

基于 DPSIR 模型的辛安泉域岩溶水资源承载力评价

张云飞,高旭波*,王倩

(中国地质大学(武汉)环境学院,湖北 武汉 430070)

摘要: [目的] “驱动力-压力-状态-影响-响应”(driving force-pressure-state-impact-response, DPSIR)模型被广泛应用于可持续发展、水土资源及环境管理科学等多个领域,成为评价社会经济与生态环境协调发展程度的有效工具.然而,很少有指标能够反映当地有关部门对水资源的调蓄能力,尤其在一些水资源水质和水量分布差异过大的地区,为此需要对模型的响应层指标进行优化. [方法] 在指标选取和权重计算过程中,针对研究区的特点,在响应层中加入了大中型水库供水覆盖范围的指标,用以反映当地有关部门对于水资源的调蓄能力;同时,在对大中型水库供水覆盖范围的评价中,综合考虑水平维度和垂直维度两方面的因素. [结果] 利用地理信息系统(Geographic Information System, GIS)技术,在 DPSIR 模型中将水平维度和垂直维度两方面的评价结果相结合,使得大中型水库供水覆盖范围的最终评价结果与实际情况更加贴合,从而使得最终的评价结果能够更加精准地反映研究区岩溶水资源的承载力情况. [结论] 大中型水库供水覆盖范围指标的引入以及评价方法很好地反映了水资源的调蓄能力,一定程度上完善了当前的水资源评价体系.

关键词: 驱动力-压力-状态-影响-响应(DPSIR)模型;调蓄能力;大中型水库;供水覆盖范围;地理信息系统

中图分类号: X82

文献标志码: A

文章编号: 0438-0479(2025)03-0472-12

Evaluation of karst water resources carrying capacity of Xin'an spring basin based on DPSIR model

ZHANG Yunfei, GAO Xubo*, WANG Qian

(School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan 430070, China)

Abstract: [Objective] The "driving force-pressure-state-impact-response" (DPSIR) model has been widely used in various fields, such as sustainable development, soil and water resources and environmental management science. It has become an effective tool to evaluate the degree of coordinated development in social economy and ecological environments. However, few indicators can effectively reflect the capacity of local departments to regulate and store water resources, especially in areas where water quality and water distribution differ greatly. Therefore, it is necessary to optimize the response layer indicators of the model. [Methods] In the process of index selection and weight calculation, and based on the characteristics of the study area, the index for water supply coverage of large and medium-sized reservoirs is added to the response layer to reflect the water resource regulation and storage capacity of departments. At the same time, in evaluating the water supply coverage of large and medium-sized reservoirs, both horizontal and vertical dimensions are comprehensively considered. [Results] By using Geographic Information System (GIS) technology, the evaluation results of the horizontal and vertical dimensions are combined in the DPSIR model to ensure that the final evaluation results of the water supply coverage of large and medium-sized reservoirs better align with the actual situation. This effectively reflects the range of water supply that each large and medium-sized reservoir can cover and the difficulty of water supply in different areas within the range of water supply. The evaluation results show that areas with higher elevations have lower

收稿日期: 2024-11-10 录用日期: 2025-01-26

基金项目: 国家自然科学基金(42172288)

*通信作者: Xubo.gao.cug@gmail.com

引文格式: 张云飞,高旭波,王倩. 基于 DPSIR 模型的辛安泉域岩溶水资源承载力评价[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2025, 64(3): 472-483.

Citation: ZHANG Y F, GAO X B, WANG Q. Evaluation of karst water resources carrying capacity of Xin'an spring basin based on DPSIR model[J]. J Xiamen Univ Nat Sci, 2025, 64(3): 472-483. (in Chinese)



evaluation scores even if they are close to the reservoir, while areas with lower elevations have relatively high evaluation scores even if they are far from the reservoir, which is consistent with reality. Such scientific and reasonable evaluation results directly reflect the ability of relevant management departments in the study area to regulate and store water resources, and they also make the final comprehensive evaluation results more accurately reflect the bearing capacity of karst water resources in the study area. [Conclusion] The evaluation method combining horizontal and vertical dimensions can accurately reflect the actual situation of water supply coverage of large and medium-sized reservoirs, and the evaluation results are scientific and reasonable. Furthermore, introducing the indicator of "water supply coverage of large and medium-sized reservoirs" can better reflect the capacity of relevant local management departments for water resource regulation and storage, thereby improving the evaluation index system. In addition, the evaluation method for "water supply coverage of large and medium-sized reservoirs" in this study can also be applied to evaluating other indicators with similar properties. Finally, due to incomplete data collection and other limitations, this study failed to include the water supply coverage area of reservoirs outside the scope of small reservoirs and springs into the evaluation system. Including these data in future studies would lead to more accurate evaluation results.

Keywords: driving force-pressure-state-impact-response (DPSIR) model; regulation and storage capacity; large and medium-sized reservoirs; water supply coverage; Geographic Information System

水资源自古以来就是最重要的自然资源之一,在高度现代化的今天,水资源仍然是制约经济社会发展的重要因素^[1-2]. 岩溶地下水是全球水资源的重要组成部分,对人类的生产和生活有重要的影响作用^[3-4]. 岩溶地下水是世界上很多国家、地区和城市必不可少的淡水水源,据估算,全球 25% 的人口饮用水来自于岩溶水^[5]. 与此同时,作为优质的供水水源,岩溶含水层也普遍受到人类活动的影响,对污染具有高度的脆弱性^[6-7]. 鉴于岩溶水开发利用难度和脆弱性较高的特点^[8],对岩溶水资源进行承载力评价,使其能够被更加合理地开发和利用,对人类社会经济的可持续发展具有重要的现实意义^[9].

目前国内外学者对水资源承载力的研究成果已经比较丰富,研究方法主要是通过选取多因素指标并将其量化,最终达到综合评价的目的^[10]. 常用的量化标准已有很多,如刘敏等^[11]通过模糊综合评价的方法对华北平原地区的地下水资源承载力进行了评价研究,邢旭光等^[12]基于主成分分析法对西安市地下水资源承载力进行了评价研究,张欣等^[13]运用多目标决策法对黄河三角洲地区的水资源承载力进行了评价研究,崔海升^[14]基于系统动力学法对哈尔滨市水资源承载力进行了评价和预测,郭晓英等^[15]基于梯度反向传播神经网络法对厦门市水资源承载力进行了评价研究,马金珠等^[16]运用层次分析法对地处西北干旱地区的马鬃县水资源承载力进行了评价研究. 在大多数研究成果中,指标体系的建立往往会选用认可程度较高或者适用范围较广的公共指标^[17],然而这些公共指标并不总是能够很好地反映研究区域的自身特性. 不同研究区域在社会经济发展程度、地形地质条件、水文气候类型等方面均存在差异,因此在对影响指标的选

取和权重计算过程中,应该根据研究区域的自身特点而有所不同.

“驱动力-压力-状态-影响-响应”(driving force-pressure-state-impact-response, DPSIR) 模型是广泛应用于水资源承载力指标体系构建的概念模型,该模型系统分析了人与自然之间的相互作用关系并将体现水资源系统的多个评价指标分为驱动力(driving force)、压力(pressure)、状态(state)、影响(impact)、响应(response) 5 个准则层,分别代表社会经济发展对水资源的影响、水资源需求、水资源系统满足用水需求的能力、水资源系统的变化、人为管理措施对水资源承载力的影响^[18],其中响应是指人类为促进社会经济的可持续发展所采取的对策^[19]. 通常,废污水处理能力和对相关水利设施的投入等指标可以较好地反映水资源配置政策、管理体制和节水意识^[20-21],其中,相关水利部门通过溶蚀洼地堵洞成库、岩溶槽谷建坝蓄水等方式建设调蓄工程,使得地表水体通过渗漏的方式对地下水进行补充,从而在一定程度上改变地下水的天然状况,对水资源在空间和时间上进行再分配^[22],尤其对于一些水资源水量和水质空间分布差异较大的地区,水资源的调蓄能力能够在很大程度上对当地水资源承载力产生影响. 因此本研究在响应层指标中引入大中型水库供水覆盖范围用以反映研究区内的水资源调蓄能力,再利用层次分析法对各项指标进行量化并计算权重,最后引入地理信息系统(Geographic Information System, GIS)技术,运用差值分析、缓冲区分析和叠加分析等手段,对已量化的指标进行空间分析,并最终得出目标研究区域的岩溶水承载力评价结果.

辛安泉域位于山西省东南部,太行山中南段西

侧,属暖温带大陆性季风气候,四季分明,冬季寒冷少雪,春季多风少雨,夏季炎热干燥,秋季温和凉爽,岩溶地下水埋藏深度大,且泉域中西部具有丰富的煤矿资源,水资源开发利用受采矿业影响明显,由此可见,辛安泉域具有鲜明的北方岩溶的特点.因此,本研究针对辛安泉域的研究结果对北方地区其他岩溶泉域的相关评价工作颇具参考价值.

1 研究区概况

辛安泉域位于我国山西省东南部,太行山中南段西侧,是山西省 19 个岩溶大泉中仅次于娘子关泉域的第二大岩溶大泉.泉域范围为 112°25′~113°36′ E, 35°51′~37°25′ N,呈南部宽北部窄的“塔”状,南北长平均 150 km,东西宽平均 73 km,周长 564 km,面积 10 950 km².泉域主体部分位于山西省长治市和晋中市内,其中位于长治市的面积为 9 278 km²,占泉域总面积的 84.73%,也是本研究的主要研究范围(图 1).

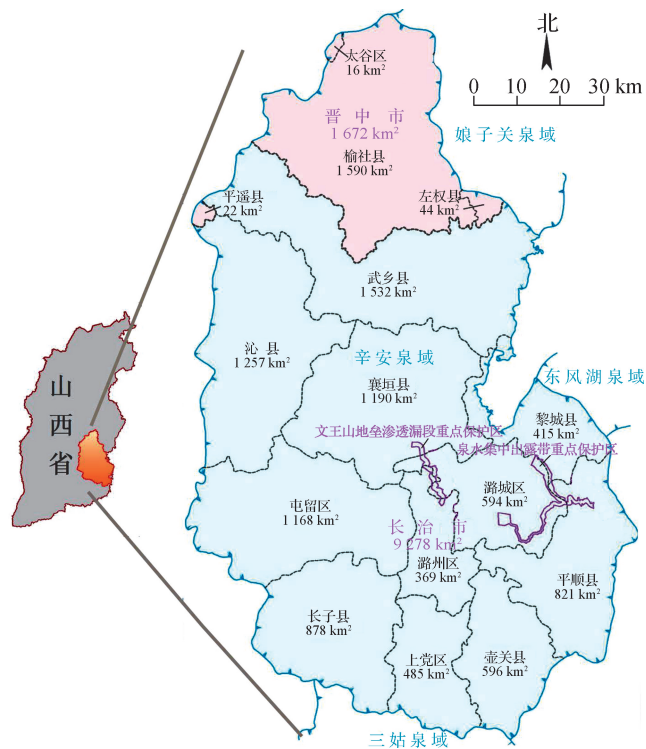


图 1 辛安泉域范围及行政区划

Fig. 1 Xin'an spring basin and administrative divisions

据统计,辛安泉域 1956—2000 年的年平均流量为 9.64 m³/s,其中最大流量为 1964 年的 16.03 m³/s,最小为 1999 年的 4.72 m³/s,年平均天然水资源量为 32 324.4 万 m³,可采水资源量为 22 769 万 m³(P=95%)^[23].辛安泉域自 20 世纪 60 年代开始进行大规

模开发,之后又修建了红旗渠和战备渠等一系列提水和引水工程,到 2010 年,泉域内实际岩溶深井共 417 眼^[24].据统计,辛安泉域岩溶水 2019 年开采总量为 10 123.1 万 m³^[25].

2 评价体系建立

水资源承载力评价指标体系是开展水资源承载力评价的基础,本研究以维持辛安泉域社会经济和生态环境可持续发展为前提,综合考虑辛安泉域经济条件及水资源开发利用水平,在遵循整体性原则、定性定量相结合原则、可比性原则、可行性原则、适用性原则的基础上,力求所建立的评价体系能够准确地反映该泉域岩溶水资源的开发利用状况^[26-27].

2.1 评价指标选取

基于 DPSIR 模型的原理,本研究根据辛安泉域具体层次的岩溶水资源情势和社会经济发展水平,选取具体的指标体系以反映泉域水资源系统的功能特点,具体的评价指标体系如图 2 所示.

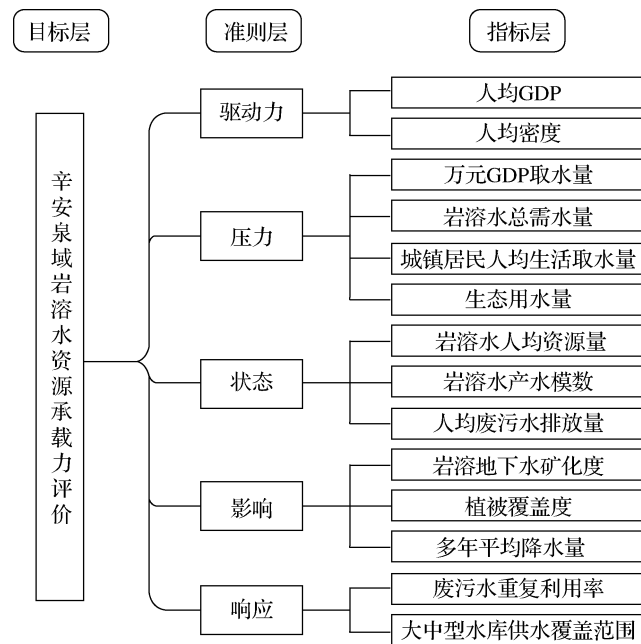


图 2 评价指标体系模型

Fig. 2 Model of evaluation indicator system

2.2 指标权重计算

本研究采用层次分析法进行指标赋权.层次分析法是由 Saaty^[28]于 20 世纪 70 年代提出的一种决策方法,该方法利用降维的思想,把多指标转化为少数几个综合指标,对高维变量系统进行综合与简化,将复杂问题中的元素分解为目标层、准则层和指标层 3 个

层次,再通过构建判别矩阵,依次求得各元素的权重,结果更倾向于表述为社会经济发展系统与水资源系统的协调程度,方法具有全面性、可比性、客观合理性。

根据层次分析法计算权重:首先利用 1~9 标度法^[29](表 1),将指标之间的相对重要程度进行量化处理;然后建立同层次上各元素的判别矩阵 X ,再计算各判别矩阵的特征向量 W ,并将特征向量 W 作为各元素之间的相对权重值;最后经过一致性检验表明计算结果无误,则可得到各层次元素的权重。

表 1 1~9 标度法
Tab. 1 1-9 scale method

标度	含义
1	表示两元素同等重要
3	表示元素 i 比元素 j 稍显重要
5	表示元素 i 比元素 j 明显重要
7	表示元素 i 比元素 j 强烈重要
9	表示元素 i 比元素 j 极为重要
2,4,6,8	表示上述相邻判断的中间值
倒数	表示元素 j 的重要性大于元素 $i, x_{ji}=1/x_{ij}$

$$X = (x_{ij})_{n \times n}, \quad (1)$$

式中, x_{ij} 表示元素 i 与元素 j 之间的相对重要程度, n

为所对比的元素数量。

通过式(2)可计算得到最大特征值 λ_{\max} :

$$XW = \lambda_{\max}W. \quad (2)$$

为保证判别矩阵中各元素之间相对重要程度的协调一致性,有必要对各判别矩阵进行一致性检验,在此需引入一致性指标 I_C ,计算公式如下:

$$I_C = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1). \quad (3)$$

I_C 值越接近于 0,证明判别矩阵的一致性越高。与此同时,还需引入随机一致性指标 I_R ,用来衡量 I_C 是否在满意的范围内。 I_R 与判别矩阵的阶数呈正相关,其标准值如表 2 所示。

表 2 平均随机一致性指标的标准值

Tab. 2 Standard values of average random consistency indicators

矩阵阶数	1	2	3	4	5	6
I_R	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24

最后,引入检验系数 C_R 来衡量判别矩阵 X 的一致性,计算公式如下:

$$C_R = I_C/I_R. \quad (4)$$

当 $C_R < 0.1$ 时,证明判别矩阵 X 具有满意的一致性。

本研究通过层次分析法计算和一致性检验(C_R 均小于 0.1)得到各层次中各元素的权重,如表 3 所示。

表 3 层次分析法指标权重

Tab. 3 Indicator weights of analytical hierarchy process

准则层	权重	指标名称	编号	权重	综合权重
驱动力	0.07	人均 GDP	C1	0.33	0.02
		人口密度	C2	0.67	0.05
压力	0.24	万元 GDP 取水量	C3	0.26	0.06
		岩溶水总需水量	C4	0.56	0.13
		城镇居民人均生活取水量	C5	0.11	0.03
		生态用水量	C6	0.07	0.02
		岩溶水人均资源量	C7	0.20	0.08
状态	0.39	岩溶水产水模数	C8	0.49	0.19
		人均废污水排放量	C9	0.31	0.12
		地下水矿化度	C10	0.30	0.05
影响	0.18	植被覆盖度	C11	0.16	0.03
		多年平均降水量	C12	0.54	0.10
		废污水重复利用率	C13	0.50	0.06
响应	0.12	大中型水库供水覆盖范围	C14	0.50	0.06

2.3 分级标准划分

2.3.1 常规指标分级划分

本研究将辛安泉域岩溶水承载力评价指标

划分为 5 个等级: I 级表示岩溶水资源承载能力强,在当前指标下岩溶水资源仍然具有极大的开发潜力; II 级表示岩溶水资源承载能力较强,在满足当前岩溶水资源开发利用的压力下,仍具有一定的余力可以在

未来一定时间内为社会经济的发展提供长期、稳定的支撑;Ⅲ级表示岩溶水资源承载能力中等,与当前的岩溶水资源开发利用规模相平衡,刚好能够保障社会经济的发展;Ⅳ级表示岩溶水资源承载能力较弱,开发利用潜力不足,面对当前社会经济发展带来的压力,很难起到长期、稳定的支撑作用;Ⅴ级表示岩溶水资源承载能力已经达到极限,水资源开发利用潜力严重不

足,急需采取一定的措施来提升水资源承载能力.

与此同时,需要在各指标层面对辛安泉域岩溶水资源承载力综合评价进行指标等级的划分和衡量,在对国内外水资源承载力评价基础上,结合研究区水资源开发利用特点、社会经济发展状况等因素,以国家或行业标准^[30-31]为参考,确定了各指标的等级划分标准,如表 4 所示.

表 4 各指标的等级划分标准

Tab. 4 Classification criteria for the levels of each indicator

指标	I 级	II 级	III 级	IV 级	V 级
人均 GDP/万元	<4.5	4.5~<7.0	7.0~<8.3	8.3~<12.0	≥12.0
人口密度/(人·km ⁻²)	<100	100~<200	200~<500	500~<1 000	≥1 000
万元 GDP 取水量/m ³	<25.2	25.2~<44.0	44.0~<51.0	51.0~<60.8	≥60.8
岩溶水总需水量/万 m ³	<60	60~<470	470~<1 500	1 500~<2 500	≥2 500
城镇居民人均生活取水量/(L·d ⁻¹)	<100	100~<110	110~<120	120~<130	≥130
生态用水量/万 m ³	<52	52~<260	260~<520	520~<1 000	≥1 000
岩溶水人均资源量/m ³	≥300	150~<300	100~<150	50~<100	<50
岩溶水产水模数/(万 m ³ ·km ⁻²)	≥5.5	4.0~<5.5	2.5~<4.0	1.0~<2.5	<1.0
人均废污水排放量/m ³	<5	5~<10	10~<15	15~<25	≥25
地下水矿化度/(mg·L ⁻¹)	<300	300~<400	<400	400~<500	≥500
植被覆盖度	≥0.7	0.5~<0.7	0.3~<0.5	0.1~<0.3	<0.1
多年平均降水量/mm	≥600	550~<600	500~<550	450~<500	<450
废污水重复利用率	≥0.8	0.6~<0.8	0.4~<0.6	0.2~<0.4	<0.2

注:地下水矿化度是以地下水矿化度分区图为依据进行等级划分,而矿化度分区图是经过大量的野外水样采集和检测后进行统计分析及专家评定划分,因此不同的空间区域存在数值上的重合.

2.3.2 大中型水库供水覆盖范围等级划分

辛安泉域范围内大中型水库共有 12 座,其基本信息及分布状况如表 5 和图 3 所示.

表 5 大中型水库基本信息

Tab. 5 Basic information of large and medium-sized reservoirs

水库名称	所属行政区	经纬度		高程(H)/m
		东经/(°)	北纬/(°)	
云竹水库	榆社县	112.772 408 0	37.060 167 0	1 041
关河水库	武乡县	112.910 027 4	36.860 955 8	1 007
圪芦河水库	沁县	112.684 092 4	36.718 181 9	973
月岭山水库	沁县	112.674 092 6	36.607 582 1	1 013
后湾水库	襄垣县	112.805 760 8	36.580 976 8	947
屯绛八一水库	屯留区	112.702 782 0	36.321 052 1	991
鲍家河水库	长子县	112.785 066 6	36.239 304 4	946
申村水库	长子县	112.794 957 2	36.101 124 5	967
漳泽水库	潞州区	113.057 906 3	36.288 767 1	892
陶清河水库	上党区	113.069 548 5	36.009 046 0	982
庄头水库	壶关县	113.246 342 9	36.124 615 4	1 063
西堡水库	壶关县	113.244 722 4	36.043 987 0	1 130

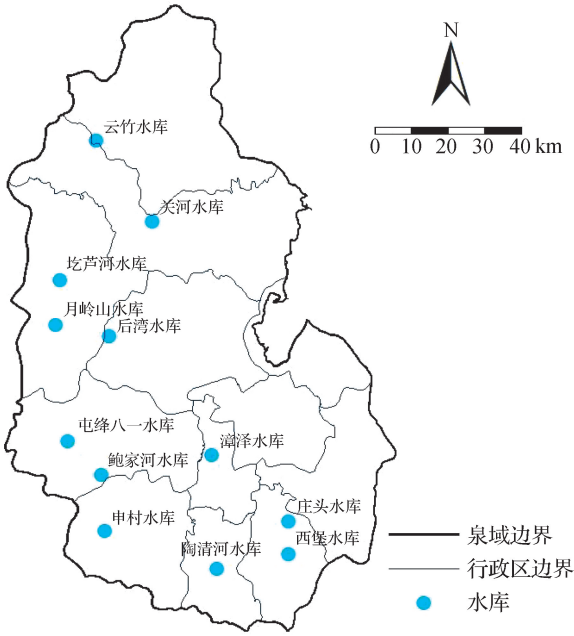


图 3 大中型水库分布情况

Fig. 3 Distribution of large and medium-sized reservoirs

大中型水库供水覆盖范围的评价分为 5 个级别: I 级为核心覆盖区域,指水库最容易供水的核心区域; II 级为较易覆盖区域,指正常情况下水库比较容

易供水的区域; III 级为较难覆盖区域,指水库的供水需经由其他一定规模的水利工程或投入一定成本才能够覆盖的区域; IV 级为极难覆盖区域,指水库的供水需经由重大水利工程或付出极大代价才能覆盖的区域; V 级为不可覆盖区域,指水库供水无法覆盖的区域。

大中型水库供水覆盖范围将从水平维度和垂直维度进行综合考虑. 水平维度方面,依据水库最初的设计建造规模和蓄水量等参数确定其最大覆盖半径为 R ,单位为 km,最大覆盖半径以外 ($>R$) 定为 V 级,最大覆盖半径内越靠近中心水库位置评价得分越高,具体为: $0 \sim <0.25R$ 为 I 级, $0.25R \sim <0.50R$ 为 II 级, $0.50R \sim <0.75R$ 为 III 级, $0.75R \sim R$ 为 IV 级. 各水库的水平维度评价结果如图 4 所示. 垂直维度的评价主要考虑地形高程差的影响,以水库所在高程 H 为基准,单位为 m,高程 $\leq H$ 的区域为 I 级,高程 $>H$ 的区域,与 H 的高程差越大评分越低,具体为: $>H \sim <H+50$ 为 II 级, $H+50 \sim <H+200$ 为 III 级, $H+200 \sim <H+500$ 为 IV 级, $\geq H+500$ 为 V 级. 各水库的垂直维度评价结果如图 5 所示。

借由 Arcmap10.8 软件的多缓冲区分析功能对大中型水库供水覆盖范围的水平维度进行分区评价,

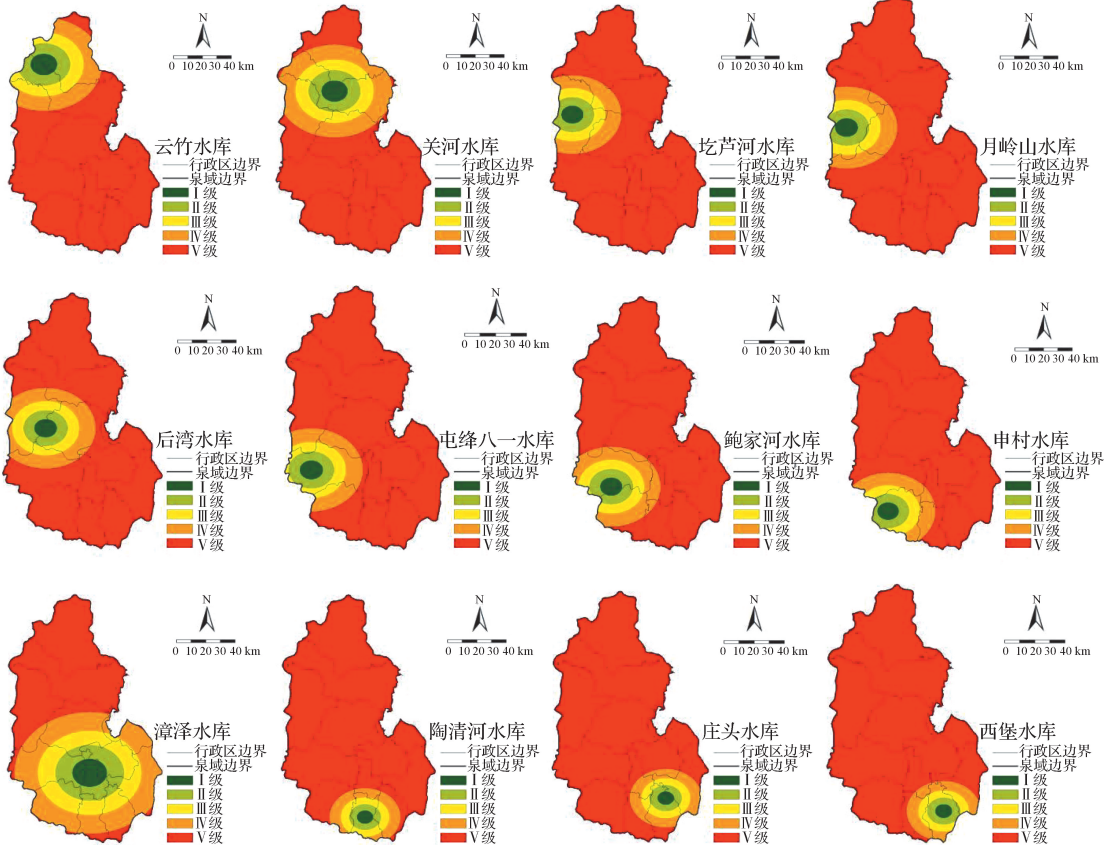


图 4 各水库水平维度评价结果

Fig. 4 Results of horizontal dimension evaluation for each reservoir

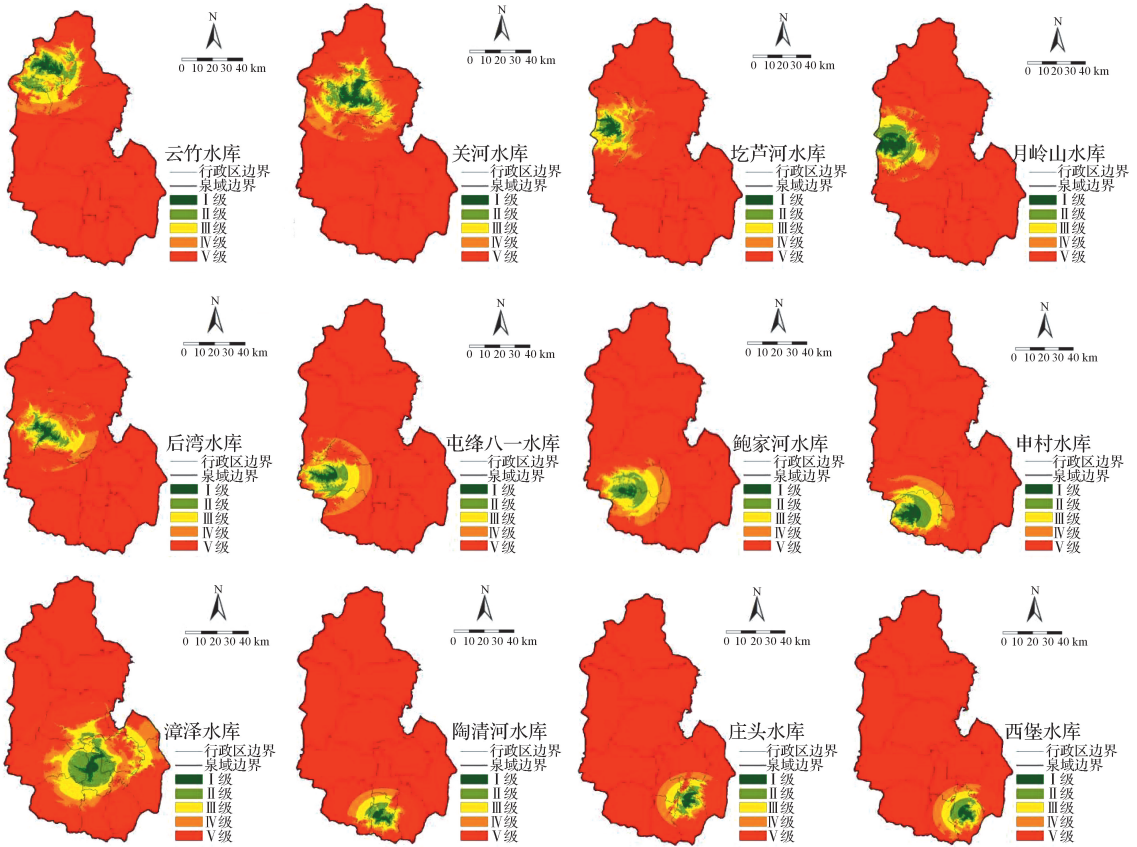


图 5 各水库垂直维度评价结果

Fig. 5 Results of vertical dimension evaluation for each reservoir

再利用分类分析功能,结合各水库点位置高程数据,对研究区高程数据进行重分类处理,完成各水库供水覆盖范围的垂直维度评价,最后利用加权叠加功能将水平维度和垂直维度的评价结果进行叠加分析,最终得出研究区大中型水库供水覆盖范围的评价结果如图 6 所示。

3 指标预测

辛安泉域近期规划年、远期规划年岩溶水资源承载力各指标的合理预测是开展预测评价的基础,选取推动水资源发展变化的源动力指标即人口指标和经济发展指标为主要影响因子进行辛安泉域岩溶水资源承载力指标预测,为消除量纲影响,各指标预测尽量采用年增长率进行预测;此外,紧密结合国家及地区各项相关政策,以近年来指标完成情况为补充,对辛安泉域岩溶水资源承载力评价指标体系中可预测指标进行合理预测。

其中,与岩溶水资源总量相关的岩溶水人均资源量和岩溶水产水模数两个指标通过数值模拟的方式预测。首先基于研究区水文地质条件的综合分析,

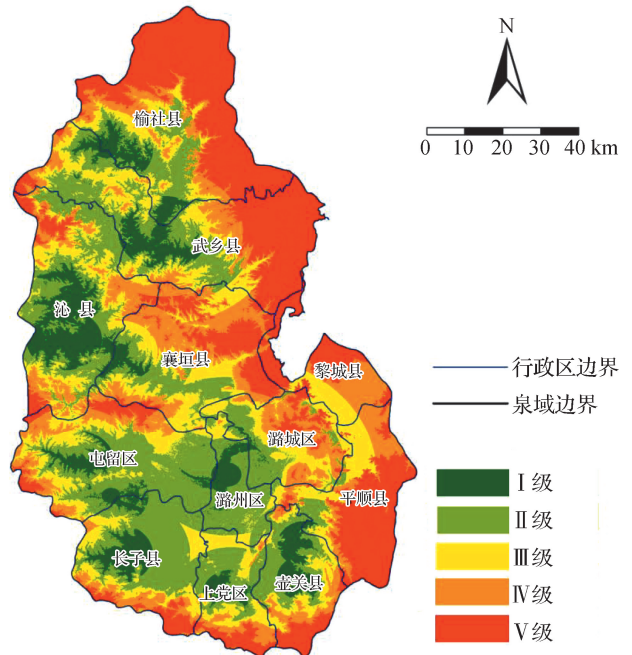


图 6 大中型水库供水覆盖范围

Fig. 6 Water supply coverage of large and medium-sized reservoirs

通过确定模拟区域范围、地层岩性和构造,建立辛安泉域的三维含水层模型;然后根据已经建立的研究区

地下水数值模型,利用均衡法计算均衡期与多年平均条件下的寒武与奥陶系灰岩的岩溶水资源量,并使

用开采系数法进行可开采资源量预测.各评价年份的具体指标数据如表 6 所示.

表 6 各评价年份指标数据集
Tab. 6 Data set of indicators for each evaluation year

行政区	年份	人均 GDP/万元	人口密度/(人·km ⁻²)	万元 GDP 取水量/m ³	岩溶水总需水量/万 m ³	城镇居民人均生活取水量/(L·d ⁻¹)	生态用水量/万 m ³	岩溶水人均资源量/m ³	岩溶水产水模数/(万 m ³ ·km ⁻²)	废污水重复利用率/%	人均废污水排放量/m ³
武乡县	2019	2.88	127.44	49.47	59.00	87.84	491.00	78.62	1.00	57.90	10.09
	2025	3.08	129.14	41.18	59.79	94.99	779.16	83.53	1.08	64.02	8.46
	2030	3.26	130.57	38.27	60.45	101.74	1 144.83	88.50	1.16	73.50	5.86
沁县	2019	1.82	130.42	74.27	0	93.54	437.00	61.11	0.80	24.19	5.42
	2025	2.50	133.50	68.48	0	101.16	693.46	71.42	0.95	29.23	4.50
	2030	3.09	136.13	63.65	0	108.34	1 018.93	76.12	1.04	39.16	3.09
襄垣县	2019	7.70	236.43	33.77	474.00	88.86	505.00	98.72	2.33	98.23	0.22
	2025	10.74	241.09	29.64	483.34	96.10	801.37	119.18	2.87	100.00	0
	2030	13.11	245.04	27.55	491.26	102.92	1 177.48	138.47	3.39	100.00	0
黎城县	2019	1.89	145.62	167.26	55.00	75.03	25.00	157.94	2.30	18.40	8.15
	2025	1.89	147.92	154.21	55.87	81.14	39.67	151.62	2.24	22.60	6.82
	2030	1.87	149.86	143.34	56.60	86.90	58.29	147.93	2.22	31.27	4.71
屯留区	2019	4.85	230.28	37.93	47.28	80.24	90.00	101.48	2.34	31.89	7.79
	2025	6.88	233.48	34.28	47.94	86.78	142.82	76.21	1.78	37.73	6.53
	2030	8.07	236.19	31.86	48.49	92.94	209.85	58.77	1.39	48.57	4.52
潞州区	2019	6.40	2 070.67	23.32	4 895.90	128.01	419.00	23.67	4.90	24.04	37.57
	2025	7.55	2 138.55	19.79	5 056.38	138.44	664.90	29.61	6.35	29.05	30.84
	2030	8.57	2 196.81	18.39	5 194.13	148.27	976.96	32.34	7.14	35.17	24.67
潞城区	2019	5.29	384.35	49.11	2 358.02	75.78	50.40	55.78	2.14	77.33	12.87
	2025	5.70	393.66	37.63	2 415.13	81.95	79.98	69.37	2.73	81.53	10.68
	2030	6.37	401.59	34.97	2 463.78	87.77	117.51	75.35	3.03	87.31	7.33
平顺县	2019	1.53	99.66	67.45	47.28	116.65	50.00	408.58	4.07	100.00	0
	2025	1.64	99.40	60.20	47.15	126.15	79.34	348.10	3.46	100.00	0
	2030	1.76	99.17	55.96	47.05	135.11	116.58	304.06	3.02	100.00	0
长子县	2019	4.76	354.96	36.31	389.00	72.30	201.00	47.74	1.69	100.00	0
	2025	6.74	367.07	30.84	402.27	78.19	318.96	40.85	1.50	100.00	0
	2030	8.36	377.47	28.66	413.67	83.74	468.66	36.27	1.37	100.00	0
上党区	2019	6.20	722.05	21.30	1 134.40	79.00	224.40	33.44	2.41	61.04	16.43
	2025	7.50	739.50	15.81	1 161.83	85.43	356.09	32.95	2.46	66.97	13.53
	2030	8.77	754.38	14.70	1 185.19	91.50	523.22	33.17	2.54	72.87	10.85
壶关县	2019	1.80	298.13	31.69	517.78	69.00	17.00	119.16	3.55	34.62	5.65
	2025	2.37	302.85	27.69	525.98	74.62	26.98	114.39	3.46	39.29	5.00
	2030	2.76	306.85	25.74	532.92	79.92	39.64	117.77	3.61	50.21	3.46

榆社县在行政区划管理上隶属于晋中市,因此在数据采集和资料收集的过程中受到当地相关部门的支持力度有所不同,收集到的数据资料在详实度和精

确度上与长治市所属县区差距较大.为避免因数据资料差异而导致评价结果与榆社县当地实情有所偏差,除“大中型水库供水覆盖范围”指标外,本研究不对榆

社县区域进行评价。

4 评价结果

针对该研究区的评价指标数据包含图层文件及数据文件,因此本研究引入 GIS 技术和评价模型,建立辛安泉域内长治市 11 个区县的图层数据库和对应区县岩溶水资源承载力指标数据库,调用 Arcmap10.8 软件的空间分析模块分析辛安泉域各区县岩溶水资源承载能力,实现长治市岩溶水资源承载能力的空间差异分析. 总体采用成熟的评价模型和遥感、GIS 技术相结合的分析方法对辛安泉域岩溶水资源承载力进

行评价,为后续发展规划提出更准确、更深入、更全面的

研究结果。
包括废水重复利用率和大中型水库供水覆盖范围在内的响应层评价结果如图 7 所示. 此研究区内大中型水库共有 12 座,由评价结果可以看出,从现状年到规划年,研究区在响应层的得分整体呈稳步提升的趋势, I 级评价区域变化不大,但 II 级评价区域有明显的扩大趋势, IV 级和 V 级评价区域均持续缩小,尤其是处于滞留缓流带的屯留区和武乡县等地区改善程度尤为明显. 由此可知,当地政府机构对水资源的开发利用足够重视,相关政策较为合理,尤其是针对该泉域滞留缓流带的水资源相关政策尤为完善.

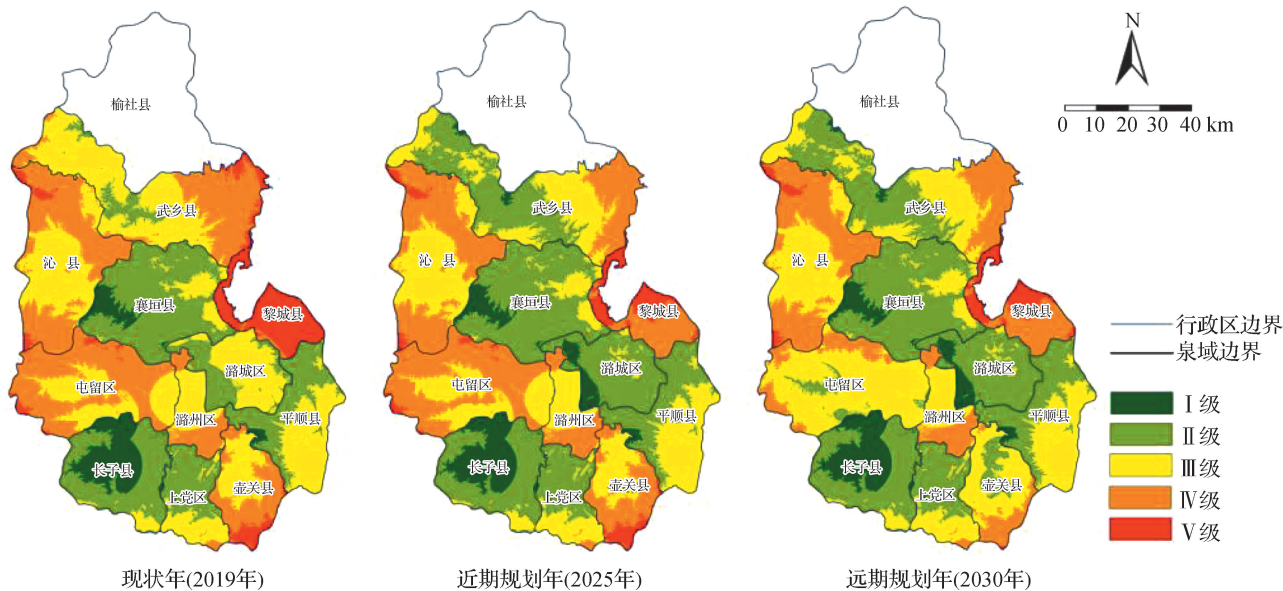


图 7 响应层评价结果

Fig. 7 Response layer evaluation results

辛安泉域内长治市岩溶水资源承载力空间分布如图 8 所示. 可以看出,辛安泉域岩溶水承载力评价整体在 II~IV 级. 现状年(2019 年)中,只有平顺县和壶关县评价为 II 级,屯留区和长子县只有部分地区能够达到 II 级评价,潞州区、潞城区、上党区和沁县部分地区为 IV 级,其他区域都为 III 级;随着时间的推移,到近期规划年(2025 年),沁县和潞城区大部分地区由 IV 级评价上升为 III 级评价,襄垣县大部分地区由 III 级评价上升为 II 级评价,而屯留区和长子县原本达到 II 级的区域却下降为 III 级,其他地区基本没有明显变化;到远期规划年(2030 年),辛安泉域整体岩溶水承载力有明显增强的趋势,潞城区和上党区大部分地区从 IV 级评价上升为 III 级评价,襄垣县也完全从 III 级评价上升为 II 级评价.

也可以看出,从现状年(2019 年)到近期规划年(2025 年),最大值和最小值略有下降,平均值持平,但到远期规划年(2030 年),评价得分均有明显提升,其中最小值的提升尤为明显,说明到 2030 年,辛安泉域岩溶水资源承载力总体有所增强,尤其是最弱的区域得到明显的改善.

除此之外,本研究还对准则层的各指标进行了单独评价,评分结果如图 9(b)~(e)所示. 可以看出,在驱动力层面,评价得分随着时间的推移逐年下降,在预测数据中人均 GDP 和人口密度都随着时间的推移不断增加,因此评价结果符合现实状况;在压力层面,从现状年到近期规划年的评价得分下降,但之后这种趋势得到明显的改善,评价得分有回升趋势;在状态层面,除了最大值基本持平甚至略有下降之外,最小值和平均值随着时间推移稳步上升,但总体的平均得

从辛安泉域岩溶水承载力的具体评分[图 9(a)]

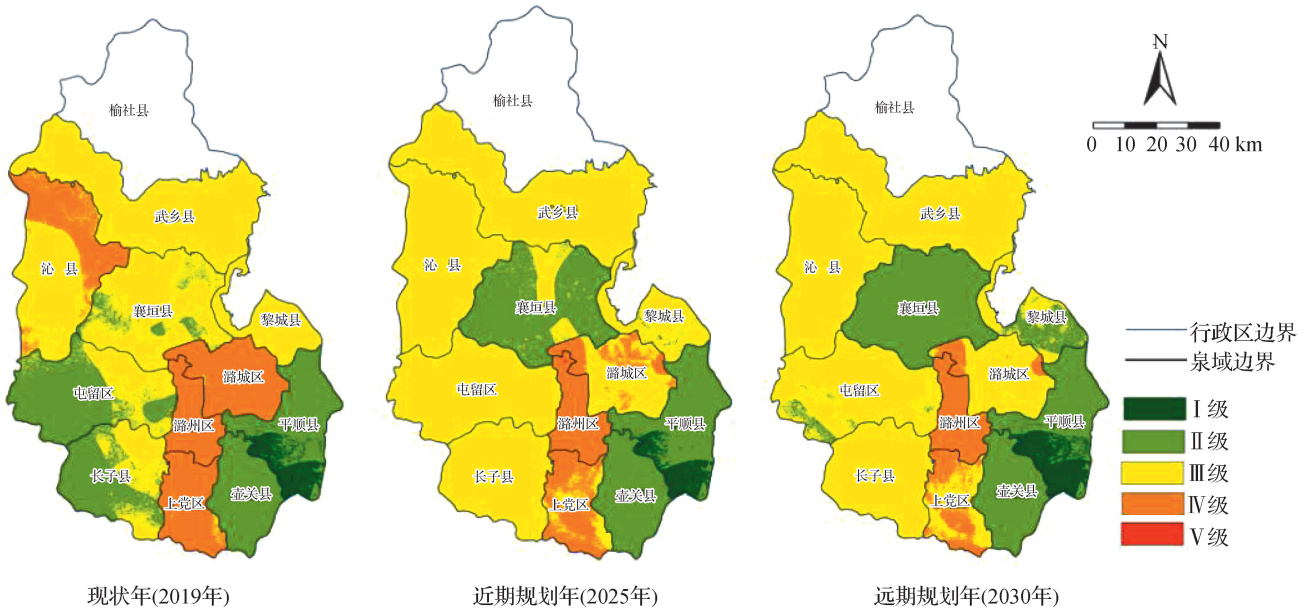


图 8 岩溶水资源承载力空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of karst water resources carrying capacity

分偏低;在响应层面,评价得分随时间呈上升趋势,上升速度虽然较缓,但总体的平均得分比较高。

对各行政区的评价得分统计结果如图 10 所示. 评价得分最低的是潞州区,其次为上党区和潞城区,三者皆位于长治市经济发展的核心区域,同时也是人口分布最集中的区域. 得分最高的是平顺县,其次为壶关县,二者皆是经济发展较落后的县区. 由预测评

价结果看,从 2019 年到 2025 年,多个区域的岩溶地下水承载力呈现减弱趋势,其中以屯留区和长子县尤为明显,但到 2030 年,除长子县和沁县外,其他区域的岩溶地下水承载力均转变为增强趋势,长子县的岩溶地下水承载力虽仍在减弱,但减弱的趋势已经得到明显改善,由此可以看出,整个辛安泉域岩溶地下水的承载力在 2025 年到 2030 年间将得到显著的提升。

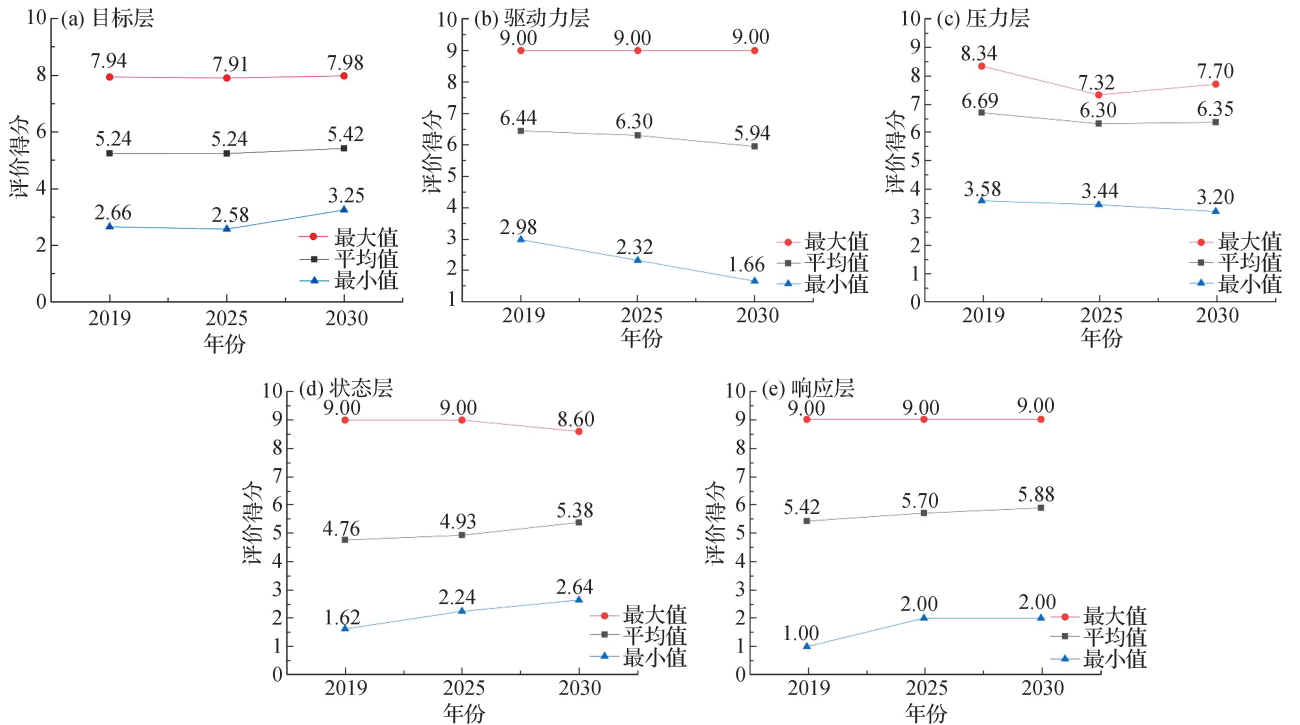


图 9 辛安泉域岩溶水资源承载力评价得分的变化趋势

Fig. 9 Variation trend of evaluation score of karst water resources carrying capacity in Xin'an spring basin

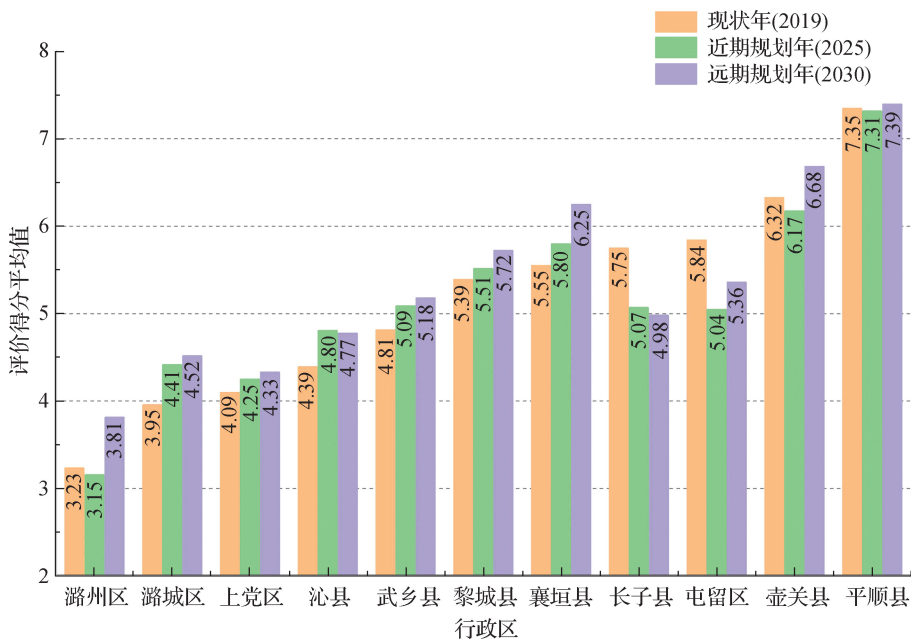


图 10 各行政区岩溶水资源承载力评价得分

Fig. 10 Evaluation score of each administrative region in the criterion layer

5 结论与讨论

在对研究区各项数据进行分析时发现:研究区东部和西部岩溶水资源禀赋差距极大,西部大范围属于滞流缓流带,地下水埋藏深度大,溶解性总固体含量过高,水质较差,而东部和东南部恰好相反,地下水埋藏深度小,总量大,易开采,且水质好;另外,经济发展较好的潞州区和上党区等区域对岩溶水的需求量远大于该区域的资源可利用量,在这样的情况下,相关部门对于水资源的调蓄能力将极大地影响各个地区对于本地岩溶水资源的开发利用程度,因此,能够反映调蓄能力的指标是地下水承载力评价中重要的组成部分。

本研究利用水平维度和垂直维度相叠加的分析方法来表征大中型水库供水覆盖范围,很好地反映了水库供水的实际情况。例如一些海拔较高的山地地区,由于水位抬升工程困难或成本较高等问题,即使距离水库较近,也无法得到较高的评分;而一些海拔较低的低洼地区,只需要利用水流的自然规律建设引流工程即可,即便距离水库较远,也不会得到太低的评分。由于每个水库的初始建造规模以及本身所在高程不同,所以该指标的评价并不是以统一的参照值作为评价基准,而是根据每个水库自身的数据进行单独评价,最后再于研究区内进行叠加,因此,评价结果更加贴合实际,也使得研究区岩溶水承载力的最终评价

结果与实际更加相符。

与此同时,在用大中型水库供水覆盖范围来体现相关部门对于水资源的调蓄能力上仍然有较大的改进空间。首先,本研究中确定水库水平维度供水覆盖范围的依据是水库的最初设计建造规模和近 10 年的蓄水量,由于部分水库的近 10 年蓄水量变化较大,所以将最初的设计建造规模作为主要的参考依据,事实上应该参照水库蓄水量和服役年限等资料对其供水覆盖范围做更精细化的计算;其次,由于数据资料不够全面,本研究并未将小型水库的供水覆盖范围加入评价体系中,若能把小型水库的供水覆盖范围考虑进来,则可更加精准地反映相关部门调蓄水资源的能力。

参考文献:

- [1] LIANG Y P, GAO X B, ZHAO C H, et al. Characterization, evolution, and environmental issues of karst water systems in northern China[J]. Hydrogeol J, 2018, 26(5): 1371-1385.
- [2] 高旭波,王万洲,侯保俊,等. 中国北方岩溶地下水污染分析[J]. 中国岩溶, 2020, 39(3): 287-298.
- [3] 梁永平,申豪勇,高旭波. 中国北方岩溶地下水的研究进展[J]. 地质科技通报, 2022, 41(5): 199-219.
- [4] 章程,肖琼,孙平安,等. 岩溶碳循环及碳汇效应研究与展望[J]. 地质科技通报, 2022, 41(5): 190-198.
- [5] FORD D C, WILLIAMS P W. Karst geomorphology and hydrology[M]. London: Unwin Hyman, 1989: 601.

- [6] DALY D, DREW D. Irish methodologies for karst aquifer protection[M]// Hydrogeology and engineering geology of sinkholes and karst. Harrisburg-Hershey: [s. n.], 1999:267-272.
- [7] LIU J C, YANG F, CAI Y F, et al. Unveiling the existence and ecological hazards of trace organic pollutants in wastewater treatment plant effluents across China[J]. *Eco-Environment & Health*, 2024, 3(1):21-29.
- [8] GOLDSCHIEDER N, DREW D. Methods in karst hydrogeology[M]. London: CRC Press, 2014.
- [9] SUN Y M, LI H, LEI S, et al. Redevelopment of urban brownfield sites in China: motivation, history, policies and improved management[J]. *Eco-Environment & Health*, 2022, 1(2):63-72.
- [10] 李念春, 周建伟, 王金彪, 等. 基于对数承载率模型的东营市水环境承载力评价[J]. *地质科技情报*, 2018, 37(3):219-225.
- [11] 刘敏, 聂振龙, 王金哲, 等. 华北平原地下水资源承载力模糊综合评价[J]. *水土保持通报*, 2014, 34(6):311-315.
- [12] 邢旭光, 史文娟, 张译丹, 等. 基于主成分分析法的西安市地下水资源承载力评价[J]. *水文*, 2013, 33(2):35-38.
- [13] 张欣, 范明元, 陈华伟, 等. 黄河三角洲水资源承载力多目标优化计算[J]. *人民黄河*, 2013, 35(12):47-49, 53.
- [14] 崔海升. 基于系统动力学模型的哈尔滨市水资源承载力预测研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [15] 郭晓英, 陈兴伟, 陈莹, 等. 基于粗糙集和 BP 神经网络组合法的水资源承载力动态变化分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2015, 13(2):236-240.
- [16] 马金珠, 李相虎, 贾新颜. 干旱区水资源承载力多目标层次评价: 以民勤县为例[J]. *干旱区研究*, 2005, 22(1):11-16.
- [17] 李鑫. 基于 DPSIRM 模型的雄安新区水资源承载力评价研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2021.
- [18] GUO Q H, WANG Y X, GAO X B, et al. A new model (DRARCH) for assessing groundwater vulnerability to arsenic contamination at basin scale: a case study in Taiyuan Basin, northern China[J]. *Environ Geol*, 2007, 52(5):923-932.
- [19] 王鸽. 基于多情景预测的渭南市水生态承载力研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2020.
- [20] 苏伟洲. 水资源承载力与城市经济社会协调发展研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
- [21] ZHU M Y, WANG J W, YANG X, et al. A review of the application of machine learning in water quality evaluation[J]. *Eco-Environment & Health*, 2022, 1(2):107-116.
- [22] 邓欢, 郭纯青. 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.
- [23] 常反堂. 长治市水资源评价[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2006.
- [24] 杨瑞芳. 辛安泉域岩溶地下水脆弱性评价研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
- [25] 长治市水利局. 2019 长治市水资源公报[EB/OL]. [2024-11-10]. <https://slj.changzhi.gov.cn/slxz/tzgg3/202310/P020231012344531812817.pdf>.
- [26] WANG W Z, MWIATHI F N, LI C C, et al. Assessment of shallow aquifer vulnerability to fluoride contamination using modified AHP-DRASTICH model as a tool for effective groundwater management, a case study in Yuncheng Basin, China[J]. *Chemosphere*, 2022, 286:131601.
- [27] 高超, 梅亚东, 吕孙云, 等. 基于 AHP-Fuzzy 法的汉江流域水资源承载力评价与预测[J]. *长江科学院院报*, 2014, 31(9):21-28.
- [28] SAATY T L. The Analytical hierarchy process[M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1980.
- [29] 许晖程. 临汾市水资源承载力研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
- [30] 水利部办公厅关于印发《全国水资源承载能力监测预警技术大纲(修订稿)》的通知: 办水总函〔2016〕1429号[EB/OL] (2016-11-16) [2024-11-10]. <https://www.docin.com/p-1990978552.html>.
- [31] 全国国土资源标准化技术委员会. 地下水质量标准: GB/T 14848—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.

(责任编辑: 曾礼娜)