

DOI: 10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202601050004

基于AHP-GIS耦合模型的赣州红层盆地及周边 地下水勘查靶区优选

丰章哲^{1,2}, 余圣品^{1,2,*}, 邓飞^{1,2}, 万皓辉^{1,2}, 陈婷³

(1. 江西省地质局水文地质大队, 江西 南昌 330095; 2. 江西省勘察设计研究院有限公司, 南昌市水文地质与优质地下水资源
开发利用重点实验室, 江西 南昌 330095; 3. 江西省煤田地质勘察研究院, 江西 南昌 330006)

摘要: 为解决南方红层盆地地下水勘查靶区优选难题, 本研究以赣州盆地及其周边为研究区, 构建了层次分析法(AHP)和地理信息系统(GIS)相互耦合的多因子综合评价模型, 系统整合地质构造、地形地貌、气象水文及地表覆盖4大类10项指标, 开展地下水潜力定量评价与勘查靶区优选。结果表明: 研究区地下水潜力指数呈“盆心低、边缘中、山地高”的分布格局, 高潜力区集中分布于东西两侧山地; 含水岩组(权重0.29)与小流域面积(权重0.21)是地下水补给-富集的核心指标, 构造密度与植被覆盖度协同调控地下水运移与补给能力; 圈定的B1-B5高潜力靶区, 均位于含水岩组适宜性评分高、汇水面积大、构造发育且植被覆盖度高的复合区域; 钻孔验证显示靶区单井涌水量达611.71~1381.33 m³/d, 模型计算结果与抽水试验数据高度吻合。研究结果实现了赣州红层盆地及周边地下水勘查靶区的分级评价及空间识别, 可为南方红层地区地下水精准勘查与可持续开发提供可靠技术支撑。

关键词: 红层地下水; 勘查靶区; 层次分析法; 地理信息系统; 赣州盆地

中图分类号: P641.13 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-8527(2026)04-1244-13

Optimization of Groundwater Exploration Targets in Ganzhou Red Bed Basin and Surrounding Areas Based on AHP-GIS Coupling Model

FENG Zhangzhe^{1,2}, YU Shengpin^{1,2,*}, DENG Fei^{1,2}, WAN Haohui^{1,2}, CHEN Ting³

(1. Jiangxi Provincial Hydrogeological Team, Nanchang, Jiangxi 330095, China; 2. Jiangxi Provincial Survey and Design Research Institute Co., Ltd., Key Laboratory of Hydrogeology and High-quality Groundwater Resources Development and Utilization of Nanchang City, Nanchang, Jiangxi 330095, China; 3. Jiangxi Provincial Coalfield Geological Exploration Institute, Nanchang, Jiangxi 330006, China)

Abstract: To address the challenges in selecting optimal groundwater exploration targets in the red-bed basins of southern China, this study focuses on the Ganzhou Basin and its surrounding areas. By constructing an AHP-GIS coupled multi-factor comprehensive evaluation model, we systematically integrated 10 indicators from four major categories-geological structure, topography, meteorology-hydrology, and land cover-to conduct quantita-

收稿日期: 2026-01-05; **修回日期:** 2026-05-06; **编辑:** 袁茂文。

基金项目: 江西省水资源基础调查项目(赣自然资办函[2024]362号); 江西省技术创新引导类计划项目(2023KDG01010); 江西省地质局青年科学技术带头人培养计划项目(2023JXDZKJRC07); 南昌市水文地质与优质地下水资源开发利用重点实验室项目(20251A101)。

作者简介: 丰章哲, 男, 工学硕士, 1997年出生, 水文学及水资源专业, 主要从事水文地质调查与研究工作。

Email: 1806676565@qq.com。

***通信作者:** 余圣品, 男, 高级工程师, 1988年出生, 水文与水资源工程, 主要从事水文地质研究工作。

Email: jxswdzysp@163.Com。

引用格式: 丰章哲, 余圣品, 邓飞, 等. 基于AHP-GIS耦合模型的赣州红层盆地及周边地下水勘查靶区优选[J]. 现代地质, 2026, 40(4): 1244-1256. DOI: 10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202601050004.

FENG Zhangzhe, YU Shengpin, DENG Fei, et al. Optimization of Groundwater Exploration Targets in Ganzhou Red Bed Basin and Surrounding Areas Based on AHP-GIS Coupling Model [J]. GEOSCIENCE, 2026, 40(4): 1244-1256. DOI: 10. 19657/j. geoscience. 1000-8527. 202601050004.

tive evaluation of groundwater potential and optimize exploration targets. The results indicate that the groundwater potential index in the study area exhibits a distribution pattern of “low in the basin center, moderate at the edges, and high in mountainous regions,” with high-potential zones concentrated in the mountainous areas on the eastern and western sides. The aquifer formation (weight 0.29) and small watershed catchment area (weight 0.21) are identified as the core factors influencing groundwater recharge and enrichment, while structural density and vegetation coverage jointly regulate groundwater movement and recharge capacity. The delineated high-potential target zones (B1-B5) are all located in composite areas characterized by high aquifer suitability scores, large catchment areas, well-developed structures, and high vegetation coverage. Drilling validation revealed that the water yield per well in these target zones ranges from 611.71–1,381.33 m³/d, with model calculations showing high consistency with pumping test data. The findings enable spatial identification and hierarchical evaluation of groundwater exploration targets in the Ganzhou red-bed basin and its surroundings, providing reliable technical support for precise groundwater exploration and sustainable development in southern red-bed regions.

Key words: red-bed groundwater; exploration target area; analytic hierarchy process (AHP); geographic information system (GIS); Ganzhou Basin

0 引言

红层在我国分布广泛, 因富含 Fe³⁺ 氧化物而呈红-紫红色^[1-6], 受泥钙质胶结及低孔隙度影响, 普遍裂隙不发育, 入渗补给能力弱, 地下水资源天然禀赋较差^[7-8]。当前, 对红层及其周边地下水的研究主要集中在两个方面, 通过分析地形地貌、地质构造、岩性组合等条件^[9-14], 确定地下水的分布特点及富集规律; 或是借助 Piper 三线图、Gibbs 模型等揭示红层区水化学特征及其演化规律, 分析地下水的水文地球化学演化机理^[15-20]。现有研究成果主要集中在机理规律探讨, 在多富水因子协同评价、勘察靶区识别及空间定位方面存在不足。而层次分析法 (AHP) 与地理信息系统 (GIS) 相互耦合可有效解决上述难题, 通过 AHP 构建评价指标体系并计算权重^[21-22], 结合 GIS 平台空间叠加、分区等功能, 实现结果的可视化表达^[23]。国内外研究已充分证明这一方法的有效性, 杨美等^[24]采用 AHP-CIS 结合的方式, 构建了包含 11 项指标的评价体系, 研究了鄱阳湖流域地下水潜力分区情况; 胡彦斌等^[25]选取社会经济概况、地下水水质、水量等 6 项指标, 采用层次分析法确定甘肃省地下水水源地开采潜力; 韦华鹏^[26]等通过层次分析法构建青海省矿泉水资源开发利用评价指标体系, 并确定各指标权重; Getahun Belete 通过 AHP 和 GIS 融合, 实现了对埃塞俄比亚南贡达尔区福格拉沃雷达的地下水潜力评估^[27]; Chavda, Z. K 等采用 GIS-AHP 相结合的方

式, 对印度古吉拉特邦纳尔马达区地下水潜力分区进行了研究^[28]; Sadrahi Yabre 等选取了地貌、土壤类型、土地利用等 10 项因素, 结合 AHP 和 GIS 识别了布基纳法索萨门德尼流域地下水不同潜力区^[29]; Zeinolabedini M 运用 AHP 构建评价模型, 通过 GIS 对伊朗克尔曼省巴夫特市地下水资源潜力进行分区^[30]。红层及其周边区域水文地质条件复杂, 含水岩组岩性非均质性强, 传统勘查手段具有相当大的局限性, 通过 AHP-GIS 耦合, 可有效整合地质构造、地形地貌、气象水文、地表覆盖等多维度信息, 精准识别地下水高潜力区, 显著提升地下水勘查的准确性与科学性, 优化水资源配置, 保障区域用水安全^[31-32]。

本文以赣州盆地及周边为研究区域, 通过层次分析法构建地下水勘察靶区优选指标体系, 量化各指标相对权重, 借助 ArcGIS 平台叠加分析功能, 确定研究区地下水勘察潜力指数并进行分级, 进而确定勘察靶区范围, 旨在为红层盆地及其周边地下水的精准勘查与可持续开发提供科学支撑。

1 研究区概况

1.1 自然地理特征

研究区位于赣江上游, 赣州市西北部, 以赣州市主城区为边界, 外扩 30 km, 并结合水文地质单元圈定, 总面积 5464.10 km² (图 1)。属亚热带季风气候区, 年均气温 19.9℃, 年均降水量 1580.2 mm, 降水多集中于 4—6 月。地势周高中

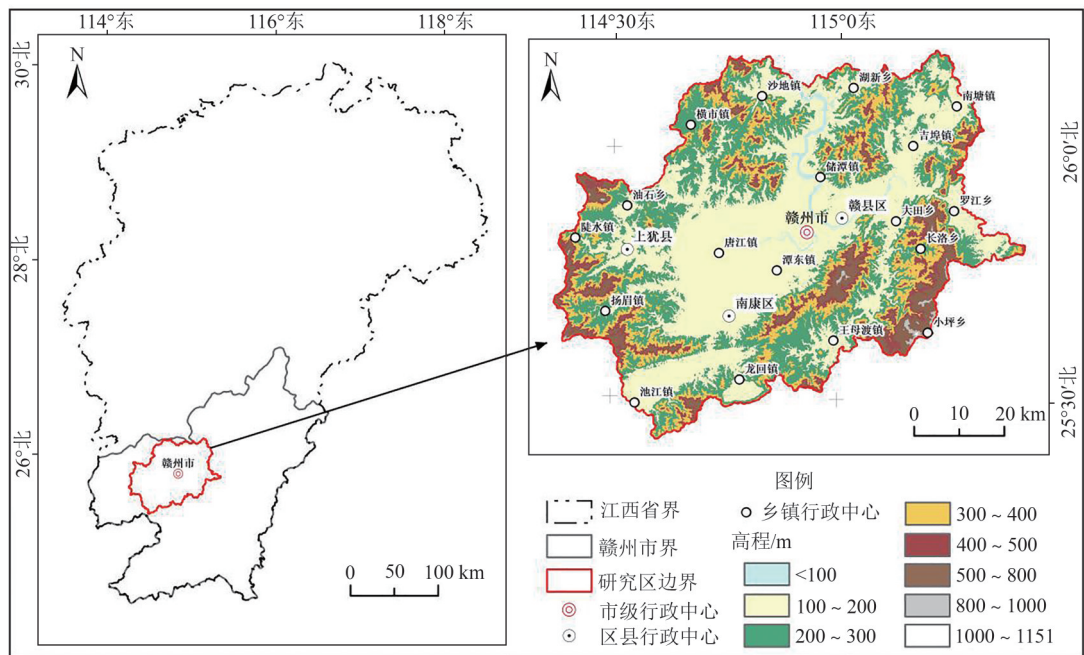


图1 研究区地理位置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the geographical location of the study area

低、南高北低，水系呈辐射状汇入章贡区，地貌以丘陵及平原为主。

1.2 地质背景

研究区位于华夏板块东南缘华南造山带北段的“罗霄—诸广隆起”带。区内沉积地层发育齐全，从南华系到第四系均有出露，地层序列连续性良好。基底由震旦系—寒武系浅变质岩组成，盖层以泥盆系碎屑岩与白垩系红色碎屑岩为主^[33]。褶皱主要为基底卷入型复式褶皱，以早期加里东期及晚期燕山期两期为主。断裂系统极为发育，按走向可分为北东（NE）、北北东（NNE）、北西（NW）、东西（EW）和南北向（SN）五组，以北东—北北东向断裂最为发育。

1.3 水文地质特征

据江西省地质局水文地质工程地质大队 1/20 万赣州幅，1/10 万南康县、赣州市（县）区域水文地质普查报告显示，研究区地下水类型按赋存介质可分为松散岩类孔隙水、红层孔隙裂隙水、岩溶水及基岩裂隙水四大类（图2）。

松散岩类孔隙水分布于赣江、章江、贡水及其支流河谷地带，含水层为全新统一上更新统砂砾石层，水量贫乏—中等、水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{—Ca}$ 型，pH 值 5.0 ~ 7.8；红层孔隙裂隙水主要分布于赣州盆地，含水层岩性以紫红色泥岩、粉砂岩、钙质砂岩为主，地下水水量贫乏—中等，地下水主

要为 $\text{HCO}_3\text{—Ca}\cdot\text{Mg}$ 、 $\text{HCO}_3\text{—Na}\cdot\text{Ca}$ 型，pH 值 7.0 ~ 8.2，矿化度 47 ~ 3050 mg/L；岩溶水零星分布在研究区东部，含水岩组为石炭系黄龙组、二叠系栖霞组灰岩、白云岩，水量贫乏—中等，水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{—Ca}$ 型为主，pH 值 7.0 ~ 8.1，矿化度 101 ~ 178 mg/L；基岩裂隙水广泛分布在红层盆地周围山地地带，有碎屑岩裂隙水、岩浆岩裂隙水及变质岩裂隙水 3 个亚类，水量以贫乏—中等为主，局部地段可达丰富级别，地下水类型有 $\text{HCO}_3\text{—Na}$ 、 $\text{HCO}_3\text{—Na}\cdot\text{Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{—Mg}\cdot\text{Ca}$ 型，pH 5.5 ~ 7.0，矿化度 50 ~ 800 mg/L。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与处理

地下水勘察靶区优选依赖于科学、系统且契合区域特征的评价指标体系，根据赣州盆地及周边的水文地质特征、地理环境背景并借鉴前人研究成果^[34-37]，选择了对地下水赋存有显著影响的 10 项评价指标，包括坡度、高程差、地形湿度指数、构造密度、含水岩组、年均降雨量、河网密度、小流域面积、土壤类型、植被覆盖度。

研究中的土壤类型数据来自国家地球系统科学数据中心 (<https://www.geodata.cn>)，江西省 1/100 万土壤类型（2018），由中国科学院南京土壤研究所提供；降水数据基于江西省 2023 年水资

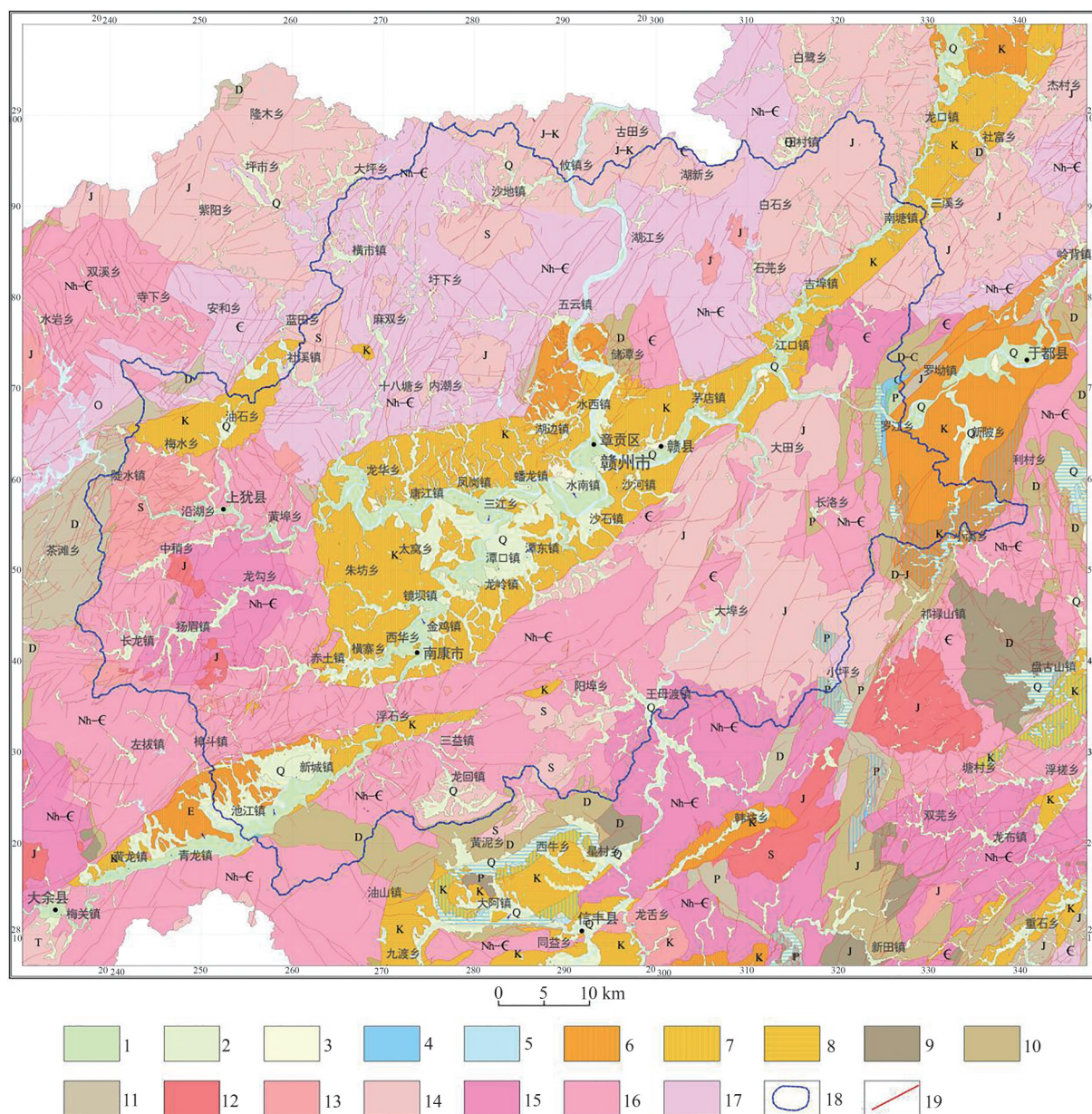


图2 赣州盆地水文地质略图 (修改自江西省地质局水文地质工程地质大队1:20万赣州幅水文地质图)

Fig. 2 Hydrogeological sketch map of Ganzhou Basin (Modified from the 1:200000 Ganzhou Hydrogeological map by the hydrogeological and engineering geology team of Jiangxi Provincial geological bureau)

1. 水量中等的松散岩类孔隙水; 2. 水量贫乏的松散岩类孔隙水; 3. 水量极贫乏的松散岩类孔隙水; 4. 水量中等的碳酸盐岩裂隙溶洞水; 5. 水量贫乏的碳酸盐岩裂隙溶洞水; 6. 水量中等的红层溶蚀孔隙裂隙水; 7. 水量贫乏的红层溶蚀孔隙裂隙水; 8. 水量贫乏的红层孔隙裂隙水; 9. 水量丰富的碎屑岩裂隙水; 10. 水量中等的碎屑岩裂隙水; 12. 水量贫乏的碎屑岩裂隙水; 13. 水量丰富的岩浆岩裂隙水; 14. 水量中等的岩浆岩裂隙水; 15. 水量贫乏的岩浆岩裂隙水; 16. 水量丰富的变质岩裂隙水; 17. 水量中等的变质岩裂隙水; 18. 研究区范围; 19. 断层

源公报中公布的降水数据, 借助 ArcGIS 平台空间分析模块, 采用克里金插值法对区内各站点观测的年均降雨量进行空间插值; 小流域面积借助 ArcGIS 平台的 Arc Hydro Tools 插件, 经历填注、流向计算、流量计算、河流定义、河流分级、河流网格划定等一系列步骤生成; 构造及含水岩组资料来源于江西省地质局水文地质工程地质大队

1:20 万赣州幅水文地质普查报告, 以及南康县、于都县、赣州市 (县) 1/10 万区域水文地质普查成果; 河流数据选取流域面积在 50 平方公里以上的河流; 植被覆盖度采用 Landsat 8-9 卫星影像, 利用 ArcGIS 平台计算归一化植被指数 (NDVI), 进而确定植被覆盖度 (FVC)。

数字高程模型数据来自地理空间数据云平台

(<https://www.gscloud.cn>) 上下载的 ASTER GDEM 30 m 分辨率。坡度通过 ArcMap 软件中的表面分析工具直接生成；高程差借助 ArcMap 空间分析模块区域分析功能以小流域为单元，计算各单元内高程差值；地形湿度指数 (TWI) 借助 ArcMap 空间分析模块经过 DEM 数据填注、坡度计算、流向计算、流量计算、坡度单位转化、坡度正切值计算 (TanSlop)、单位面积汇流量 SCA 计算、最终通过公式 (1) 计算生成。

$$TWI = \ln \left(\frac{SCA}{\tan \text{Slope}} \right) \quad (1)$$

河网密度和构造密度计算见公式 (2)。

$$A_d = \frac{L}{S} \quad (2)$$

式中 A_d 为河网密度 (构造密度), km/km^2 ; L 为河网长度 (构造长度), km ; S 为对应的小流域面积 km^2 。

2.2 研究方法

2.2.1 优选指标体系构建

将上述 10 项指标从地形地貌、地质构造及岩性、气象水文和地表覆盖 4 个方面进行分类, 以层次分析法确定权重, 构建了包含目标层、指标层、方案层在内的优选指标体系 (图 3)。

2.2.2 权重计算与一致性检验

基于层次分析法原理, 对 10 项指标进行整合, 依据 Saaty 1-9 标度法对每个指标进行赋值^[38-40],

数值大小反映了不同指标对地下水赋存的影响程度, 数值越大影响程度越大。最后对每个指标进行两两重要性比较得出其相对重要性 (表 1), 据此构建判断矩阵 A , 采用和积法计算各指标权重 (表 2)。

一致性检验: 采用一致性比率 (CR) 对指标层、指标层子类所形成的两两对比矩阵进行一致性检验公式 (3)-(5)。

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(AW)_i}{nW_i} \quad (5)$$

式中: CI 为一致性指数, RI 为随机一致性指数 (其值由表 3 查阅^[41]), $\lambda_{\max}$ 为最大特征根, n 为矩阵的阶数。

由公式 (3)-(5) 计算得到 $\lambda_{\max}=10.47$ 、 $CI=0.05$ 、 $CR=0.035<0.1$, 判断矩阵的一致性是可以接受的, 因此该判断矩阵通过一致性检验, 计算出的权重合理且有效。

2.3 数据标准化与 GIS 集成

2.3.1 数据标准化与评分

依据自然间断点分级法或专业标准将各指标划分为 5~6 个子类。小流域面积参照《水文调查规范》中对小流域面积 (10~50 km^2) 的划定,

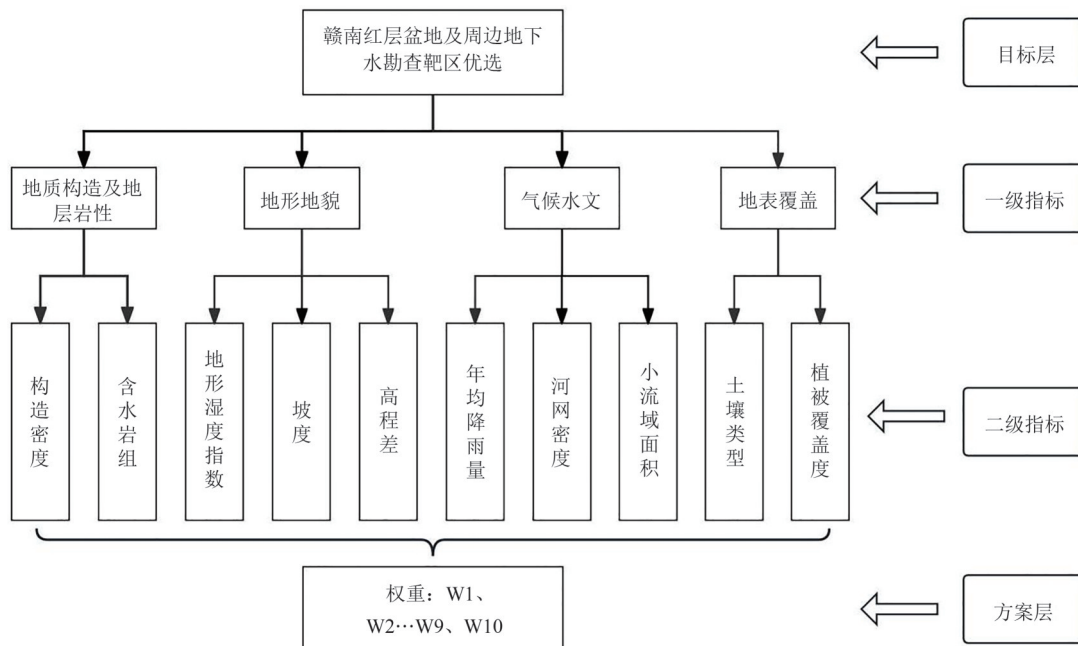


图3 赣州盆地及周边地下水勘查靶区优选指标体系

Fig. 3 Ganzhou basin and surrounding groundwater exploration target area optimization index system

结合研究区流域实际面积确定阈值；高程差依据柴宗新提出的不同地貌基本形态划分指标中相对高差进行分级；构造密度参考《工程岩体分级标准》中不同级别节理发育情况的分级逻辑，结合研究区构造密度分布确定阈值；土壤类型与含水岩组依据收集到的资料进行划分；河网密度按照水文学界通用分级（高密度 > 0.7、中密度 0.3 ~ 0.7、低密度 < 0.3），结合研究区河网密度实际情况进行分级；地形坡度采用国际地理学联合会（IGU）地貌调查与制图委员会标准，将坡度在 5° 以下的平原、微斜坡、缓斜坡合并为平坡，5 ~ 35° 的缓斜坡、斜坡、陡坡保留，> 35° 的峭坡、垂直壁合并为急坡；植被覆盖度采用植被多度分级标准，将覆盖度 < 5% 的类别合并为无植被区，其余按覆盖梯度划分；年均降雨量、地形湿度指数

表 1 相关因素重要性比例标度表	
Table 1 Importance proportions of related factors	
比例标度	重要性
$b_{ij}=1$	b_i 与 b_j 同等重要
$b_{ij}=3$	b_i 比 b_j 稍微重要
$b_{ij}=5$	b_i 比 b_j 较强重要
$b_{ij}=7$	b_i 比 b_j 强烈重要
$b_{ij}=9$	b_i 比 b_j 极端重要
$b_{ij}=2, 4, 6, 8$	两相邻判断的中间值
$b_{ij}=1/b_{ji}$	b_i 比 b_j 重要, 依数值同上关系

采用 ArcGIS 自然间断点分级法，以最小化组内方差、最大化组间差异原则确定最优断点。指标分级的目的是区分出对地下水富集影响较大的子类，给予其更高的评分，针对每一子类，按其对地下水赋存的适宜性排序，并赋予 1-9 分的评分值（表 4）。

表 2 影响因子判断矩阵 A 及权重分配
Table 2 Judgment matrix a for impact factors and weight allocation

指标因子	含水岩组	小流域面积	构造密度	植被覆盖度	高程差	坡度	年均降雨量	地形湿度指数	河网密度	土壤类型	特征向量	权重
含水岩组	1	2	3	4	5	6	7	8	9	9	2.90	0.29
小流域面积	1/2	1	2	3	4	5	6	7	8	8	2.10	0.21
构造密度	1/3	1/2	1	2	3	4	5	6	7	7	1.52	0.15
植被覆盖度	1/4	1/3	1/2	1	2	3	4	5	6	6	1.09	0.11
高程差	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2	3	4	5	5	0.78	0.08
坡度	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2	3	4	4	0.56	0.05
年均降雨量	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2	3	3	0.39	0.04
地形湿度指数	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	2	2	0.27	0.03
河网密度	1/9	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	1	0.19	0.02
土壤类型	1/9	1/8	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1	1	0.19	0.02

表 3 平均随机一致性指数 RI 标准值
Table 3 Standard values of the average random consistency index (RI)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
RI	0	0	0.52	0.89	1.12	1.26	1.36	1.41	1.46	1.49	1.52	1.54	1.56	1.58

表 4 指标层排序及其子类等级
Table 4 Ranking of indicator layer and grades of its subclasses

序号	一级指标	二级指标	权重	子类	
				子类	等级
1	地质构造条件	构造密度(km/km ²)	0.15	> 1.50	9
				0.90 ~ 1.50	7
				0.30 ~ 0.9	5
				0.1 ~ 0.3	3
				< 0.1	1
2	地质构造条件	含水岩组	0.29	碳酸盐岩类裂隙岩溶水含水岩组	9
				岩浆岩类裂隙水含水岩组	7
				碎屑岩类孔隙裂隙水含水岩组	5
				变质岩类裂隙水含水岩组	3
				松散岩类孔隙水含水岩组	3
				红层孔隙裂隙水含水岩组	1

续表 4

序号	一级指标	二级指标	权重	子类	
				子类	等级
3	地形与地貌条件	地形湿度指数	0.03	> 15	9
				10 ~ 15	7
				8 ~ 10	5
				6 ~ 8	3
				< 6	1
4		坡度(°)	0.05	急坡(> 35)	9
				陡坡(25 ~ 35)	7
				斜坡(15 ~ 25)	5
				缓坡(5 ~ 15)	3
				平坡(< 5)	1
5	高程差(m)	0.08	> 1500	9	
			500 ~ 1500	7	
			200 ~ 500	5	
			20 ~ 200	3	
			0 ~ 20	1	
6	年均降雨量(mm)	0.04	1554 ~ 1588	9	
			1532 ~ 1554	7	
			1516 ~ 1532	5	
			1502 ~ 1516	3	
			1490 ~ 1502	1	
7	河网密度(km/km²)	0.02	> 1.5	9	
			1.0 ~ 1.5	7	
			0.7 ~ 1.0	5	
			0.5 ~ 0.7	3	
			< 0.5	1	
8	小流域面积(km²)	0.21	> 50	9	
			30 ~ 50	8	
			20 ~ 30	7	
			10 ~ 20	5	
			5 ~ 10	3	
			< 5	1	
9	地表覆盖条件	土壤类型	0.02	江河内沙	9
				潮土	8
				渗育水稻	7
				水稻土	7
				暗黄棕壤	7
				黄红壤	6
				黄壤	5
				褐土	4
				石灰性紫	4
				石灰(岩)土	3
				砖红壤	3
				红壤	2
				红壤性土	2
10	植被覆盖度(%)	0.11	> 75(极高覆盖区)	9	
			50 ~ 75(高覆盖区)	7	
			25 ~ 50(中覆盖区)	5	
			5 ~ 25(低覆盖区)	3	
			< 5(无植被区)	1	

2.3.2 叠加分析

基于 ArcGIS 加权叠加分析模块，将 10 项指标的子类评分分别与其对应权重相乘，并累加求和，得到地下水靶区勘察潜力综合指数（公式 6）。

$$CPI = \sum_{i=1}^n (W_i \times R_i) \quad (6)$$

公式中：CPI 为地下水潜力指数， W_i 为各类指标评分， R_i 为其对应的权重。

3 结果与分析

3.1 地下水潜力影响指标空间分布

研究区地质构造及地层岩性、地形地貌、气候水文、地表覆盖等与地下水勘察靶区优选相关的 10 项影响指标空间分布如图 4 所示。

3.2 地下水潜力分区空间特征

基于地下水勘察综合潜力指数，借助 ArcGIS

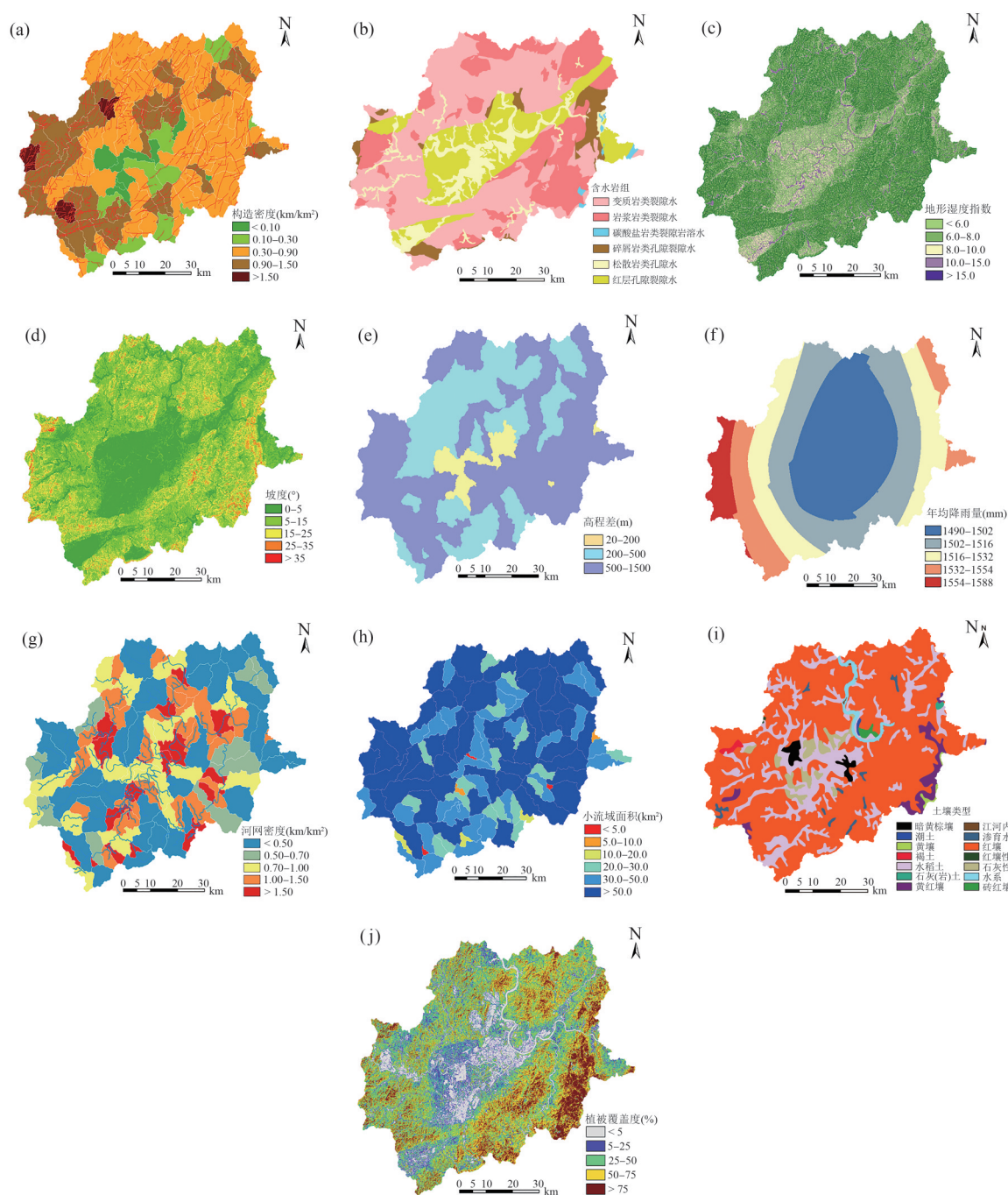


图4 赣州盆地地下水潜力各影响指标空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution map of influencing indicators for groundwater potential in Ganzhou Basin

软件的“Weighted Overlay”工具，实现了对十个不同图层数据的高效集成与分析，从而生成了覆盖整个研究区的地下水勘查潜力分区图，通过 CIS 平台将赣州盆地及周边地下水勘查潜力分为 5 类，如图 5 所示。

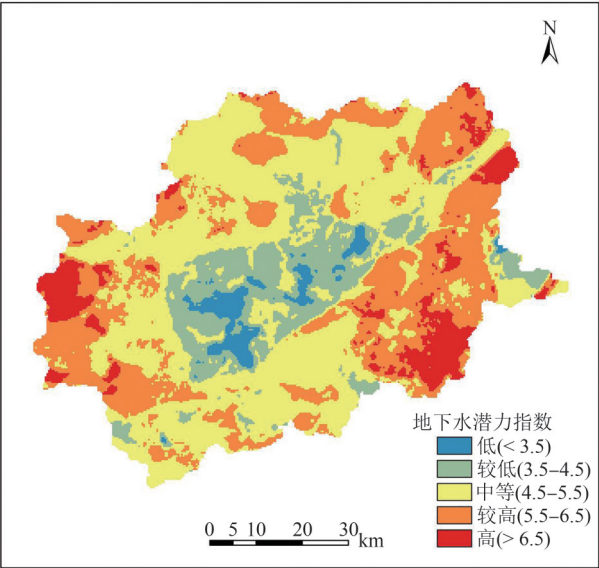


图5 赣州盆地地下水潜力分区图
Fig. 5 Groundwater potential zoning map of Ganzhou Basin

地下水潜力指数分区按照计算所得的 GPI 值划定为如下级别，如表 5 所示：

表 5 研究区地下水潜力评价分级
Table 5 Classification of groundwater potential evaluation in the study area

地下水潜力评价	地下水潜力指数	面积	占比
低	< 3.5	155.4	2.84%
较低	3.5 ~ 4.5	762.83	13.96%
中等	4.5 ~ 5.5	2495.15	45.66%
较高	5.5 ~ 6.5	1651.63	30.23%
高	>6.5	399.09	7.31%

从图 5 和表 5 可以看出，研究区地下水勘查潜力呈现出“盆心低、边缘中、山地高”的总体空间分布格局。地下水潜力以中等（45.66%）和较高（30.23%）等级为主，两者合计占比达 75.89%，表明红层盆地周边地下水赋存条件总体较为良好；潜力低（2.84%）和高（7.31%）的区域占比较小，呈两极分化特征，反映了研究区水文地质条件的区域差异性。低和较低潜力区主要分布在赣江两岸的盆地内部及部分山间洼地与红层区地下水富水性普遍较低的特点相吻合；较高和高潜力区主要集中在分布在东西两侧的山地

区域，占总面积 37.54%，是勘查开发的重点靶区。

3.3 靶区范围

本研究构建 AHP-GIS 耦合模型，综合含水岩组、小流域面积、构造密度等 10 项控水因子计算地下水潜力指数，确定地下水高潜力区；在计算出的高潜力区内，依据含水岩组类型，供水距离、地形地貌等确定最终靶区并结合钻孔涌水量进行验证，所圈定的 5 个地下水勘查靶区（B1-B5），如图 6 所示。

3.4 靶区验证

在分析五个靶区的地质构造特征及水文地质条件的基础上，选定 B1 和 B3 靶区作为验证靶区，部署实施了水文地质钻探及抽水试验，对其地下水富集性与开发潜力进行现场验证与定量评价（图 7；表 6）。

B1 靶区钻孔 B1ZK01、B1ZK02、B1ZK03 单井涌水量分别为 611.71 m³/d、790.56 m³/d、886.32 m³/d，富水性中等，钻孔所在区域地下水潜力指数为 5.5 ~ 6.5（较高）；钻孔 B3ZK01 单井涌水量达 1381.33 m³/d，富水性好，水量丰富，该位置地下水潜力指数 > 6.5（高）。B1 和 B3 靶区抽水试验结果与模型预测结果高度吻合，有力验证了靶区圈定的科学性。基于评价体系的一致性 & 区域水文地质条件的相似性，可合理推测 B2、B4 及 B5 地下水勘查靶区具备同等开发潜力。

为进一步验证模型可靠性，整合研究区 1:20 万、1:10 万水文地质资料中的 19 个靶区外历史钻孔数据（表 7），其中 13 个（68.4%）钻孔涌水量 < 100 m³/d，地下水潜力评估为低及较低；仅 6 个钻孔涌水量 > 100 m³/d，其中 5 个介于 100 ~ 300 m³/d（潜力中等），ZK06 涌水量达到 445.56 m³/d，其位于模型识别的较高潜力指数区。靶区内外钻孔涌水量与地下水潜力指数呈现显著空间耦合特征，高涌水量钻孔集中于高潜力靶区，低涌水量主体分布于低潜力背景区，进一步验证了靶区优选结果的可靠性。

4 讨 论

本次研究构建的 AHP-GIS 耦合模型，可实现赣州红层盆地及周边区域地下水潜力的分级及地下水勘查靶区划分。验证结果显示，模型科学合理，权重分配符合研究区水文地质条件，输出结果与抽水试验吻合性较好。

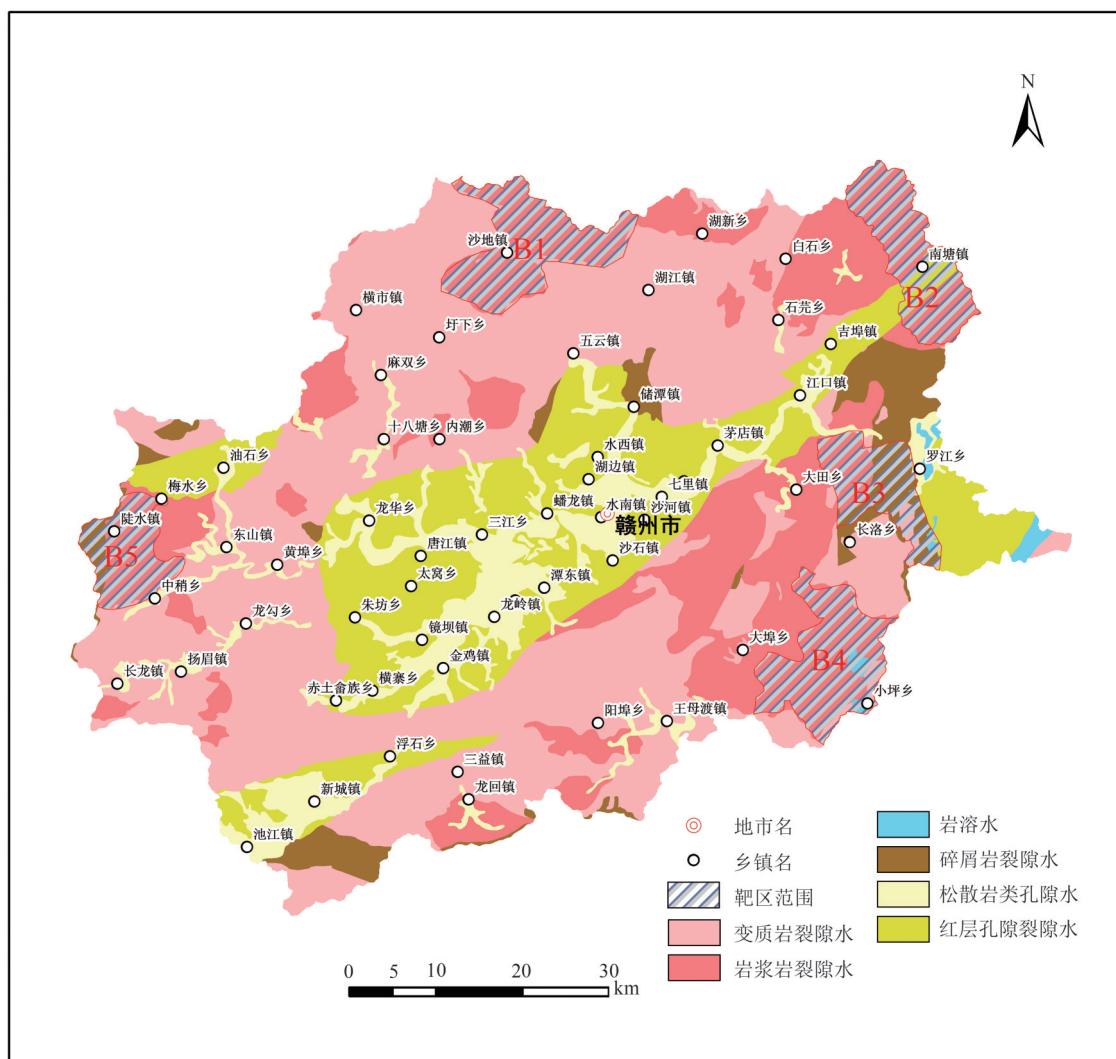


图6 赣州盆地地下水勘察靶区分布图

Fig. 6 Distribution map of groundwater exploration target areas in Ganzhou Basin

在10项评价指标中,含水岩组与小流域面积权重合计为0.5,是影响地下水潜力的核心指标,表明两者直接决定了地下水赋存的介质类型与富水能力。地下水高潜力区主要位于岩浆岩裂隙水、岩溶水分布区,该区域含水层孔隙裂隙较为发育,储水导水性能优越。小流域面积反映了局部汇流能力以及地下水补给范围,流域面积越大汇集的降水越多,入渗时间越长,越有利于地下水补给。构造密度(0.15)和植被覆盖度(0.11)同样具有显著影响,说明断裂带不仅是导水通道,也是重要的储水空间;高植被覆盖有助于减缓地表径流、增强入渗,间接促进地下水补给。

B1-B5靶区全部位于红层盆地四周山地位置,B1、B2、B4、B5这四个靶区分布在权重高、适宜

性评分优异的岩浆岩裂隙水或岩溶水含水岩组区,具备较高的地下水开发潜力,B3靶区地下水类型多样,有岩浆岩裂隙水、碎屑岩裂隙水,局部分布有变质岩裂隙水和岩溶水,岩溶水在部分地段富水性好。同时各靶区流域面积普遍在50 km²以上,具有良好的汇水条件;构造密度超过0.3 km/km²,B5靶区局部区域在1.5 km/km²以上,密集的断裂网络为地下水提供了运输通道及赋存空间;加之植被覆盖度高,多数区域超过50%,B3靶区更在75%以上,有利于降水入渗与水源涵养。在多因素共同作用下,为靶区内地下水富集奠定了良好的基础,是其被划定为勘察靶区的核心依据。

尽管模型取得了较为良好的效果,但仍存在一定局限,潜力指数分级依赖自然断点法,容易

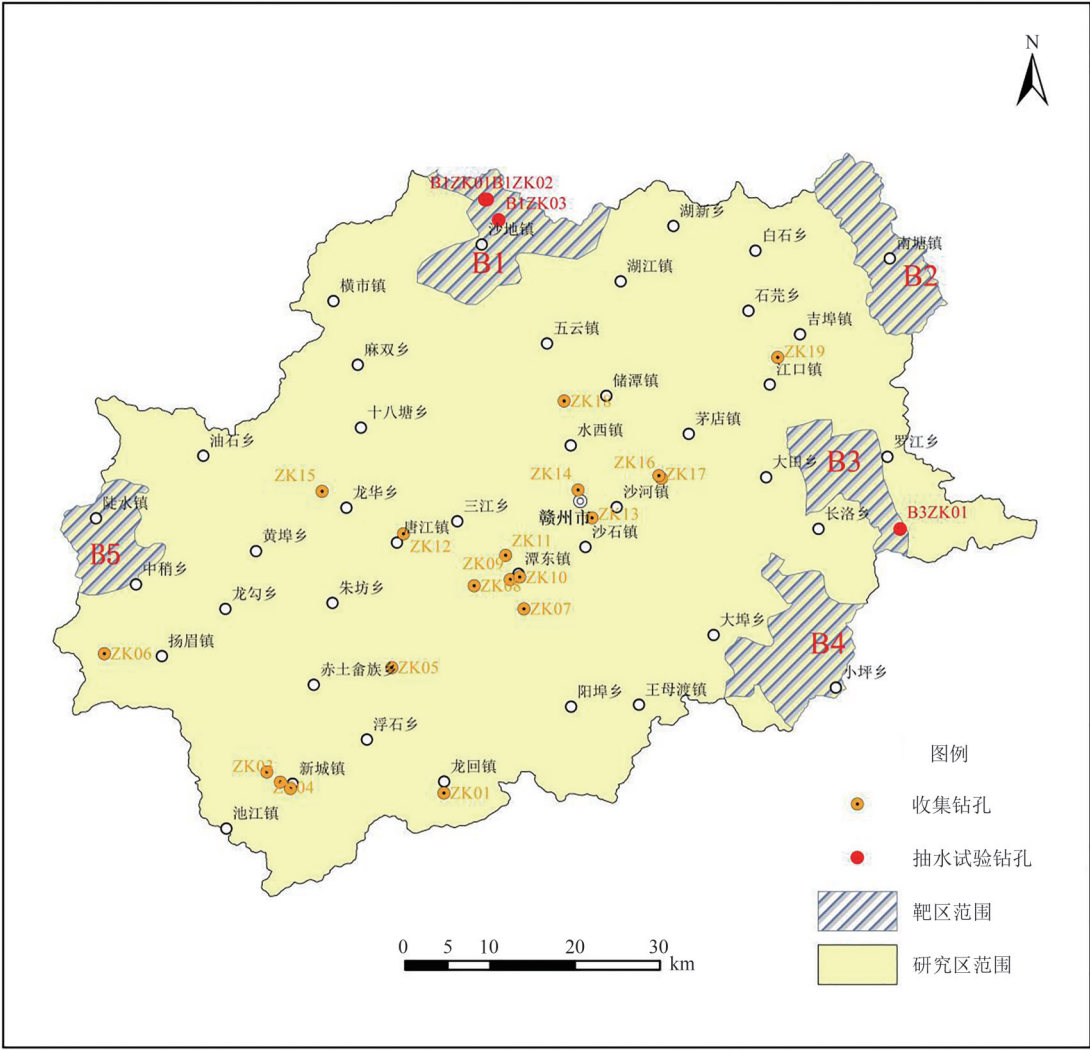


图7 研究区钻孔分布图
Fig. 7 Borehole distribution map of the study area

表6 抽水试验钻孔涌水量
Table 6 Yield of pumping test boreholes

编号	孔深(m)	降深(m)	流量(m ³ /d)
B1ZK01	120	25.07	611.71
B1ZK02	195	28.78	790.56
B1ZK03	170	47.74	886.32
B3ZK01	150	2.14	1381.33

受到数据分布的影响,未来将考虑引入对比等间隔法/分位数法等多方案分级结果优化阈值设定,进一步提升分级的客观性与科学性;构造密度简化为线密度,未能对断裂的导水/阻水性质进行区分;未考虑人类活动对地下水系统的干扰;同时验证钻孔数量有限且空间分布不均。

表7 靶区外钻孔涌水量
Table 7 Water inflow from boreholes outside the target zone

钻孔编号	涌水量(m ³ /d)	钻孔编号	涌水量(m ³ /d)	钻孔编号	涌水量(m ³ /d)
ZK01	297.22	ZK08	60.7	ZK15	41.47
ZK02	2.33	ZK09	28.5	ZK16	62.2
ZK03	9.5	ZK10	14.688	ZK17	108.82
ZK04	3.5	ZK11	67.2	ZK18	101.347
ZK05	4.58	ZK12	250.55	ZK19	3.8
ZK06	445.56	ZK13	108		
ZK07	31.1	ZK14	31.45		

5 结 论

本研究构建了 AHP-GIS 相互耦合的地下水勘查靶区优选模型, 圈定了研究区 5 处勘查靶区, 有如下结论:

研究突破了传统单一因子评价的局限, 将地质构造、地形地貌、气象水文、地表覆盖等多类型影响因子互相融合, 构建了地下水勘查靶区优选模型, 经验证模型计算结果与抽水试验高度一致, 证明了模型的科学性和实用性。

研究区地下水潜力指数呈现“盆心低、边缘中、山地高”的总体分布格局, 表明研究区不同位置水文地质条件存在区域差异性, 高及较高潜力区主要分布在东西两侧山地, 是地下水勘查的重点区域。

含水岩组和小流域面积是影响研究区地下水富集的核心指标, 决定了含水介质的类型以及区域地下水的补给能力。构造密度通过控制裂隙网络的发育程度, 为地下水提供运移通道和储水空间, 植被覆盖度则通过增加降水入渗、减少地表径流的方式, 提升对地下水的补给, 两者对地下水的富集起到重要支持。

B1-B5 靶区分布在含水岩组适宜性评分高、小流域汇水面积大、构造密度和植被覆盖度高的复合区, 印证了“岩性控储、构造导流、汇水补给、植被涵养”的多要素协同控水规律, 同时为模型的科学性提供了有力支撑。

本研究构建的 AHP-GIS 耦合模型为红层盆地及周边地下水精准勘查与可持续开发提供了技术支撑, 可为南方红层地区地下水勘查靶区优选提供科学参考, 对于解决区域水资源短缺问题具有重要实践意义。

参考文献:

- [1] 卢金凯. 对红层地下水富集规律的认识[J]. 水文地质工程地质, 1981, (4): 26-28.
- [2] 毛茂兵. 川东北红层区地下水赋存特征及影响因素—以达万铁路沿线车站供水工程为例[J]. 四川地质学报, 2014, 34(3): 437-438.
- [3] ROBERT A, BERNER. Goethite stability and the origin of red beds. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1969, 33(2): 267-273.
- [4] 李廷勇, 王建力. 中国的红层及发育的地貌类型[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 2002, 25(4): 427-431.
- [5] 彭华, 吴志才. 关于红层特点及分布规律的初步探讨[J]. 中

- 山大学学报(自然科学版), 2003, 42(5): 109-113.
- [6] 程强, 寇小兵, 黄绍槟, 等. 中国红层的分布及地质环境特征[J]. 工程地质学报, 2004, 12(1): 34-40.
- [7] 潘德元, 王杰, 方国庆, 等. 红层区典型储水构造快速钻探成井工艺研究[J]. 科技和产业, 2022, 22(8): 319-323.
- [8] 王宇, 朱春林, 李燕, 等. 红层地下水勘查开发的理论及方法[M]. 北京: 地质出版社, 2008: 1-16.
- [9] 魏良帅, 孔德彦, 罗雲丰, 等. 川南红层地区地下水赋存环境及水化学特征分析—以宜宾市屏山县为例[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2018, 45(8): 145-150.
- [10] 曹学松. 赣东北地区白垩系红层地下水的赋存规律[J]. 水文地质工程地质, 1994(2): 34-36.
- [11] 王新峰, 宋绵, 龚磊, 等. 赣南缺水地区地下水赋存特征及典型蓄水构造模式解析—以兴国县为例[J]. 地球学报, 2018, 39(5): 573-579.
- [12] 张廷山, 陈晓慧, 姜照勇, 等. 川东北红层区地下水赋存特征及合理开发思考[J]. 水资源与水工程学报, 2006, 17(1): 15-19.
- [13] 朱春林. 滇中红层地下水富集规律及开发利用研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2010.
- [14] 李志勇, 黎义勇, 黄长生, 等. 赣江流域红层盆地典型构造样式与地下水动力学模式[J]. 地质通报, 2020, 39(12): 1873-1882.
- [15] 田梦莎. 巴中市恩阳区凤凰庙红层区浅层地下水水文地球化学特征[D]. 成都: 成都理工大学, 2016.
- [16] 赵幸悦子, 肖攀, 宋文龙, 等. 赣南红层地区地下水水化学特征及成因分析[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(33): 14112-14122.
- [17] 王广昊. 衢州市红层区地下水化学组分异常识别与溯源研究[D]. 廊坊: 防灾科技学院, 2021.
- [18] 成胜, 许模, 罗明, 等. 川中遂宁地区红层地下水水化学特征及主要离子来源分析[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(1): 220-231.
- [19] 冯文凯, 方宏宇, 黎一禾, 等. 红层丘陵区浅层地下水水化学特征及水质评价[J]. 水力发电, 2020, 46(2): 12-16.
- [20] 张智雄, 许模, 张强, 等. 绵阳红层地区浅层地下水水化学特征、成因及水质分析[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(3): 168-173.
- [21] 曾志杰, 程怡高, 周伟龙, 等. 基于 AHP-熵值法组合赋权的百山祖国家公园地质遗迹资源综合评价与保护利用决策研究[J]. 现代地质, 2026, 40(1): 248-262.
- [22] 李信, 薛桂澄, 夏南, 等. 基于 CF、CF-LR 和 CF-AHP 模型的国家热带雨林公园地质灾害易发性研究: 以海南保亭为例[J]. 现代地质, 2023, 37(4): 1033-1043.
- [23] 王瑞丰, 翟延亮, 张宝君, 等. 基于 GIS 与 AHP 耦合技术的承德地区地质灾害危害性评价[J]. 现代地质, 2023, 37(4): 1023-1032.
- [24] 杨美, 李云良, 邢子康, 等. 基于层次分析法的鄱阳湖流域地下水潜力分区研究[J]. 水资源与水工程学报, 2025, 36(2): 19-28.
- [25] 胡彦斌, 冯建宏, 高文德, 等. 基于层次分析法的甘肃省地下水水源地开采潜力研究[J]. 甘肃地质, 2024, 33(3): 30-37.
- [26] 韦华鹏, 许伟林, 罗银飞, 等. 基于层次分析法的青海省矿泉

- 水开发利用潜力评价[J]. 地下水, 2022, 44(4): 1-4.
- [27] GETAHUN, BELETE. Groundwater Potential Zone Assessment Using Remote Sensing, Geographical Information System (GIS), and Analytical Hierarchy Process (AHP) Techniques in Fogera Woreda, South Gondar Zone, Ethiopia[J]. Qeios, 2024, 6(1): 1-19.
- [28] CHAVDA Z K, KAKWANI D, SINGH N. Delineation of Groundwater Potential Zones in Narmada District Gujarat (India) Using GIS and AHP Techniques[J]. Water Conservation Science and Engineering, 2024, 9(1): 7.
- [29] SADRAKI YABRE, NICAISE YALO, STEPHEN SILLIMAN, et al. Identification of Groundwater Potential Zones in Samendini Watershed in Sedimentary and Semi-Arid Contexts of Burkina Faso, Using Analytic Hierarchy Process (AHP) Method and GIS[J]. American Journal of Climate Change, 2023, 12(1): 172-203.
- [30] ZEINOLABEDINI M, ESMAEILI A. Groundwater potential assessment using geographic information systems and AHP method (Case study: Baft city, Kerman, Iran)[J]. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2015, 40: 769-774.
- [31] 程明月, 陈姗姗, 程星敏, 等. 韧性城市视角下的南昌地下水应急保障能力[J/OL]. 现代地质, 1-13[2026-05-05].
- [32] 周斐然, 尹子悦, 孙晓敏, 等. 融合数值模拟和机器学习的民勤盆地地下水潜力评价与主控因素识别[J]. 地学前缘, 2026, 33(1): 511-522.
- [33] 黎敬, 时国, 楼法生, 等. 江西省赣州市章贡区晚白垩世莲荷组恐龙蛋化石显微结构及古环境意义[J]. 现代地质, 2025, 39(2): 350-360.
- [34] EJEPU J, JIMOH M, ABDULLAHI S, et al. Groundwater Exploration Using Multi Criteria Decision Analysis and Analytic Hierarchy Process in Federal Capital Territory, Abuja, Central Nigeria[J]. International Journal of Geosciences, 2022, 13(1): 33-53.
- [35] 林旺辉. 三明生态工贸区地下水脆弱性评价及应急水源地开采靶区研究[D]. 中国矿业大学, 2021.
- [36] HAMMOURI N, EL-NAQA A, BARAKAT M. An integrated approach to groundwater exploration using remote sensing and geographic information system[J]. Journal of Water Resource and Protection, 2012, 4(9): 717-724.
- [37] MUHWANGA C, OBIERO J, KARANJA F. Application of Geographic Information Systems in Groundwater Prospecting: A Case Study of Garissa County, Kenya[J]. Journal of Geographic Information System, 2018, 10(4): 439-460.
- [38] 何全江. 层次分析法简介[J]. 西北民族大学学报(哲学社会科学版), 1984, (4): 25-34.
- [39] OMKARPRASAD S, VAIDYA S, SUSHIL KUMAR. Analytic hierarchy process: An overview of applications[J]. European Journal of Operational Research, 2006, 169(1): 1-29.
- [40] WILLIAM HO. Integrated analytic hierarchy process and its applications—A literature review[J]. European Journal of Operational Research, 2008, 186(1): 211-228.
- [41] SAATY T L. The Analytic Hierarchy Process[M]. New York: McGraw Hill, 1980: 49-68.