

喀斯特流域枯水资源遥感反演

贺中华¹, 梁虹¹, 黄法苏², 赵芳³

(1. 贵州师范大学 地理与生物科学学院, 贵州 贵阳 550001;

2. 贵州省水文水资源局, 贵州 贵阳 550001; 3. 白云区第三中学, 贵州 贵阳 550003)

摘要: 喀斯特流域是由独特的地貌、水系结构及水文动态过程组成的地域综合体。影响喀斯特流域持水供水能力的因素复杂多样, 除岩性、地貌、植被等因素外, 喀斯特流域地貌特征也是影响喀斯特流域持水、保水和供水的重要因素。根据贵州省 ASTER 影像, 利用 RS 和 GIS 技术, 提取了 DEM 数据。以 DEM 数据、TM 影像和 CBERS 影像为基础, 选取 28 个喀斯特流域, 分析了影响喀斯特流域持水供水的十大因素, 并进行量化处理。借助 MATLAB 和 SPSS 软件进行数据处理和分析, 构建了喀斯特流域枯水资源遥感反演模型, 通过方差分析和样区检验, 取得了很好的识别效果。

关键词: 喀斯特流域; ASTER 影像; DEM; RS 和 GIS 技术; 遥感反演模型

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2008)02-0135-05

中图分类号: TV211.1

Low water Resource Retrieval in Karst Drainage Area by Remote Sensing

HE Zhong-hua¹, LIANG Hong¹, HUANG Fa-su², ZHAO Fang³

(1. School of Geography and Biology, Guizhou Normal University,

Guiyang, Guizhou 550001, China; 2. Department of Hydrology and Water Resources, Guiyang,

Guizhou 550001, China; 3. The No. 3 Middle School of Baiyun District, Guiyang, Guizhou 550003, China)

Abstract: Karst drainage area is a regional synthesis which is made up of spatial drainage boundary, unique landform, and river system structure, as well as hydrologic dynamic processes. It has its own special drainage structure. Thus, there are complicated and diversified factors that influence the karst drainage abilities of holding water and supplying water. Besides rock, geomorphology, and vegetation, the karst basin feature is also a very important factor for holding water, conserving water, and supplying water. DEM data were extracted from Guizhou ASTER images by applying RS and GIS. Based on DEM, TM, and CBERS, 28 karst drainage areas were selected to analyze the ten main factors that affect water holding and water supplying. In addition, quantitative analysis was made for the factors. A remote sensing retrieval model was then constructed by applying SPSS and MATLAB software to data processing and analysis. Sound retrieval effects were achieved through ANOVA and test of sample regions.

Keywords: karst area; ASTER image; DEM, RS, and GIS; remote sensing retrieval model

喀斯特流域是指具有特殊的含水介质(可溶岩双重含水介质), 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]。在喀斯特流域内, 地表崎岖, 地下洞隙纵横交错, 水文动态变化剧烈, 地表水渗漏严重, 地下持水保水能力差。土层薄, 肥力低, 植被生长困难,

水土流失严重, 形成了独特的、脆弱的喀斯特自然景观, 严重地制约了喀斯特流域的持水、供水能力。

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异, 这种差异严重地影响喀斯特流域水资源的开发, 尤其是枯水资源。喀斯特

收稿日期: 2007-10-17 修回日期: 2007-11-26

资助项目: 贵州省青年基金(黔教科 2006307); 贵州省科技基金[黔科合 J 字(2005)2085 号]

作者简介: 贺中华(1976—), 男(布依族), 贵州省兴义市人, 硕士, 讲师, 主要从事喀斯特水文水资源与 GIS 教学和科研工作。E-mail: hzhonghua7621@126.com。

通讯作者: 梁虹(1955—), 男(汉族), 贵州省贵阳市人, 硕士, 教授, 主要从事喀斯特水文水资源教学和科研工作。E-mail: lianghong@gznu.edu.cn。

流域枯水资源是指在现有的经济技术条件下,喀斯特流域枯水季节可开发利用的水资源。目前,国内外对非喀斯特流域水资源遥感反演模型的研究相对比较多^[2-11],而对喀斯特流域枯水资源的研究,除本课题组有相关的研究外^[12-16],至今国内外尚未见有相关的研究内容,枯水资源遥感反演模型的研究,更是一片空白。以贵州省为例,以 ASTER 影像为基础,利用 ERDAS, ENVI 自动提取 DEM 数据,从中选取具有代表性、典型性的喀斯特流域 28 个,并利用 ArcGIS, ArcView, GIS 提取喀斯特流域河网密度、流域形状系数、主河道纵比降等 10 个因素。利用 SPSS, MATLAB 进行数据处理。建立喀斯特流域枯水资源遥感反演模型,并任选 3 个喀斯特流域样区对反演模型进行检验。检验结果认为该模型模拟效果很好。

1 数据获取

1.1 水文数据获取

根据贵州省水文总站整编的《贵州省历年枯水流量统计资料》,从中选取具有连续 5~10 a 水文观测的、代表性和典型性的喀斯特流域水文断面 28 个,计算多年平均枯水径流深,并进行标准化处理(表 1)。

1.2 DEM 数据获取

喀斯特流域 DEM 的提取步骤如下^[17-22]。使用数字影像匹配技术,收集为生成 DEM 所需的大量同名像点;利用摄影测量原理,确定大量同名像点对应的地面上地物点的空间坐标;构建 DEM。立体影像处理流程图如图 1 所示。生成的喀斯特流域 DEM 见附图 6。

表 1 喀斯特流域特征与枯水径流的标准化数据

流域特征 水文站	流域出 口高程	河网 分支数	主河道 长度	河网 密度	流域 结构	主河道 纵比降	流域形 状系数	流域 崎岖数	流域平均 高程	高程 标准差	枯水 径流深
石牛口	-0.374 97	-0.572 43	-0.781 57	-0.265 28	-0.191 96	0.234 70	0.817 08	-0.936 96	-1.038 5	-0.847 36	-0.967 51
乌江渡	-0.387 32	-0.770 05	-0.962 04	-0.409 38	-0.191 69	2.077 40	0.051 22	0.123 01	-0.803 47	0.036 77	0.145 67
营盘	0.036 79	0.002 45	-0.478 51	0.377 90	5.375 02	-0.936 77	0.917 08	-0.543 41	-0.798 37	-0.570 40	1.700 59
白家林	-0.374 97	0.710 00	0.879 83	0.173 17	-0.192 62	-0.847 31	0.135 37	-0.205 53	-0.808 58	-0.549 10	-0.259 5
长河坝	-0.786 73	0.812 27	1.057 13	0.128 23	-0.192 55	-0.764 21	0.148 78	0.219 11	-1.053 83	-0.261 49	-0.012 57
田坝	-1.441 43	1.695 32	1.409 92	-0.220 32	-0.191 97	-0.441 53	-0.182 93	1.368 86	-1.293 97	0.633 29	1.670 78
猴昌河	0.036 79	-0.833 62	-0.914 76	-0.450 75	-0.191 66	3.263 82	-0.574 39	1.270 32	0.923 46	0.878 29	1.128 91
三岔河	1.683 84	-0.329 21	-0.423 54	-0.348 94	-0.191 85	-1.628 40	0.106 10	-0.141 74	2.134 36	-0.123 01	-0.357 46
河头寨	0.530 91	0.915 91	1.814 65	-0.213 2	-0.191 94	-0.626 40	-0.753 66	1.228 29	1.383 30	0.782 42	1.091 02
红枫	1.683 84	-0.569 67	-0.647 03	5.263 31	-0.194 48	-0.710 33	0.318 29	0.219 45	0.673 11	-1.859 31	-0.119 31
对江	1.609 72	-0.515 77	-0.433 03	-0.257 12	-0.191 48	0.448 80	0.381 71	0.086 04	1.889 11	0.207 2	-0.026 65
水头寨	0.860 32	0.166 90	0.587 03	-0.353 83	-0.191 65	-0.189 78	0.523 17	0.723 07	1.633 65	0.505 46	0.651 20
鸭池河	0.036 79	3.135 30	2.514 68	-0.308 96	-0.191 83	-0.635 82	1.028 05	1.865 34	1.184 03	1.187 20	1.674 97
徐家渡	0.448 56	1.056 87	1.794 23	-0.238 68	-0.191 93	-0.524 43	-0.65 61	1.555 79	1.367 97	0.793 07	1.461 48
下司	-0.786 73	0.093 66	0.296 20	-0.043 06	-0.191 92	-0.598 08	-0.098 78	-0.364 30	-0.440 72	0.473 5	-0.280 93
湾水	-0.704 38	-0.084 61	0.071 27	-0.575 14	-0.191 93	-0.065 21	-0.073 17	-0.063 87	-0.747 27	0.111 33	0.015 88
下湾 1	0.053 26	0.056 35	-0.346 35	-0.098 67	-0.192 21	-0.374 02	0.402 44	-0.852 21	-0.231 24	-0.517 14	-0.974 49
松柏山	1.272 08	-0.840 53	-0.847 60	0.198 48	-0.193 12	-0.468 99	0.556 10	-1.585 69	-0.077 96	-2.019 1	-1.482 87
龙塘	0.283 85	-0.602 84	-0.818 77	-0.416 19	-0.191 86	0.474 50	-0.425 61	-0.872 89	-0.037 08	-0.218 88	-0.899 77
小围寨	0.036 79	-0.699 57	-0.835 25	-0.032 01	-0.191 88	-0.069 47	0.308 54	-1.232 27	0.044 66	-0.101 71	-1.066 82
文峰塔	0.036 79	-0.626 33	-0.615 87	-0.057 38	-0.192 15	0.292 04	0.525 61	-0.374 82	-0.236 35	-0.506 49	-0.286 25
阿哈	0.131 50	-0.215 89	0.316 26	-0.050 94	-0.192 32	-0.464 49	-0.751 22	-0.034 59	-0.180 14	-0.559 75	0.149 79
花溪	0.860 32	-0.873 70	-1.088 65	-0.084 63	-0.192 56	-0.027 74	0.665 86	-1.689 63	0.121 30	-1.316 05	-1.672 89
天生桥	1.272 08	-0.875 08	-1.026 54	0.001 17	-0.192 49	0.351 74	-0.914 64	-1.216 03	0.550 48	-1.422 58	-1.451 49
高车	-0.745 56	-0.475 70	-0.396 14	-0.405 97	-0.191 93	1.415 86	-0.164 63	1.365 91	-0.195 47	0.750 46	0.936 71
这洞	-1.610 26	-0.092 90	-0.461 32	-0.305 79	0.196 69	-0.484 93	1.232 93	-1.289 42	-1.069 16	0.931 55	-1.247 61
大田河 1	-1.610 26	2.525 87	1.498 21	-0.281 40	-0.191 98	-0.774 81	0.164 63	0.275 73	-0.655 31	2.295 02	0.064 98
玻里	-1.610 26	-0.828 09	-0.712 75	-0.310 38	-0.191 34	1.949 20	0.440 25	1.055 31	-1.477 90	0.452 20	0.823 63

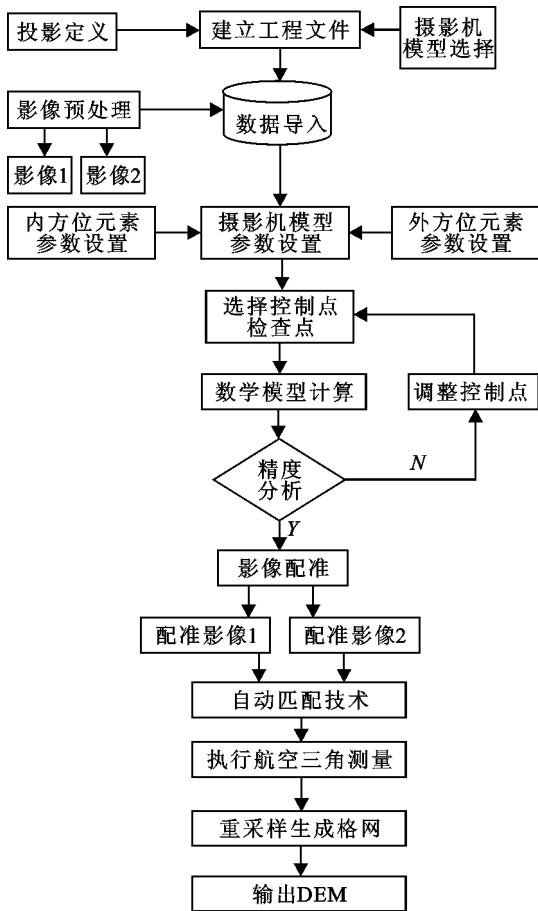


图 1 喀斯特流域 DEM 自动提取流程图

1.3 喀斯特流域水系及流域特征提取

基于 ArcView GIS 提取流域水系特征包括以下 5 个流程。DEM 的预处理, 水流流向的确定, 汇流栅格图的生成, 自动生成河网, 子流域边界的划分。具体见如流程图 2, 水系见图 3。

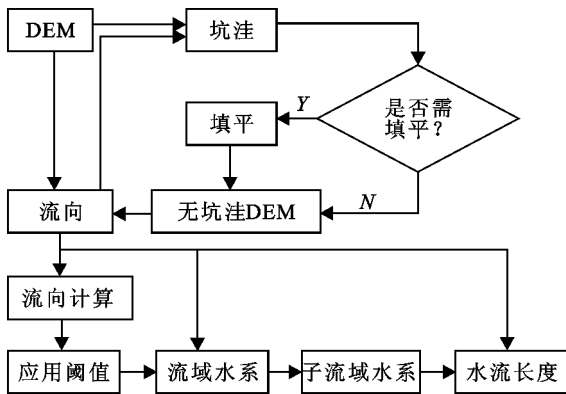


图 2 喀斯特流域地表水分提取流程图

以提取的 DEM 数据为基础, 利用 RS 和 GIS 技术, 提取喀斯特流域特征数据。为消除不同单位的影响, 对所获取的原始数据进行标准化处理, 得到如表 1 所示。

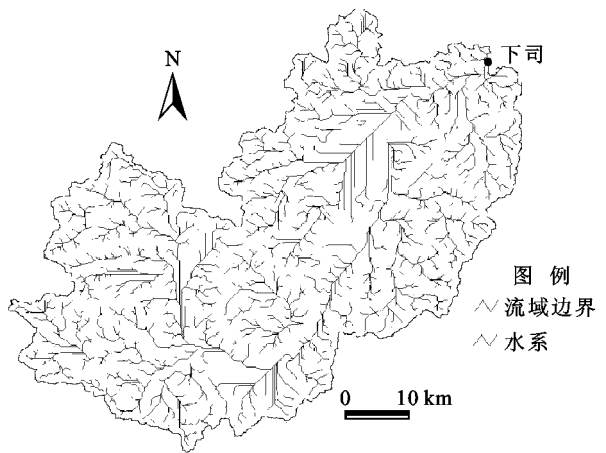


图 3 下司流域 DEM 图

2 遥感反演模型建立

假定某喀斯特流域的某水文断面枯水径流深为 Y 和该流域不同特征因素分别是 X_1, X_2, \dots, X_m , 其 Y 与 X 之间关系可用如下模型表示^[23]:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_m X_m + \varepsilon \quad (1)$$

式中: $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m$ ——未知因素参数; ε —— $N(0, \sigma)$ 随机变量。

对于任意一组实测数据 $(y_j; x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{mj})$, (其中 $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$) 都是可以通过数学模型(1)计算得出 Y 关于 X_1, X_2, \dots, X_m 的回归方程。为评价回归方程的精度, 需对其进行显著性检验。通常用的检验方法是 F 检验。

$$r_{ij} = \frac{\frac{1}{N} \sum_a (x_{ai} - \bar{x}_i)(x_{aj} - \bar{x}_j)}{\alpha \sigma_j} = \frac{1}{N} \sum_a x_{ai}^* x_{aj}^* \quad (2)$$

$$F = \frac{\frac{S_{\text{回}}}{m}}{\frac{S_{\text{剩}}}{n - m - 1}} \sim F(m, n - m - 1) \quad (3)$$

其中: $S_{\text{回}} = \sum_{k=1}^n (\hat{y}_k - \bar{y})^2$, $S_{\text{剩}} = \sum_{k=1}^n (y_k - \hat{y}_k)^2$

因 F 服从自由度为 $(m, n - m - 1)$ 的 F 分布, 对于指定的 α 由 F 分布表可查 $F_{\alpha}(m, n - m - 1)$ 。若 F 大于 $F_{\alpha}(m, n - m - 1)$, 则认为线性回归模型适合该组资料, 称为显著的, 否则称为不显著, 即不能使用。

根据表 1, 借助 SPSS 和 MATLAB 统计软件, 利用公式(2), 计算枯水径流深与流域特征因素相关系数, 并采用逐步回归思想, 利用公式(1), 计算遥感反演模型系数, 结合公式(3), 计算反演模型的检验值 F , 得表 2。

表 2 流域特征相关系数, 遥感反演模型标准化系数

项目	出口 高程	河网 分支数	主河 道长度	河网 密度	流域 结构
相关系数	- 0. 299	0. 525* *	0. 612* *	- 0. 068	0. 300
模型系数(β)	0. 113	- 0. 075	0. 150	- 0. 055	0. 407
流域特征(X)	主河道纵比降	流域形状系数	流域崎岖数	平均高程	高程标准差
相关系数	0. 105	- 0. 202	0. 9* *	0. 071	0. 589* *
模型系数(β)	0. 022	0. 036	0. 939	- 0. 123	0. 011
方差分析	R	R^2	F	F_α	显著性
	0. 981	0. 982	111. 984	3. 37	* *

注:* 表示 $P = 0. 05$ 时显著;* * 表示 $P = 0. 01$ 时高度显著。

(1) 喀斯特流域特征对枯水资源的影响是比较大的, 其中影响最大的是喀斯特流域崎岖数, 相关系数达 0. 9, 其次是主河道长度, 相关系数达 0. 612, 再次是喀斯特流域高程的变化。

(2) 根据标准化的模型系数, 可得遥感反演模型, 即

$$Y = 0. 113X_1 - 0. 075X_2 + 0. 15X_3 + \dots + 0. 011X_{10} \quad (4)$$

(3) 通过方差分析得, 该模型相关系数 R 为 0. 981, 模型拟合指数为 0. 982, 说明了模型拟合程度较高, 方差检验显著性明显, 枯水资源遥感反演的效果良好。

综上所述, 在喀斯特流域, 流域崎岖数越大, 流域持水和供水能力就越强。因为喀斯特流域地表崎岖, 土层薄, 地下洞隙纵横交错, 流域持水保水困难。而流域崎岖数越大, 流域厚度就越大, 流域持水和供水的空间就越大, 则持水和供水能力就越强。

其次, 喀斯特流域是地表—地下双重水系, 如流域主河道越长, 流域控制的地表面积就越大, 汇流的地表水就越多, 流域从亏损流域或平衡流域向盈水流域转换, 则流域的持水和供水能力也就越大。再次, 流域分支数越多, 流域水系发育就越好, 地表汇流就越好, 流域持水和供水能力就越强。

3 模型检验

为了评定遥感反演模型的精度, 任选 3 个喀斯特流域, 按上述方法对喀斯特流域特征因素进行统计, 代入模型 4 进行计算, 得表 3。

通过计算比较得出, 相对误差值都较小, 说明所建立的数学模型(4) 来反演喀斯特流域枯水资源效果是比较好的。

表 3 遥感反演模型检验结果

流域特征	下湾	大田河	高旺寨
流域出口高程	1. 127	0. 036	- 1. 606
河网分支数	- 0. 811	- 0. 572	0. 019
主河道长度	- 0. 811	- 0. 406	0. 767
河网密度	0. 039	- 0. 212	- 0. 241
流域结构	- 0. 192	- 0. 192	- 0. 191
主河道纵比降	0. 031	0. 286	- 0. 192
流域形状系数	- 0. 529	0. 854	- 4. 453
流域崎岖数	- 1. 041	- 0. 047	1. 135
流域平均高程	0. 274	0. 284	- 1. 319
高程标准差	- 1. 124	- 0. 005	1. 964
枯水径流深(实测值)	- 1. 092	- 0. 136	0. 884
枯水径流深(计算值)	- 1. 055	- 0. 122	0. 953
相对误差/ $\%$	3. 370	9. 840	7. 770

4 结论

(1) 喀斯特流域特征对喀斯特流域持水、保水和供水能力的影响是比较大的。

(2) 喀斯特流域河流的主河道长度是决定其是亏损流域、平衡流域还是盈水流域的关键。

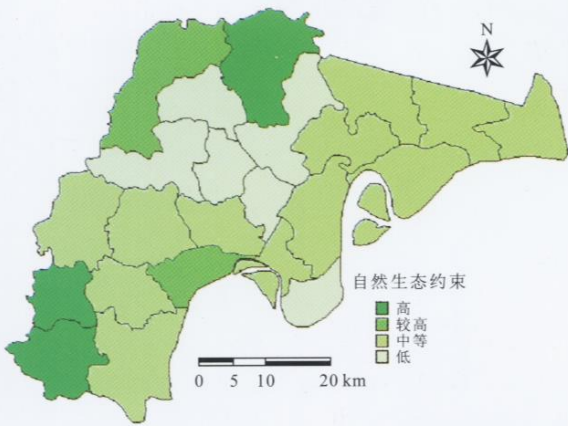
(3) 综合考虑, 影响喀斯特流域持水供水能力最大的是流域崎岖数, 其次是主河道长度, 再次是流域高程变化。

(4) 根据逐步回归思想, 构建了喀斯特流域枯水资源遥感反演模型。

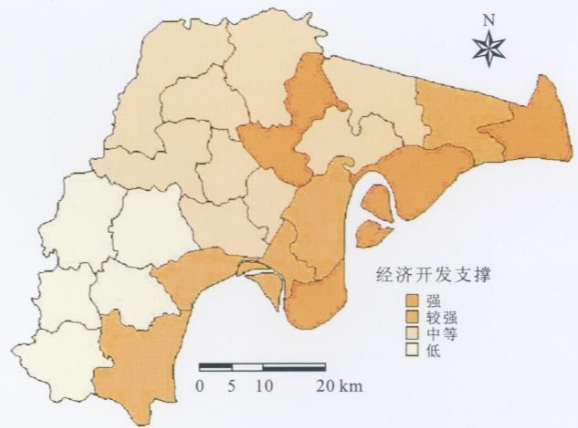
[参 考 文 献]

- [1] 杨明德. 喀斯特流域水文地貌系统[M]. 北京: 地质出版社, 1998.
- [2] 朱天禄, 杨向东. NASA TOVAS 卫星遥感反演云南降水资料分析[J]. 云南地理环境研究, 2006, 18(4): 100—104.
- [3] 钟若飞, 郭华东, 王为民, 等. 被动微波遥感反演土壤水

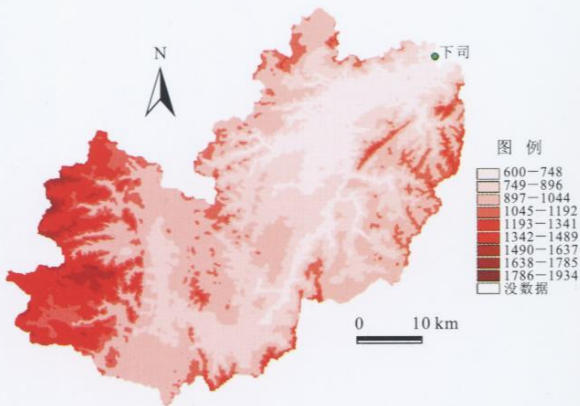
- 分进展研究[J]. 遥感技术与应用, 2005, 20(1): 49—57.
- [4] 贾媛媛, 李召良. 被动微波遥感数据反演地表温度研究进展[J]. 地理科学进展, 2006, 25(3): 96—105.
- [5] 甘甫平, 陈伟涛, 张绪教, 等. 热红外遥感反演陆地表面温度研究进展[J]. 国土资源遥感, 2006(1): 6—11.
- [6] 王建华, 江东, 王浩, 等. 年尺度下的黄河流域降水遥感反演[J]. 资源科学, 2003, 25(6): 8—13.
- [7] Mehrez Zribi, Monique Dechambre. A new empirical model to retrieve soil moisture and roughness from c band radar data[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 84: 42—52.
- [8] Friedl M A. Forward and inverse modeling of land surface energy balance using surface temperature measurements[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79: 344—354.
- [9] Sobrino J A, Romaguera M. Land surface temperature retrieval from MSG1—SEVIRI data[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 92: 247—254.
- [10] Del Frate F, Ferrazzoli P, Schiavon G. Retrieving soil moisture and agricultural variables by microwave radiometry using neural networks[J]. Remote Sensing of Environment, 2003, 84: 174—183.
- [11] Virginia Venturinia, Gautam Bishta, Shafiqul Islama, et al. Comparison of evaporative fractions estimated from AVHRR and MODIS sensors over South Florida[J]. Remote Sensing of Environment, 2004, 93: 77—86.
- [12] 贺中华, 杨胜天, 梁虹, 等. 基于 GIS 和 RS 的喀斯特流域枯水资源影响因素识别: 以贵州省为例[J]. 中国岩溶, 2004, 23(1): 48—55.
- [13] 贺中华, 梁虹, 杨胜天, 等. 基于 RS 流域枯水资源的判读识别[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2004, 22(2): 36—39.
- [14] 贺中华, 梁虹, 黄法苏, 等. 岩溶地区枯水资源承载力的概念与讨论: 以贵阳市为例[J]. 中国岩溶, 2005, 24(1): 15—22.
- [15] 戴洪刚, 梁虹, 黄法苏, 等. 基于灰关联熵的喀斯特地区枯水资源演化趋势的探讨: 以贵阳地区为例[J]. 中国岩溶, 2006, 25(1): 18—22.
- [16] 周亮广, 梁虹, 焦树林, 等. 喀斯特地区的枯水资源承载力研究[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2005, 23(4): 23—27.
- [17] Toutin T. DEM generation with a photogrammetric approach: Examples with VIR and SAR images[J]. EAR-SeL J. Advances in Remote Sensing, 1995, 4(2): 110—117.
- [18] Futamura N, Takaku J, Suzuki H. High resolution DEM generation from ALOS PRISM data Algorithm development and evaluation [J]. IEEE, 2002, 1(3): 405—407.
- [19] Rufino G, Moccia A, Esposito S. DEM generation by means of ERST and DEM Data[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1998, 36(6): 1905—1912.
- [20] Marra M, Maurice K E, Ghiglia D C, et al. Automated DEM extraction using RADARSAT ScanSAR stereo data[J]. IEEE, 1998, 5(1): 2351—2353.
- [21] Ostrowski J A, Cheng P. DEM Extraction from Stereo SAR satellite imagery [J]. IEEE, 2000, 5(3): 2176—2178.
- [22] Hensley S, Shaffer S. Automatic DEM generation using magellan stereo data [J]. IEEE, 1994, 3(3): 1470—1472.
- [23] 张超, 杨秉赓. 计量地理学基础[M]. 高等教育出版社, 1985.



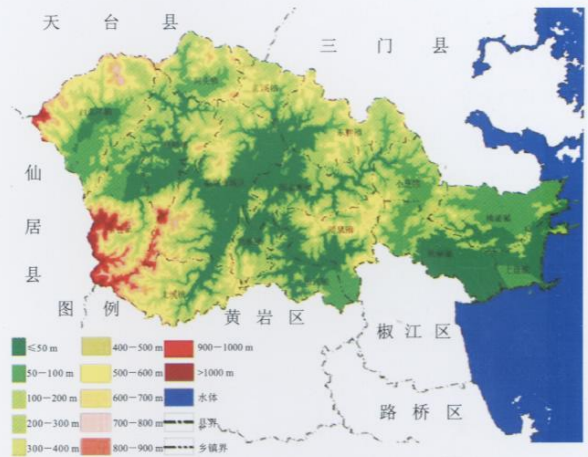
附图4 安徽省无为县域自然生态约束分区



附图5 安徽省无为县域经济开发支撑分区



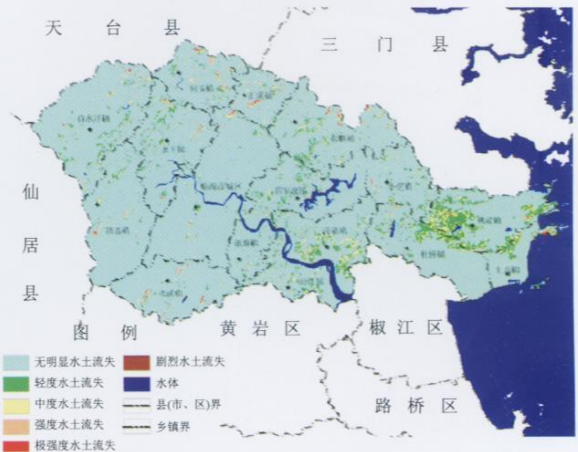
附图6 喀斯特地区下司流域DEM图



附图7 浙江省临海市水土保持规划区高程图



附图8 浙江省临海市水土保持规划区土地利用现状图



附图9 浙江省临海市水土保持规划区水土流失分布图