

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202007071

区域地下水资源承载能力评价理论与方法研究

刘 琼¹, 李瑞敏¹, 王 轶¹, 高萌萌¹, 李小磊¹, 孙 超²

(1. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 2. 河北省地质环境监测总站, 河北 石家庄 050011)

摘要: 开展地下水资源承载能力评价, 对于认识区域地下水资源禀赋和开发利用的空间分布状况、建立国家-省级资源环境承载能力监测预警机制、支撑面向国土空间规划的“双评价”研究等具有重要意义。目前, 地下水资源承载能力的评价理论与方法仍处于探索之中, 在实际工作中缺乏统一的依据。本文基于自然-社会经济系统的承载协调理论, 定义了地下水资源承载能力的内涵。从地下水资源的数量、质量、生态属性出发, 分别建立了承载本底、承载状态两个层次的区域地下水资源承载能力评价指标体系, 确定了评价指标的分级标准和评价流程。以地下水可开采资源模数、地下水开采程度作为基础指标, 来初步判断承载本底、承载状态等级, 而后利用地下水背景质量等级对承载本底初步结果进行修正, 根据区域实际情况选取地下水污染程度、地面沉降程度、海水入侵程度、土壤盐渍化程度等一项或多项指标作为承载状态的修正指标, 对承载状态初步结果进行修正; 综合承载本底、承载状态评价结果, 确定区域地下水资源承载能力。应用此方法研究了京津冀地区的地下水资源承载能力, 结果发现京津冀地区地下水资源承载能力水平整体偏弱, 202 个县级行政区中承载能力强的有 18 个, 较强的有 72 个, 中等的有 19 个, 较弱的有 36 个, 弱的有 57 个。承载能力强、较强的县级行政区几乎全部位于冀南丘陵区、冀中山前冲积平原; 承载能力弱、较弱的县级行政区主要分布在冀北山地丘陵区、冀东滨海冲积海积平原。京津冀地区地下水资源承载能力研究实例表明该方法具备可操作性, 评价结果合理。

关键词: 地下水资源; 承载能力; 评价指标; 数量-质量-生态; 京津冀

中图分类号: P641.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)06-0173-11

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

LIU Qiong¹, LI Ruimin¹, WANG Yi¹, GAO Mengmeng¹, LI Xiaolei¹, SUN Chao²

(1. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100081, China;

2. Institute of Geological Environment Monitoring of Hebei Province, Shijiazhuang, Hebei 050011, China)

Abstract: It is of great significance to evaluate the carrying capacity of groundwater resources for understanding the basic situation of regional groundwater resource availability and utilization, establishing a national and provincial level monitoring and warning mechanism for resources and environment carrying capacity, and supporting the research oriented to national spatial planning. The current theory and method for evaluation of carrying capacity of groundwater resources are still in an exploratory status, and there is no unified basis in practice. In this paper, the carrying capacity of groundwater resources is defined based on carrying coordination theory between natural resources system and socioeconomic system. After the analyses of quantity, quality and ecological feature of groundwater resources in China, an evaluation index system is established respectively from the background and status of carrying capacity. Thus, an index grading method

收稿日期: 2020-07-10; 修订日期: 2020-08-19

基金项目: 中国地质调查局地质调查项目 (DD20160328; DD20190506); 国家自然科学基金资助项目 (41702386)

第一作者: 刘琼 (1986-), 女, 高级工程师, 主要从事资源环境承载能力研究。E-mail: shhhj05@163.com

通讯作者: 李瑞敏 (1964-), 女, 教授级高级工程师, 主要从事资源环境承载能力研究、水文地质环境地质研究。

E-mail: lirm@cigem.cn

and evaluation process of carrying capacity of groundwater resources is put forward. This index system takes the module of exploitable groundwater resources and degree of groundwater exploitation as the basic indexes. The background and status of carrying capacity are firstly judged by the class of basic indexes. Secondly, level of groundwater background quality is used to modify the background of carrying capacity. As revising indexes of the status, degree of groundwater pollution, land subsidence, salinization and seawater intrusion should be used according to actual condition and the modified status of carrying capacity. Integrated carrying capacity of groundwater resources is determined by the above mentioned background and status. This method is used to evaluate the carrying capacity of groundwater resources in the Beijing-Tianjin-Hebei region, and the results show that the integrated carrying capacity is relatively weak in this region. The number of counties with strong, medium-strong, medium, medium-weak, and weak integrated carrying capacity are 18, 72, 19, 36, and 57, respectively. Counties with strong and medium-strong integrated carrying capacity are mainly located in the hilly and mountain areas of the southern part and piedmont alluvial plain of the central part. Counties with medium-weak and weak integrated carrying capacity are mainly located in hilly and mountain areas of the northern part and coastal alluvial plain of the eastern area. This case study of evaluation of carrying capacity of groundwater resources in the Beijing-Tianjin-Hebei region shows that the evaluation method is feasible, and the result is reasonable.

Keywords: groundwater resources; carrying capacity; evaluation index system; quantity-quality-ecology; Beijing-Tianjin-Hebei region

承载力 (Carrying Capacity) 通常是指某个载体对承载对象的支撑能力。资源环境承载力研究以自然资源环境作为载体,以社会经济发展作为承载对象,研究特定条件下一定地域空间内的自然资源环境系统对社会经济系统的支撑能力^[1-2]。在我国大力推进生态文明建设,强调绿色、可持续发展的形势下,资源环境承载力研究正成为衡量区域可持续发展的重要判据,且逐步在国土空间规划、主体功能区划、“三区三线”划定中发挥重要作用。

地下水资源是水资源的重要组成部分。国外在研究水资源对生态承载力、人口承载力或可持续发展的限制性作用的历程中,发展出一系列具有相似内涵的概念,如可利用水资源量 (water availability)^[3-4]、水压力指数 (water stress index)^[5]、水资源紧缺指数 (water scarcity indice)^[6]、生态可持续利用水资源量 (ecologically sustainable water resource)^[7-8],但直接以水资源承载力为主题开展专项研究的几乎没有。

我国著名学者施雅风在 20 世纪 90 年代初研究西北干旱地区水资源对生态环境与社会经济系统的瓶颈制约作用时提出了“水资源承载力”,定义为某一地区的水资源,在一定社会和科学技术发展阶段,在不破坏社会和生态系统时,最大可承载的农业、工业、城市规模和人口水平^[9]。经过 30 多年的研究,水资源承载力在我国得到了独立的发展,主要包括三种观点:一是水

资源支撑人口或经济社会发展的最大规模^[9];二是抽象的能力,表达为水资源对地区社会经济发展的支撑能力^[10];三是水资源开发容量^[11]。研究方法上逐步由单一指标、静态分析走向系统多目标、动态综合分析。主要包括指标体系综合评价法、多目标情景分析法、系统动力学模拟法。指标体系综合评价法是运用最多的研究方法,一般是通过建立评价指标体系对水资源承载力各关键因子分别进行评判,再通过主成分分析法^[12]、模糊综合评价法^[13]、物元分析法^[14]等综合评价方法,将各指标评价结果综合起来,得出一个比较全面的评价结果。此外,多目标情景分析法^[15]、系统动力学模型法^[16]也是较常用的研究方法。

20 世纪 90 年代后期,随着我国地下水供水比重不断攀升,由于过量开采地下水引发的地面沉降、生态环境问题加剧,地下水资源承载力研究也备受关注,在华北平原、关中平原、贵州岩溶区及大型灌区开展了大量有益探索^[14-15, 16-17]。地下水资源承载力多延用水资源承载力的内涵,但在研究方法上一般有所创新,尤其是运用指标体系综合评价法研究时,充分考虑了各研究区地下水分布规律与利用状况特点,建立了差异化的指标体系。如,在开采地下水主要用于农业灌溉的华北平原、关中盆地及其他大型灌区,选取的指标往往有灌溉土地供水模数、需水模数、灌溉水利用系数等^[11,13]。

开展全国区域地下水资源承载能力评价研究,判

别地下水资源超载程度和发展趋势,是支撑建立资源环境承载能力监测预警体系、加强水资源开发利用管理的有效手段。尤其是在以地下水为主要供水水源的我国北方地区,可为合理配置水资源、测算供需水量,拟定“以水定城、以水定地、以水定人、以水定产”方案,为国土空间规划编制和调整提供重要技术支撑。因此,亟需开展地下水资源承载能力的评价理论与方法探索,为区域尺度的评价工作提供统一的方法依据。

本文在总结前人研究理论与方法的基础上,面向支撑建立资源环境承载能力监测预警机制的目标,以期准确定义地下水资源承载能力的概念和内涵,结合地下水资源禀赋、开发利用状况以及相关的生态环境问题,提出一套宏观的可适用于我国省域和重要经济区(跨省域)的区域地下水资源承载能力评价指标体系与方法,并开展了京津冀地下水资源承载能力评价,论证该评价方法的可靠性。

1 地下水资源承载能力研究的基本理论

1.1 承载协调理论

在开展资源环境承载能力研究以支撑编制“全国国土规划纲要(2016—2030)”及建立“国土资源环境

承载能力评价及监测预警机制”的历程中,本研究团队在充分吸收前人研究精华、结合新时代承载能力研究新特点的基础上提出承载协调理论^[2]。该理论以追求社会经济系统与自然资源环境系统的协调为要义,将自然资源环境系统的禀赋条件作为约束社会经济发展规模的根本因素。研究对象定位在自然资源环境系统及其与社会经济系统的关系,即“一个系统、一个关系”,重点进行资源环境承载能力评价和监测预警两个方面的研究。其中,承载能力评价分为三个层次:首先是研判自然资源禀赋与环境容量优劣程度的承载本底评价;其次是分析资源环境供容能力与经济社会发展的匹配程度的承载状态评价;最后综合两者形成承载能力评价结果,反映当前资源环境能够保障社会经济发展的能力水平。

按照评价目的不同,可分为面向建立资源环境承载能力监测预警机制的宏观性评价和面向国土空间规划的细致性评价,前者主要采用总体性的评价指标从宏观尺度上综合反映大区域范围内资源环境承载能力强弱程度和空间差异性,后者主要是通过可以反映本研究区的特征性指标来较精细地刻画研究区内部的承载能力差异。本文重点讨论区域性宏观评价方法。

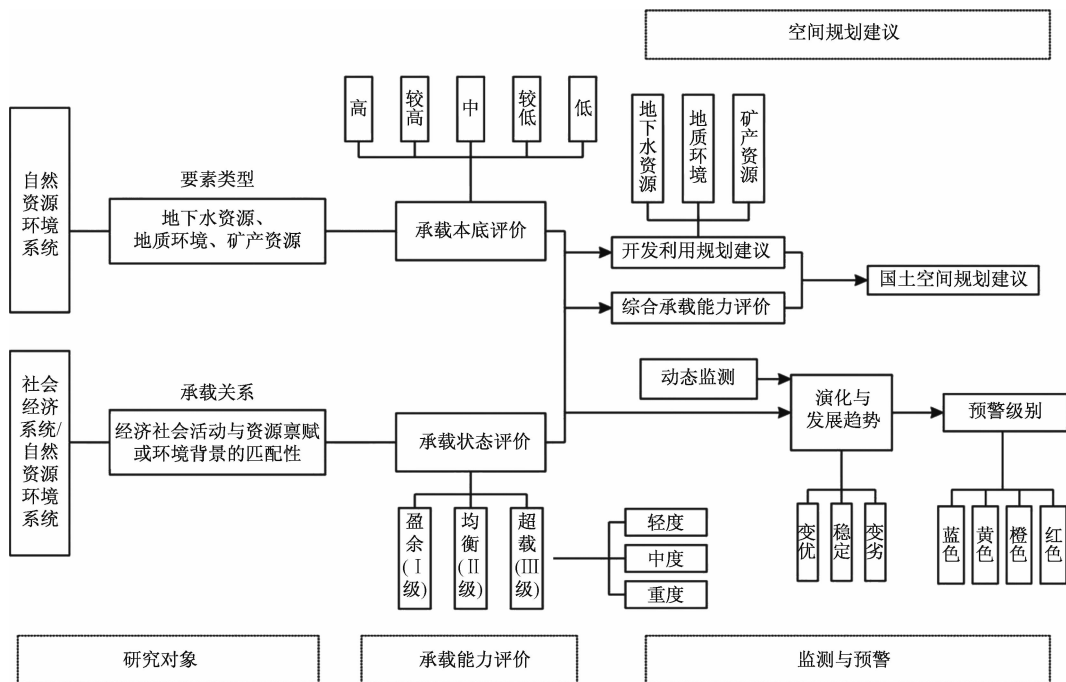


图1 资源环境承载协调理论技术框架^[2]

Fig. 1 Frame of the coordination theory and evaluation method of resource and environmental carrying capacity

1.2 定义与内涵

按照资源环境承载协调理论及面向建立资源环境

承载能力监测预警机制的目标,将地下水资源承载力定义为:在一定时期和技术经济条件下,以开发地下

水不破坏生态、且保持地质环境稳定为前提,区域地下水资源保障当地社会经济发展的能力。在此内涵下,评价地下水资源承载能力首先强调数量、质量、生态并重的理念,保证质量、维持生态及地质环境稳定为底线,更强调保护中发展;其次强调动态性,受技术、管理、人类认知水平等局限,地下水资源承载能力呈动态发展,并非一成不变;最后还强调了地域性和尺度效应,不同地域和研究尺度的研究目标和研究方法往往有差异。

根据承载协调理论,地下水资源承载能力评价的对象及内容主要包括:(1)承载本底评价对象即地下水资源,重点从数量和质量两个核心的自然属性来考量地下水资源禀赋的优劣;(2)承载状态评价对象是地下水资源与社会经济系统的关系,重点从区域社会经济发展对地下水开发利用的现状程度,以及对水质、生态、地质环境造成的不利影响来考量;(3)承载能力则通过综合承载本底和承载状态评价结果来反映当前地下水资源的数量、质量及其维系的生态环境能够保障社会经济发展的能力水平。

2 评价方法

我国疆域辽阔,自然条件下地下水补给、径流、排泄以及地下水开发利用情况差异极大。在综合分析我国地下水资源分布规律、开发利用现状与影响及社会经济发展对水资源的需求等基础上,遵循简便、实用、可操作的原则,采用指标体系综合评价法,构建了可应用于省域和重要经济区(跨省域)的区域地下水资源承载能力评价指标体系与方法。

2.1 评价指标体系

区域地下水资源承载能力评价指标包括基础指标和修正指标。基础指标作为普适性指标,从地下水的数量属性出发,根据承载本底、承载状态的内涵,分别选取地下水可开采资源模数、地下水开采程度作为相应指标,经评价后得出初步结果。修正指标作为针对性指标,从地下水的质量属性,或者区域特殊问题出发,对相应指标进行评价后,再对基础指标的初步评价结果进行修正。

2.1.1 指标选取依据与定义

(1)地下水可开采资源模数

地下水可开采资源模数表示的是单位面积上的地下水可开采资源量。地下水可开采资源量通常定义为一定经济、技术条件下,开采过程中不会诱发严重的环境问题,可以持续开采利用的地下水量^[18],是目前普

遍采用的表征地下水资源量的概念之一。此概念强调在保证生态用水和环境安全的前提下计算可开采利用的地下水量,主要以生态环境安全为约束条件。地下水可开采资源模数是地下水可开采资源量的“地均值”,以更直观对比区域间地下水资源禀赋的差异。而人均地下水资源量这个“人均值”着眼于人口分布和资源消耗现状,不符合生态文明理念。

表 1 区域地下水资源承载能力评价指标体系

Table 1 Evaluation index system of the carrying capacity of regional groundwater resources

指标类型	本底指标	状态指标
基础指标	地下水可开采资源模数	地下水开采程度
		地下水污染程度
修正指标	地下水背景质量等级	地面沉降程度
		海水入侵程度
		土壤盐渍化程度

(2)地下水开采程度

地下水开采程度是指地下水开发利用量与地下水可开采资源量之比。该指标通过可开采量与已开采量进行直观对比,可综合反映地下水资源的开发利用状况,能较全面体现地下水对社会经济系统的支撑状况,也是目前广泛运用的指标。研究者在运用逼近理想解、模型判断、投影寻踪、专家打分等不同方法评价地下水资源承载力时,均认为地下水开采程度可体现区域地下水开发利用现状,在所有相似指标中权重最高^[19]。

(3)地下水背景质量等级

地下水背景质量等级表示的是原生条件下地下水质量状况的优劣。通过综合考量区域地下水基本化学成分及含量、地下水典型元素背景状况,分析化学组分含量及背景值高的地下水分布情况,以其面积占比来反映评价区域的地下水背景质量等级。

地下水基本化学成分、典型元素背景状况反映了地下水在自然环境循环过程中的原始物理化学性质,是研究水环境质量与水质评价的基本依据,充分体现了“本底”的理念。我国地下水典型的高背景值元素包括铁、锰、氟化物、碘化物、砷等。其中,砷是国际上公认的具有直接毒害作用的六大毒性物质之一。氟化物也是对人类健康具有直接毒害作用的元素之一。碘是维持生物生长发育必须的微量元素,但饮用高碘水也能引起人类健康问题。此外,氯化物、硫酸盐、硝酸盐等虽然为无直接毒害作用的无机污染物,但当组分达到一定浓度后,导致地下水中含盐量过高,同样会对

其利用价值或环境甚至对人类健康造成不同程度的影响和危害^[20-22]。此外,当前的水处理工艺,对砷、氟化物、碘化物、含盐量等组分或元素含量高的地下水进行处理,技术也相对不成熟,存在成本高或效率低的问题。因此,综合以上因素,选取含盐量、砷、氟化物、碘化物作为主要指标,参考《地下水质量标准》(GB/T 14848—2017)和《生活饮用水卫生标准》(GB 5749—2006)^[23-24],按表2判断具有高背景值的化学组分或元素含量的地下水类型。

表2 高背景值化学组分或元素含量的地下水类型判断标准
Table 2 Criteria for groundwater with high background concentration of component or elements

指标	临界浓度/(mg·L ⁻¹)	判断原则
含盐量	5 000	高于临界浓度
砷	0.01	高于临界浓度
氟化物	1.00	高于临界浓度
碘化物	1.00	高于临界浓度

据历年来水资源公报数据(2013—2018)统计,近年来随着地下水压采政策的实施,各地区地下水开采量较过去二三十年有所下降,局部地区地下水超采的局面得到控制。然而,地下水作为重要的环境因子,常以物质迁移、能量转换、动力学特征等方式影响地质环境,地下水过度开发利用会引发地质环境问题,如区域地下水位下降、地下水污染、地面沉降、海水入侵、岩溶塌陷、土壤盐渍化、沼泽化、沙漠化等^[18,25-26]。因此,此类问题作为地下水不合理开发利用的影响也需要纳入评价体系。从影响程度和范围出发,分别选取地下水污染、地面沉降、海水入侵、土地盐渍化作为需要重点评价的问题。选取的评价指标见下文。

(4) 地下水污染程度

地下水污染指的是人类活动影响下,地下水水质朝着恶化方向发展的现象。受我国城镇化、工业化进程加快影响,特别是城市及工矿企业“三废”无序排放影响,地下水水质正在发生重大变化。首轮地下水污染调查发现,地下水正在区域上发生着硬化、盐化、硝化(三氮污染)、酸化等问题,局部重(类)金属污染严重,个别地方有机污染已有显现。地下水三氮污染普遍,在农业开发区和城市周边地区已呈面污染特征。重金属污染多呈点状分布在城市周边及工矿企业周围。地下水有毒有害有机污染相对少,主要呈点状、复合污染的特征在浅层地下水中显现^[27]。根据地下水污染调查评价方法,以污染评价后得到的地下水污染

区的面积占比,或原始调查点中地下水污染点的个数占比,来反映区域地下水污染严重程度。

(5) 地面沉降程度

地面沉降是指由于自然因素或人类工程活动引发的地下松散岩层固结压缩并导致一定区域范围内地面高程降低的地质现象,是一种缓变性地质灾害。人类活动是诱发高速率地面沉降的重要因素,其中,大量抽取地下水与地面沉降关系最为密切。尤其是在我国长江三角洲、华北平原、汾渭盆地等地区,由于过量开采地下水,特别是开采井群过分集中,引起地下水水位持续下降,诱发了地面沉降^[28]。为保持评价数据的一致性,利用 InSAR 数据得到的全国范围内的地面沉降速率作为基础数据,以地面沉降速率大于 10 mm/a 的区域占比情况表征地面沉降程度。

(6) 海水入侵程度

海水入侵是由于滨海地区地下水动力条件发生改变,引发海水或高矿化咸水向陆地淡水含水层运移而发生水土侵入的过程和现象,是沿海地区水资源不合理开发带来的特殊环境地质问题。我国渤海、黄海沿岸不少地带,由于地下水过量开采,水位持续下降,20 世纪 70 年代中期开始陆续发生海水入侵陆地含水层的现象,20 世纪 80 年代以来海水入侵现象加剧^[29]。以区域发生海水入侵的面积占比表征海水入侵程度。该指标只在沿海地区使用。

(7) 土壤盐渍化程度

土壤盐渍化是土壤表层盐分含量不断增加以至超出某一限度的发展过程。从地质环境角度,土壤的积盐过程实质上是土壤系统中地下水运动和盐分迁移富集的一种水文地质过程。在全球变暖的趋势下,中低纬度地区的土壤盐渍化现状日益严重,成为绿洲农业的发展障碍。我国西北内陆干旱区的人工绿洲、黑河流域中下游平原、河套平原、银川平原,以及东北平原、黄淮海平原的低洼地区广泛分布盐渍化。盐渍化形成的主要控制为潜水水位埋深、潜水矿化度、微地形、包气带岩性综合特征和灌排条件,人类活动较易对以上控制因素造成干扰。尤其是,以不合理灌排或水利工程渗漏等活动,造成潜水水位抬升而引发盐渍化问题^[30]。因此,以人类不合理灌排或水利工程渗漏等活动,造成潜水水位抬升而引发土壤盐渍化的区域面积占比,表征土壤盐渍化程度。

2.1.2 指标的分级标准

(1) 地下水可开采资源模数

利用新一轮地下水资源评价成果^[18]中全国 26 个

地下水资源一级区的地下水可开采资源模数数据,用自然断点法初步分析并结合专家判断后,划分地下水可开采资源模数 5 个等级的分级标准见表 3 所示,分别代表区域地下水资源量很丰富、丰富、比较丰富、一般丰富、不丰富。

表 3 地下水可开采资源模数分级标准
Table 3 Classification of module of exploitable groundwater resources $/(\times 10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1})$

等级	低	较低	中	较高	高
地下水可开采资源模数	<2	[2, 3.5)	[3.5, 7.5)	[7.5, 10)	≥ 10

(2) 地下水开采程度

对应承载状态的 3 个等级,划分地下水开采程度为较低、适中、超采 3 个等级。其中,以地下水开采程度大于 100%,即地下水开采量超过地下水可开采资源量,为超采;参考新一轮地下水资源评价^[18]中对我国各省份地下水开采程度的分析标准,以 70% 作为临界值,当地下水开采量介于 70% ~ 100% 之间时定义为适中,地下水开采量小于 70% 定义为较低。

(3) 其他修正指标

以 2018 年出版的《中国地质环境图系》中《中国地下水环境图》、《中国地面沉降现状图》、《中国荒漠化土地分布图》^[26, 28, 30]中化学组分含量及背景值高的地下水分布数据、地面沉降速率等值线数据、土壤盐渍化分布数据、海水入侵分布数据,计算得出分省的 5 个修正指标评价数据,然后按照自然断点法对各类数据进行相应分类后确定了分级阈值。参考该分级阈值,划分修正指标的分级标准见表 4 所示。

表 4 地下水资源承载能力修正指标分级标准
Table 4 Criteria of revising indexes of the carrying capacity of groundwater resources

等级	低/好	中	高/差
地下水背景质量等级	<10%	[10%, 38%)	$\geq 38\%$
地下水污染程度	<2%	[2%, 10%)	$\geq 10\%$
地面沉降程度	<12%	[12%, 28%)	$\geq 28\%$
土壤盐渍化程度	<2%	[2%, 6%)	$\geq 6\%$
海水入侵程度	<1%	[1%, 2%)	$\geq 2\%$

2.2 评价流程

(1) 基础资料收集与分析

以收集最新、精度最高的资料为宜。包括水文地质普(调)查、地下水资源评价、地下水监测、地下水污染调查、地下水开发引发的问题、地下水超采评价、地下水资源利用、保护与管理等相关资料。分析评价区

水文地质条件、地下水分布及其数量质量特征;分析地下水开发利用状况及地下水水位、水量、水质等动态变化规律及控制因素;分析不合理开发利用地下水引发的生态、环境地质问题。

(2) 评价单元划分

为兼顾科学性和实用性,地下水资源承载能力评价单元分为自然单元和行政单元 2 类。自然单元采用地下水资源分区单元,根据地下水补径排条件、地下水化学特征等水文地质条件划分。行政单元采用县级及以上行政单元。承载本底评价原则上以自然单元作为基本评价单元,也可表达至行政单元。承载状态评价以行政区域为评价单元。

(3) 评价指标体系构建

根据评价区的实际情况,充分考虑不合理开发利用地下水引发的环境地质问题,选取合适的修正指标,结合 2 项必选的基础指标,建立评价指标体系。

(4) 评价数据整理及补充调查

按照评价指标体系,梳理基础资料,整理原始评价数据。对地下水补径排条件变化较大区域,地下水开采现状不清或尚不满足评价要求的区域,应开展补充调查评价工作,重新计算地下水天然补给资源量和可开采资源量。针对重点规划建设区、生态环境脆弱区等重要评价区域或数据陈旧、不足、缺失区域,适当开展调查,修正、补充评价数据。

(5) 承载能力综合评价

从地下水可开采资源模数、开采程度等单指标计算入手,先开展承载本底、承载状态的初步评价,再依次进行各修正指标的评价。承载本底的修正指标地下水背景质量等级分别以自然单元、行政单元进行评价。地下水背景质量等级评价结果为差,则承载本底评价结果下降一级。承载状态的修正指标以行政单元评价。任一项或多项修正指标评价结果为高,承载状态评价结果均下降一级。基于承载本底和承载状态最终评价结果,按表 5 确定承载能力综合等级。

表 5 地下水资源承载能力综合等级判断标准

Table 5 Criteria of the carrying capacity of comprehensive groundwater resources

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

3 京津冀地区地下水资源承载能力评价

3.1 评价指标与数据来源

京津冀地区水资源匮乏,多年平均水资源量只有 $3.70 \times 10^{10} \text{ m}^3$,不足全国的 1.3%,却承载了全国约 10% 的人口^[31]。地下水作为京津冀地区工农业和生活用水的主要供水水源,自 20 世纪 90 年代以来地下水供水比重始终保持在 70% 以上。地下水长期过量开采导致该地区出现严重的区域地下水位下降、地面沉降、地下水污染、湿地退化、土壤盐碱化、海水入侵等问题。结合该区域特点和现有数据基础,除地下水可开采资源模数、地下水开采程度 2 项基础指标外,以地下水背景质量等级、地面沉降程度、土壤盐渍化程度 3 项指标作为修正指标,构建京津冀地区地下水资源承载能力评价的指标体系。

数据来源上,地下水可开采资源量是在“新一轮地下水资源评价”的基础上,根据各省、各地区地下水资源评价的最新成果进行了更新;地下水开采量数据采用近年来各省水利年鉴数据;化学组分含量及背景值高的地下水分布数据、地面沉降速率等值线数据、土壤盐渍化分布数据分别来自 2018 年出版的《中国地质环境图系》中《中国地下水环境图》、《中国地面沉降现状图》、《中国荒漠化土地分布图》^[26, 28, 30]。

3.2 评价结果

京津冀 202 个县级行政单元中,承载本底等级为高的有 77 个,较高的有 16 个,中等的有 39 个,较低的有 37 个,低的有 33 个。从地下水资源分区上看,承载本底高、较高的 93 个县级行政单元主要分布在潮白河、蓟运河、滦河、漳卫河、子牙河流域的山前冲洪积平原,以及子牙河流域上游的山地区,水质以孔隙水为主,基本是淡水;承载本底低、较低的 70 个县级行政区主要分布在冀北的内陆河流域、辽河大凌河流域的山地丘陵区,以及黄河、漳卫河、子牙河流域的咸水分布广泛的滨海冲积海积平原区。

承载状态等级为超载的有 151 个,均衡的有 25 个,盈余的有 26 个。超载的县级行政区连片分布于平原区,在山区也有分布,如承德、张家口、秦皇岛等地。以上地区地下水的开采量普遍高于可开采资源量,平原地区的地面沉降问题严重。

综合承载本底和承载状态结果得出,承载能力等级为强的有 18 个,较强的有 72 个,中等的有 19 个,较弱的有 36 个,弱的有 57 个。承载能力强、较强的县级行政区全部位于漳卫河、子牙河流域的上游山区、山前

冲积平原,地下水资源丰富、水质较好、地下水开发利用程度较低或适中,几乎没有地下水开发引发的生态环境问题;承载能力较强的县级行政区分布从山区到平原区都有;承载能力中等的县级行政区分布较为分散,主要是在承载能力强、较强县级行政区的周边,地下水资源较为丰富,但开发利用程度高,地面沉降问题较为严重;承载能力弱、较弱的县级行政区主要分布在冀北的内陆河流域、辽河大凌河流域、大清河流域的山地丘陵区,以及黄河、子牙河、滦河流域的滨海冲积海积平原区,地下水资源量不够丰富,部分地区水质较差,开采程度高,有严重的地面沉降问题。

3.3 结果分析

地下水资源的承载本底主要还是由资源量的多寡决定,上述京津冀地区的评价结果符合我国地下水资源平原较山区多、南方较北方多的总体规律。

将京津冀地区地下水资源承载状态评价结果与根据《地下水超采区评价导则》评价出的地下水超采区分析后发现,北京市、天津的 17 个超载行政区全部位于超采区中,河北省 134 个超载的县级行政区有 108 个位于超采区内,其余 26 个主要分布在承德、秦皇岛地区以及张家口的市区。差异原因在于,按照承载状态基础指标开采程度的分级标准,承德、秦皇岛、张家口地区开采程度高于 100% 的县级行政区都为超采,但《地下水超采区评价导则》并没有将开采程度大于 100% 作为确定超采区的必须条件。综合以上,本文所评价出的京津冀地区地下水资源承载能力超载的县级行政区与超采区评价的一致性高达 82%。

京津冀地区在历史上很长一段时间开采程度都非常高。据新一轮地下水资源评价,1999 年京津冀三省开采程度均超过 100%,河北省更是达到 128%。平原地区深层水、浅层水的过量开采引发了大面积分布、发展形势较难控制的地面沉降问题,生态维持和地质环境稳定条件得以破坏。从总体看来,京津冀地区地下水资源承载能力水平是偏弱的。但近年来,随着地下水压采政策的实施,很多地区的地下水开采量减少,仅 2018 年度就较上年减少约 $1.0 \times 10^9 \text{ m}^3$ ^[32]。因此,针对超载区域通过实施地下水压采降低地下水开采量,实现地下水采补平衡,并逐步修复地下水不合理开采引发的地质环境问题,将有助于提升京津冀区域地下水资源承载能力水平,使地下水在京津冀地区凸显更重要的战略价值。

4 结论与讨论

4.1 评价方法评述

(1) 评价方法总体上具备科学性和较强的可操作性

从科学性来看,该方法将评价对象地下水的数量、质量、生态属性作为一个整体来考虑,将反映资源量多少的指标作为基础指标,同时兼顾质量、生态,将反映地下水的数量、生态环境影响等对承载能力具有刚性约束的其他指标作为修正指标,能够较为全面地反映地下水资源承载能力的状况。此外,指标分级标准通过实际数据计算后,权衡实际情况加以适当修正。京津冀分县区的评价结果虽只选取了部分指标,但总体结果看来也是较为合理的。

从可操作性来看,评价时采用的基础数据是基于地下水评价、调查、监测工作较易获取或所能掌握的数据,如地下水可开采资源量、地下水质量是区域地下水资源评价所能获取的数据,地下水开采量是在县级及

以上层面上较易获取的统计数据,地面沉降速率、土壤盐渍化是通过 InSAR 或遥感数据可评价出的基础指标。

(2) 更具地区特色的修正指标探讨略有不足

为了构建宏观层面的评价方法,指标多是笼统的概念,以模数、比率等形式体现,而我国幅员辽阔、自然地理地质及水文地质条件迥异,特别应该在修正指标中区别体现。如表示地面沉降严重程度的指标,在该方法中为了可操作性更强,是以地面沉降速率大于 10 mm/a 的区域占比情况表征,实际上就危害程度而言,用该种计算方法尚不足以完全反映出危害的差异性,运用不同地面沉降速率、沉降量的叠加的计算方法值得深入讨论。又如盐渍化,本身成因很复杂,除去人为活动干扰外,自然条件下气候干旱、土壤蒸发强烈、潜水水位及可溶性盐量高等都是诱因,要判断出是否是地下水相关的各类因素导致,还有待于结合实际问题具体分析。

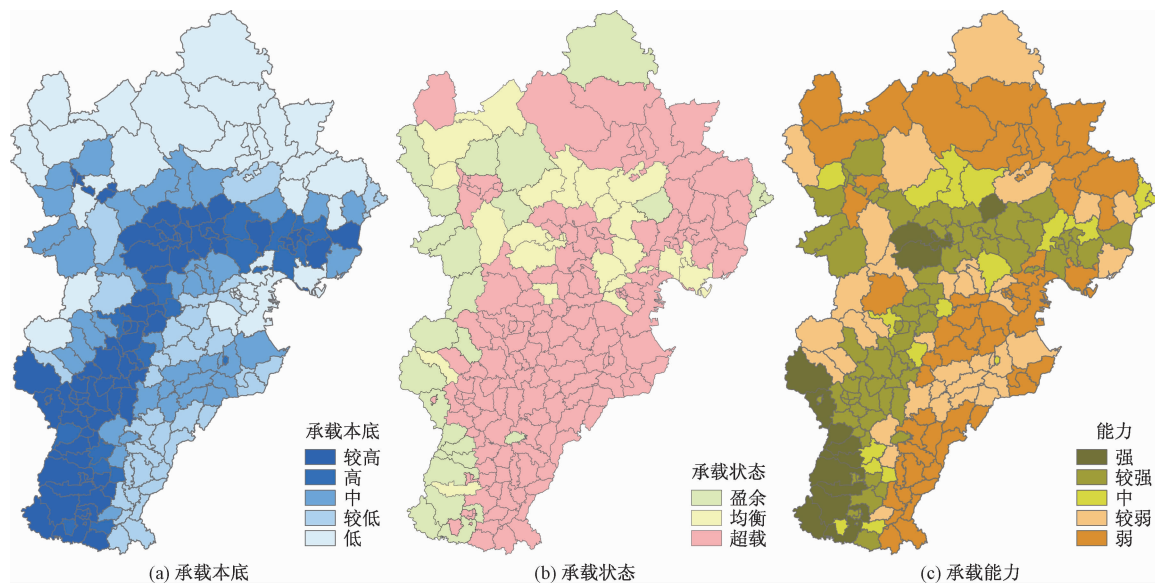


图2 京津冀地区地下水资源承载能力评价结果图

Fig. 2 Results of the carrying capacity of groundwater resources in the Beijing-Tianjin-Hebei region

4.2 相关思考与建议

(1) 根据承载能力结果可支撑制定区域地下水资源保护与开发战略

地下水资源承载能力各单项指标评价结果基本可以反映区域地下水资源禀赋及开发利用现状,可根据评价结果,研究划分面向不同目标的地下水资源保护与开发利用战略目标,如在西北内陆地区地下水资源贫乏、原生水质差,局部盐渍化、沙漠化严重,则需制定

以改善原生水质提升可开采资源量、涵养地下水、发挥地下水保护绿洲与改善植被生态环境的管理对策;如北方、中部平原地区地下水污染、地下水超采引发的地面沉降问题严重,则需制定以防治地下水污染、控制地下水开采为主要目标的管理对策。

(2) 探讨地表水地下水一体的水资源承载能力综合评价方法

由于地表水和地下水之间相互联系又相互转化的

关系,在面向支撑国土空间规划的“双评价”研究时,将地表水、地下水两者结合起来共同开展承载能力研究将有助于获取更深刻的认识。如深入开展“以水四定”研究,分析区域水资源禀赋和合理用水需求,权衡制定取用水总量,通过加强地表水、地下水资源合理配置,合理测算地下水需水量及可供水量,并提出人口控制、用地减量、产业发展方向及城市空间发展布局的合理目标等。

(3) 推进数量、质量、生态一体的地下水资源承载能力监测预警体系

基础评价数据的获取是决定水资源承载能力研究能否真正发挥作用的关键。而扎实的数据获取有赖于建立数量、质量、生态一体的监测体系。我国地下水监测工作从20世纪50年代初期发展至今,经历了从单纯的水位监测,到水位水温水质多项指标监测的历程,目前已启动的国家地下水监测工程共建设完成20469个监测站点,首次构建国家级地下水三维自动化监测网,实现对中国主要平原盆地和岩溶含水层地下水水位、水质的有效监测。但在研究地下水承载能力评价方法的过程中,发现对海水入侵、水质污染等数据获取不足。因此,建议依托国家资源环境监测预警机制建设,在水资源开发利用造成重大生态问题的区域,建立数量、质量、生态一体的地下水资源承载能力监测预警监测体系,以全面、动态评估区域地下水资源承载能力状况。

参考文献 (References):

- [1] 樊杰. 资源环境承载能力和国土空间开发适宜性评价方法指南[M]. 北京: 科学出版社, 2019. [FAN J. Assessment guidelines for resource and environmental carrying capacity and territorial development suitability [M]. Beijing: Science China Press, 2019. (in Chinese)]
- [2] 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, 2018. [LI R M, YANG N, LI X L, et al. Exploration and practice of resource and environment carrying capacity evaluation method [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2018. (in Chinese)]
- [3] COHEN J E. Population growth and earth's human carrying capacity [J]. Science, 1995, 269: 341 - 346.
- [4] SEIDL I, TISDELL C A. Carrying capacity reconsidered: from Malthus' population theory to cultural carrying capacity [J]. Ecological Economics, 1999, 31(3): 395 - 408.
- [5] FALKENMARK M, LUNDQVIST J, WIDSTRAND C. Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches: aspects of vulnerability in semi-arid development [J]. Natural Resources Forum, 1989, 13(4): 258 - 267.
- [6] BROWN A, MATLOCK M D. A review of water scarcity indices and methodologies [R]. Fayetteville: University of Arkansas, 2011.
- [7] RICHTER B D, MATHEWS R, HARRISON D L, et al. Ecologically sustainable water management: managing river flows for ecological integrity [J]. Ecological Applications, 2003, 13(1): 206 - 224.
- [8] BERNHARDT E, BUNN S, HART DD, et al. Perspective: The challenge of ecologically sustainable water management [J]. Water Policy, 2006, 8(5): 475 - 479.
- [9] 施雅风, 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. [SHI Y F, QU Y G. Water resource carrying capacity and rational utilization in Urumqi River area [M]. Beijing: Science China Press, 1992. (in Chinese)]
- [10] 冯尚友, 刘国全. 水资源持续利用的框架 [J]. 水科学进展, 1997, 8(4): 301 - 307. [FENG S Y, LIU G Q. A holistic framework for sustaining water resources utilization [J]. Advances in Water Science, 1997, 8(4): 301 - 307. (in Chinese)]
- [11] 屈吉鸿, 陈南祥, 黄强, 等. 改进的逼近理想解在地下水资源承载力评价中的应用 [J]. 水利学报, 2008, 39(12): 1309 - 1315. [QU J H, CHEN N X, HUANG Q, et al. Improved TOPSIS method for evaluating groundwater carrying capacity [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(12): 1309 - 1315. (in Chinese)]
- [12] 任玉忠, 叶芳, 高树东, 等. 基于主成分分析的潍坊市水资源承载力评价研究 [J]. 中国农学通报, 2012, 28(5): 312 - 316. [REN Y Z, YE F, GAO S D, et al. Study on water resources carrying capacity in Weifang City based on principal component analysis [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(5): 312 - 316. (in Chinese)]
- [13] 王荣晶, 张运凤, 张永华, 等. 大型灌区地下水资源承载力评价指标体系及评价方法研究 [J]. 华北水利水电学院学报, 2009, 30(3): 4 - 8. [WANG R J, ZHANG Y F, ZHANG Y H, et al. Study on the theory and evaluation method of large-scale irrigation

- district groundwater resources carrying capacity [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 2009, 30(3): 4–8. (in Chinese)]
- [14] 田静宜,王新军. 基于熵权模糊物元模型的干旱区水资源承载力研究——以甘肃民勤县为例[J]. 复旦学报(自然科学版), 2013, 52(1): 86–93. [TIAN J Y, WANG X J. Assessment of the carrying capacity of water resources in arid areas based on an entropy fuzzy matter element model—A case study in Minqin County, Gansu Province[J]. Journal of Fudan University (Natural Science), 2013, 52(1): 86–93. (in Chinese)]
- [15] 杨琳琳,李波,付奇. 基于BP神经网络模型的新疆水资源承载力情景分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2016, 52(2): 216–222. [YANG L L, LI B, FU Q. Scenario analysis of water resources carrying capacity in Xinjiang based on BP neural network model [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2016, 52(2): 216–222. (in Chinese)]
- [16] 何仁伟,刘邵权,刘运伟. 基于系统动力学的中国西南岩溶区的水资源承载力——以贵州省毕节地区为例[J]. 地理科学, 2011, 31(11): 1376–1382. [HE R W, LIU S Q, LIU Y W. Application of system dynamics in analyzing the carrying capacity of water resources in karst region of southwest China—A case study in Bijie region, Guizhou Province [J]. Scientia Geographica Sinica, 2011, 31(11): 1376–1382. (in Chinese)]
- [17] 张光辉,费宇红,刘春华,等. 华北平原灌溉用水强度与地下水承载力适应性状况[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 1–11. [ZHANG G H, FEI Y H, LIU C H, et al. Adaptation between irrigation intensity and groundwater carrying capacity in North China Plain [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(1): 1–11. (in Chinese)]
- [18] 张宗祜,李烈荣. 中国地下水资源:综合卷[M]. 北京:中国地图出版社,2004. [ZHANG Z H, LI L R. Groundwater resources of China [M]. Beijing: Sino Maps Press,2004. (in Chinese)]
- [19] 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. [LIU M, NIE Z L, WANG J Z, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of groundwater resources carrying capacity in North China Plain [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(6): 311–315. (in Chinese)]
- [20] 王焰新. 地下水污染与防治[M]. 北京:高等教育出版社,2007. [WANG Y X. Groundwater contamination [M]. Beijing: Higher Education Press, 2007. (in Chinese)]
- [21] 郭华明,郭琦,贾永锋,等. 中国不同区域高砷地下水化学特征及形成过程[J]. 地球科学与环境学报, 2013, 35(3): 83–96. [GUO H M, GUO Q, JIA Y F, et al. Chemical characteristics and geochemical processes of high arsenic groundwater in different regions of China [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2013, 35(3): 83–96. (in Chinese)]
- [22] 张二勇,张福存,钱永,等. 中国典型地区高碘地下水分布特征及启示[J]. 中国地质, 2010, 37(3): 797–802. [ZHANG E Y, ZHANG F C, QIAN Y, et al. The distribution of high iodine groundwater in typical areas of China and its inspiration [J]. Geology in China, 2010, 37(3): 797–802. (in Chinese)]
- [23] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 地下水质量标准 GB/T 14848—2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017. [General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Standard for groundwater quality GB/T 14848—2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017. (in Chinese)]
- [24] 中华人民共和国卫生部,中国国家标准化管理委员会. 生活饮用水卫生标准 GB 5749—2006[S]. 北京:中国标准出版社,2007. [Ministry of Health of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Standards for drinking water quality GB 5749—2006 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2007. (in Chinese)]
- [25] 武选民,文冬光,吴登定,等. 我国主要平原盆地地下水资源可持续利用的几点思考[J]. 水文地质工程地质, 2005, 32(6): 96–99. [WU X M, WEN D G, WU D D, et al. Some thoughts on sustainable utilization of groundwater resource in the main large Plains and basins of China [J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2005, 32(6): 96–99. (in Chinese)]
- [26] 孙继超,荆继红. 中国地下水环境图(1:500万)

- [M]. 北京:地质出版社,2017. [SUN J C, JIN J H. Map of groundwater environment in China (1:5 000 000) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017. (in Chinese)]
- [27] 文冬光,林良俊,孙继朝,等. 中国东部主要平原地下水质量与污染评价[J]. 地球科学,2012, 37(2): 220-228. [WEN D G, LIN L J, SUN J C, et al. Groundwater quality and contamination assessment in the main Plains of Eastern China [J]. Earth Science,2012, 37(2): 220-228. (in Chinese)]
- [28] 王云龙. 中国地面沉降现状图(1:500万)[M]. 北京:地质出版社,2017. [WANG Y L. Map of land subsidence in China(1:5 000 000) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017. (in Chinese)]
- [29] 高茂生,骆永明. 我国重点海岸带地下水资源问题与海水入侵防控[J]. 中国科学院院刊,2016,31(10): 1197-1203. [GAO M S, LUO Y M. Change of groundwater resource and prevention and control of seawater intrusion in coastal zone [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2016,31(10): 1197-1203. (in Chinese)]
- [30] 孙永军,高会军. 中国荒漠化土地分布图(1:500万)[M]. 北京:地质出版社. 2018. [SUN Y J, GAO H J. Desertification land distribution map of China (1:5 000 000) [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2018. (in Chinese)]
- [31] 席北斗,李娟,汪洋,等. 京津冀地区地下水污染防治现状、问题及科技发展对策[J]. 环境科学研究,2019,32(1): 1-9. [XI B D, LI J, WANG Y, et al. Strengthening the innovation capability of groundwater science and technology to support the coordinated development of Beijing-Tianjin-Hebei region: status, problems and goals [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(1): 1-9. (in Chinese)]
- [32] 河北省水利厅. 2018年河北水资源公报[R]. 石家庄:河北省水利厅,2019. [Water Resources Department of Hebei Province. Report of Water Resources in Hebei, 2018 [R]. Shijiazhuang: Water Resources Department of Hebei Province, 2019. (in Chinese)]