价,而应以社会、经济、生态综合指标来度量枯水资源承载能力。只有这样研究喀斯特地区的枯水资源承载力才具有一定的现实意义和可操作性。本文运用主成分分析对喀斯特地区枯水资源承载力的指标进行分析,选出主成分均值较大的作为评价指标:(1)人均水资源可利用量($\text{m}^3/\text{人}$);(2)供水模数($10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$);(3)耕地面积比重(%);(4)综合生活用水定额($\text{L}/\text{人} \cdot \text{d}$);(5)需水模数($10^4 \text{ m}^3/\text{km}^2$);(6)喀斯特面积比重(%);(7)工业耗水率(%);(8)单位面积水资源量($\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{a}$);(9)万元产值农业耗水($\text{m}^3/\text{万元}$);本文采用 1998— 2003 年的《贵阳市水资源公报》和《贵阳市统计年鉴》为基础数据,将贵阳地区 10 个县市区作为 10 个监测点(表 1),根据贵阳市 1998— 2003 年的用水状况,并结合贵阳市的有关规划及相关城市的有关用水标准,划分贵阳市枯水资源承载力评价理想区间标准(表 2)。

2.2 枯水资源承载力综合评价的 MODMIIM 基本步骤
步骤 1:构造目标向量函数。选用枯水资源承载力评价

系统中的 10 个指标来综合评价枯水资源承载力, 由此构造目标向量函数:

$$F(X) = [f_1(X), f_2(X), f_3(X), \dots, f_j(X), \dots, f_n(X)]^T \quad (1)$$

式中: $f_j(X)$ ——第 j 个指标, $j= 1, 2, 3, \dots, 10$ 。

步骤 2: 构造监测点(见表 1)指标向量。设第 K 个监测点指标向量为 F_K 为:

$$F_K = [f_{1,k}, f_{2,k}, \dots f_{j,k}, \dots f_{n,k}]^T \quad (2)$$

式中: $k= 1, 2, 3, \dots, 10$; f_{jk} ——第 K 个监测点第 j 个指标值。

步骤 3: 构造理想区间向量(见表 2)。枯水资源承载力综合评价标准中的每一等级的标准指标构成理想区间向量:

表 3 贵阳地区评价标准值无量纲化结果

承载力评价指标	待评价区域									
	南明区	云岩区	花溪区	乌当区	白云区	小河区	清镇市	开阳县	息烽县	修文县
人均水资源可利用量/($\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1}$)	0.6521	0.9633	0.8431	1.1264	2.058	1.1285	0.7339	0.7463	1.031	0.7173
供水模数/($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)	2.1975	4.8361	0.1705	0.2081	0.8439	1.2334	0.1503	0.0935	0.1487	0.1179
耕地面积比重/%	0.4206	0.3482	1.5192	1.5399	1.8585	0.3814	0.849	1.0046	0.8839	1.1946
综合生活用水定额/($\text{L} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	0.1632	1.5722	0.4824	0.8768	1.1537	1.4806	0.7675	0.6683	0.6648	0.702
需水模数/($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)	1.6386	4.72	0.3239	0.3369	0.9091	0.9897	0.2916	0.2112	0.2657	0.3132
喀斯特面积比重/%	1.1268	0.806	1.1126	1.0723	1.0569	0.9421	0.967	0.9895	0.9504	0.9764
工业耗水率/%	1.0868	1.5933	1.0427	0.8731	1.0898	0.9917	1.2176	0.8966	0.4768	0.7316
单位面积水资源量/($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	1.0024	0.9785	1.0588	1.019	0.9161	0.9692	1.0787	1.0787	0.8862	1.0123
万元产值农业耗水率/($\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$)	0.1977	0.193	1.3654	0.877	1.2514	0.4048	1.2702	1.2418	1.6912	1.5077

然后再计算枯水资源承载力指标的权重:

$$B_{jk} = \frac{A_{jk}}{\frac{1}{9} \sum_{j=1}^9 A_{jk}} \quad (5)$$

表 4 贵阳市各枯水资源承载力评价指标权重值

承载力评价指标	待评价区域									
	南明区	云岩区	花溪区	乌当区	白云区	小河区	清镇市	开阳县	息烽县	修文县
人均水资源可利用量/($\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1}$)	0.0769	0.0602	0.1065	0.1421	0.1848	0.1324	0.1002	0.1077	0.1473	0.0986
供水模数/($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)	0.2590	0.3021	0.0215	0.0262	0.0758	0.1447	0.0205	0.0135	0.0212	0.0162
耕地面积比重/%	0.0496	0.0217	0.1919	0.1942	0.1669	0.0448	0.1159	0.1449	0.1263	0.1642
综合生活用水定额/($\text{L} \cdot \text{人}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$)	0.0192	0.0982	0.0609	0.1106	0.1036	0.1737	0.1048	0.0964	0.0950	0.0965
需水模数/($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)	0.1931	0.2948	0.0409	0.0425	0.0816	0.1161	0.0398	0.0305	0.0380	0.0431
喀斯特面积比重/%	0.1328	0.0503	0.1405	0.1352	0.0949	0.1106	0.1320	0.1428	0.1358	0.1343
工业耗水率/%	0.0311	0.0455	0.0298	0.0249	0.0311	0.0283	0.0348	0.0256	0.0136	0.0209
单位面积水资源量/($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)	0.0286	0.028	0.0303	0.0291	0.0262	0.0277	0.0308	0.0308	0.0253	0.0289
万元产值农业耗水率/($\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$)	0.0233	0.0121	0.1724	0.1106	0.1124	0.0475	0.1734	0.1792	0.2416	0.2073

表 5 各监测点到各等级理想区间的距离

距离	待评价区域									
	南明区	云岩区	花溪区	乌当区	白云区	小河区	清镇市	开阳县	息烽县	修文县
D(1, k)	1.4448	2.5979	1.1818	1.4627	1.9164	1.7735	0.9503	0.6959	0.9326	0.9111
D(2, k)	1.4849	2.1621	1.0476	1.0270	0.8335	1.0466	0.3919	0.7218	1.3627	1.2125
D(3, k)	1.4809	0.8958	1.0027	1.1918	1.0358	1.1365	0.6672	1.2603	1.7969	1.6816
D(4, k)	2.2501	0.8224	2.0597	2.0818	2.2469	2.0641	2.0945	2.2218	2.5326	2.3904

具体方法是取第 k 个监测点的监测值到第 i 个理想区间向量的距离 $d(i, k)$:

$$F_i = [F_{1,i}, F_{2,i} \dots, F_{j,i}, \dots F_{n,i}]^T \quad (3)$$

$F_{j,i} = [p_{j,i}, q_{j,i}]$
式中: $i= 1, 2, 3, 4$; $p_{j,i}, q_{j,i}$ ——第 i 个等级第 j 个标准指标所对应区间的左右端点。

步骤 4: 计算权重 λ_j 。因指标量纲不同, 因此首先要将指标的样本值进行无量纲化处理。

$$A_{jk} = S_{jk} / (\frac{1}{10} \sum_{k=1}^{10} S_{jk}) \quad (4)$$

式中: A_{jk} ——第 j 个指标的第 k 个监测点的无量纲化值; S_{jk} ——第 j 个指标的第 k 个监测点的值。结果如表 3。

其结果如表(4)。
步骤 5: 计算监测点到各等级的理想区间向量的距离, 详见表 5。

$$d(i, k) = \sum_{j=1}^9 \lambda_j \Delta(i, k, j) \quad (6)$$

式中: λ_j ——权重。

当评价因子处于一级时, 即 $i = 1$ 时:

$$\Delta(i, k, j) = \begin{cases} (f_{j, k} - p_{j, 1}) / (q_{j, 1} - p_{j, 1}) & f_{j, k} \in [p_{j, 1}, q_{j, 1}] \\ 1 + (f_{j, k} - p_{j, 2}) / (q_{j, 2} - p_{j, 2}) & f_{j, k} \in [p_{j, 2}, q_{j, 2}] \\ 3 & f_{j, k} > q_{j, 2} \end{cases} \quad (7)$$

当评价因子处于 2, 3 级时, 即 $i = 2, 3$ 时:

$$\Delta(i, k, j) = \begin{cases} (f_{j, k} - p_{j, 1}) / (q_{j, 1} - p_{j, 1}) & f_{j, k} \in [p_{j, i}, q_{j, i}] \\ 1 + (f_{j, k} - p_{j, i-1}) / (q_{j, i-1} - p_{j, i-1}) & f_{j, k} \in [p_{j, i-1}, q_{j, i-1}] \\ 1 + (f_{j, k} - p_{j, i+1}) / (q_{j, i+1} - p_{j, i+1}) & f_{j, k} \in [p_{j, i+1}, q_{j, i+1}] \\ 3 & f_{j, k} < p_{j, i-1}, f_{j, k} > q_{j, i+1} \end{cases} \quad (8)$$

当评价因子处于四级, 即 $i = 4$ 时:

$$\Delta(i, k, j) = \begin{cases} (f_{j, k} - p_{j, 4}) / (q_{j, 4} - p_{j, 4}) & f_{j, k} \in [p_{j, 4}, q_{j, 4}] \\ 1 + (f_{j, k} - p_{j, 4}) / (q_{j, 4} - p_{j, 4}) & f_{j, k} \in [p_{j, 3}, q_{j, 3}] \\ 3 & f_{j, k} > q_{j, 3} \end{cases} \quad (9)$$

步骤 5: 求最小距离, 即确定枯水资源承载力评价等级。
在表 5 中, 取每一监测点中 $D(i, k)$ 的最小距离, 则最小距离

所对应的等级 i 即为第 k 个监测点的枯水资源承载力综合评价的等级(见图 1, 表 6)。

表 6 各监测点到理想区间的最小距离及所属等级

	南明区	云岩区	花溪区	乌当区	白云区	小河区	清镇市	开阳县	息烽县	修文县
最小距离	1. 4448	0. 8958	1. 0027	1. 027	0. 8335	1. 0466	0. 3919	0. 6959	0. 9326	0. 9111
所属等级	iv(很弱)	㊟一般	㊟一般	㊟(较弱)	㊟(较弱)	㊟(较弱)	㊟(较弱)	iv(很弱)	iv(很弱)	iv(很弱)

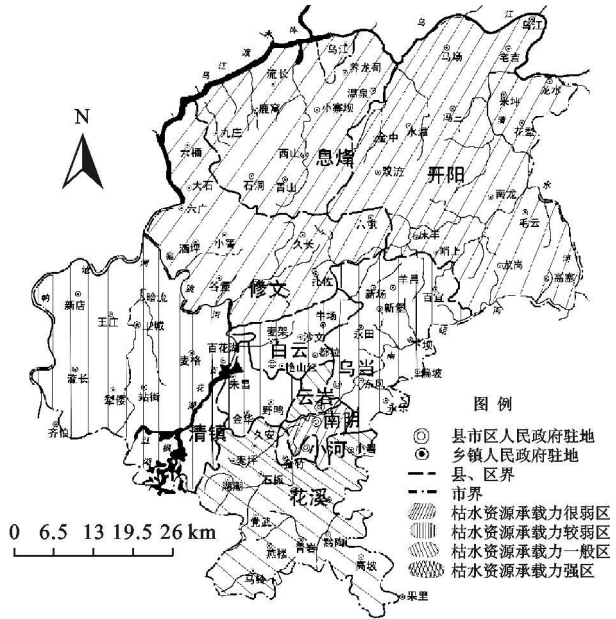


图 1 贵阳地区枯水资源承载力等级分布

表 7 贵阳地区枯水资源承载力评价结果

监测点	南明区	云岩区	花溪区	乌当区	白云区
灰类	弱	中等	弱	较弱	中等

监测点	小河区	清镇市	开阳县	息烽县	修文县
灰类	较弱	较弱	较弱	弱	弱

从表 6 中可以得出: 南明区、开阳县、息烽县、修文县的枯水资源承载力很弱; 云岩区和花溪区的枯水资源承载力一般; 乌当区、白云区、小河区及清镇市的枯水资源承载力较弱; 贵阳市枯水资源承载力总体较弱。可见贵阳地区总体枯水资源承载力水平较弱, 需采取措施加以提高。这为贵阳地

区的社会经济发展提供了参照系。此外, 还利用灰色聚类决策模型对其枯水资源承载力进行评价, 也得到相似的结论, 如表 7。

3 建议

在实际工程中, 仅知道评价结果是不够的, 还应具体分析各指标的作用效果, 找到存在的问题, 指出解决问题的方向, 权重是某指标在枯水资源承载力评价中的贡献率, 因此, 权重值大的指标就是造成该地区枯水资源承载力向不利于方向发展的主要因素, 也是该地区在提高枯水资源承载力中必须重点改善的指标。从表 4 中我们可以看出今后贵阳地区各县市区枯水资源承载力改善的重点如表 8。

表 8 贵阳地区各县市区枯水资源承载力改善重点

监测点	南明区、花溪区、云岩区	乌当区	白云区	小河区	清镇市、开阳县、息烽县、修文县
改善重点	供水模数	耕地面积	人均资源可利用量	综合生活用水定额	万元产值农业耗水率

总之, 要提高贵阳市枯水资源承载力, 建议从以下几个方面入手:

- (1) 寻找水源, 以增加枯水季节的供水量。但由于岩溶发育的不均匀导致岩溶水分布的位置不易确定和找寻, 因此应在传统水文地质工作的基础上将遥感、综合物探方法有机结合起来, 在喀斯特地区寻找深切河谷区和岩溶表层水。
- (2) 制定水资源保护规划, 加强水资源管理, 以法治水, 最大限度地发挥水资源的效益, 提高水的重复利用率, 提高枯水资源承载力。
- (3) 要提倡节约用水, 建立与社会市场经济相适应的水价体系, 实行分质供水、分质定价, 建立节水型的贵阳。
- (4) 控制工业三废的排放, 加强污水处理, 发展循环经济。

(下转第 36 页)

面形成后,卸荷回弹作用是在短时间内发生的。

(3) 在不同水平,模型的变化情况不同。4 个水平的百分表测量 4 个高度:65,60,55,50 cm;最大位移量依次为:1.25,1.19,1.15,1.12 mm,从而可以看出高水平位移都大于低水平位移。

(4) 在 5 次开挖过程中,可以发现公路开挖($T=80\text{ h}$ 时)的模拟边坡变形量最大,从而证明在整个边坡变形过程中,公路开挖造成的影响最大。

4 结 语

以上两次模型试验,虽为验证同一边坡类型的变形破坏机制,但采用的层面制作方法不同,侧重点也不同。但从总体来看,通过对以上两次模型试验结果观察和所测数据综合分析,可得出以下结论:

(1) 从量测数据上可以发现,随着模型的不断开挖(模拟河流下切和公路开挖),坡体表面存在向临空方向的倾倒弯曲变形,模拟结果与理论分析一致,证明该边坡的破坏方式为倾倒弯曲拉裂型。

(2) 时间上,从位移曲线分析,在模拟下切每个阶段中,每一次下切初始阶段,都有一次比较大的变形,之后变形发展缓慢;证明在模拟河流不断下切时,坡体表面卸荷回弹作用是在短时间内发生的。

(3) 空间上,不同水平,模型的变化情况也不同。在水平方向,高水平位移大于低水平位移;在垂向方向,上部垂向位移大于下部垂向位移。证明坡体上部所受应力大于下部所受应力,上部首先发生变形破坏,且变形规模大于下部,在对该边坡采取治理措施时应予以注意。

(4) 2 次试验中,都反映出在开挖过程中,模拟公路的开挖时模型边坡变形量最大,从而证明在实际整个边坡变形过

程中,公路开挖造成的影响最大。

(5) 对比 2 次试验的变形数据:第一次模型试验坡体表面最大变形量较小(水平方向 0.09 mm,垂直方向 0.13 mm);第二次模型试验,坡体表面最大变形量较大(1.25 mm,垂直方向 0.26 mm)。分析原因为第一次试验采用钢丝切割层面,层面不光滑,有波状纹理;第二次试验用刀片切割层面,层面光滑,基本无纹理。因此可以推断层面性质对边坡变形的大小有很大的影响,即层面越平直、光滑,则开挖临空面的卸荷回弹、倾倒弯曲变形越明显。

(6) 模拟坡体横向细沟切割对坡体表面变形量影响不大。

(7) 模型变形在宏观上的表征并不明显,推测原因为蠕变破坏本身形成较缓慢所致,建议对该滑坡实行实地监测,采取有效治理措施。

参考文献:

[1] 陈安敏,顾金才,沈俊,等.地质力学模型试验技术应用研究[J].岩石力学与工程学报,2004,23(22):3785-3789.

[2] 张林,费文平,李桂林,等.高拱坝坝肩坝基整体稳定地质力学模型试验研究[J].岩石力学与工程学报,2005,24(19):466-469.

[3] 张倬元,王士天,王兰生.工程地质分析原理[M].北京:地质出版社,1994:331-332.

[4] 周维垣.高等岩石力学[M].北京:水利水电出版社,1990:404-408.

[5] 王汉鹏,李术才,张强勇,等.新型地质力学模型试验相似材料的研制[J].岩石力学与工程学报,2006,25(9):1842-1847.

(上接第 26 页)

参考文献:

[1] 杨明德,等.喀斯特流域水文地貌系统[M].北京:地质出版社,1998:2-9.

[2] 戴洪刚,梁虹,黄法苏.喀斯特枯水、干旱、灾害初探:以贵州省为例[J].贵州师范大学学报(自然科学版),2005,23(4):28-33.

[3] 汤奇成,张捷斌.西北干旱地区水资源与生态环境保护[J].地理科学进展,2001,20(3):227-233.

[4] 贺中华,梁虹,黄法苏,等.岩溶地区枯水资源承载力概念与理论的讨论[J].水资源研究,2004,25(4):1-3.

[5] 王在高,梁虹.岩溶地区水资源承载力指标体系及其理论模型初探[J].中国岩溶,2001,20(2):144-148.

[6] 邓欢,郭纯清.岩溶地区水资源承载力与经济社会的可持续发展[J].桂林工学院学报,2004,24(1):32-35.

[7] 郦建强,陆桂华,杨晓华.流域水资源承载力综合评价的多目标决策:理想区间模型[J].水文,2004,24(4):1-4.