

文章编号: 1000-0585(2002)04-0441-08

喀斯特流域地貌类型对枯水径流的影响 ——以贵州省河流为例

王在高, 梁 虹, 杨明德

(贵州师范大学 资源与环境科学系, 贵阳 550001)

摘要: 影响流域的枯水径流及其变系数的因素很多, 如气候、岩性、地貌、植被、土壤等。本文借助于 GIS 软件和 SPSS 统计软件, 对喀斯特流域地貌类型进行划分和数字化, 并通过聚类分析把各流域按地貌类型的差异进行归类, 研究不同地貌类型及其空间配置的差异与枯水径流特征值之间的相互关系, 从而揭示地貌类型的差异对流域枯水的影响。

关 键 词: 喀斯特流域; 地貌类型; 枯水径流

中图分类号: P333.3; P931.5 **文献标识码:** A

1 问题提出

喀斯特流域是指特殊的含水介质(可溶岩双重含水介质)、有特殊的流域边界(地表、地下双重分水岭)、独特的地貌-水系结构及水文动态过程耦合的地域综合体^[1]。因此, 喀斯特流域与正常流域特别是湿润地区常态流域相比, 其流域空间结构、水系发育、地貌景观、水文动态规律都有明显的差别。这种差异正是由于喀斯特流域独特的结构及其产生的功能效应所致, 其中之一就表现在喀斯特流域的枯水径流规律上。对喀斯特流域枯水规律的探讨, 曾发表论文多篇^[2~4], 如文献 [4] 曾详细探讨过喀斯特流域岩性差异与洪、枯水特征值的相关分析, 其结论为: 灰岩比例愈高的流域, 枯水径流模数愈小; 白云岩比例愈高, 枯水径流模数则愈大。

喀斯特流域溶蚀强度与降水量、岩石可溶性、气温、地貌条件等因素存在一定的关系^[5], 而且不同岩性控制着不同的地貌类型的发育^[8], 这种地貌类型的差异也将导致不同流域的洪、枯水水文特征。本文借助于 GIS 软件和 SPSS 统计软件, 从定量的角度分析喀斯特流域地貌类型的差异对枯水径流特征值的影响, 以揭示喀斯特流域的地貌类型对枯水径流影响的规律, 为喀斯特地区水资源的评价、找水、污水排水控制及其社会经济发展和生态环境保护等提供一定的依据。

2 研究方法和资料来源

2.1 研究方法

在 GIS 技术的支持下, 以单个流域为统计单元, 利用 1:20 万贵州省综合水文地质

收稿日期: 2001-12-17; 修订日期: 2002-03-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40061001); 贵州省科学技术基金项目 (20013082)

作者简介: 王在高 (1969-), 男, 安徽天长人, 贵州师范大学硕士。主要从事自然地理与环境科学研究。

图、1 20 万贵州省地形图以及根据 1 10 万贵州省的地形图所确定的地貌类型，借助于 Arcview 软件强大的计算功能，在 1 20 万贵州省综合水文地质图上确定各个流域面积的大小，同时参考地形图和地貌图，在各流域内确定其地貌类型并数字化。然后按流域内各地貌类型的百分比，通过 SPSS 统计软件进行聚类分析，把地貌类型相似的流域归为一类，研究各类地貌类型控制下的历年枯水水文特征值的大小，从而揭示出喀斯特流域的地貌类型对枯水径流影响的规律。

2.2 资料来源

根据贵州省水文总站整编的《贵州省历年水文特征值统计资料》，选用了其中观测年数在 10 年以上的水文断面共 30 个，观测资料年限截止于 1979 年，对不足 10 年的观测资料，参考邻站延长到 10 年。所选的时间界限，主要是为了减少人类活动对枯水径流的影响，流域面积一般以中小流域为主。各流域水文特征值依据《贵州省历年水文特征值统计资料》计算获得（见表 1），主要统计各年最小日、旬、月枯水径流模数（ $M_{\text{日}}$ 、 $M_{\text{旬}}$ 、 $M_{\text{月}}$ ），以及它们各自的枯水流量的年变差系数（ $C_{V\text{日}}$ 、 $C_{V\text{旬}}$ 、 $C_{V\text{月}}$ ）。各样区内的地貌类型所占的百分比，是通过 Arcview 软件在贵州省综合水文地质图上叠加地貌类型获取。由于喀斯特地貌类型的复杂多样，为了能更好探讨典型喀斯特地貌类型对枯水水文特征值的影响，并与非喀斯特地貌类型如砂岩、板岩、页岩等形成的地貌类型比较研究，进行了归类和简化，分为以下几种类型：峰丛洼地、峰丛谷地、峰林溶原（盆地）、峰林谷地、半喀斯特低（中）山、非喀斯特地貌，各类地貌类型的百分比见表 2。

表 1 流域样区水文特征值表

Tab. 1 The hydrologic characteristics of analyzed drainage basin

水文 指标	样区 编号	高车 c1	织金 c2	麦翁 c3	黄猫村 c4	周家洞 c5	对江 c6	响水滩 c7	徐花屯 c8	草坪头 c9	土城 c10	寨蒿 c11
枯水	$M_{\text{日}}$	1.776	0.606	2.230	1.223	1.982	1.972	2.540	2.960	2.029	3.841	2.483
	$C_{V\text{日}}$	0.35	0.54	0.40	0.79	0.27	0.50	0.29	0.32	0.26	0.27	0.30
	$M_{\text{旬}}$	2.163	0.606	2.910	1.715	2.717	2.356	2.960	3.330	2.442	4.244	2.867
	$C_{V\text{旬}}$	0.29	0.54	0.39	0.62	0.23	0.44	0.22	0.32	0.24	0.25	0.26
	$M_{\text{月}}$	2.536	0.785	3.220	2.119	2.382	2.804	3.140	5.180	2.962	4.959	3.240
	$C_{V\text{月}}$	0.29	0.72	0.57	0.58	0.22	0.35	0.42	0.32	0.33	0.30	0.27
统计年数		21	10	18	14	10	15	10	10	21	15	13

水文 指标	样区 编号	南哨 c12	高旺寨 c13	下司 c14	荔波 c15	把本 c16	官坝 c17	正安 c18	旺草 c19	石阡 c20	南花 c21	车边 c22
枯水	$M_{\text{日}}$	2.972	2.812	4.470	1.525	2.042	2.910	2.740	1.872	1.850	2.972	3.063
	$C_{V\text{日}}$	0.20	0.31	0.36	0.35	0.26	0.35	0.25	0.40	0.28	0.27	0.35
	$M_{\text{旬}}$	3.254	3.228	5.368	1.861	2.604	3.910	3.190	3.793	2.560	3.254	3.658
	$C_{V\text{旬}}$	0.18	0.28	0.33	0.33	0.27	0.41	0.15	0.27	0.24	0.35	0.22
	$M_{\text{月}}$	3.706	3.709	6.077	2.156	2.722	4.110	3.380	4.532	3.130	3.706	4.148
	$C_{V\text{月}}$	0.18	0.30	0.35	0.33	0.34	0.42	0.27	0.37	0.22	0.34	0.22
统计年数		14	11	20	19	25	13	15	10	19	20	21

注：日、旬、月径流模数单位为 $l/s \cdot km^2$

3 样区地貌类型差异分类

从表 2 统计结果可见，所选的流域样区中，除非喀斯特地貌流域外，很少有单一地貌

类型的流域，通常表现为某一类或二类地貌类型为主的流域，有的流域甚至有几种地貌类型共存如对江、下司等。对于喀斯特流域来说，各流域样区内的岩性基本是碳酸岩（白云岩、石灰岩）、碳酸岩夹碎屑岩、碎屑岩夹碳酸岩以及第四纪沉积物等，由于岩性与构造决定了岩石孔隙、裂隙、溶隙发育状况，影响含水层的给水性、透水性等水理性^[9]，从而制约地下水对枯水的补给程度。而且，同一时代的岩层因岩相及岩性变化往往导致地貌景观或类型的明显变化。因此地貌类型的差异也会影响枯水径流的大小。另外，各流域样区大多为低山丘陵区，补给径流途径短，加上各样区大多数基岩裸露，松散层厚度小，森林植被覆盖率除少数非喀斯特流域以外，一般都较低，调节径流和涵养水源的能力小。为了将各流域样区地貌类型差异进行科学的定量分类，本文把各地貌类型占流域的百分比（表 2）作为要素指标，采用系统聚类法，对各流域样区进行分类。

表 2 流域样区地貌类型构成表（%）

Tab. 2 The type of landforms of analyzed drainage basin（%）

样区 编号	高车 c1	织金 c2	麦翁 c3	黄猫村 c4	周家洞 c5	对江 c6	响水滩 c7	徐花屯 c8	草坪头 c9	土城 c10	寨蒿 c11
峰丛洼地	62.08	66.67	0	29.13	0	19.87	100	100	35.1	0	0
峰丛谷地	12.92	0	0	38.84	15.71	15.29	0	0	0	0	0
峰林溶原	6.35	13.64	69.27	0	47.13	4.32	0	0	0	0	0
峰林谷地	2.35	0	0	21.94	0	21.67	0	0	0	0	0
半喀斯特低中山	8.44	0	0	0	37.16	17.4	0	0	64.9	100	0
非喀斯特地貌	7.86	19.69	30.73	10.09	0	21.45	0	0	0	0	100
流域面积（km ² ）	2252	66	192	793	974	1897	118	81	1094	966	858

样区 编号	南哨 c12	高旺寨 c13	下司 c14	荔波 c15	把本 c16	官坝 c17	正安 c18	旺草 c19	石阡 c20	南花 c21	车边 c22
峰丛洼地	0	40.15	2.55	7.05	18.26	0	0	0	0	0	0
峰丛谷地	0	26.81	0	42.62	0	51.36	69.33	37.93	0	0	0
峰林溶原	0	29.43	23.67	17.62	19.03	0	0	0	0	0	39.07
峰林谷地	0	0	38.35	0	0	0	0	0	19.39	0	0
半喀斯特低中山	0	0	3.1	32.71	32.37	37.8	0	62.07	40.03	0	0
非喀斯特地貌	100	3.61	32.33	0	30.34	10.84	30.67	0	40.58	100	60.93
流域面积（km ² ）	1171	914	2159	1220	1440	1254	1467	406	722	466	1244

首先对原始数据进行标准化处理，即把第 i 个样区第 j 个指标的数据 x_{ij} 减去均值再除以标准差：

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \bar{x}_j}{S_j} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n; j = 1, 2, 3, \dots, m) \tag{1}$$

式中， $S_j = [\sum_{i=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_j)^2 / n - 1]^{1/2}$ $\bar{x}_j = (\sum_{i=1}^n x_{ij}) / n$

而各流域样区之间的亲疏程度采用欧氏距离平方公式计算，即：

$$d_{rs} = (\sum_{k=1}^m (x_{rk} - x_{sk})^2)^{1/2} \tag{2}$$

式中： d_{rs} 为第 r 、 s 样区的距离； x_{rk} 表示第 r 样区第 k 个指标值； x_{sk} 表示第 s 样区第 k 个指标值。

根据公式（2）则可以求出任何两个样区之间的距离 d ，其距离矩阵为：

$$d = \{ d_{rs} \} = \begin{Bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{n1} & d_{n2} & \dots & d_{nn} \end{Bmatrix}$$

(3)

最后，通过 SPSS 软件依据距离大小绘出聚类谱系图^[10]（图 1）。

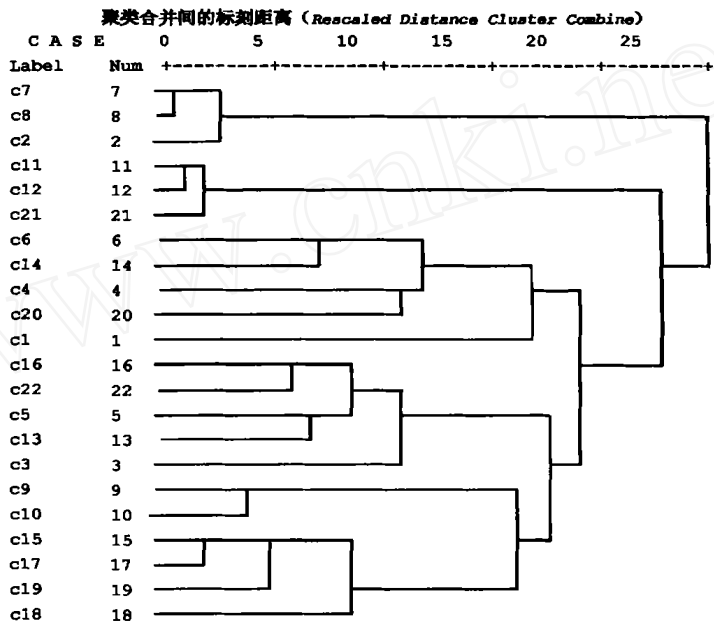


图 1 流域聚类谱系图

Fig. 1 Cluster analysis pedigree chart of drainage basins

从整个流域地貌类型聚类谱系图上可以看出各流域的相似性，按标刻距离等于 15，流域样区可分 6 类：

- (c2, c7, c8)，峰丛洼地面积占 88.89 %，即表现为以峰丛洼地为主的流域。
- (c15, c17, c18, c19)，峰丛谷地面积百分比达 50.31 %，即表现为以峰丛谷地为主的流域。
- (c3, c5, c13, c16, c22)，峰林溶原（盆地）面积百分比达 40.79 %，即表现为以峰林溶原（盆地）为主的流域。
- (c1, c4, c6, c14, c20)，该组的流域地貌类型比较全，没有一组地貌类型占明显的优势。暂且称为混合型地貌。
- (c9, c10)，该组的流域地貌类型以半喀斯特低、中山为主，其面积占 82.45 %。
- (c11, c12, c21)，这是一组非喀斯特地貌，岩性基本是非碳酸盐岩。

当按标刻距离为 22 时，流域样区可分 3 类：即典型的峰丛洼地、非喀斯特地貌和混合型地貌。从以上的分类说明，采用系统聚类法得到的结果与实际情况是相吻合的，这有助于流域地貌类型差异与枯水水文特征值关系规律的解释。

4 不同地貌类型的流域与枯水径流特征值相关分析

根据流域地貌类型的相似性，本文选择了 22 个流域样区可分为不同的类型，在所统计的流域中，属于典型的峰林谷地的地貌类型较少，只有平寨站流域（峰林谷地占 56.62 %），故未参加聚类。现按上述聚类的结果，来研究与枯水平均径流模数以及平均变差系数的关系，计算数据列入表 3。

表 3 各类流域地貌类型、水文特征值表

Tab. 3 The type of landforms, hydrologic characteristics of drainage basins

平均指标 类型	地貌类型平均百分比（%）						枯水平均值		
	峰丛 洼地	峰丛 谷地	峰林 溶原	峰林 谷地	半喀斯特 低、中山	非喀斯特 地貌	$\overline{M}_{\text{日}}$ ($\overline{C_{v\text{日}}}$)	$\overline{M}_{\text{旬}}$ ($\overline{C_{v\text{旬}}}$)	$\overline{M}_{\text{月}}$ ($\overline{C_{v\text{月}}}$)
	88.89	0	4.55	0	0	6.56	2.03 (0.38)	2.30 (0.36)	3.03 (0.48)
	1.76	50.31	4.41	0	33.14	10.38	2.26 (0.34)	3.18 (0.29)	3.54 (0.35)
	11.68	8.50	40.79	0	13.91	25.12	2.43 (0.31)	2.92 (0.27)	3.24 (0.33)
	22.73	13.41	6.87	20.74	13.79	22.46	2.26 (0.45)	2.83 (0.38)	3.33 (0.36)
	17.55	0	0	0	82.45	0	2.94 (0.26)	3.33 (0.24)	3.63 (0.31)
	0	0	0	0	0	100	2.81 (0.26)	3.13 (0.26)	3.55 (0.26)

4.1 枯水径流模数分析

从表 3 可以看出：第一，在喀斯特地貌类型中，以峰丛洼地为主的流域，各响应计算时段的枯水径流模数最小，以峰林溶原（盆地）为主的流域，枯水径流模数相对较大，这在最小日径流模数上表现最为明显；第二，总的来说，喀斯特流域的枯水平均径流模数要比非喀斯特流域的小；第三，当流域中喀斯特地貌类型较复杂多样，没有明显以某一种地貌类型为主时，其枯水平均径流模数往往介于峰丛地貌与峰林地貌之间；第四，当流域中具有较多的不纯的碳酸盐岩或碳酸盐岩与非碳酸盐岩相互交错在一起时（如 类），有时反而具有较大的枯水径流模数；第五，从统计的数据可以发现，各不同地貌类型的流域，对枯水平均径流模数是有一定影响的，但影响的程度并不十分明显。在文献 [4] 中论及灰岩的枯水径流模数要比白云岩小，差异性比较明显。但在这两种岩性的控制下，都可以发育峰丛地貌和峰林地貌^[7]，因此地貌类型的差异对枯水径流模数的影响程度小于岩性对枯水径流模数的影响程度。

4.2 枯水径流变差系数分析

从表 3 可看：第一，在喀斯特地貌类型中，以峰丛洼地为主的流域，各响应计算时段的枯水径流变差系数最大，以峰林溶原（盆地）为主的流域，枯水径流变差系数相对较小，这说明在喀斯特峰林平原、峰林盆地等流域中，因较为平缓的凹状平原、盆地上常常具有一定厚度的土层覆盖，因而具有较大的蓄水能力，而在峰丛洼地（谷地）流域，因地表土层零星分布，且厚度极薄，表层溶蚀裂隙发育，入渗强度较大，因而蓄水能力差；第

二，当流域由喀斯特流域逐渐向非喀斯特流域过渡时，枯水平均径流的变差系数在减小。

5 流域地貌类型的空间配置与枯水径流特征值相关分析

由于喀斯特地区有峰丛洼地（谷地）、峰林溶原（盆地）、峰林谷地多种地貌类型，这些地貌类型的空间配置不同对枯水径流也存在一定的影响。现选择四个流域进行对比，其枯水特征如表 4。

表 4 四个流域的枯水径流特征表

Tab. 4 The chart of low flow runoff in four drainages

站名	面积 (km ²)	最小日流量 (Cv) (M _模)	最小旬流量 (Cv) (M _模)	最小月流量 (Cv) (M _模)
平寨	322	0.339 (0.65) (1.05)	0.472 (0.6) (1.46)	0.944 (0.8) (2.92)
周家洞	974	1.93 (0.27) (1.98)	2.12 (0.23) (2.18)	2.32 (0.22) (3.38)
对江	1897	3.737 (0.5) (1.97)	4.468 (0.44) (2.36)	(5.323) (0.35) (2.80)
高车	2252	4.003 (0.35) (1.78)	4.873 (0.29) (2.16)	5.706 (0.29) (2.54)

注：流量单位 m³/s M_模—径流模数单位 l/s·km²

(1) 序列型：平寨，周家洞（图 2）。

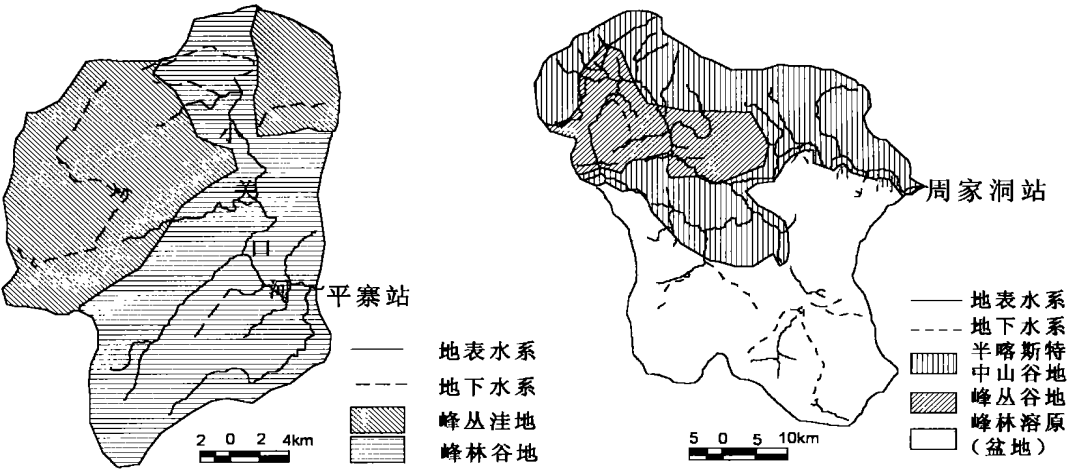


图 2 两个流域地貌类型比较图（左：平寨站，右：周家洞站）

Fig. 2 The comparing picture of land in forms both drainage basins

平寨站控制的流域，上游是峰丛洼地，面积为 140km²，下游是峰林谷地，面积 182km²。周家洞站控制的流域上游主要是峰林溶原（盆地），面积 459km²，下游主要是峰丛谷地和半喀斯特中山谷地。由上所说，在喀斯特峰丛洼地流域中，降雨很快进入表层裂隙带。进而转入地下的暗河、溶洞等。退水快，蓄水作用相对较弱，所以最枯水日径流模数相对较小，枯水径流变差系数较大；而当上游为喀斯特峰林平原时，降雨下渗能力较峰丛地貌小，因而，在水文功能上表现为蓄水作用强，其最枯水日径流模数相对较大，枯水径流变差系数反而较小。但随着统计历时的增大，这种差异可能会逐渐消除。

(2) 混合型：对江，高车（图 3）。

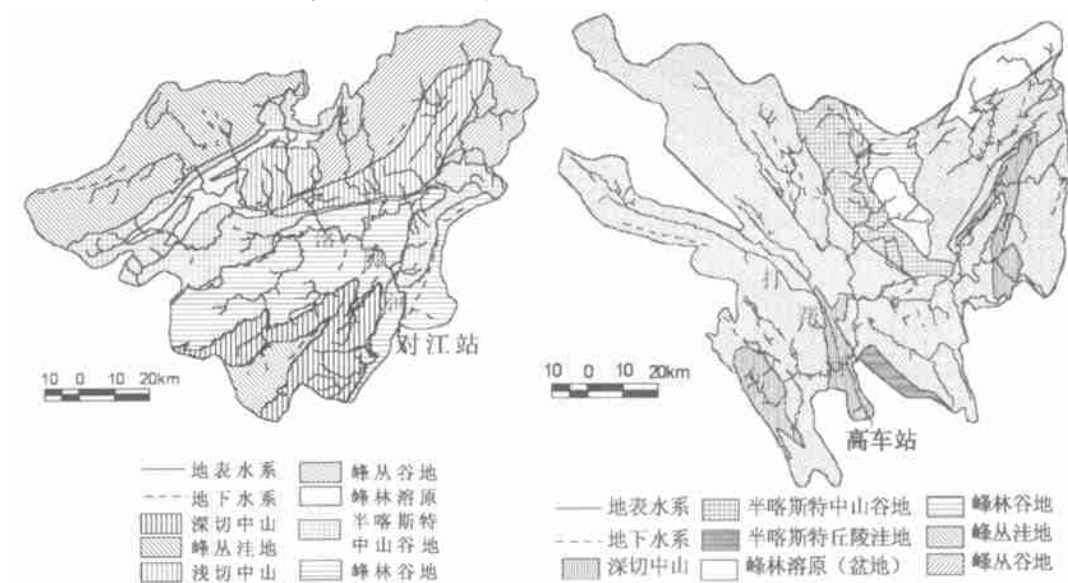


图 3 两个流域地貌类型比较图（左：对江站，右：高车站）

Fig. 3 The comparing picture of landforms in both drainage basins

为了能更好的说明喀斯特地貌类型的差异是否对枯水径流产生影响，同时选择了对江与高车两个流域，其地貌类型基本一致，但在空间配置上呈相互交错分布，称为混合型这两个流域的空间尺度相差不大，流域地貌类型较复杂，都有峰丛地貌、峰林地貌、半喀斯特低（中）山和常态地貌，且交错分布，由于地貌的组合和空间配置基本相同，对照表 4，其水文特征也基本一致。总之，由于喀斯特地貌类型结构的不同，其水文功能常常对输入的水流过程产生的蓄水作用、滞水作用和导水作用也不同。因此流域地貌类型在空间上的配置不同，对最小日枯水径流也会产生重要的影响。

6 结论

(1) 在喀斯特流域中，地貌类型是影响枯水径流模数的重要因素之一，当峰丛洼地所占比列愈高时，枯水径流模数愈小；峰林溶原（盆地）比例愈高，则枯水径流模数愈大。

(2) 在喀斯特流域中，地貌类型的差异对枯水径流的变差系数也有重要的影响，当流域中峰丛地貌比例较大时，枯水的变差系数也较大，峰林地貌则相反。

(3) 随着喀斯特地貌类型在空间的配置不同，对枯水最小日径流特征值会产生较大的影响，但随着统计历时的增长，这种影响程度会逐渐减小。

(4) 本文利用不同的地貌类型的特性研究枯水季节径流模数的特征，对评价不同地貌类型区的水资源有重要作用，但是，由于影响喀斯特枯水径流模数的因素很多，从单一的地貌因素入手，可能造成较大的误差。今后，应着重从地质、地貌、气候、植被、土壤等各种因素综合研究对枯水的影响，并分析不同地区，影响枯水径流大小的主导因素。

参考文献:

- [1] 杨明德,等.喀斯特流域水文地貌系统.北京:地质出版社,1998.
- [2] 王继辉,郭履维.贵州省诸河流枯水规律初步分析.水文,1995,(5):54~58.
- [3] 梁虹.喀斯特流域空间尺度对洪、枯水水文特征值影响初探.中国岩溶,1997,(2):121~128.
- [4] 梁虹,王剑.喀斯特地区流域岩性差异与洪、枯水特征值相关分析.中国岩溶,1998,(1):67~73.
- [5] 李钜章,林钧枢,房金福.喀斯特溶蚀强度分析与估算.地理研究,1994,(3):90~97.
- [6] 李秀云.滇西地区枯水径流与水资源开发利用.山地研究,1987,(2):108~113.
- [7] 高道德,等.黔南岩溶研究.贵阳:贵州人民出版社,1986.
- [8] 翁金桃.桂林岩溶与碳酸盐岩.重庆:重庆出版社,1987.
- [9] 刘庆书,许劲松.辽南不同岩性地区地下水动态研究.地理研究,1991,(3):23~29.
- [10] 卢纹岱,等.SPSS for Windows 从入门到精通.北京:电子工业出版社,1997.

Analysis of the impact of different landform types on low flow modulus in karst regions : a case study of rivers in Guizhou Province

WANG Zai-gao , L IANG Hong , YANG Ming-de

(Department of Resources and Environmental Science ,Guizhou Normal University ,Guiyang 550001 ,China)

Abstract : Many factors affect the runoff modulus and the variation coefficients of low flow , such as climate , rock , soil , plant , landforms , and so on. In karst drainage basins , the factors of geology , topography and landforms are complicated and they affect the low flow modulus together since they influence each other and condition each other.

In this paper the authors study the characteristics of low flow modulus making use of specific properties of different landforms. Firstly , landforms in karst regions are divided and digitized by means of GIS and SPSS software. All drainage basins were classified according to different types of landforms through cluster analysis in order to research the dimensions of low flow modulus in regions with different landforms types. In general , the following points are identified as: 1) the low flow modulus is smaller in regions with Fengcong landforms than Fenglin landform; 2) the low flow modulus is smaller in karst regions than in non-karst regions; and 3) it is bigger in regions with mixed types of landforms than in others.

Secondly , the impact of different types of drainage landform on low flow modulus are analyzed through different spatial distribution of landform types. The result is that even in karst regions with the same types of landforms , the low flow modulus would vary because of differences in spatial distribution.

In a word , landform types constitute an important factor affecting low flow runoff modulus and this conclusion is essential in evaluating the value of water resource in karst regions.

Key words : karst drainage basins ; landform types ; low flow runoff