

# 粤北岩溶区雨水资源空间可利用潜力评价

陈佳升<sup>1</sup>, 尹辉<sup>2</sup>

(1. 东华理工大学 地球科学学院, 南昌 330013; 2. 惠州学院 地理与旅游学院, 广东 惠州 516007)

**摘要:**利用3S技术开展粤北岩溶区雨水资源空间可利用潜力评价,可以为区域雨水资源评价提供方法参考,为研究区域雨水资源开发利用提供决策支持。选取了岩性、气候、土壤、地形和植被因素作为评价指标,利用粤北岩溶区的遥感数据、气象数据、DEM等,在3S技术的支持下实现了评价指标空间量化和表达,并基于此评价了粤北岩溶区雨水资源空间可利用潜力。结果表明:(1)3个模型计算结果均显示雨水资源可利用潜力呈现块状分布、梯度变化的特点,且从模型1到模型3,梯度变化逐渐增大。(2)粤北岩溶区雨水资源空间可利用潜力空间分布不均,区域差异较大。(3)主成分分析显示,雨水资源空间可利用潜力受到各因素的综合影响,贡献率较大的是岩性因素和地形因素。

**关键词:**粤北岩溶区; 雨水资源; 潜力评价

中图分类号:TV213.9

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)02-0187-07

## Evaluation on Potential of Rainwater Resource Utilization of Karst Region in Northern Guangdong Province

CHEN Jiasheng<sup>1</sup>, YIN Hui<sup>2</sup>

(1. School of Earth Science, East China Institute of Technology, Nanchang 330013, China;

2. School of Geography and Tourism, Huizhou University, Huizhou, Guangdong 516007, China)

**Abstract:** Using 3S technology to evaluate the potential of rainwater resource utilization in the karst region of northern Guangdong Province can provide a reference for the evaluation on regional rainwater resources and provide decision support for the development and use of rainwater resources in the study area. The lithology, soil, topography and vegetation as the indicators were selected. Space quantization of indicators was expressed based on 3S technology with remote sensing data, meteorological data and DEM data. Then the potential of rainwater resource was estimated based on this. The results showed that: (1) the potential of rainwater resources calculated by the three models all showed the characteristics of block distribution and gradient change, and the gradient change gradually increased from model 1 to model 3; (2) spatial distribution of potential of rainwater resources in karst region of northern Guangdong Province was uneven, and the regional difference was great; (3) principal component analysis showed that the potential of rainwater resources utilization was affected by various factors, and lithology and topography had the higher contribution rates to the potential.

**Keywords:** karst region in northern Guangdong Province; rainwater resource; evaluation of potential

水是维持生态系统正常运转不可或缺的基本要素,是生态系统物质和能量交换的主要介质。由于岩溶地区具有地表和地下双层结构,6—9月的季风性强降雨季节,对于落水洞堵塞、地表排水不畅的地区,洪涝灾害时有发生;然而,雨季过后,大量地表水下渗、汇入到深几十米甚至几百米的当地居民难以获得

水资源的地下河,常常造成长达6个月或半年以上的干旱。此外,生态环境恶化、土地资源流失在岩溶区可以造成地表植被覆盖度减少,涵养水源能力减弱,水源枯竭和粮食减产,给当地人们生产和生活带来威胁<sup>[1-3]</sup>。可见,作为维持岩溶区居民生产与生活,岩溶区治理与生态恢复重要组成部分的水资源,其雨水资

源空间可利用潜力的空间评估和雨水资源利用模式的相关研究,是急待深入探讨的科学问题。

国外学者对于非岩溶区雨水资源的量化研究主要集中在气候变化引发的降水量变化、人类活动等对下垫面的改造<sup>[4-8]</sup>影响下的雨水资源可利用风险评价,和雨水—径流数值建模等方面<sup>[9-13]</sup>;岩溶区雨水资源的量化研究,主要从水循环与水动力模型、试验评价、雨水资源与环境背景的相互关系等方面展开,技术手段主要应用了经典统计学、GIS技术、水工程勘测等研究方法<sup>[14-21]</sup>。国内学者对于非岩溶区雨水资源的量化研究,主要以某个特定区域或小流域为单位开展空间层面上的研究<sup>[22-24]</sup>;对于岩溶区雨水资源的量化研究,主要从遥感监测技术、综合评价模型两个大方面进行了量化计算与多指标综合评价<sup>[25-26]</sup>。当前,对于雨水资源可开发利用潜力的研究主要集中在坡面和小流域尺度上,区域尺度上对雨水资源可利用潜力进行系统性分析的研究较少<sup>[27-28]</sup>,小尺度上的评价指标体系及其评价方法难以适合区域尺度上的评价,因而亟需探讨区域尺度上的雨水资源开发潜力评价指标体系和评价方法<sup>[29-31]</sup>。

广东岩溶区总面积 1.06 万 km<sup>2</sup>,占广东省总土地面积的 5.9%,大部分位于粤北和粤西地区,是我国岩溶区的重要组成部分,集中在粤北的清新、英德、连州、阳山、乳源和粤西的封开、怀集等县市<sup>[32-33]</sup>。该区域经济发展较为落后,贫困人口多<sup>[34]</sup>。利用遥感(RS)和地理信息系统(GIS)技术,开展粤北岩溶区雨水资源空间可利用评价,可以探索 RS 和 GIS 技术支持下粤北岩溶区雨水资源可利用评价的实现方法,从宏观上了解研究区域雨水资源化潜力的空间分布现状,并进行定量评价。此外,研究结果有利于为粤北岩溶区雨水资源开发提供参考,因地制宜合理地保护和利用雨水资源,解决局部区域的缺水问题,实现区域可持续发展。

本研究选取粤北岩溶区为研究区域,采用 3S 技术和统计学方法,选择与雨水资源空间可利用潜力紧密相关的气候、岩性、土壤、地形地貌、植被覆盖等影响因素作为评价指标,分析各因子之间的关系进行数据建模,通过野外考察采样和室内试验分析、空间分析的相互结合,进行粤北岩溶区雨水资源空间可利用评价。研究核心探讨如何实现粤北岩溶区雨水资源可利用潜力影响因子的空间量化,并对评价结果进行分析。

## 1 研究区概况

粤北地区地处广东省北部,位于 112°07′—114°30′E, 24°00′—25°28′N,是广东、广西和湖南 3 省交界地带。基于区域的水文地质条件,结合前人研究成果,论文以行政区为边界确定粤北岩溶区,主要包括清远市的清城区、清新区、英德市、连州市、佛冈县、阳山县、连南瑶族自治县和连山壮族瑶族自治县,韶关市的曲江、浈江、武江和乳源瑶族自治县。粤北岩溶区北属于亚热带季风气候,温暖潮湿,雨热同期,雨旱季分明。研究区多年平均气温 20.6℃,因地处南岭南坡的多雨区,年降雨量达 1 500~2 400 mm,大雨、暴雨频率高;受东亚季风和南亚季风共同影响,降水多集中于每年的 4—9 月,占全年雨量的 67.5%~74.2%。研究区域内岩溶地貌发育典型,分布面积大,生态环境脆弱,土壤侵蚀和植被退化较为强烈,面临着突出的石漠化、水土流失等生态环境问题<sup>[3,35]</sup>。

## 2 材料与方法

### 2.1 数据来源及预处理

(1) 遥感数据。本研究采用 Landsat8 OLI 影像 Level 1T 地形校正产品,共 3 景,数据下载自中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)。所有影像均采用 UTM-WGS84 投影坐标系,空间分辨率为 30 m。在日期选择上,为了减少物候对于影像识别的影响,降低解译难度,在 4—10 月份筛选数据。研究区域地处南方多雨区(降水集中在 4—9 月),获得完全无云覆盖的影像有一定难度,因此在尽可能保证小云量的前提下选择日期较为接近的数据<sup>[36]</sup>。遥感影像预处理工作主要包括影像辐射定标、大气校正、影像镶嵌和研究区裁剪等<sup>[37]</sup>。本研究遥感影像所有的预处理工作在遥感图像处理软件 ENVI 中进行。

(2) DEM(数字高程模型)数据。本研究选择由日本 METI 和美国 NASA 联合研制的 ASTER GDEM V2 数据,空间分辨率为 30 m,采用 WGS-84 地理坐标系,数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn>)。预处理工作包括进行投影变换为 UTM-WGS84 投影坐标系、镶嵌、研究区域裁剪等。

(3) 土地利用类型数据。本研究以中国科学院土地利用/覆盖分类体系<sup>[38-41]</sup>为基础,结合粤北岩溶区实际情况,将研究区域土地利用分为耕地、林地、草地、水体、城乡、工矿和居民用地、其他用地共 6 大类。为了减

小和避免监督分类中人为主观因素较强、类别定义误差和训练样本选择误差等制约分类精度的因素干扰,节省样本的选取和评估的人力、时间,同时充分利用遥感影像和其他辅助数据提供的专题信息,研究中采用非监督分类和决策树分类相结合的方法进行土地利用分类,得到粤北岩溶区土地利用分类结果(附图 6)。

此外,粤北岩溶区气候数据来源于中国气象数据网的中国地面累年值年值数据集(1981—2010 年)(<http://data.cma.cn>),选择了粤北岩溶区 6 个,以及周边 27 个,共 33 个国家基本气象站点的年降水量数据。图件资料主要有来自中国水文地质图册的广东省水文地质图、广东省土壤类型图等。在 ArcGIS 中,完成上述图件的地理配准、矢量化、研究区域裁剪等预处理工作,建立地理空间数据库进行统一管理。研究中涉及转换为栅格数据的,重采样分辨率统一为 30 m。

2.2 研究方法

2.2.1 评价指标的选取 一般而言,影响区域雨水资源空间可利用潜力的因素可归纳为 3 个方面:气候因素、下垫面因素和人为因素,3 个方面的因素可进一步分解为气候、岩性、土壤、地形、植被和人为 6 个方面的因素。按照评价指标具有代表性、宏观性和适于 GIS 处理的要求,同时参考前人相关研究结果,最后选定雨水资源空间可利用潜力评价的各项指标见表 1。

表 1 粤北岩溶区雨水资源空间可利用潜力评价指标					
影响因素	岩性(R)	气候(P)	土壤(S)	地形(T)	植被(V)
评价指标	岩层水文地质条件	多年平均降雨量(mm)	≥0.25 mm 水稳性团粒含量(%)	沟壑密度(km/km <sup>2</sup> )	植被覆盖度(%)

2.2.2 评价指标的空间量化

(1) 岩性因素(R)。本研究对岩性因素空间量化,主要基于粤北岩溶区各类岩层的水文地质条件,通过层次分析法计算指标值。在构建层次分析法的判断矩阵时,主要参考《水利水电工程地质勘察规范 GB50487—2008》行业标准中提供的不同岩体特征条件和不同渗透性等级下的渗透系数和透水率,并根据粤北岩溶区的具体实际情况和数值量化的可操作性,界定出粤北岩溶区不同岩性条件下的透水系数比值关系为:富水性强(强透水性):富水性中等(中等透水性):富水性弱(弱透水性)=1:3:7。据此得到基于层次分析法的各岩性判断矩阵(表 2),以及粤北岩溶区岩性因素(R)值空间分布图(附图 7)。

(2) 气候因素(P)。以粤北岩溶区及其周边 33 个国家基本气象站年平均降水量为依据,计算多年平均降水量;然后将多年平均降水量数据导入 ArcGIS 中,生成带有多年平均降水量属性的气象站点图层;最后应用 ArcGIS 地统计模块中的反距离权重法进

行空间插值,得到粤北岩溶区多年平均降水量空间分布图(附图 8)。

表 2 基于层次分析法的各岩性权重构成				
A—B <sub>i</sub> 的判断矩阵	富水性强	富水性中等	富水性弱	权重值
富水性强	1	1/3	1/7	0.0909
富水性中等	3	1	3/7	0.2727
富水性弱	7	7/3	1	0.6364

(3) 土壤因素(S)。由于不同土地利用类型下,人为活动的多寡对团聚体的影响或破坏作用不一,加上岩溶山地是典型的脆弱生态环境,土壤资源存在先天不足性,其退化恢复受土地利用方式的影响大。首先,以粤北岩溶区土地利用图(附图 6)和 Google Earth 影像为依据,进行空间布点,共选取覆盖研究区的 36 个采样点,每个采样点均采集不同土地利用方式下,0—20 cm 深度并去除植物和岩石等杂质的土壤样品。随后通过样品烘干和过筛的方式完成土壤粒度分析试验,得到研究区域土壤粒度数据。其中,≥0.25 mm 水稳性团粒含量为粒径 0.25 mm 以上的土壤质量占总质量的百分比。最后,结合研究区域土地利用图和行政区划图。在 ArcGIS 中对粒度分析试验得到≥0.25 mm 水稳性团粒含量进行属性赋值,得到粤北岩溶区≥0.25 mm 的土壤水稳性团聚体含量空间分布(附图 9)。

(4) 地形因素(T)。区域地形特征对雨水资源化潜力有很大的影响,选择沟壑密度作为反映地形因素的综合度量指标。以粤北岩溶区 DEM 数据为基础,基于 ArcGIS 的水文分析工具箱,提取了研究区域的河网;最后通过线密度分析计算研究区域沟壑密度分布(附图 10)。

(5) 植被因素(V)。植被覆盖度可以基于遥感图像提取的归一化植被指数(NDVI)反演得到,结果如附图 11 所示。其中,归一化植被指数(NDVI)的计算公式为:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}$$

(1)

式中:NDVI 为归一化植被指数;NIR 为近红外波段地物反射率;R 为红光波段地物反射率。植被覆盖度(FVC)的计算公式为:

$$FVC = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \times 100\%$$

(2)

式中:FVC 为植被覆盖度(%),NDVI<sub>min</sub>为区域 NDVI 的最小值;NDVI<sub>max</sub>为区域 NDVI 的最大值。

2.2.3 雨水资源空间可利用潜力的计算方法 相关研究表明,影响区域雨水资源空间可利用潜力的岩性因素、气候因素、土壤因素、地形因素、植被因素之间的关

系是一个典型的乘法关系<sup>[42-43]</sup>。粤北岩溶区雨水资源空间可利用潜力的计算公式为式(3)(记为模型 1)。为了较好地探讨雨水资源空间可利用潜力模型的效果,对式(3)进行了两次调整。考虑到土壤因子中 $\geq 0.25\text{ mm}$ 水稳性团粒含量越大,越可能会增加雨水资源的下渗,从而造成地表水的流失,雨水资源可利用潜力越小,将式(3)调整为式(4)(记为模型 2);此外,在土壤因子调整的基础上,植被覆盖对于雨水资源的树冠截留,会造成蒸发和蒸腾增加,从而导致雨水资源可利用潜力的减小,据此调整为式(3)(记为模型 3)。

$$W'=a\times R\times P\times S\times T\times V\tag{3}$$

$$W'_{t1}=a\times R\times P\times (1-S)\times T\times V\tag{4}$$

$$W'_{t2}=a\times R\times P\times (1-S)\times T\times (1-V)\tag{5}$$

式中: $W'$ 、 $W'_{t1}$ 、 $W'_{t2}$ 为雨水资源空间可利用潜力; $a$ 为系数,取常数 1; $R$ 为岩性因素; $P$ 为气候因素; $S$ 为土壤因素; $T$ 为地形地貌因素; $V$ 为植被因素。

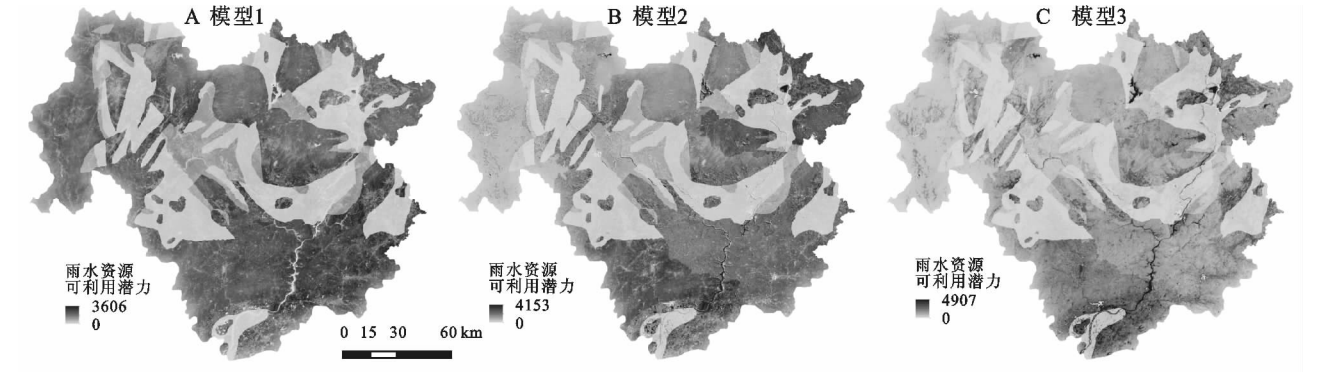


图 1 基于模型 1、模型 2、模型 3 的粤北岩溶区雨水资源空间可利用潜力分布

表 3 不同模型下雨水资源空间可利用潜力分级统计

模型	潜力等级	最小值	最大值	均值	标准差
模型 1	潜力小	0	523.237	234.739	101.195
	潜力较小	523.243	1074.758	829.166	148.410
	潜力中等	1074.760	1541.430	1330.925	131.432
	潜力较大	1541.431	2008.098	1752.994	132.239
	潜力大	2008.104	3606.099	2254.848	197.989
模型 2	潜力小	0	179.180	80.432	44.022
	潜力较小	179.180	374.649	280.584	55.880
	潜力中等	374.650	879.584	475.187	78.346
	潜力较大	879.929	1824.377	1286.038	274.745
	潜力大	1824.641	4153.723	2356.935	352.341
模型 3	潜力小	0	230.922	102.533	62.829
	潜力较小	230.922	1019.679	374.842	127.752
	潜力中等	1020.489	2212.857	1668.971	348.710
	潜力较大	2213.198	3251.783	2749.273	271.261
	潜力大	3252.745	4907.095	3762.121	328.316

为了揭示县域尺度下不同模型雨水资源可利用潜力的空间差异,分别计算了 3 个模型下不同等级雨水资源可利用潜力在各县域的构成比例,结果见图 2、表 4。粤北岩溶区南部的清城区、佛冈县、清新区,

3 结果与分析

3.1 雨水资源空间可利用潜力分析

在 ArcGIS 中,利用栅格计算器可实现雨水资源空间可利用潜力计算。得到粤北岩溶区雨水资源空间可利用潜力分布图(图 1)。对计算结果进行基于自然间断点方法的重分类,把雨水资源可利用潜力由小到大划分为 5 个等级,得到分级统计表(表 3)。由图 1 和表 3 可知,3 个模型计算结果中,粤北岩溶区雨水资源可利用潜力空间分布不均,呈现块状分布、梯度变化的特点;3 个模型均值分别为 1 117.866, 239.68, 218.549,模型 1 的均值高于模型 2、模型 3 的均值;同时从模型 1 到模型 3,雨水资源空间可利用潜力分布的梯度变化逐渐增大。由图 1B—1C 可知,模型 2 和模型 3 的计算结果中,雨水资源空间可利用潜力呈现南多北少、东多西少的特征。

东北部的曲江区、武江区等县区雨水资源空间可利用潜力相对较大,位于西北部的连州市、连山县等的可利用潜力相对较小。

3.2 雨水资源空间可利用潜力影响因素分析

主成分分析可以通过数理统计方法来衡量各自变量对因变量的影响程度。在 SPSS 统计软件的支持下,对岩性、气候、土壤、地形和植被 5 个因子进行主成分分析。表 5 显示了影响因子之间的相关系数,基于此可以计算得到主成分的特征值、贡献率和累积贡献率(表 6)。根据累积贡献率超过 85%或特征值大于 1 时,即可确定主因子,由表 6 可知,主成分 1 和主成分 2 的特征值分别为 1.502,1.345,因此取这两个主成分作为主因子计算各影响因素的主成分载荷,结果见表 7。由表 7 可知,在主成分 1 中起主导作用的依次是地形因素和岩性因素,在主成分 2 中起主导作用的依次为植被因素、岩性因素和土壤因素。综上所述,影响雨水资源空间可利用潜力的因素按照影响程度依次为岩性因素和地形因素,其主成分载荷分别为 0.645,0.788。

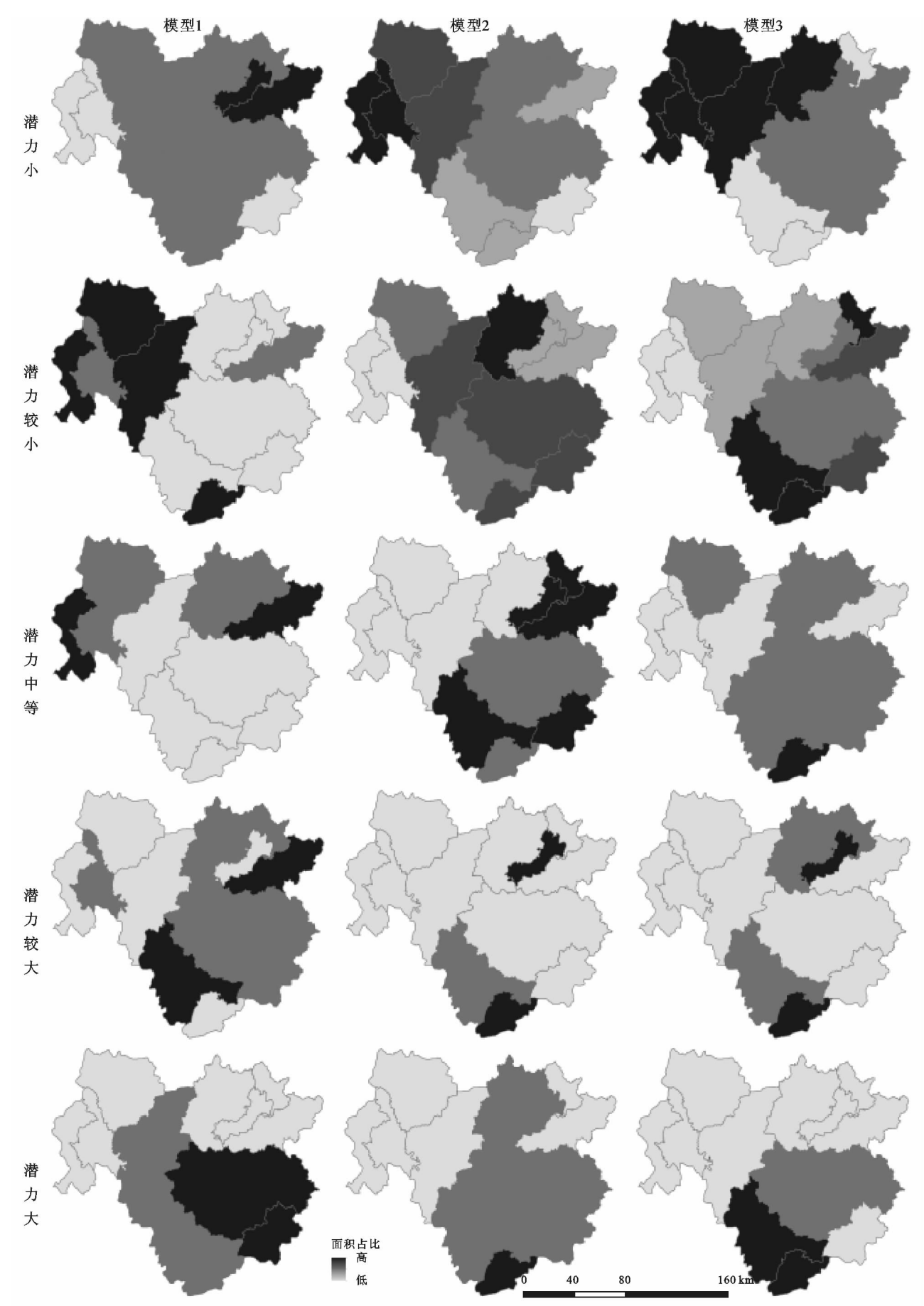


图 2 县域尺度下不同等级雨水资源空间可利用潜力构成

表 4 县域尺度不同等级雨水资源可利用潜力构成 %

潜力等级	模型 1			模型 2			模型 3		
	潜力小	潜力中等	潜力大	潜力小	潜力中等	潜力大	潜力小	潜力中等	潜力大
清城区	55.28	21.37	23.35	70.59	26.88	2.53	96.60	1.00	2.40
佛冈县	10.98	17.76	71.26	50.01	49.57	0.42	99.55	0.20	0.25
清新区	33.64	22.08	44.29	46.46	52.47	1.06	98.64	0.22	1.14
英德市	43.25	9.51	47.24	75.26	24.18	0.55	99.20	0.30	0.50
连山壮族瑶族自治县	36.43	45.00	18.57	99.92	0.03	0.04	99.93	0.04	0.02
曲江区	73.90	63.93	43.41	42.57	57.27	0.15	99.74	0.21	0.14
连南瑶族自治县	35.68	38.47	25.84	99.85	0.11	0.04	99.96	0.01	0.03
武江区	59.53	25.11	15.36	57.43	41.14	1.44	97.63	0.55	1.82
阳山县	65.61	17.12	17.26	92.94	6.94	0.13	99.87	0.10	0.03
浈江区	46.81	26.62	26.57	45.45	54.11	0.43	99.41	0.23	0.35
乳源瑶族自治县	46.18	27.41	26.41	95.24	4.45	0.31	99.05	0.28	0.67
连州市	63.01	26.13	10.86	99.02	0.83	0.15	99.68	0.20	0.12

注：潜力小的比例等于潜力小与潜力较小两个等级的比例之和，潜力大的比例等于潜力较大与潜力大两个等级比例之和。

表 5 各影响因素的相关系数

影响因素	岩性	气候	土壤	地形	植被
岩性	1.000	−0.295	−0.012	0.337	0.198
气候	−0.295	1.000	0.009	0.035	0.018
土壤	−0.012	0.009	1.000	−0.267	0.182
地形	0.337	0.035	−0.267	1.000	−0.191
植被	0.198	0.018	0.182	−0.191	1.000

表 6 各主成分特征值、贡献率和累积贡献率

主成分	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
1	1.502	30.045	30.045
2	1.345	26.895	56.940
3	0.962	19.243	76.183
4	0.777	15.534	91.717
5	0.414	8.283	100.000

表 7 各影响因素的主成分载荷

影响因素	主成分 1	主成分 2
岩性	0.645	0.616
气候	−0.343	−0.498
土壤	−0.533	0.469
地形	0.788	−0.187
植被	−0.251	0.680

4 结 论

以粤北岩溶区为研究对象,选取岩性、气候、土壤、地形和植被作为影响因素,建立了区域雨水资源空间可利用潜力评价模型。在 3S 技术的支持下,着重研究了评价指标的空间量化和表达,并在此基础上对研究区域的雨水资源空间可利用潜力进行了评价。得出以下结论:(1) 雨水资源空间可利用潜力的影响

因素在 GIS 中的空间量化效果较好,适合于进行空间分析;(2) 3 个评价模型虽然基于不同的考虑,但计算结果均显示,粤北岩溶区雨水资源可利用潜力呈现块状分布和梯度变化的特点,且从模型 1 到模型 3,梯度变化逐渐增大;(3) 粤北岩溶区雨水资源空间可利用潜力空间分布不均,区域差异较大;(4) 主成分分析显示,雨水资源空间可利用潜力受到各因素的综合影响,贡献率较大的是岩性因素和地形因素。

本研究仅仅是在 3S 技术支持下,选择岩性、气候、土壤、地形和植被 5 个因素的具体指标宏观评价粤北岩溶区的雨水资源空间可利用潜力。而除上述因素和指标外,雨水资源空间可利用潜力还受到其他环境变量的影响,这需要进行深入系统探讨。

参考文献:

[1] 李阳兵,罗光杰,程安云,等. 黔中高原面石漠化演变典型案例研究:以普定后寨河地区为例[J]. 地理研究, 2013,32(5):828-838.

[2] 熊康宁,李晋,龙明忠. 典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题[J]. 地理学报,2012,67(7):878-888.

[3] 陆冠尧,魏兴琥,李森,等. 粤北石漠化地区植被退化及其与降雨截留量和土壤的相关性[J]. 中国沙漠,2013, 33(2):358-366.

[4] Bär R, Rouholahnejad E, Rahman K, et al. Climate change and agricultural water resources: A vulnerability assessment of the Black Sea catchment[J]. Environmental Science & Policy, 2015,46:57-69.

[5] Jeuland M, Whittington D. Water resources planning under climate change: Assessing the robustness of real options for the Blue Nile [J]. Water Resources Research, 2014,50(3):2086-2107.

[6] Fathelrahman E, Davies A, Davies S, et al. Assessing

- climate change impacts on water resources and Colorado agriculture using an equilibrium displacement mathematical programming model[J]. *Water*, 2014,6(6):1745-1770.
- [7] Al-Kalbani M S, Price M F, Abahussain A, et al. Vulnerability assessment of environmental and climate change impacts on water resources in Al Jabal Al Akhdar, Sultanate of Oman[J]. *Water*, 2014,6(10):3118-3135.
- [8] Collet L, Ruelland D, Borrell-Estupina V, et al. Assessing the long-term impact of climatic variability and human activities on the water resources of a meso-scale Mediterranean catchment [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 2014,59(8):1457-1469.
- [9] Dessu S B, Melesse A M, Bhat M G, et al. Assessment of water resources availability and demand in the Mara River Basin[J]. *Catena*, 2014,115:104-114.
- [10] Renzullo L J, Van Dijk A, Perraud J M, et al. Continental satellite soil moisture data assimilation improves root-zone moisture analysis for water resources assessment[J]. *Journal of hydrology*, 2014,519:2747-2762.
- [11] Burnet J B, Penny C, Ogorzaly L, et al. Spatial and temporal distribution of *Cryptosporidium* and *Giardia* in a drinking water resource: implications for monitoring and risk assessment[J]. *Science of the Total Environment*, 2014,472:1023-1035.
- [12] De Freitas C R, Helbig M, Matzarakis A. Hydroclimatic assessment of water resources of low Pacific islands: evaluating sensitivity to climatic change and variability[J]. *International Journal of Climatology*, 2014,34(3):881-892.
- [13] Tshimanga R M, Hughes D A. Basin-scale performance of a semidistributed rainfall-runoff model for hydrological predictions and water resources assessment of large rivers: The Congo River [J]. *Water Resources Research*, 2014,50(2):1174-1188.
- [14] Hartmann A, Weiler M, Wagener T, et al. Process-based karst modelling to relate hydrodynamic and hydrochemical characteristics to system properties[J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2013,17(8):3305-3321.
- [15] Nguyen N T, Pham N H, Pham X C, et al. Application of multimedia methodology for investigation of karst water in highland regions of Ha Giang Province, Vietnam[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2013,70(2):531-542.
- [16] Pretzsch H, Rötzer T, Matyssek R, et al. Mixed Norway spruce (*Picea abies* L. Karst) and European beech (*Fagus sylvatica* L.) stands under drought: from reaction pattern to mechanism[J]. *Trees*, 2014, 28(5):1305-1321.
- [17] Hauwert N M, Sharp J M. Measuring autogenic recharge over a karst aquifer utilizing eddy covariance evapotranspiration[J]. *Journal of Water Resource and Protection*, 2014,6(9):869-879.
- [18] Allocca V, Manna F, De Vita P. Estimating annual groundwater recharge coefficient for karst aquifers of the southern Apennines (Italy) [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014,18(2):803-817.
- [19] Ringgaard R, Herbst M, Friborg T. Partitioning forest evapotranspiration: Interception evaporation and the impact of canopy structure, local and regional advection[J]. *Journal of Hydrology*, 2014,517:677-690.
- [20] Kong-A-Siou L, Fleury P, Johannet A, et al. Performance and complementarity of two systemic models (reservoir and neural networks) used to simulate spring discharge and piezometry for a karst aquifer[J]. *Journal of Hydrology*, 2014,519:3178-3192.
- [21] Govender Y, Cuevas E, Sternberg L D S, et al. Temporal variation in stable isotopic composition of rainfall and groundwater in a tropical dry forest in the northeastern Caribbean[J]. *Earth Interactions*, 2013,17:1-20.
- [22] 芦晓峰,孙毅,李波,等. 城市化进程中雨水资源利用研究[J]. *水土保持研究*, 2011,18(3):267-271.
- [23] 李方红,李援农,李铎. 石家庄市城镇化后雨水资源利用的潜力分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2011,22(3):168-170.
- [24] 赵丹丹,冯利华,王亚丽. 金华市雨水资源化潜力及效益评价[J]. *水资源与水工程学报*, 2011,22(1):36-39.
- [25] Liu M, Xu X, Sun A Y, et al. Evaluation of high-resolution satellite rainfall products using rain gauge data over complex terrain in southwest China [J]. *Theoretical and applied climatology*, 2015,119(1/2):203-219.
- [26] Li L, Kuang Z, Mo J, et al. Assessment of risk ranking for autumn drought in Guangxi province based on AHP and GIS[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013,29(19):193-201.
- [27] 李红军,曹建生,张万军. 流域雨水资源化目标潜力计算模型研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2005,23(2):159-163.
- [28] 赵西宁,吴普特,冯浩,等. 基于 GIS 的区域雨水资源化潜力评价模型研究[J]. *农业工程学报*, 2007,23(2):6-10.
- [29] 张建新,郑大玮,武永利. 基于 3S 技术的可收集雨水资源潜力的计算与分析[J]. *农业工程学报*, 2006,22(10):40-44.
- [30] 宋进喜,宋令勇,何艳芬,等. 基于 GIS 的西安市雨水收集潜力估算[J]. *干旱区地理*, 2009,32(6):874-879.
- [31] 孙静愚,田文君,乔建民,等. 基于 GIS 的平原区雨水资源潜力估算与利用研究:以崂山区为例[J]. *测绘与空间地理信息*, 2013,36(9):76-79.

活用地转化为农业生产生态用地是生态环境改善的主导因素,其他生产用地和村庄生活用地占用是区域生态环境质量退化的重要因素。

#### 参考文献:

- [1] Lambin E F, Meyfroidt P. Land use transitions: Socio-ecological feedback versus socio-economic change[J]. Land Use Policy, 2010, 27(2):108-118.
- [2] 陆大道,史培军,董光器.体现土地利用转型的重要理念[N].中国国土资源报,2006-07-17(5).
- [3] 龙花楼.论土地利用转型与土地资源管理[J].地理研究,2015,34(9):1607-1618.
- [4] Grau H R, Aide M. Globalization and land-use transitions in Latin America [J]. Ecology & Society, 2008, 13(2008):582-592.
- [5] 刘永强,廖柳文,龙花楼,等.土地利用转型的生态系统服务价值效应分析:以湖南省为例[J].地理研究,2015, 34(4):691-700.
- [6] 吕立刚,周生路,周兵兵,等.区域发展过程中土地利用转型及其生态环境响应研究:以江苏省为例[J].地理科学,2013,33(12):1442-1449.
- [7] 张合兵,王世东.典型生态县域土地利用时空与景观格局变化[J].水土保持研究,2015,22(2):246-252.
- [8] 陈婧,史培军.土地利用功能分类探讨[J].北京师范大学学报:自然科学版,2005,41(5):536-540.
- [9] 梁国付,丁圣彦.气候和土地利用变化对径流变化影响研究:以伊洛河流域伊河上游地区为例[J].地理科学,2012,32(5):635-640.
- [10] 于兴修,杨桂山,王瑶.土地利用/覆被变化的环境效应研究进展与动向[J].地理科学,2004,24(5):627-633.
- [11] 赵成,顾小华,姜宏雷,等.“三江”流域(云南部分)土地利用变化的生态环境效应研究[J].水土保持研究,2016,23(1):240-243.
- [12] 吴健生,冯喆,高阳,等.基于DLS模型的城市土地政策生态效应研究:以深圳市为例[J].地理学报,2014, 69(11):1673-1682.
- [13] 刘继来,刘彦随,李裕瑞.中国“三生空间”分类评价与时空格局分析[J].地理学报,2017,72(7):1290-1304.
- [14] 李晓文,方创琳,黄金川,等.西北干旱区城市土地利用变化及其区域生态环境效应:以甘肃河西地区为例[J].第四纪研究,2003,23(3):280-290.
- [15] 崔佳,臧淑英.哈大齐工业走廊土地利用变化的生态环境效应[J].地理研究,2013,32(5):848-856.
- [16] 杨清可,段学军,王磊,等.基于“三生空间”的土地利用转型与生态环境效应:以长江三角洲核心区为例[J].地理科学,2017,37(1):1-9.
- [17] 朱会义,李秀彬.关于区域土地利用变化指数模型方法的讨论[J].地理学报,2003,58(5):643-650.
- [18] Sudhira H S, Ramachandra T V, Jagadish K S. Urban sprawl: metrics, dynamics and modelling using GIS [J]. International journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2004, 5(1):29-39.
- [19] Oliver M A, Webster R. A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging [J]. Catena, 2014, 113(2):56-69.

(上接第193页)

- [32] 李森,魏兴琥,张素红,等.典型岩溶山区土地石漠化过程:以粤北岩溶山区为例[J].生态学报,2010,30(3): 674-684.
- [33] 陆冠尧,魏兴琥,李森,等.粤北石漠化地区碳酸盐岩溶试验研究[J].中国沙漠,2013,33(3):819-825.
- [34] 陆冠尧,李森,魏兴琥,等.粤北石漠化地区植被退化过程及其建模[J].生态学杂志,2013,32(6):1629-1635.
- [35] 黄金国,魏兴琥,王兮之.粤北岩溶山区土地石漠化成因及其生态经济治理模式[J].水土保持研究,2013,20 (4):105-109.
- [36] 沈文娟,李明诗.基于长时间序列 Landsat 影像的南方人工林干扰与恢复制图分析[J].生态学报,2017,37 (5):1438-1449.
- [37] 邓书斌,陈秋锦,杜会建. ENVI 遥感图像处理方法 [M]. 2 版. 北京:高等教育出版社,2014.
- [38] 刘纪远.中国资源环境遥感宏观调查与动态研究[M]. 北京:中国科学技术出版社,1996.
- [39] Liu Jiuyan, Liu Mingliang, Deng Xiangzheng, et al. The land use and land cover change database and its relative studies in China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2002,12(3):275-282.
- [40] 刘纪远,张增祥,徐新良,等.21世纪初中国土地利用变化的空间格局与驱动力分析[J].地理学报,2009,64 (12):1411-1420.
- [41] 徐新良,刘纪远,庄大方.国家尺度土地利用/覆被变化遥感监测方法[J].安徽农业科学,2012,40(4):2365-2369.
- [42] 胡良军,李锐,杨勤科.基于GIS的区域水土流失评价模型[J].应用基础与工程科学学报,2000,8(1):1-8.
- [43] 赵西宁,吴普特,冯浩.黄土高原小流域雨水资源化潜力及其可持续利用分析[J].农业工程学报,2005,21 (7):38-41.