

河北省地下水资源承载能力评价及预警方法研究

孙超, 王昕洲, 叶莹莹, 刘琼, 曹颐, 韩冲, 王轶

Research on evaluation and early warning of groundwater resources carrying capacity in Hebei Province

SUN Chao, WANG Xinzhou, YE Yingying, LIU Qiong, CAO Yi, HAN Chong, and WANG Yi

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202111050>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

区域地下水资源承载能力评价理论与方法研究

Theory and methodology for evaluation of carrying capacity of regional groundwater resources in China

刘琼, 李瑞敏, 王轶, 高萌萌, 李小磊, 孙超 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 173-183

基于GIS的地下水资源分区研究及承载本底评价

Evaluation of natural carrying capacity and zoning of groundwater resources based on GIS

高萌萌, 李瑞敏, 刘琼, 王轶, 李小磊 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 184-190

霍城县地下水资源构成变化及驱动力分析

An analysis of groundwater resources composition and driving force in Huocheng county

霍世璐, 王文科, 段磊, 李瑛, 张琛, 刘明明, 曾磊 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 51-59

地下水污染风险预警等级及阈值确定方法研究综述

Review on the determination methods for early warning grade and threshold of groundwater pollution risk

王嘉瑜, 蒲生彦, 胡, 李博文 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 43-50

安阳市地下水源热泵系统建设水资源管理区划研究

A study of the water resources management and division of the groundwater heat pump system construction in Anyang

朱文举, 平建华, 侯俊山, 宁艺武, 耿文斌 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 200-208

西北地区地下水水量-水位双控指标确定研究——以民勤盆地为例

A study of the determination of indicators of dual control of groundwater abstraction amount and water table in northwest China: a case study of the Minqin Basin

王晓玮, 邵景力, 王卓然, 崔亚莉, 张秋兰 水文地质工程地质. 2020, 47(2): 17-24



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202111050

孙超, 王昕洲, 叶莹莹, 等. 河北省地下水资源承载能力评价及预警方法研究 [J]. 水文地质工程地质, 2022, 49(6): 55-63.
SUN Chao, WANG Xinzhou, YE Yingying, *et al.* Research on evaluation and early warning of groundwater resources carrying capacity in Hebei Province[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2022, 49(6): 55-63.

河北省地下水资源承载能力评价及预警方法研究

孙超^{1,2}, 王昕洲^{1,2}, 叶莹莹^{1,2}, 刘琼³, 曹颐^{1,2}, 韩冲^{1,2}, 王轶³

(1. 河北省地质资源环境监测与保护重点实验室, 河北石家庄 050021; 2. 河北省地质环境监测院, 河北石家庄 050021; 3. 中国地质环境监测院, 北京 100081)

摘要: 河北省由于地下水持续超采引发一系列生态环境问题, 其根源在于人类活动强度超出了地下水资源承载能力, 并缺乏及时有效的预警。为了构建更符合河北省实际的地下水资源承载能力评价体系, 解决以往预警方法需要设置固定的水位、水量预警区间值, 水位的区域差异导致的宏观性评价困难、工作量巨大且无法动态修正的问题, 从地下水的资源属性和社会属性出发, 采用指标体系综合分析评判法, 建立承载本底、承载状态 2 个层面的承载能力评价体系; 采用地下水开发利用程度为主, 水位变化幅度加以修正的“双控联动”预警方法, 实现两指标的动态联动且无需设置固定的水位、水量区间。研究表明河北省地下水资源承载本底整体较好, 但由于开发利用程度高, 承载状态多处于超载状态, 承载能力太行山中南部高于北部及燕山山区、坝上地区, 山前冲洪积平原优于中部湖积平原和滨海平原; 受咸水分布、工农业生产取水量大等因素影响, 地下水红色及橙色预警区域主要分布于河北平原中部冲湖积平原的沧州、衡水地区、太行山山前平原邯郸交界区域及城市市区周边。评价及预警结果与河北省实际情况吻合。该评价方法具有区域适用性强、可操作性好、数据易获取等优点。

关键词: 地下水资源; 资源承载能力; 地下水预警; 双控联动; 河北省

中图分类号: P641.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2022)06-0055-09

Research on evaluation and early warning of groundwater resources carrying capacity in Hebei Province

SUN Chao^{1,2}, WANG Xinzhou^{1,2}, YE Yingying^{1,2}, LIU Qiong³, CAO Yi^{1,2}, HAN Chong^{1,2}, WANG Yi³

(1. Hebei Key Laboratory of Geological Resources and Environment Monitoring and Protection, Shijiazhuang, Hebei 050021, China; 2. Hebei Institute of Environmental Geology Exploration, Shijiazhuang, Hebei 050021, China; 3. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China)

Abstract: A series of ecological and environmental problems occur in Hebei Province due to the continuous over-exploitation of groundwater. The reasons for these are that human activity intensity is beyond the groundwater resources carrying capacity and there is lack of timely and effective early warning method. The aims of this study is to build the groundwater resources carrying capacity evaluation system conforming to the reality of Hebei Province, improve previous warning methods that need to set the fixed warning interval value of groundwater levels and water volume and address some problems caused by the regional differences of groundwater level, such as macroscopic evaluation difficulty, huge workload and being unable to correct dynamically. Based on resource

收稿日期: 2021-11-18; 修订日期: 2022-01-05

投稿网址: www.swdgedz.com

基金项目: 河北省地质资源环境监测与保护重点实验室项目(JCYKT202010); 中国地质调查局地质调查项目(DD20160328)

第一作者: 孙超(1979-), 男, 正高级工程师, 硕士, 主要从事地下水、地质环境、资源环境承载能力评价研究。E-mail: hkychao@163.com

attributes and social attributes of the groundwater resources, this paper uses the comprehensive analysis and judgement method of index system and builds the carrying capacity evaluation system on two levels: carrying background and carrying status. The “dual-control linkage” warning system is used, which mainly focuses on the degree of groundwater development and utilization and modifies the extent of groundwater level changes, to achieve dynamical linkage of the two indexes without setting the fixed interval value of groundwater level and water volume. The research results show that the overall carrying background of groundwater resources in Hebei Province is good. Because the degree of groundwater development and utilization is high, the carrying status of groundwater is mostly in the over-load state. The results show that the bearing capacity of the central and southern parts of the Taihang Mountains is higher than that of the northern part, Yanshan mountain area and the Bashang region, and the bearing capacity of the piedmont alluvial plain is better than those of the central lacustrine plain and coastal plain. Influenced by the salt water distribution, the huge water consumption in industrial and agricultural production and other factors, red and orange warning areas of groundwater are mainly distributed in the Cangzhou and Hengshui areas of the central alluvial lake plain of the Hebei plain, Hanxing junction area of the Taihang piedmont plain and urban peripheries. Evaluation and warning results conform to the reality of Hebei Province and the system has the advantages of strong regional applicability, good operability and easy access to data.

Keywords: groundwater resources; resources carrying capacity; groundwater warning; dual-control linkage; Hebei Province

随着社会经济发展需水量迅速增长,人类活动强度超出了地下水资源的承载能力,同时缺乏有效的监测预警,致使水资源供需矛盾日益突出,并引发一系列生态环境问题。为充分合理利用地下水资源,使地下水资源科学开发利用与生态环境保护协调发展,有必要以地下水资源为承载体,以社会经济发展为承载对象,开展地下水资源承载能力评价研究。同时地下水资源承载能力预警作为一种资源环境风险规制行为^[1],通过科学的环境风险标准体系,可以规避使资源环境耗竭的经济发展活动,促进社会经济持续发展。

河北省是以地下水为主要开采资源的资源性缺水区域。近几十年来社会经济快速发展,生产生活用水量剧增,地下水资源消耗严重,省内出现地下水严重超采、地面沉降等一系列问题^[2]。而针对本区域的地下水资源承载能力评价相关研究尚未全面开展。因此,开展河北省地下水资源承载能力评价及预警研究,将水资源作为约束社会经济发展规模的基本要素,针对不同区域建立差异化指标体系,对促进河北省经济社会可持续发展具有重要的研究意义。

目前,国外地下水资源承载能力研究多归于可持续发展理论,地下水资源承载能力相关理论的专题研究报道较为少见,主要围绕地下水可持续发展潜力^[3]、可供发展的极值^[4-6]、对经济社会发展的影响^[7]等方面开展。在我国,水资源承载力研究是 20 世

纪 80 年代末随水问题的日益突出开始的^[8]。评价方法主要有综合指标法^[9-10]、主成分分析法^[11-12]、模糊综合评价法^[13]、物元分析法^[14]及资源环境承载协调理论^[15-19]等。而由于缺水类型、开采类型的差异性,如何根据河北省地下水资源分布规律与利用特点,建立符合区域实际的指标体系是开展河北省地下水资源承载能力评价的关键。

地下水资源承载能力监测预警尚处于探索阶段,国外多围绕地下水管理模型研究而展开^[20],国内早期多以单一固定的水量或水位为指标^[21-23]。水量指标单纯以开采量为预警判据,忽略了补给量的动态变化;水位指标虽数据实时直观,但易受外部条件影响,由于区域水位存在差异性,在大区域预警中难以定量制定统一值。近年来,单一固定指标虽逐步演化为水量水位“双控”指标^[24-27],如王晓玮等^[25,27]采用“以位定量”的思路以及数值模拟进行西北地区双控管理研究。现有方法多以开采量和水位作为 2 个独立的静态预警判据,需要针对某一区域制定固定的开采量指标和水位指标。但目前对二者之间的动态联系缺乏深入研究,受水文地质条件、取用水工艺等自然和人为因素的影响无法形成统一的标准,工作量巨大,且很难做出动态调整。

因此,本文采用指标体系综合分析评判法,针对河北省以地下水为主要开采方式的资源型缺水地区,

开展适用于河北省的区域地下水资源承载能力评价及预警研究,论证了该评价方法的可靠性;选取地下水开发利用程度—水位变化幅度“双控联动”指标为预警指标,将水量与水位有机结合,无需设置固定的水位、水量预警值,实现预警指标的自我调节,解决由于水位区域差异导致的大区域尺度无法定量预警问题,可为将来建立多方协同的地下水资源承载能力评价及预警机制提供参考。

1 河北省地下水动态

1.1 地下水开采历史及动态变化

20世纪50年代,河北省地下水水位基本处于天然状态,年开采量约 $40 \times 10^8 \text{ m}^3$,其动态特征主要受降水与蒸发控制;至20世纪70年代,工农业生产迅猛发展,水资源供需矛盾日益突出,地下水动态类型由降雨入渗补给—蒸发排泄型转化为降雨入渗补给—开采排泄型,多年平均地下水可采资源量为 $119 \times 10^8 \text{ m}^3$,年平均开采总量为 $193 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中地下水开采占开采量75%以上。1975—2015年,河北省深浅层地下水水位整体均呈下降状态,太行山山前平原浅层地下水累计降幅达20~40 m,中部平原由于浅层咸水的存在,深层地下水大量开采,水位下降幅度较大,累计降幅达70 m以上(图1)。

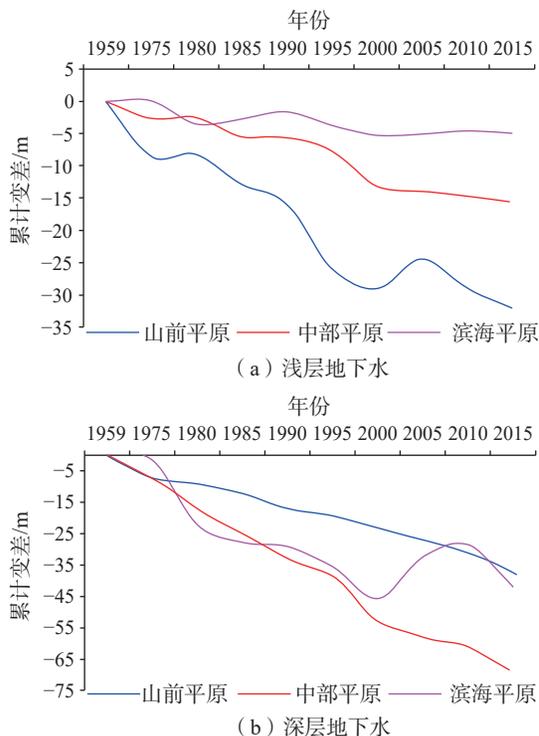


图1 河北平原浅层和深层地下水水位多年变化趋势图

Fig. 1 Multi-year trend of groundwater levels in the shallow and deep aquifers in the Hebei Plain

1.2 地下水开发利用引发的地质环境问题

在水资源严重匮乏和经济社会持续发展的双重压力下,地下水长期超采,华北平原成为世界上超采地下水最严重的地区之一,也是地下水降落漏斗面积最大、地面沉降面积最大、类型最复杂的地区之一,同时还产生一系列诸如含水层疏干、水质恶化等地质环境问题。河北省地下水降落漏斗主要为冀枣衡、沧州、南宫3大深层地下水漏斗区和宁柏隆、高蠡清、肃宁、石家庄4大浅层地下水漏斗区,漏斗面积为 $4.26 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[28]。河北平原地面沉降累计沉降量大于1 000 mm的面积达9 440 km^2 ,沧州市区地面沉降量最大值已达2.727 m。

2 数据来源与评价方法

2.1 数据来源

河北省地下水水位数据主要来源于河北省历年地下水监测数据和地质环境监测报告。地下水资源量来源于《河北省地质环境图系》。地下水开采量数据主要来源于历年水利公报及水利统计年鉴。

2.2 地下水资源承载能力评价

2.2.1 承载能力评价指标体系

参考《区域地质环境承载能力评价技术要求(试行)》,采用指标体系综合分析评判法,选取符合河北实际的地下水资源关键因子(表1),以自然单元评价为基础,自下而上逐级评价、汇总,形成多级、多层次的评价结果,归并到县域行政单元,以保证评价结果的实用性。通过科学设置分级标准,将承载本底划分为高、较高、中、较低、低5个等级,完成承载本底评价,反映地下水资源禀赋特征;通过科学设置状态阈值,将承载状态划分为盈余、均衡、超载3种状态,反映地下水水资源开发利用程度;结合本底和状态评价结果,开展地下水资源承载能力评价,将评价结果分为强、较强、中、较弱、弱5级(图2)。

表1 河北省地下水资源承载能力评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of groundwater resources carrying capacity of Hebei Province

指标类型	本底评价	状态评价
基础指标	地下水可开采资源模数	地下水开发利用程度
修正指标	可饮用地下水资源量占比	水位相对下降区占比
	可灌溉地下水资源量占比	地下水用水量占比

2.2.2 承载本底因子选取及评价方法

数量指标即资源性是地下水最核心的功能,质量指标是对水资源承载能力影响因子的综合及量化^[16]。承载本底评价因子以地下水可开采资源模数为基础

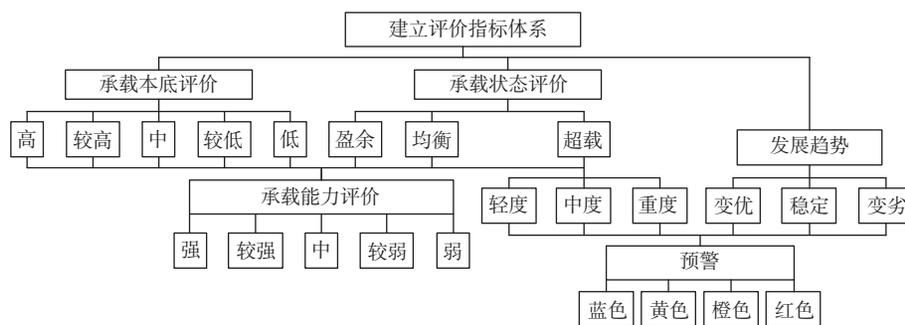


图 2 地下水资源承载力评价预警方法图

Fig. 2 Evaluation and warning method of the groundwater resource carrying capacity

指标, 由高到低分为 5 级(表 2); 根据地下水利用功能, 选取可饮用的地下水资源量占比、可灌溉的地下水资源量占比对基础指标予以修正(表 3)。将承载本底划分为高、较高、中、较低、低等 5 个等级, 反映地下水资源禀赋。

表 2 地下水可开采资源模数本底分级标准

Table 2 Standard for the module background classification of exploitable groundwater resources

等级	地下水可开采资源模数/(10 ⁴ m ³ ·km ⁻² ·a ⁻¹)
高	≥10
较高	[7.5, 10)
中	[3.5, 7.5)
较低	[2, 3.5)
低	<2

表 3 地下水承载本底修正指标阈值

Table 3 Threshold for groundwater carrying background correction index

修正指标	不降级	降一级	降二级
可饮用的地下水资源量占比/%	(70, 100]	(30 ~ 70]	[0, 30]
可灌溉的地下水资源量占比/%	(60, 100]	(25 ~ 60]	[0, 25]

2.2.3 承载状态因子选取及评价方法

地下水开发利用程度是区域地下水开采合理与否的基础指标, 是水位变化的重要影响因子, 水位是地下水开采是否超载的直观体现。开发利用程度作为承载状态基础评价指标, 分为盈余(小于 70%)、均衡(70% ~ 100%)、超载(大于 100%); 地下水水位下降区面积占比、地下水用水量占比作为承载状态修正评价指标(表 4)。将承载状态划分为盈余、均衡、超载 3 种状态, 反映地下水资源开发利用现状。

表 4 地下水承载状态修正指标阈值

Table 4 Groundwater carrying state correction index threshold

修正指标	不降级	降一级
地下水水位下降区面积占比/%	[0, 30]	(30, 100]
地下水用水量占比/%	[0, 50]	(50, 100]

2.2.4 承载能力评价方法

结合本底和状态评价结果, 构建地下水资源承载力判别矩阵, 将评价结果分为强、较强、中、较弱、弱 5 级(表 5)。

表 5 地下水资源承载力分级表

Table 5 Scale for groundwater resources carrying capacity

承载能力等级	承载本底等级					
	高	较高	中	较低	低	
承载状态等级	盈余	强	强	较强	中	较弱
	均衡	强	较强	中	较弱	弱
	超载	较强	中	较弱	弱	弱

2.3 地下水预警指标及方法研究

地下水开发利用程度是地下水取水量与可开采资源量的比值, 体现区域地下水开发利用状况。通过地下水开发利用程度指标代替取水量指标, 以开发利用量和可开采资源量的比值替代固定取水量值, 实现了省级大区域制定统一标准的目的。

地下水水位的变化是区域补给量和排泄量变化的外在体现, 取水量是影响河北省水位变化的最主要人为因素, 两者之间存在动态联系, 控制水位最直接有效的手段就是控制地下水取水量。省域范围内水位值区域差异大, 通过用水位变化幅度指标代替水位指标, 以速率形式代替固定值, 实现无需设置固定水位预警值的目的。

考虑到地下水开发利用程度是河北省水位变化的最大可控因素, 选取地下水开发利用程度作为河北省地下水预警的基础指标。而降水量是河北省水位变化的最大不可控因素, 单纯以地下水开发利用程度作为预警指标, 在极端降水年会出现地下水开发利用程度未预警而水位出现大幅变化的情况, 致使预警出现偏差。地下水水位变化依托现有监测网络, 具有实时的优势, 因此将水位变化幅度作为修正指标对地下

水开发利用程度予以修正。通过地下水开发利用程度—水位变化幅度的“双控联动”预警,实现丰、平、枯水年之间的动态调节,使预警指标具有自我调节能力。

在地下水资源承载能力评价中地下水开采量是最主要的可控因素,降水量是最主要的不可控因素的区域现状,而二者的直接体现就是水位的变化。预警评价时采用地下水开发利用程度(100%~120%为轻度超载、120%~150%为中度超载、大于150%为重度超载)和水位波动程度(水位上升超10%为变优、下降超10%为变劣、变幅10%之间为稳定)作为水位变化趋势的判别矩阵(表6),同时用水位变化幅度加以修正(年际水位上升提高1级、水位下降幅度不足1m不降级、水位下降幅度1~2m降1级、水位下降幅度大

表6 地下水预警等级判别矩阵

Table 6 Discriminant matrix of groundwater warning grade

预警级别	发展趋势类型	承载状态级别		
		轻度超载	中度超载	重度超载
变优		蓝色	黄色	橙色
稳定		黄色	橙色	红色
变劣		橙色	红色	红色

于2m降2级)。将预警级别分为红、橙、黄、蓝4级。

3 结果

3.1 地下水资源承载能力评价结果

3.1.1 承载本底评价结果

河北省地下水资源承载本底整体较好(图3),高、

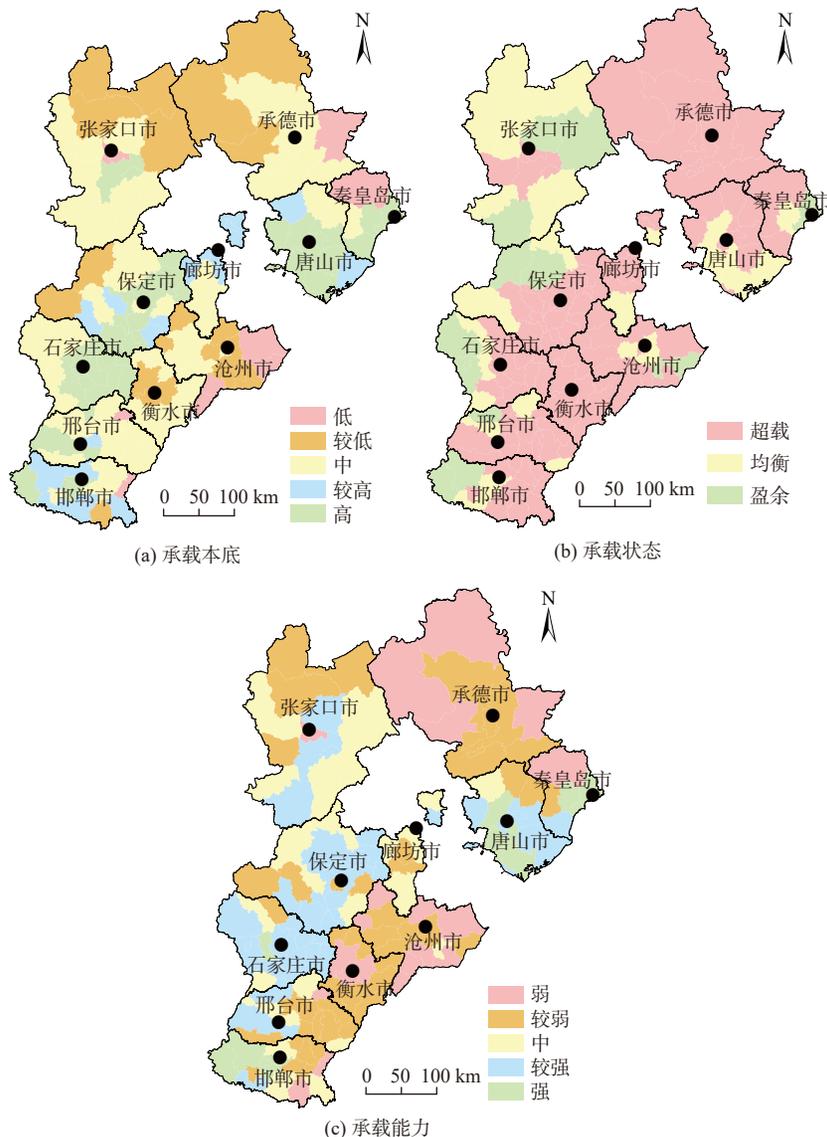


图3 河北省地下水资源承载能力评价图

Fig. 3 Evaluation results for groundwater resource carrying capacity of Hebei Province

较高县占全省的 43.1%，主要位于燕山及太行山山前冲洪积平原区及太行山中南部山区；承载本底低、较低县占全省的 16.8%，太行山北段、坝上高原以及滨海冲积海积平原区东部承载本底普遍以低或较低为主。

3.1.2 承载状态评价结果

地下水承载状态整体多为超载(图 3)，超载区域在河北省平原区大范围分布，占全省比例 72.5%，状态盈余县占比仅 9.6%，主要位于太行山区。

3.1.3 承载能力评价结果

根据本底和状态评价结果，对河北省地下水资源进行承载能力评价。河北省地下水资源承载能力整体呈两极分化，强、较强县占比 38.9%，弱、较弱县占比 43.1%(图 3)。承载能力强的县占 7.8%，主要分布在太行山中南部山区及燕山山前平原西部；能力较强县占 31.1%，主要分布在太行山及燕山的山前平原区；能力较弱的县占 30.5%，主要分布在河北平原中部冲湖积平原以及张家口、承德坝上区域；能力弱的县占 12.6%，主要分布在沧州、衡水地区及承德坝上区域。

3.2 地下水资源预警结果

在承载能力评价基础上对河北省地下水资源进行预警研究，结果显示河北省地下水资源红色及橙色预警区域主要分布于河北平原中部冲湖积平原的沧州、衡水地区、太行山山前平原邯邢交界区域及城市市区周边(图 4)。

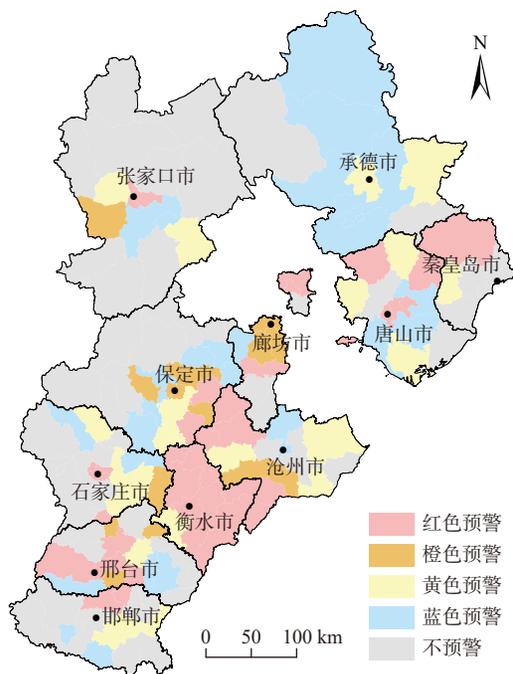


图 4 河北省地下水资源承载能力预警图

Fig. 4 Warning chart for groundwater resource carrying capacity of Hebei Province

4 分析及讨论

4.1 评价结果分析

(1)自然因素即水文地质条件是影响河北省地下水资源承载本底的主要因素

太行山区中南段含水层以寒武、奥陶系灰岩为主，岩溶裂隙发育，具有良好的储水条件，常形成较大的泉及泉群，如峰峰黑龙洞泉域、邢台百泉泉域、涉县东风湖泉域等；山前平原区含水层以冲洪积的粗砂、砾石、卵石为主，垂向连续性强，具有强入渗和储存条件，常与山区河谷含水体相连，具有较好侧向径流补给条件。良好的水文地质条件致使该区域水资源丰富，承载本底多为较高或高；太行山北段地下水系统多为封闭的构造断陷盆地，补给类型单一、以降水为主，地下水分布不均、连通性差；坝上高原位于内陆河地下水系统，具有明显的内陆盆地封闭或半封闭特征，以降水入渗补给为主，地下水连通性差；滨海冲积海积平原区主要由于浅层咸水的分布，地下水功能性减弱，承载本底多为低或较低。

本底评价结果与河北省水文地质条件总体趋势符合，即从山前平原到滨海平原，含水层颗粒由粗变细，地下水水力坡度由大变小，地下水的补径排条件由好变差；山区碳酸盐岩类岩溶水多优于基岩裂隙水分布区。

(2)河北省地下水承载状态主要受人为因素即地下水开采影响

太行山区水资源丰富，开发利用程度相对较低，一般在 70% 以下；河北平原为经济及工农业生产较为发达的区域，大部分区域均超采 100% 以上，1999 年河北省开采程度达到 128%^[17]。

将状态评价结果与河北省政府公布地下水超采区、禁采区和限采区范围对比，结果一致性达 93%，状态评价结果与河北省超采现状基本符合。

(3)河北省地下水资源红色及橙色预警主要位于 3 大区域

市区周边区域主要由于经济的发展及人口的增长，集中分布的工业及生活用水超出了地下水的承载能力。太行山山前平原的邯邢交界区域 5 年间深层地下水下降幅度多小于 5 m，但浅层水位下降幅度多在 5 m 以上，浅层水位下降是造成邯邢山前平原红色预警的主要诱因。河北平原中部的冲湖积平原浅层多咸水、微咸水，开发程度较低，水位整体呈稳定或上升态势，但是深层水多以下降为主，尤其是衡水地区，

地下水水位5年变差多在6~10 m以上,沧州衡水及周边区域为河北省地面沉降速率较大区域,高阳、武强、武邑、南宫、平乡等地年沉降速率达到90 mm。预警结果与河北省地下水实际情况及由此产生的地质环境、生态问题一致。

4.2 讨论

评价结果整体可靠性较高。通过宏观省级层面构建评价预警指标体系,以县域单元体现评价结果,在增强了区域普遍性、操作性和针对性的同时忽略了县域单元的内在特殊性。如在同时具有山区和平原的县域,工农业生产多集中于平原区,地下水开采也相应多集中于此,评价将其视为一个整体,虽对宏观性评价结果影响不大,但容易忽视个别区域地下水超采的现状。在市县级细致性评价中应根据区域实际细化评价单元、进一步优化调整评价指标体系可解决此问题。

地下水超采是河北省地下水资源承载能力的主要影响因素。针对超载区实施地下水压采,将有助于提升区域地下水资源承载能力,凸显地下水的重要战略价值。近年来,随着地下水压采政策的施行,2020年河北省累计压减地下水超采量 $43.5 \times 10^8 \text{ m}^3$,地下水水位下降趋势得到初步遏制^[29]。

5 结论

(1)基于地下水资源属性和社会属性,采用指标体系综合分析评判法,建立承载本底、承载状态2个层面的承载能力评价体系。选取地下水可开采资源模数作为本底基础指标,可饮用地下水资源量占比、可灌溉用地下水资源量占比作为本底修正指标;选取地下水开发利用程度作为承载状态基础指标,地下水水位下降区面积占比、地下水用水量占比作为承载状态修正评价;构建地下水资源承载力判别矩阵。河北省地下水资源承载力主要受水文地质条件和开发利用现状影响,太行山中南部地下水资源承载力高于北部及燕山山区、坝上地区,山前冲洪积平原优于中部湖积平原和滨海平原。评价结果符合河北省区域实际。

(2)选取地下水开发利用程度~水位变化幅度“双控联动”指标为预警指标,较之单纯采用水量或水位单要素的方法,加强了取水量与补给来源的动态联系,解决了区域水位数据的差异性和波动性问题,区域通用性更强。受咸水分布、工农业生产取水量大等因素影响,地下水红色及橙色预警区域主要分布于河

北平原中部冲湖积平原的沧州、衡水地区、太行山山前平原邯邢交界区域及城市市区周边。预警结果与超采导致的地质环境、生态问题相一致。

(3)通过省级宏观层面构建评价预警指标体系,在综合考虑了区域地下水共性因子的同时容易忽略小区域的特殊性,在市县级细致性评价中应根据区域实际细化评价单元,进一步优化调整评价指标体系。

参考文献 (References) :

- [1] 张真源,黄锡生. 资源环境承载力监测预警的制度功能与完善[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2019, 21(1): 162 - 170. [ZHANG Zhenyuan, HUANG Xisheng. System functions and perfection of monitoring and early warning of resources and environment carrying capacity[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition), 2019, 21(1): 162 - 170. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 王哲,付宇,朱静思,等. 华北典型河道地下水回补效果评价[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(3): 843 - 853. [WANG Zhe, FU Yu, ZHU Jingsi, et al. Effect assessment on groundwater recharge for typical rivers in North China[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(3): 843 - 853. (in Chinese with English abstract)]
- [3] KHANNA P, BABU P R, GEORGE M S. Carrying-capacity as a basis for sustainable development a case study of National Capital Region in India[J]. *Progress in Planning*, 1999, 52(2): 101 - 166.
- [4] RIJSBERMAN M A, VAN DE VEN F H M. Different approaches to assessment of design and management of sustainable urban water systems[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2000, 20(3): 333 - 345.
- [5] HARRIS J M, KENNEDY S. Carrying capacity in agriculture: global and regional issues[J]. *Ecological Economics*, 1999, 29(3): 443 - 461.
- [6] HUQ S M I, JOARDAR J C, PARVIN S, et al. Arsenic contamination in food-chain; Transfer of arsenic into food materials through groundwater irrigation[J]. *Journal of Health, Population and Nutrition*, 2006, 24(3): 305 - 316.
- [7] VARIS O, VAKKILAINEN P. China's 8 challenges to water resources management in the first quarter of the 21st Century[J]. *Geomorphology*, 2001, 41(2/3): 93 - 104.
- [8] 施雅凤,曲耀光. 乌鲁木齐河流域水资源承载力及其合理利用[M]. 北京: 科学出版社, 1992: 48 - 63. [SHI Yafeng, QU Yaoguang. Water resources carrying capacity and rational utilization of Urumqi River basin[M].

- Beijing: Science Press, 1992: 48 – 63. (in Chinese)]
- [9] 王顺久, 杨志峰, 丁晶. 关中平原地下水资源承载力综合评价的投影寻踪方法[J]. *资源科学*, 2004, 26(6): 104 – 110. [WANG Shunjiu, YANG Zhifeng, DING Jing. Projection pursuit method of comprehensive evaluation on groundwater resources carrying capacity in Guanzhong plain[J]. *Resources Science*, 2004, 26(6): 104 – 110. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 贺中华, 梁虹, 黄法苏, 等. 喀斯特地区地下水资源承载力综合评价研究: 以贵州省为例[J]. *水文*, 2010, 30(3): 22 – 27. [HE Zhonghua, LIANG Hong, HUANG Fasu, et al. Assessment of groundwater resources carrying capacity in Karst areas: Taking Guizhou Province as a case[J]. *Journal of China Hydrology*, 2010, 30(3): 22 – 27. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 于钊, 尚曼廷, 姚梅, 等. 水足迹与主成分分析法耦合的新疆水资源承载力评价[J]. *水文*, 2021, 41(1): 49 – 54. [YU Po, SHANG Manting, YAO Mei, et al. Water resources carrying capacity evaluation based on water footprint and principal component analysis in Xinjiang[J]. *Journal of China Hydrology*, 2021, 41(1): 49 – 54.]
- [12] 王威, 张鑫, 胡笑涛. 基于主成分分析法的灌区地下水资源承载力评价[J]. *水利与建筑工程学报*, 2010, 8(1): 5 – 6. [WANG Wei, ZHANG Xin, HU Xiaotao. Evaluation on carrying capacity of ground water in irrigation districts based on principal components analysis method[J]. *Journal of Water Resources and Architectural Engineering*, 2010, 8(1): 5 – 6. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 雷能忠, 许峰, 阮丽缘, 等. 多级模糊综合评判在自然资源承载力评价中的应用——以阜阳地区地下水资源为例[J]. *安徽技术师范学院学报*, 2004, 18(1): 53 – 57. [LEI Nengzhong, XU Feng, RUAN Liyuan, et al. Application of multi-level fuzzy comprehensive discrimination in evaluation of regional natural resources carrying capacity[J]. *Journal of Anhui Technical Teachers College*, 2004, 18(1): 53 – 57. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 何青, 成建梅. 基于模糊权物元理论的地下水资源承载力评价分析[J]. *水利水电技术*, 2018, 49(5): 25 – 29. [HE Qing, CHENG Jianmei. Fuzzy weight matter element theory-based evaluation and analysis on groundwater resources carrying capacity[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, 49(5): 25 – 29. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 李瑞敏, 殷志强, 李小磊, 等. 资源环境承载协调理论与评价方法[J]. *地质通报*, 2020, 39(1): 80 – 87. [LI Ruimin, YIN Zhiqiang, LI Xiaolei, et al. A study of the coordination theory and evaluation method of resource environment carrying capacity[J]. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(1): 80 – 87. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 李瑞敏, 杨楠, 李小磊, 等. 资源环境承载能力评价方法探索与实践[M]. 北京: 地质出版社, 2019: 5 – 6. [LI Ruimin, YANG Nan, LI Xiaolei, et al. Exploration and practice of geological resources and environmental carrying capacity evaluation method[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2019: 5 – 6. (in Chinese)]
- [17] 刘琼, 李瑞敏, 王轶, 等. 区域地下水资源承载能力评价理论与方法研究[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(6): 173 – 183. [LIU Qiong, LI Ruimin, WANG Yi, et al. Theory and methodology for evaluation of carrying capacity of regional groundwater resources in China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(6): 173 – 183. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 王轶, 李瑞敏, 高萌萌, 等. 基于双曲距离协调模型的地下水资源与经济承载协调关系[J]. *地质通报*, 2020, 39(1): 88 – 93. [WANG Yi, LI Ruimin, GAO Mengmeng, et al. An analysis of coordination relationship between groundwater resources and economic carrying capacity based on hyperbolic distance coordination model[J]. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(1): 88 – 93. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 殷志强, 李瑞敏, 李小磊, 等. 地质资源环境承载能力研究进展与发展方向[J]. *中国地质*, 2018, 45(6): 1103 – 1115. [YIN Zhiqiang, LI Ruimin, LI Xiaolei, et al. Research progress and future development directions of geo-resources and environment carrying capacity[J]. *Geology in China*, 2018, 45(6): 1103 – 1115. (in Chinese with English abstract)]
- [20] FARHADI S, NIKOO M R, RAKHSHANDEHROO G R, et al. An agent-based-Nash modeling framework for sustainable groundwater management: a case study[J]. *Agricultural Water Management*, 2016, 177: 348 – 358.
- [21] 李文鹏, 郑跃军, 郝爱兵. 北京平原区地下水位预警初步研究[J]. *地学前缘*, 2010, 17(6): 166 – 173. [LI Wenpeng, ZHENG Yuejun, HAO Aibing. A preliminary study of groundwater level pre-warning in Beijing Plain[J]. *Earth Science Frontiers*, 2010, 17(6): 166 – 173. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 刘莎, 谢义华, 柴娟, 等. 陕西省地下水水位预警机制

- 研究[J]. 地下水, 2020, 42(4): 63 – 65. [LIU Sha, XIE Yihua, CHAI Juan, et al. Study of groundwater level early-warning in Shannxi Province[J]. Ground Water, 2020, 42(4): 63 – 65. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 李福臻. 区域水资源预警研究与应用[D]. 济南: 山东大学, 2020. [LI Fuzhen. Research and application of regional water resources early warning[D]. Jinan: Shandong University, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 戴长雷, 王羽, 王美玉, 等. 区域地下水水位水量双控管理研究[J]. 黑龙江大学工程学报, 2021, 12(1): 1 – 8. [DAI Changlei, WANG Yu, WANG Meiyu, et al. Study on dual control management of regional groundwater level and groundwater volume[J]. Journal of Engineering of Heilongjiang University, 2021, 12(1): 1 – 8. (in Chinese with English abstract)]
- [25] 王晓玮. 我国西北超采区地下水水量-水位双控指标确定研究: 以民勤盆地为例[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2017. [WANG Xiaowei. Study on the dual control of groundwater abstraction amount and table in groundwater over-exploitation zones in northwest China: A case study in Minqin Basin[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2017. (in Chinese with English abstract)]
- [26] 哈建强, 朱艳飞, 史洪飞, 等. 黑龙港平原区地下水利用水位水量控制指标分析[J]. 人民长江, 2018, 49(7): 52 – 57. [HA Jianqiang, ZHU Yanfei, SHI Hongfei, et al. Controlling indexes of water level and pumped groundwater in Heilonggang plain area, Hebei Province[J]. Yangtze River, 2018, 49(7): 52 – 57. (in Chinese with English abstract)]
- [27] 王晓玮, 邵景力, 王卓然, 等. 西北地区地下水水量-水位双控指标确定研究——以民勤盆地为例[J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(2): 17 – 24. [WANG Xiaowei, SHAO Jingli, WANG Zhuoran, et al. A study of the determination of indicators of dual control of groundwater abstraction amount and water table in northwest China: a case study of the Minqin Basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2020, 47(2): 17 – 24. (in Chinese with English abstract)]
- [28] 李文鹏, 王龙凤, 杨会峰, 等. 华北平原地下水超采状况与治理对策建议[J]. 中国水利, 2020(13): 26 – 30. [LI Wenpeng, WANG Longfeng, YANG Huifeng, et al. The groundwater over exploitation status and countermeasure suggestions of the North China Plain[J]. China Water Resources, 2020(13): 26 – 30. (in Chinese with English abstract)]
- [29] 水利部网站. 河北省2020年度地下水超采综合治理成效考核结果公布[EB/OL]. (2021-04-14). http://www.mwr.gov.cn/xw/dfss/202104/t20210414_1513818.html. [Ministry of Water Resources Website. Evaluation results of comprehensive treatment of groundwater overexploitation in Hebei Province in 2020[EB/OL]. (2021-04-14). http://www.mwr.gov.cn/xw/dfss/202104/t20210414_1513818.html. (in Chinese)]

编辑: 张若琳