

doi: 10.12029/gc20210409

李海涛, 凤蔚, 王凯霖, 赵凯, 李刚, 张源, 李木子, 孙璐, 陈一超, 尤冰. 2021. 雄安新区地下水资源概况、特征及可开采潜力[J]. 中国地质, 48(4): 1112–1126.

Li Haitao, Feng Wei, Wang Kailin, Zhao Kai, Li Gang, Zhang Yuan, Li Muzi, Sun Lu, Chen Yichao, You Bing. 2021. Groundwater resources in Xiong'an New Area and its exploitation potential[J]. *Geology in China*, 48(4): 1112–1126(in Chinese with English abstract).

雄安新区地下水资源概况、特征及可开采潜力

李海涛¹, 凤蔚¹, 王凯霖², 赵凯¹, 李刚¹, 张源¹, 李木子¹, 孙璐¹, 陈一超¹, 尤冰³

(1. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 2. 生态环境部环境规划院, 北京 100012;
3. 河北水文工程地质勘察院, 河北 石家庄 050021)

摘要: 地下水资源在中国社会经济发展中发挥重要作用, 特别是在地表水资源相对匮乏的北方地区。掌握一个地区地下水资源状况、动态变化特征及可开采潜力, 对该地区的供水安全保障至关重要。本文选择雄安新区, 在近年来开展的区域水文地质调查、监测及综合研究等成果基础上, 结合前人研究, 对雄安新区区域水文地质条件、地下水动态变化特征等进行分析总结; 以恢复地下水降落漏斗为地下水可持续开采利用方案的目标, 从白洋淀流域平原区尺度, 设置现状开采条件、河流补水、工农业节水及地下水禁(限)采等不同情景方案, 采用地下水数值模拟技术, 综合分析不同情景 30 年后的预测结果, 提出白洋淀流域平原区地下水可持续开采利用方案; 在流域地下水可持续开采利用方案基础上, 分析雄安新区地下水可开采的最大资源量, 进而评价雄安新区地下水可开采潜力。结果显示, 雄安新区区域水文地质条件相对简单, 浅层富水性中等, 深层富水性较强; 地下水位为多年下降状态, 近年来, 浅、深层地下水整体呈企稳或回升状态, 局部地区仍有所下降; 地下水质量总体良好, 且较为稳定。根据评价结果, 雄安新区地下水可开采潜力约为 $1.80 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 其中, 浅层地下水可开采潜力约为 $1.50 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 深层地下水可开采潜力约为 $0.30 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

关键词: 地下水资源; 可开采潜力; 水文地质调查; 地质调查工程; 雄安新区

中图分类号: P641.6; P641.8 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2021)04-1112-15

Groundwater resources in Xiong'an New Area and its exploitation potential

LI Haitao¹, FENG Wei¹, WANG Kailin², ZHAO Kai¹, LI Gang¹,
ZHANG Yuan¹, LI Muzi¹, SUN Lu¹, CHEN Yichao¹, YOU Bing³

(1. China Institute of Geo-Environmental Monitoring, Beijing 100081, China; 2. Chinese Academy of Environmental Planning, Beijing 100012, China; 3. Hydrological Engineering and Geological Prospecting Institute of Hebei Province, Shijiazhuang 050021, Hebei, China)

Abstract: Groundwater resources have played an important role in the national social and economic development, especially in the northern region where surface water resources are relatively scarce. It is very important for security guarantee of water supply to understand hydrogeology, dynamic characteristics of groundwater, and exploitation potential of groundwater resources in a certain area. The Xiong'an New Area was selected as pilot area to analyze and summarize the regional hydrogeology and dynamic

收稿日期: 2021-04-15; 改回日期: 2021-05-30

基金项目: 中国地质调查局项目“雄安新区资源环境承载能力监测和透明雄安数字平台建设”(DD20189142)资助。

作者简介: 李海涛, 男, 1979 年生, 博士, 主要从事水工环地质方面调查监测及研究工作; E-mail: lihaitao@mail.cgs.gov.cn。

characteristics of groundwater based on hydrogeological survey and groundwater monitoring in recent years as well as the previous achievements. Aiming at recovering groundwater depression cones as the sustainable exploitation strategy of groundwater, different scenarios were put forward, including current condition, river recharge, water-saving from agricultural and industrial water consumption, and decrease or prohibition of groundwater pumping. Using groundwater numerical simulation technology, the prediction results of different scenarios after 30 years were comprehensively analyzed, and the sustainable exploitation and utilization scheme of groundwater in plain area of Baiyangdian Watershed was put forward. The results show that the hydrogeology is relatively simple in Xiong'an New Area with normal water-bearing capacity in shallow aquifers and good in deep aquifers. The groundwater level has been declining for many years, and getting stable or rising up in the past one or two years. The quality of groundwater is good and stable both in shallow and deep aquifers. According the assessment, the exploitation potential of groundwater in Xiong'an New Area is about 1.80×10^8 m³/a, with 1.50×10^8 m³/a in shallow aquifers and 0.30×10^8 m³/a in deep aquifers.

Key words: groundwater resources; exploitation potential; hydrogeological survey; geological survey engineering; Xiong'an New Area

About the first author: LI Haitao, male, born in 1979, doctor, engaged in investigation, monitoring and research of hydrogeology, engineering geology and environmental geology; E-mail: lihaitao@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey "Capacity monitoring of resources and environments in Xiong'an New Area and construction of transparent Xiong'an digital platform (No. DD20189142)".

1 引言

水是生命资源、生产之要、生态之基,是山水林田湖草的灵魂。在2014年,习近平总书记就提出了“城市发展要坚持以水定城、以水定地、以水定人、以水定产的原则”,可见水资源具有举足轻重的作用。地下水资源作为水资源的重要组成部分,在中国发展社会经济、推进城市化进程、建设生态文明等方面发挥了重要作用,特别是在中国地表水资源相对匮乏的北方地区(潘文灿,2020)。

自20世纪90年代以来,随着农业规模的不断扩大和城市化进程的持续推进,华北地区对水资源的需求越来越大,地下水长期处于超采状况,在区域上形成了大大小小的地下水降落漏斗,在局部地区引起了地面沉降等地质环境问题(李文鹏等,2020)。雄安新区属于一个行政区划,针对性的地下水资源详细评价或研究相对较少,更多的是从华北平原(Liu et al., 2010; 孟素花等, 2011; Qin et al., 2012; Cao et al., 2013; Wang et al., 2014; 王仕琴等, 2014; 石建省等, 2014; Fei et al., 2015; Liu et al., 2016; 赖冬蓉等, 2018; 狄胜同等, 2020; 王雨婷等, 2021)、大清河流域(刘克, 2009;)、白洋淀流域(吕晨旭等, 2010; 周婧, 2010; 袁瑞强和宋献方, 2017; Zhang et al., 2018)等不同区域尺度对地下水资源进

行定性或者定量的评价和研究。随着科学技术的不断进步,针对地下水资源数量、质量及其可持续发展研究,也从均衡法等传统评价方法,发展到以数值模拟技术为主的新技术方法体系(张二勇等, 2009; 白利平等, 2011; 周超等, 2018; 程勤波等, 2018; 王涵等, 2018; 赵科峰等, 2020)。

城市地质调查是保障城市科学规划、安全建设和有效运行的基础性工作,也是优化城市结构布局、拓展城市发展空间、推进绿色城市建设、提高城市安全保障水平等方面的迫切需求(林良俊等, 2017; 殷志强等, 2018; 马震等, 2021)。2017年4月1日,中共中央国务院宣布在河北设立建设雄安新区以来,受到了社会各界的广泛关注。“城市建设,地质先行”,建设雄安新区作为国家重大战略和千年大计,地质工作先行显得更为重要,作为地质工作的分支——水文地质工作,就是要摸清和掌握区域水文地质条件,回答雄安新区地下水资源状况以及可开采潜力等问题。基础水文地质条件、地下水动态变化特征及地下水资源开采潜力等是雄安新区城市科学规划和安全建设的重要依据和基础资料。在此背景下,自然资源部中国地质调查局迅速响应国家重大战略部署,组织开展雄安新区综合地质调查工作(吴启华和林良俊, 2017)。本研究就是结合以往区域研究成果、1:5万水文地质调查(张源

等,2018)成果以及后期水文地质调查评价工作,对雄安新区基础水文地质条件、地下水动态变化特征、地下水资源状况及开采潜力等进行评价研究,为雄安新区规划建设、地下水资源可持续利用与科学管理、国土空间规划、生态环境保护等提供技术支撑。

2 研究区概况

雄安新区地处北京、天津、保定腹地,距北京、天津均为105 km,距石家庄155 km,距保定30 km,距北京大兴新机场55 km,主要包括河北雄县、容城、安新三县行政辖区(含白洋淀水域),任丘市郑州镇、苟各庄镇、七间房乡和高阳县龙化乡,规划面积约1770 km²。新区地势相对平坦,坡降0.2‰~0.7‰,西部和北部略高、东部和南部稍低;属暖温带季风型大陆性半湿润半干旱气候,年平均气温12.7℃,多年平均降水量478 mm,多年平均最大蒸发量1762 mm。雄安新区内最大的水体为白洋淀湿地,素来享有“华北之肾”、“华北明珠”的美称,也是河北著名的旅游胜地。从白洋淀湿地的南、西、北三个方向接纳9条入淀河流,分别为潞龙河、孝义河、唐河、清水河、府河、漕河、瀑河、萍河、白沟引河,出淀河流为东部的赵王新河(易雨君等,2020)(图1)。

3 区域水文地质条件

雄安新区第四系地下水主要为松散岩类孔隙水。水平方向上,从华北平原地下水系统划分来看(张兆吉等,2009),雄安新区地下水系统隶属于海河流域大清河平原地下水系统。垂向方向上,结合前人研究成果,一般分为4个主要含水层组,传统上,往往将I和II两个含水层组中的地下水称为“浅层地下水”,III和IV两个含水层组中的地下水称为“深层地下水”。

根据本次开展的水文地质调查工作以及前人研究成果,雄安新区浅层地下水包括为潜水和浅层承压水,含水层岩性主要以中、细、粉、粉细砂为主;单井涌水量主要在1000~2000 m³/d,属于中等富水区(图2),雄县东南部一带相对较小,单井涌水量800~1000 m³/d,属于弱富水区,唐河两侧相对较大,单井涌水量为2000~3000 m³/d,属于较强富水区;浅层地下水含水层组厚度一般小于40 m,底界深度一般为120~200 m。深层地下水为承压水,含水层岩性主要以粗、中、细砂为主;单井涌水量主要在2000~3000 m³/d,属于较强富水区(图3),雄县东南部一带及安新县西部局部地区属中等富水区,单井

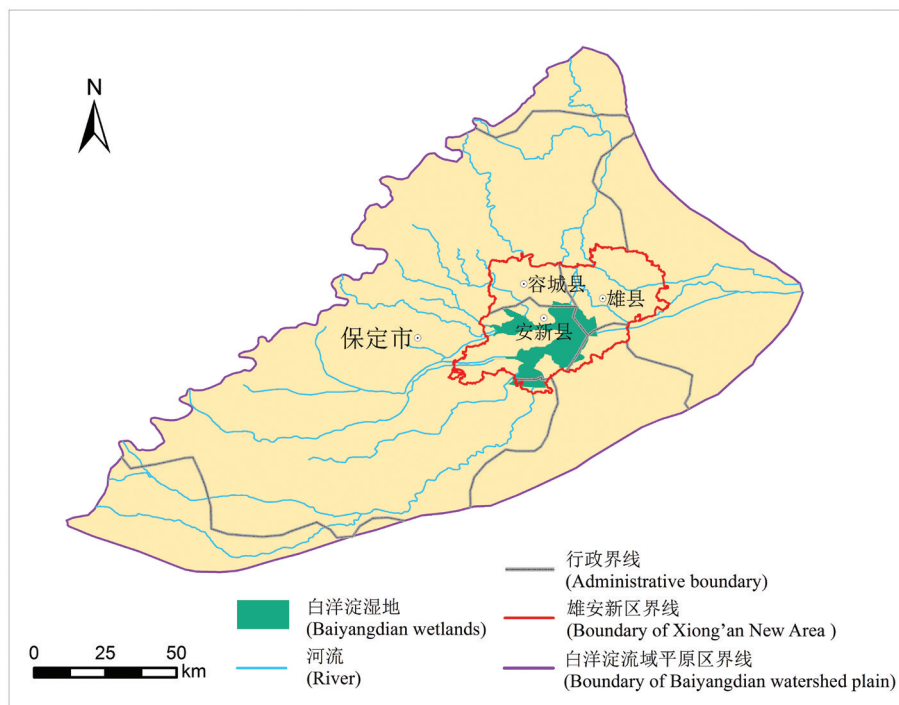


图1 雄安新区地理位置及水系概图

Fig.1 Location and drainage of Xiong'an New Area

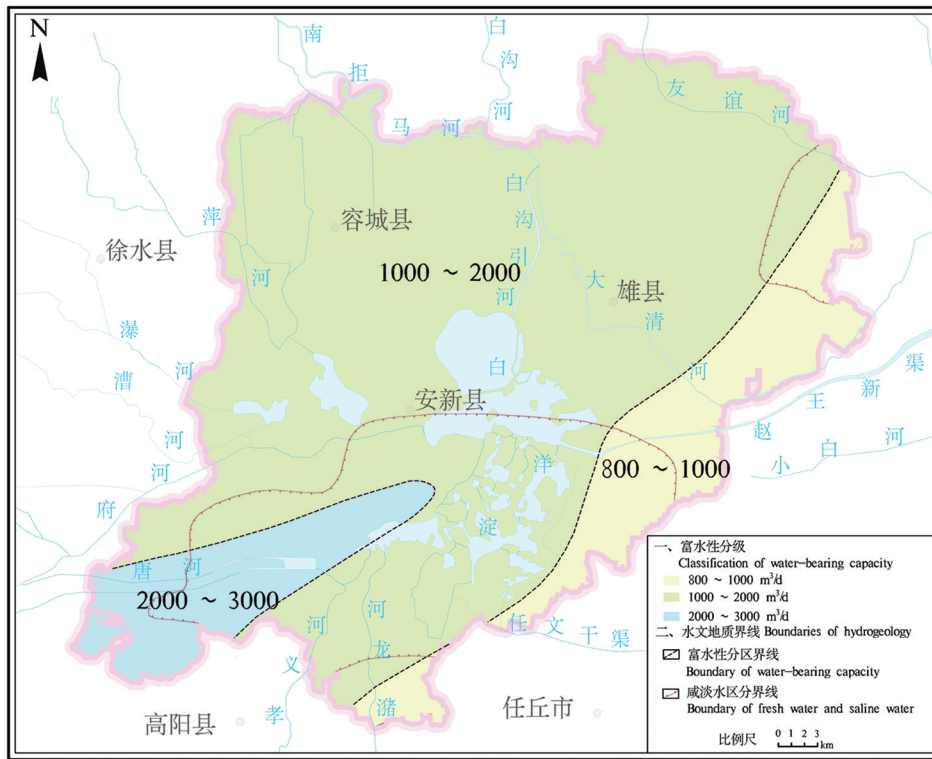


图2 研究区水文地质略图(浅层地下水含水层组)
Fig.2 Hydrogeological map of shallow aquifers in Xiong'an

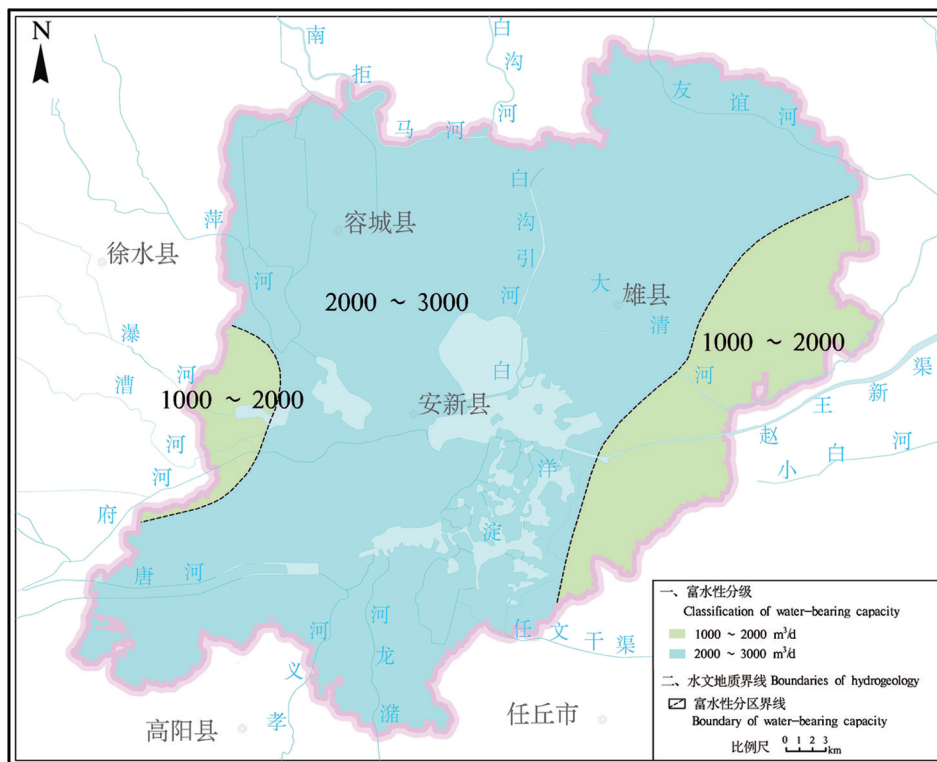


图3 研究区水文地质略图(深层地下水含水层组)
Fig.3 Hydrogeological map of deep aquifers in Xiong'an

涌水量 1000~2000 m³/d,与浅层地下水相比,深层地下水富水性较好;深层地下水含水层组厚度一般在 100~180 m,底界埋深一般在 385~550 m。

浅层地下水主要接受大气降水补给,同时,接受农业灌溉、地表水入渗补给及地下水侧向径流补给。地下水主要排泄方式为人工开采,其次为地下水径流和局部地区的蒸发排泄。根据水文地质调查现状条件下(2020年6月),雄安新区及周边地区浅层地下水总体上,由西北向东南方向流动;但在雄安新区内部,以白洋淀为中心,地下水位相对较高,进而形成地下水“水丘”,地下水由白洋淀向四周地下水位较低的区域径流(图4)。浅层地下水水位埋深一般在 5~20 m,白洋淀周边区域地下水位埋深较浅。浅层地下水水化学类型以 HCO₃型为主,自西北向东南方向地下水化学类型主要由 HCO₃-Ca·Mg(Mg·Ca)型向 HCO₃-Na·Mg(Mg·Na)、SO₄(SO₄·HCO₃)-Na·Mg(Na·Ca)型过渡,在雄安新区南部地区存在一定的咸水区。

深层地下水主要接受侧向径流补给,垂向补给较少。排泄方式以人工开采为主,其次是侧向径流排泄。现状条件下(2020年6月),雄安新区及周边

深层地下水总体由西北向东南径流;在安新县西部局部,存在地下水位流向不尽一致的地区(图5)。深层地下水水位埋深一般为 25~35 m。深层地下水水化学类型以 HCO₃-Na (Ca·Mg)型为主。

4 雄安新区地下水动态变化特征

4.1 地下水水位动态变化特征

雄安新区浅层地下水位多年动态变化主要受降雨、农业灌溉及人工开采的影响,而深层地下水位多年动态变化则主要受人工开采的影响。雄安新区地下水开采历史由来已久,农业灌溉、工业用水主要开采浅层地下水,生活用水主要开采深层地下水。据不完全统计,雄县、安新、容城三县 2014年各类地下水开采井总数达 25000 余眼。2014年后,河北省政府开始实施地下水超采区禁限采措施;2017年,对地下水超采区进一步加大禁限采力度,雄安新区虽然不处于超采范围,但雄县、安新、容城城区仍被列为浅层地下水禁采区;安新县、雄县城区被列为深层地下水禁采区。

根据雄安新区地下水长期监测数据分析(图6,图7),1996—2014年,随着农业生产规模不断扩大

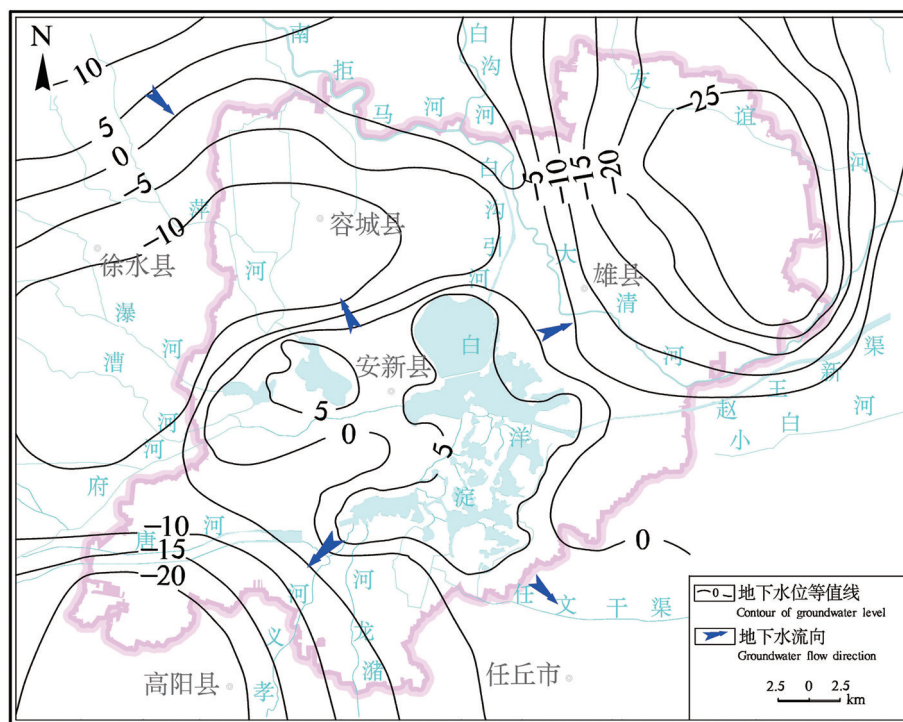


图4 雄安新区浅层地下水位等值线图(据2020年度6月份地下水统测数据)

Fig.4 Contour of groundwater level in shallow aquifers in Xiongan (Data from groundwater survey in June, 2020)

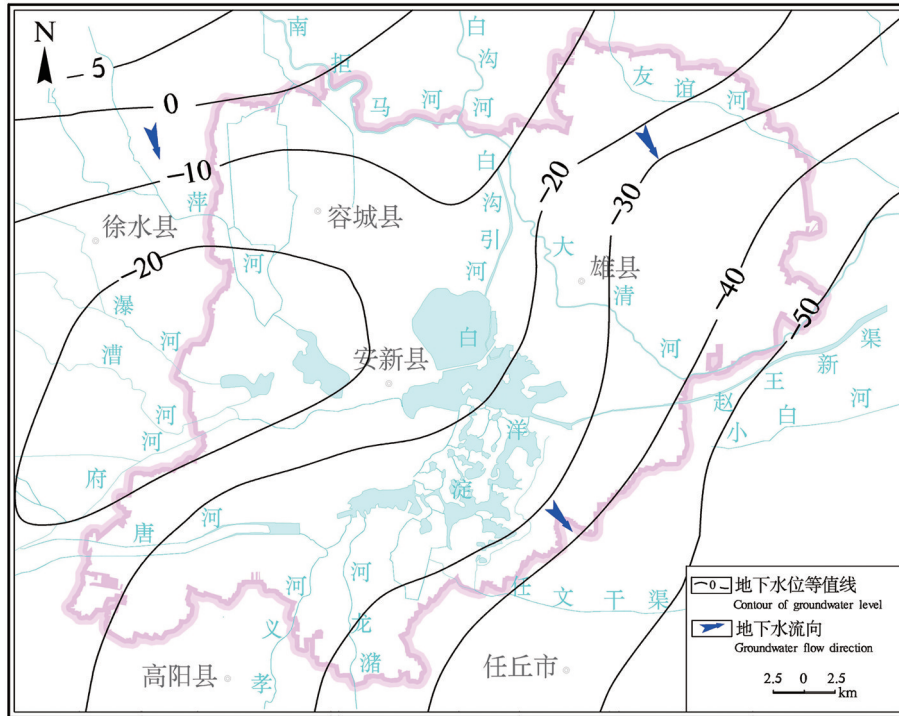


图5 雄安新区深层地下水位等值线图(据2020年度6月份地下水统测数据)

Fig.5 Contour of groundwater level in deep aquifers in Xiongan (Data from groundwater survey in June, 2020)

和人口增加,对地下水资源开采逐年增加,浅、深地下水位均持续快速下降,浅层地下水位下降约15 m,平均每年下降约0.83 m;深层地下水位下降约20 m,平均每年下降1.11 m。2014—2017年,雄安新区采取禁(限)采措施(第一阶段),浅层地下水位下降速率变缓,地下水位下降约1.61 m,平均每年下

降约0.50 m;深层地下水位仍持续下降,下降速率减缓不明显,地下水位下降约3.26 m,平均每年下降1.09 m。2018年后,河北省继续采取更加严格的地下水禁限采措施(第二阶段),雄安新区浅层地下水有所回升;深层地下水下降速率明显减缓,呈企稳趋势。特别是近两年,雄安新区浅、深层地

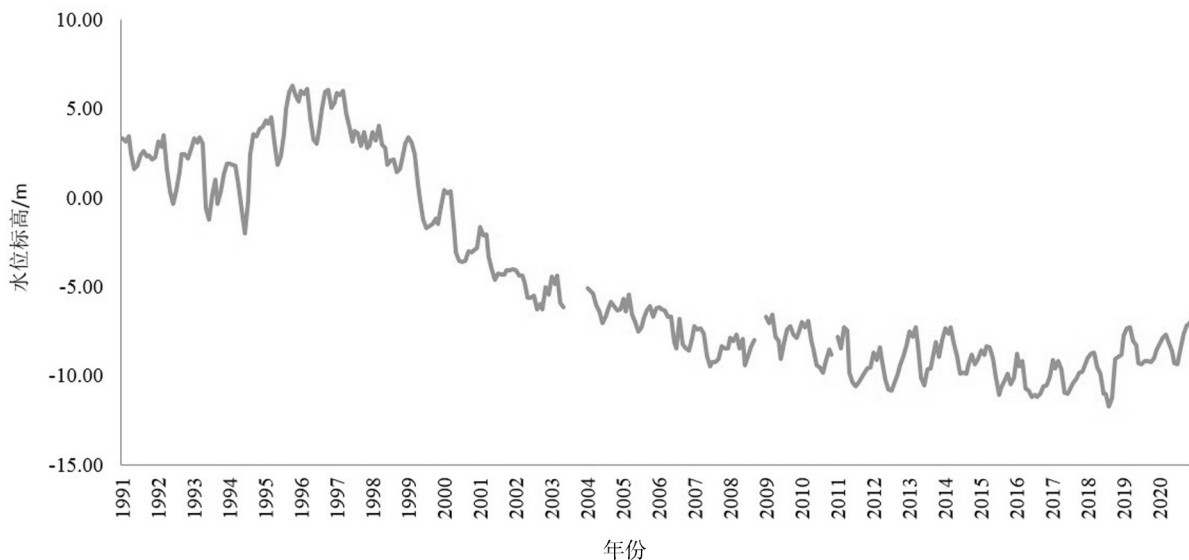


图6 容城县浅层地下水位动态监测曲线

Fig.6 Curve of groundwater level monitored in Rongcheng County

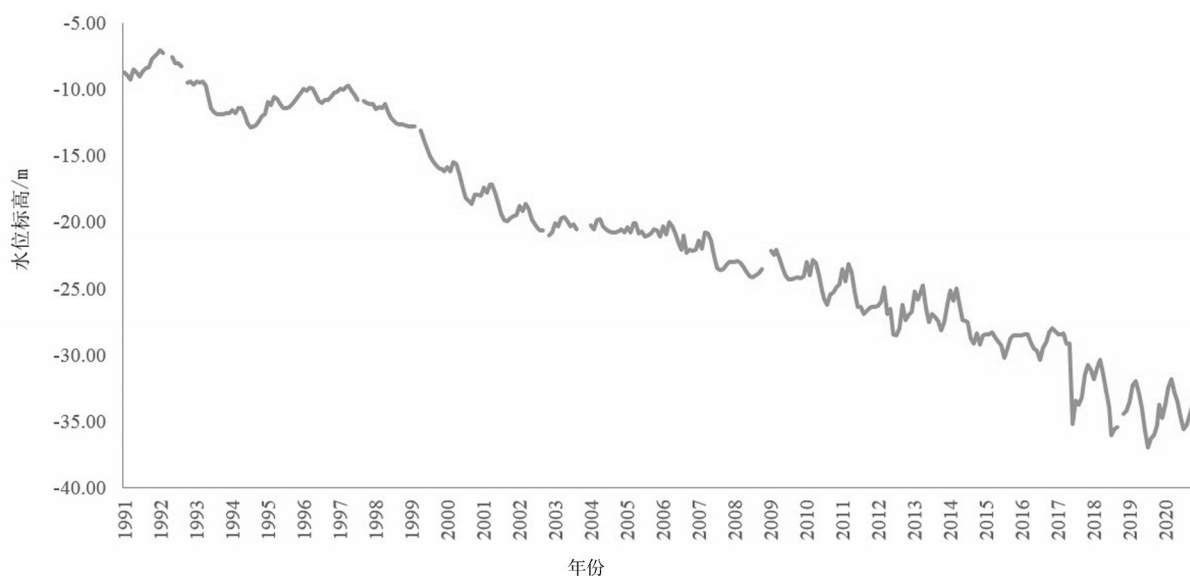


图7 雄县深层地下水位动态监测曲线
Fig.7 Curves of groundwater level monitored in Xiong County

下水位整体上呈企稳回升趋势(图8,图9),只是在局部地区,还存在地下水开采的情况,导致地下水位有所下降。

4.2 地下水水质动态变化特征

在2017年、2019年和2020年,分别开展了雄安新区地下水水质样品采集和测试工作,每年采集的

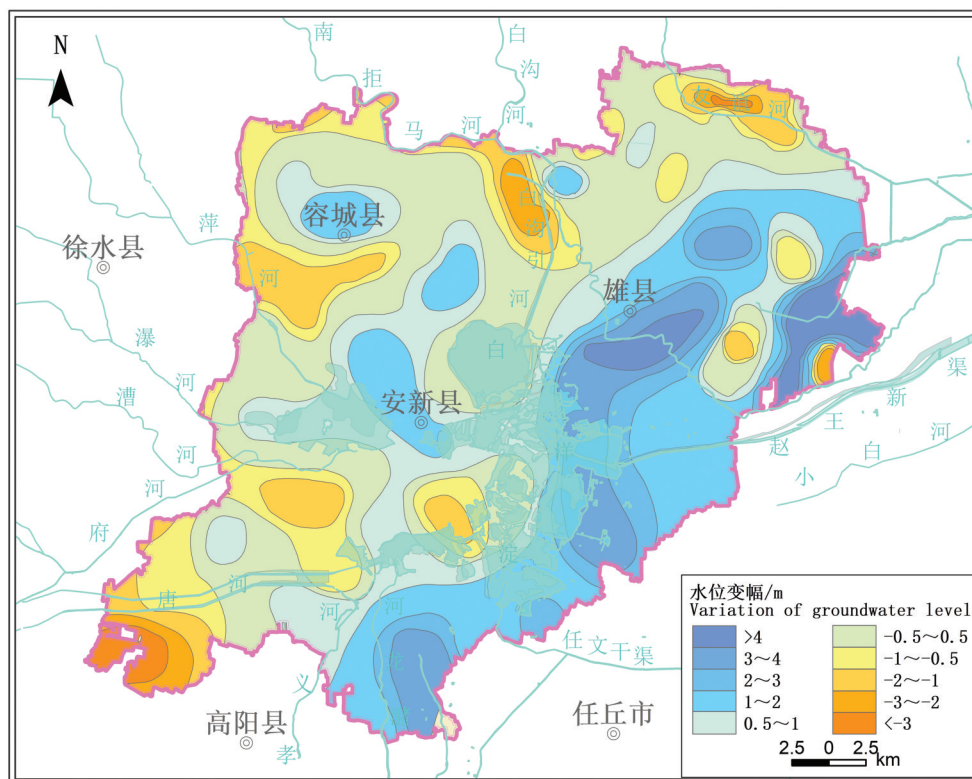


图8 雄安新区浅层地下水位变幅图(据2020年6月和2019年6月)
Fig.8 Variation of groundwater level in shallow aquifers in Xiong'an (June, 2020 VS June, 2019)

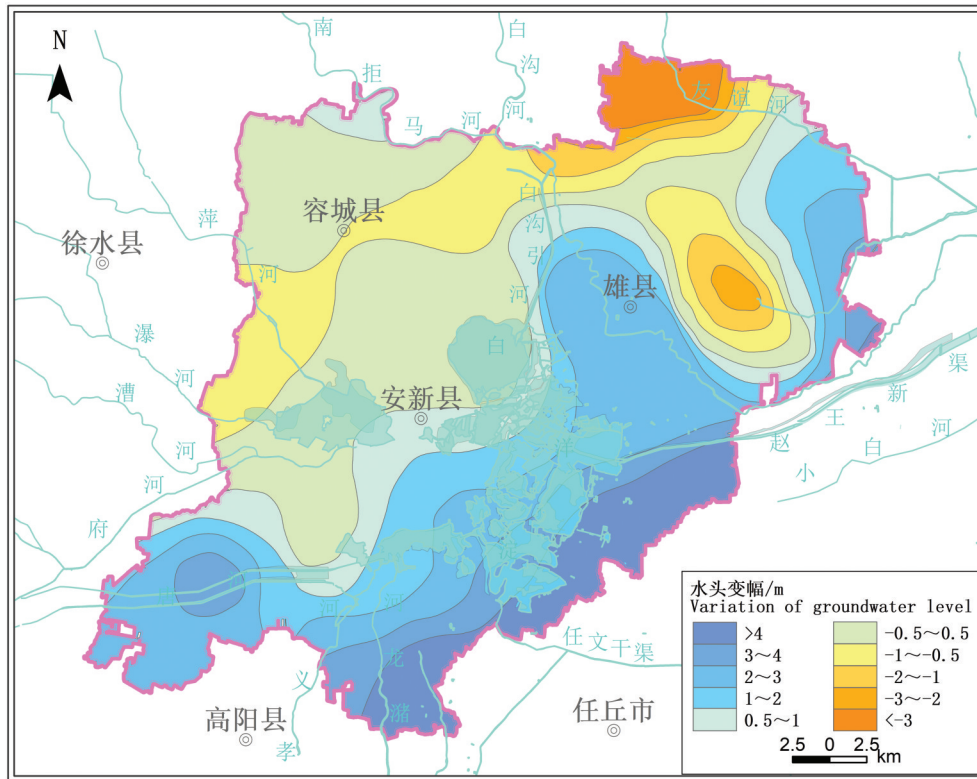


图9 雄安新区深层地下水位变幅图(据2020年6月和2019年6月)

Fig.9 Variation of groundwater level in deep aquifers in Xiongan (June, 2020 VS June, 2019)

地下水样品在位置、层位和时间等方面基本一致,测试单位均为河北省地质环境监测院实验室,测试指标47项,主要包括水质综合分析组分和部分微量元素。按照《地下水质量标准》(GB/T 14848-2017),图10和图11分别显示2020年度浅层和深层地下水质量评价结果,表1为2017、2019、2020这3年的地下水质量评价结果统计表。评价结果显示,空间上,雄安新区地下水质量总体良好,浅层地下水平均约36%为I-III类,约38%为IV类,约26%为V类;深层地下水平均约74%为I-III类,约23%为IV类,约3%为V类,深层地下水质量明显要优于浅层地下水质量。雄安新区浅、深层地下水质量均较为稳定,没有明显的时空变化。浅层地下水质量影响指标主要为铁、锰、氟化物、溶解性总固体、硫酸盐等,深层地下水质量影响指标主要为氟化物。浅、深层地下水质量均主要受自然地质背景和地球化学作用控制,另外浅层地下水质量还受到一定程度的人类活动和地表水(白洋淀及入淀河流)的影响。

值得注意的是,在雄安新区地下水中,达到或接近饮用天然矿泉水标准(锑含量大于0.4 mg/L)的

优质富锑地下水在全区均有分布,在浅层地下水中居多。

5 雄安新区地下水资源可开采潜力分析

5.1 流域尺度地下水可持续利用方案

1992年,在联合国环境与发展大会上,提出了“可持续发展”的概念(联合国,1992)。针对地下水可持续利用来说,基本上要遵循两个原则,一是避免由于地下水利用,造成严重的生态环境问题;二是地下水开发不能破坏地表水资源和相邻区域地下水资源的可持续性。

在本文研究中,区域尺度地下水可持续利用主要参考以下两个方面:(1)地下水开采长期处于超采,在白洋淀流域平原区形成了浅层高阳—蠡县—清苑地下水降落漏斗、徐水漏斗、雄县漏斗和深层任丘漏斗等,造成一些环境地质问题,如地面沉降等(李文鹏等,2020);(2)雄安新区是一个行政单元,不是一个相对完整的水文地质单元等方面考虑,从白洋淀流域平原区尺度和缓解地下水降落漏斗

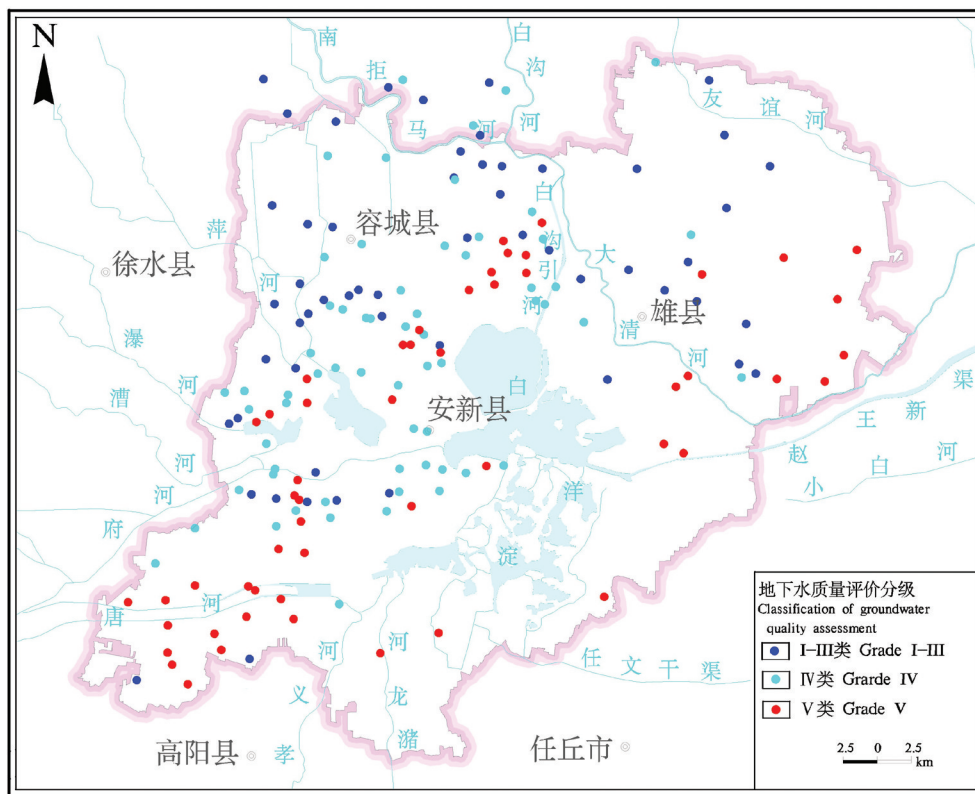


图10 雄安新区浅层地下水质量评价图(据2020年度地下水水质样品测试数据)

Fig.10 Assessment of groundwater quality of shallow aquifers in Xiong'an New Area (Data from groundwater sample test in 2020)

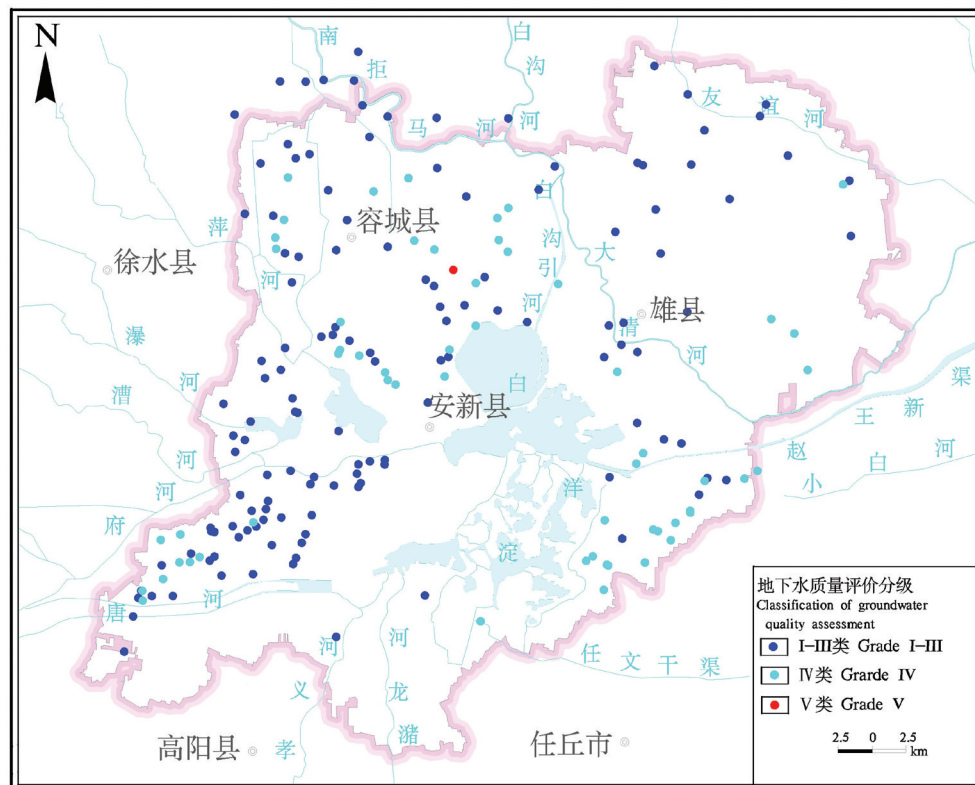


图11 雄安新区深层地下水质量评价图(据2020年度地下水水质样品测试数据)

Fig.11 Assessment of groundwater quality of deep aquifers in Xiong'an New Area (Data from groundwater sample test in 2020)

表1 地下水质量评价结果

年度	浅层占比/%			深层占比/%		
	I-III类	IV类	V类	I-III类	IV类	V类
2017	38	40	22	75	20	5
2019	32	37	31	69	30	1
2020	39	36	25	78	20	2
平均	36	38	26	74	23	3

问题的角度出发,采用数值模拟技术,开展地下水资源可持续利用方案研究。白洋淀流域平原区地下水数值模型建设可参见文献(王凯霖,2020)。

在地下水资源可持续利用方案研究中,主要遵循以下原则:(1)降水量按照平水年,即降水保证率50%的情景。(2)在不同方案设计时,主要结合近期政府颁布的各项政策纲要以及对工农业用水管理规划等,采取保障生活用水、减少工农业用水的原则。(3)采用河流回补、农业灌溉节水、地下水压采等综合措施的原则。(4)可持续利用以恢复地下水降落漏斗区的地下水水位为目标的原则。

5.1.1 情景预测及结果分析

根据设置的原则,设置了不同的情景,并预测地下水水位未来30年的变化过程。

(1)现状开采条件情景预测。在现状开采条件下,预测结果显示,未来30年,浅、深层地下水均呈不同幅度的下降趋势。30年后,高阳—蠡县—清苑浅层地下水降落漏斗中心地下水水位将下降约33.32 m,雄县浅层地下水降落漏斗中心地下水水位将下降约26.36 m,徐水浅层地下水降落漏斗中心地下水水位将下降约25.91 m;任丘深层地下水降落漏斗中心水位将下降约32.92 m。

(2)河流回补情景预测。河流回补情景为在现状开采条件下,进行河流补水。河流补水主要依据《华北平原地下水超采综合治理行动方案》(2019年)中的规划目标,在南拒马河、瀑河、唐河及潴龙河进行补水,各河流补水量分别为 $1 \times 10^8 \sim 1.5 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 、 $1 \times 10^8 \sim 1.3 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 、 $1 \times 10^8 \sim 1.4 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 、 $1.2 \times 10^8 \sim 1.9 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。预测结果显示,与现状开采条件情景预测结果对比,在河流段两侧周边区域,浅层地下水水位均有不同程度上升,深层地下水水位变化不大。河流上游段,入渗条件相对较好,浅层地下水水位上升幅度大;河流下游段,入渗条件相对较差,浅

层地下水水位上升幅度小。但对于地下水降落漏斗来说,徐水地下水降落漏斗区地下水水位有所上升,其他地下水降落漏斗区地下水水位并没有大的变化,与现状开采条件情景预测结果基本保持一致。

(3)工农业节水情景预测。相对于河流回补情景的线性回补地下水来说,工农业节水情景是从面上减少地下水开采利用的一种情景。按照《河北省节水行动实施方案》(2019年),拟提高农业灌溉用水效率、减少工业用水,将农业灌溉用水有效利用系数提高到0.675,工业用水减少30%。按此目标,在工农业节水情景中,设置浅层地下水开采减少约25%,深层地下水开采减少约20%。预测结果显示,绝大多数浅层地下水水位均有不同程度的上升,研究区北部上升幅度较大,南部上升幅度较小;深层地下水,西北部有小幅度上升,东南部仍有所下降,但要好于现状开采条件情景预测结果。在工农业节水情景下,高阳—蠡县—清苑和徐水地下水降落漏斗区地下水水位变化较小,漏斗中心地下水水位下降均约3.33 m;雄县浅层地下水降落漏斗区地下水水位有较大幅度上升,漏斗中心地下水水位上升约9.45 m;任丘深层地下水降落漏斗区地下水水位有所下降,漏斗中心地下水水位下降约7.61 m。

(4)地下水禁(限)采情景。地下水禁(限)采主要考虑地下水降落漏斗的恢复情况,浅层地下水禁(限)采主要针对地下水水位低于-10 m的区域;深层地下水禁(限)采主要针对地下水水位低于-45 m的区域。按照《华北平原地下水超采综合治理行动方案》(2019年)和《河北省节水行动实施方案》(2019年)的目标,对同时采取河流回补和工农业节水的情景进行了模拟预测。预测结果显示,30年后,徐水地下水降落漏斗区能够恢复,也即该地区浅层地下水水位能够恢复到-10 m以上,而其他地下水降落漏斗区均不能恢复到设置的地下水水位以上。因此,地下水(禁)限情景主要考虑在同时采取河流回补和工农业节水情况下,在仍不能恢复到设置地下水水位的区域进行地下水禁(限)采,并设计不同比例(10%,20%...50%)的禁(限)采程度,研究地下水降落漏斗的恢复情况。表2为地下水禁(限)采情景预测的地下水降落漏斗恢复情况,结果显示,减少20%地下水开采量时,雄县漏斗区能够恢复,而其他漏斗区则不能;减少地下水30%开采量时,雄安、高

表2 地下水降落漏斗恢复情况(地下水禁(限)采情景)
Table 2 Recovery of groundwater depression cones (Case of groundwater pumping prohibited)

地下水降落漏斗	地下水禁(限)采程度				
	10%	20%	30%	40%	50%
高阳—蠡县—清苑浅层地下水降落漏斗	不能	不能	能	能	能
雄县浅层地下水降落漏斗	不能	能	能	能	能
徐水浅层地下水降落漏斗	能	能	能	能	能
任丘深层地下水降落漏斗	不能	不能	不能	不能	能

阳—蠡县—清苑漏斗区能够恢复,而任丘漏斗区则不能;减少地下水50%开采量时,地下水降落漏斗区均能恢复。

5.1.2 流域尺度地下水可持续利用方案

根据不同情景预测结果综合分析,流域尺度地下水可持续利用方案建议主要考虑两个方面:一是在未形成大规模地下水降落漏斗的区域,采取工农节水及河流补给措施;二是在地下水降落漏斗区,采取工农节水及禁(限)采措施等。按照流域尺度地下水可持续利用方案遵循的原则,提出以下地下水可持续利用建议:

(1)河流回补地下水中,采用《华北平原地下水超采综合治理行动方案》(2019年)规划补水量的50%(按照平水年降雨量50%保证率和河流补水预测结果对区域地下水位影响不大两方面考虑)。

(2)节水措施中,采用《河北省节水行动实施方案》(2019年)规划目标,浅层地下水开采减少约25%,深层地下水开采减少约20%,在局部地区如山前地带、任丘等有咸水,考虑浅层地下水位上升会导致地下水无效蒸发,浅层地下水开采维持现状。

(3)在河流补水和节水措施并举的基础上,在雄县浅层地下水降落漏斗区减少20%的浅层地下水开采量;在高阳—蠡县—清苑浅层地下水降落漏斗区减少30%的浅层地下水开采量;在任丘深层地下水降落漏斗区减少50%的深层地下水开采量。

根据提出的流域尺度地下水可持续利用方案进行预测,30年后,浅、深层地下水位均有不同程度上升,高阳—蠡县—清苑浅层地下水降落漏斗区、雄县浅层地下水降落漏斗区、徐水浅层地下水降落漏斗区、任丘深层地下水降落漏斗区等地下水位均能恢复到设置水位以上,满足区域地下水资源可持续发展的要求。

5.2 雄安新区地下水资源可开采潜力评价

5.2.1 雄安新区地下水资源评价

以2002—2014年为均衡期,采用均衡法计算雄安新区地下水资源(《水文地质手册》(第二版),2012)。地下水均衡计算过程中,降水量、河流径流、白洋淀水位等采用气象部门、水利部门等实测资料;开采量及灌溉量采用保定市水资源公报数据;水文地质参数主要参考《河北省保定平原区勘察报告》等前人研究成果;关于白洋淀湿地渗漏量量化研究开展的较少,刘建芝和魏建强(2007)研究了白洋淀地表水位与白洋淀周边渗漏量之间的关系;李刚等(2021)研究了白洋淀湿地周边的地表水与地表水垂向量化转化关系,在地下水均衡计算中,白洋淀湿地渗漏量占比相对较小,采用比较保守的估计值。具体结果见表3(中国地质环境监测院等,2017)。

地下水均衡结果(表3)显示,雄安新区浅层地下水和深层地下水均处于负均衡状态;相对而言,深层地下水均衡状态要好于浅层地下水。按现状发展下去,雄安新区地下水位将持续下降,势必要造成一系列由于地下水开采而引起的地质环境问题。

5.2.2 雄安新区地下水资源可开采潜力评价

科学评价雄安新区地下水资源可开采潜力,对雄安新区规划建设和供水安全保障具有十分重要的意义。在本文中,雄安新区地下水可开采潜力评价是基于流域尺度地下水资源可持续利用方案,在维持安新、容城地下水位不再下降和雄县浅层地下

表3 雄安新区地下水均衡情况($10^4 \text{ m}^3/\text{a}$)
Table 3 Groundwater balance in Xiong'an New Area ($10^4 \text{ m}^3/\text{a}$)

项 目	内 容	数 量		合 计*
		浅层	深层	
补给量	降水入渗	12083		12083
	河流入渗	30		30
	白洋淀入渗	1000*		1000
	农田灌溉入渗	2284		2284
	侧向径流入渗	1398	1687	3085
	含水层越流		46	
	小计	16795	1733	18482
排泄量	地下水开采	21654	3115	24769
	侧向径流排泄	110	340	450
	含水层越流	46		
	小计	21810	3455	25219
均衡差		-5015	-1722	-6737

注:*在合计中,不考虑浅层和深层含水层组之间的越流。

水降落漏斗能够在30年时间内恢复的前提下,分析雄安新区最大地下水可开采量,也即为雄安新区地下水资源可开采潜力。

在本文5.1.2提出的流域地下水可持续利用方案基础上,设置安新、容城、雄县的开采量,并进行模拟预测,保证各区在不形成新的地下水降落漏斗、已形成的地下水降落漏斗能够恢复的前提下,反演推算最大的地下水可开采量(表4)。

结果显示,雄安新区地下水资源可开采潜力为 $1.80 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,其中,浅层地下水可开采潜力为 $1.50 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,深层地下水可开采潜力为 $0.30 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

6 问题讨论

6.1 地下水降落漏斗问题

地下水超采导致白洋淀流域平原区及雄安新区浅、深层地下水位持续下降,在局部地区形成了地下水降落漏斗。根据模型预测结果,采取(1)河流补水措施中,采用河流规划补水量的50%,(2)节水措施中,浅层地下水开采减少约25%,深层地下水开采减少约20%,在局部地区如山前地带、任丘等有咸水区,浅层地下水开采维持现状,(3)在河流补水和节水措施并举的基础上,在雄县浅层地下水降落漏斗区,减少20%的浅层地下水开采量,在高阳—蠡县—清苑浅层地下水降落漏斗区,减少30%的浅层地下水开采量,在任丘深层地下水降落漏斗区,减少50%的深层地下水开采量。30年后,白洋淀流域平原及雄安新区目前的浅、深层地下水降落漏斗均能恢复到设置的临界水位。

目前,根据河北省人民政府《关于公布平原区地下水超采区、禁止开采区和限制开采区范围的通知》,在河北省地下水开采及超采严重的地区实施严格的禁限采措施。雄安新区全区为浅层地下水一般超采区,雄安城区、安新城区、容城城区为浅层

地下水禁采区;安新县、雄县城区被列为深层地下水禁采区。在河北省禁限采措施的影响下,雄安新区的浅、深层地下水位近年来有所上升,特别是在2020年,浅、深层地下水上升较为明显,地下水降落漏斗的面积也有所减少,地下水禁限采效果初步显示,应该继续坚持和保持。

6.2 地下水水质问题

雄安新区浅层地下水水化学类型以 HCO_3 型为主,在南部地区存在一定范围的咸水区;深层地下水水化学类型以 $\text{HCO}_3\text{-Na}(\text{Ca}\cdot\text{Mg})$ 型为主。整体上,雄安新区地下水质量良好,深层地下水质量要好于浅层地下水质量,且浅、深层地下水水质状况均较为稳定。地下水质量主要受自然地质背景和地球化学作用控制,其次为人类工程活动的影响。白洋淀湿地地下水水质受地表水水质影响,应充分考虑和深入研究白洋淀湿地地表水与地下水相互转化对白洋淀湿地水环境的影响机制。

6.3 地下水资源问题

从区域地下水资源可持续利用角度出发,雄安新区地下水资源可开采量为 $1.80 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。根据统计,2002—2014年地下水开采量约为 $2.17 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$;2014年以来,河北省实施地下水禁限采措施,地下水开采量有减少,约为 $1.68 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,略低于地下水可开采资源量。可以继续保持目前的地下水开采规模,以开采浅层地下水为主,严格控制深层地下水开采,避免导致地面沉降等环境地质问题。从雄安新区供水安全的角度考虑,虽然地下水可开采资源远远不能满足需求,需要外部调水;但地下水资源可作为城市后备或应急水源,特别是在雄安新区西北部,水量和水质均较好,可以考虑建设后备或应急水源地。

7 结论

(1)地下水过量开采导致雄安新区地下水位动态为多年持续下降;近年来,在地下水禁(限)采和各项补水、节水措施的综合治理下,地下水位下降有所缓解,并有企稳回升趋势。1996—2014年,为地下水位快速下降期;2014—2017为地下水位缓慢下降期;2018—2020年,地下水位总体企稳回升,局部地区仍有下降。

(2)雄安新区地下水质量总体良好,绝大多数

表4 雄安新区地下水可开采潜力($10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)

Table 4 Groundwater exploitation potential of Xiong'an New Area ($10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)

	安新	容城	雄县	合计
浅层地下水可开采量	0.39	0.40	0.71	1.50
深层地下水可开采量	0.13	0.10	0.07	0.30
小计	0.52	0.50	0.78	1.80

深层地下水和三分之二以上的浅层地下水达到饮用水质量标准。深层地下水质量要优于浅层地下水质量,浅层地下水中富镉居多,达到或接近饮用天然矿泉水标准。浅、深层地下水质量无明显时空变化,均较为稳定,地下水质量主要受自然地质背景和地球化学作用控制,浅层地下水质量还受到人类活动和地表水部分影响。

(3)从可持续利用出发,雄安新区地下水可开采资源约为 $1.80 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,其中,浅层地下水约为 $1.50 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,深层地下水约为 $0.30 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。地下水可开采资源难以满足雄安新区未来城市运行管理的水资源需求,需要充分考虑外调水源;但可以采用“深控浅用”和“优水优用”,建设后备或应急浅层地下水水源地,保障新区供水安全。

References

- Bai Liping, Wang Yeyao, Wang Jinsheng, Li Fasheng. 2011. A study of the groundwater pollution early-warning method based on numerical model[J]. *Geology in China*, 38(6): 1652–1659(in Chinese with English abstract).
- Cao G L, Zheng C M, Scanlon B R, Liu J, Li W P. 2013. Use of flow modeling to assess sustainability of groundwater resources in the North China Plain[J]. *Water Resources Research*, 49: 159–175.
- Cheng Qinbo, Chen Xi, Zhang Zhicai, Zhang Runrun, Qiu Ning, Huang Richao, Cai Lianbin. 2018. Fracture infiltration experiment and numerical simulation[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 45(4): 7–14 (in Chinese with English abstract).
- China Geological Survey. 2012. *Handbook of Hydrogeology*[M]. Beijing: Geological Publishing House, 692–694 (in Chinese).
- China Institute of Geo-Environmental Monitoring. 2017. Report of Special Issue on Hydrogeology and Groundwater Resources in Xiong'an[R]. 1–27 (in Chinese).
- Di Shengtong, Jia Chao, Zhang Shaopeng, Ding Pengpeng, Shao Ming, Zhang Yongwei. 2020. Regional characteristics and evolutionary trend prediction of land subsidence caused by groundwater over exploitation in North Shandong of the North China Plain[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(5): 1638–1654 (in Chinese with English abstract).
- Fei Y H, Zhang Z J, Li Y S, Guo C Y, Tian X. 2015. Quality evaluation of groundwater in the North China Plain[J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 3(4): 306–315.
- Feng Wei, Qi Xiaofan, Li Haitao, Li Wenpeng, Yin Xiulan. 2017. Wavelet analysis between groundwater level regimes and precipitation, North Pacific Index in the Xiong'an New Area[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 44(6): 1–8 (in Chinese with English abstract).
- Lai Dongrong, Qin Huanhuan, Wan Wei, Zheng Chunmiao. 2018. Scenario analysis on water resources utilization of the North China Plain based on MIKE SHE model[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 29(5): 60–67 (in Chinese with English abstract).
- Li gang, Ma Baiheng, Zhou Yangxiao, Zhao Kai, Youbing, Li Muzi, Dong Huijun, Li Haitao. 2021. Research on vertical exchange between surface water and groundwater around banks of Baiyangdian Lake[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 48(4): 48–54 (in Chinese with English abstract).
- Li Wenpeng, Wang Longfeng, Yang Huifeng, Zheng Yuejun, Cao Wengeng, Liu Ke. 2020. The groundwater overexploitation status and countermeasure suggestions of the North China Plain[J]. *China Water Resources*, 13: 26–30 (in Chinese with English abstract).
- Lin Liangjun, Li Yamin, Ge Weiya, Hu Qiuyun, Li Xiaozhao, Li Yun, Meng Hui, Zhang Lizhong, Yang Jianfeng. 2017. General ideas for urban geological survey in China and key theory and techniques[J]. *Geology in China*, 44(6): 1086–1101 (in Chinese with English abstract).
- Liu J, Zheng C M, Zheng L, Lei Y. 2008. Ground water sustainability: Methodology and application to the North China Plain[J]. *Ground Water*, 46(6): 897–909.
- Liu Jianzhi, Wei Jianqiang. 2007. Calculation and analysis of evaporation leakage and water supplement in Baiyangdian Wetlands[J]. *Water Science and Engineering Technology*, 1: 15–16 (in Chinese).
- Liu Ke. 2009. Study on Hydrological Characteristics and Ecological Response of Wetlands in the Lower River of Daqing River[D]. Beijing: Capital Normal University (in Chinese with English abstract).
- Liu M, Nie Z L, Wang J Z, Wang L F, Tian Y L. 2016. An assessment of the carrying capacity of groundwater resources in North China Plain region—Analysis of potential for development[J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 4(3): 174–187.
- Lü Chenxu, Jia Shaofeng, Ji Zhiheng. 2010. Dynamics and causes of groundwater table change in plain area of Baiyangdian Basin in last 30 Years[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 8(1): 65–68 (in Chinese with English abstract).
- Ma Zhen, Xia Yubo, Li Haitao, Han Bo, Yu Xuezhong, Zhou Yalong, Wang Yushan, Guo Xu, Li Hongqiang, Pei Yandong. 2021. Analysis of natural resources and environment eco-geological conditions in the Xiong'an New Area[J]. *Geology in China*, 48(3): 677–696(in Chinese with English abstract).
- Meng Suhua, Fei Yuhong, Zhang Zhaoji, Qian Yong, Li Yasong. 2011. Groundwater vulnerability assessment of North China Plain[J]. *Geology in China*, 38(6): 1607–1613 (in Chinese with English abstract).
- Pan Wencan. 2020. Cognition and recommendations for the development, utilization and sustainable development of water resources in China—Marking the 51st anniversary of Earth Day[J].

- China Territory Today, 11: 27–30 (in Chinese).
- Qin H, Sun A, Liu J, Zheng C M. 2012. System dynamics analysis of water supply and demand in the North China Plain[J]. Water Policy, 14: 214–231.
- Shi Jiansheng, Li Guomin, Liang Xing, Chen Zongyu, Shao Jingli, Song Xianfang. 2014. Evolution mechanism and control of groundwater in the North China Plain[J]. Acta Geoscientica Sinica, 35(5): 527–534 (in Chinese with English abstract).
- United Nations. 1992. The Rio de Janeiro declaration on environment and development[C]//United Nations Conference on Environment and Development, Rio de Janeiro, Brazil.
- Wang C X, Zhang Z J, Fei Y H, Qian Y. 2014. Research on migration features of salt–fresh water interface on the North China Plain[J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2(2): 68–79.
- Wang Han, Liu Qi, Zhang Yilong, Wang Wenzhong. 2018. Division of the drinking groundwater protection area based on numerical methods: A case study near Hohhot in Inner Mongolia[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, (45)6: 23–30 (in Chinese with English abstract).
- Wang Kailin. 2020. Research on Common Sustainability of Groundwater Resources and Wetlands in Xiong'an New Area[D]. Beijing: China University of Geosciences (in Chinese with English abstract).
- Wang Kailin, Li Haitao, Wu Aimin, Li Muzi, Zhou Yi, Li Wenpeng. 2018. An analysis of the evolution of Baiyangdian Wetlands in Hebei Province with artificial recharge[J]. Acta Geoscientica Sinica, 39(5): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Wang Shiqin, Song Xianfang, Wang Qinxue, Tang Changyuan, Liu Changming. 2014. An analysis of period features of groundwater micro–dynamics in the North China Plain[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 28(3): 6–12 (in Chinese with English abstract).
- Wang Yuting, Li Junxia, Xue Xiaobin, Tian Xiaowei, Chi Xiucheng. 2021. Similarities and differences of main controlling factors of natural high iodine groundwater between North China Plain and Datong Basin[J]. Earth Science, 46(1): 308–320 (in Chinese with English abstract).
- Wu Qihua, Lin Liangjun. 2017. "Safeguard Engineering", recreate geological first legend–a documentary about geological survey support the coordinated development strategy of the Beijing–Tianjin–Hebei region[N]. China Mining News, 2017–09–22 (in Chinese).
- Yang Shuyuan, Wei Baoyi, Wang Jun, Yang Dongfang. 2015. Preliminary study on "Four Determination of Water" method and its application in Beijing[C]// China Urban Planning Society. The New Normal: Inheritance and Transformation–Proceedings of the 2015 China Urban Planning Annual Conference. Beijing: China Construction Industry Press: 11 (in Chinese).
- Yi Yujun, Lin Qiaochu, Tang Caihong. 2020. Hydrology, environment, ecological evolution of Lake Baiyangdian since 1960s[J]. Journal of Lake Sciences, 32(5): 1333–1347,1226 (in Chinese with English abstract).
- Yin Zhiqiang, Li Ruimin, Li Xiaolei, Meng Hui, Liu Qiong, Yang Nan, Wang Yi, Tong Xiaoxia, Li Chunyan, Gao Mengmeng. 2018. Research progress and future development directions of geo–resources and environment carrying capacity[J]. Geology in China, 45(6): 1103–1115 (in Chinese with English abstract).
- Yuan Ruiqiang, Song Xianfang. 2017. The dataset of groundwater in the Baiyangdian Lake catchment of China[J]. Journal of Global Change Data & Discovery, 1(4): 460–463 (in Chinese and English).
- Zhang Eryong, Li Changqing, Li Xufeng. 2009. Regional groundwater numerical modeling: A case study of North China plain[J]. Geology in China, 36(4): 920–926 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Yuan, Zhao Kai, Li Haitao, You Bing, Wang Yongbo, Wang Shixiong. 2018. Dataset of the 1: 50000 hydrogeological map of the plain area of the Baiyangdian Lake Basin, Xiong'an New Area[J]. Geology in China, 45(S2): 1–12 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y Q, Wang G W, Wang S Q, Yuan R Q, Tang C Y, Song X F. 2018. Hydrochemical characteristics and geochemistry evolution of groundwater in the plain area of the Lake Baiyangdian watershed, North China[J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 6 (3): 220–233.
- Zhang Zhaoji, Fei Yuhong, Chen Zongyu, Zhao Zongzhuang, Xie Zhenhua, Wang Yabin, Miao Jinxiang, Yang Lizhi, Shao Jingli, Jin Menggui, Xu Guangming, Yang Qiqing. 2009. Investigation and Evaluation on Sustainable Utilization of Groundwater in North China Plain[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1–471 (in Chinese).
- Zhao Kefeng, Wang Jinguo, Cao Huiqun. 2020. Numerical simulation of light non–aqueous phase liquids remediation in the unsaturated zone with single fractures[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 47(5): 43–55 (in Chinese with English abstract).
- Zheng C M, Liu J, Cao G L, Eloise K, Wang H, Jia Y W. 2010. Can China cope with its water crisis?– Perspectives from the North China Plain[J]. Ground Water, 48(3): 350–354.
- Zhou Chao, Shao Jingli, Cui Yali, Zhang Qiulan. 2018. A groundwater–model–based DRASTIC for assessing aquifer vulnerability[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 45(1): 15–22 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Jing. 2010. Study on the Optimal Allocation of Water Resources of Baiyangdian Basin[D]. Baoding: Agricultural University of Hebei (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 白利平, 王业耀, 王金生, 李发生. 2011. 基于数值模型的地下水污染预警方法研究[J]. 中国地质, 38(6): 1652–1659.
- 程勤波, 陈喜, 张志才, 张润润, 丘宁, 黄日超, 蔡炼彬. 2018. 裂隙水流运动的入渗试验及数值模拟研究[J]. 水文地质工程地质, 45

- (4): 7-14.
- 中国地质调查局. 2012. 水文地质手册(第二版)[M]. 北京: 地质出版社, 692-694.
- 中国地质环境监测院. 2017. 水文地质条件与地下水资源专题报告(支撑服务雄安新区规划建设地质调查专题报告)[R]. 1-27.
- 狄胜同, 贾超, 张少鹏, 丁朋朋, 邵明, 张永伟. 2020. 华北平原鲁北地区地下水超采导致地面沉降区域特征及演化趋势预测[J]. 地质学报, 94(5): 1638-1654.
- 夙蔚, 祁晓凡, 李海涛, 李文鹏, 殷秀兰. 2017. 雄安新区地下水水位与降水及北太平洋指数的小波分析[J]. 水文地质工程地质, 44(6): 1-8.
- 赖冬蓉, 秦欢欢, 万卫, 郑春苗. 2018. 基于MIKE SHE模型的华北平原水资源利用情景分析[J]. 水资源与水工程学报, 29(5): 60-67.
- 李刚, 马佰衡, 周仰效, 赵凯, 尤冰, 李木子, 董会军, 李海涛. 2021. 白洋淀湖岸带地表水与地下水垂向交换研究[J]. 水文地质工程地质, 48(4): 48-54.
- 李文鹏, 王龙凤, 杨会峰, 郑跃军, 曹文庚, 刘可. 2020. 华北平原地下水超采状况与治理对策建议[J]. 中国水利, 13: 26-30.
- 林良俊, 李亚民, 葛伟亚, 胡秋韵, 李晓昭, 李云, 孟晖, 张礼中, 杨建锋. 2017. 中国城市地质调查总体构想与关键理论技术[J]. 中国地质, 44(6): 1086-1101.
- 刘建芝, 魏建强. 2007. 白洋淀蒸发渗漏与补水量计算分析[J]. 水科学与工程技术, 1: 15-16.
- 刘克. 2009. 大清河下游湿地水文特征演变及生态响应研究[D]. 北京: 首都师范大学.
- 吕晨旭, 贾绍凤, 季志恒. 2010. 近30年来白洋淀流域平原区地下水位动态变化及原因分析[J]. 南水北调与水利科技, 8(1): 65-68.
- 马震, 夏雨波, 李海涛, 韩博, 余学中, 周亚龙, 王雨山, 郭旭, 李洪强, 裴艳东. 2021. 雄安新区自然资源与环境-生态地质条件分析[J]. 中国地质, 48(3): 677-696.
- 孟素花, 费宇红, 张兆吉, 钱永, 李亚松. 2011. 华北平原地下水脆弱性评价[J]. 中国地质, 38(6): 1607-1613.
- 潘文灿. 2020. 对我国水资源开发利用与持续发展的认识和建议——纪念地球日51周年[J]. 今日国土, 11: 27-30.
- 石建省, 李国敏, 梁杏, 陈宗宇, 邵景力, 宋献方. 2014. 华北平原地下水演变机制与调控[J]. 地球学报, 35(5): 527-534.
- 联合国. 1992. 关于环境与发展的里约热内卢宣言[C]/联合国环境与发展会议, 巴西里约热内卢.
- 王涵, 刘琦, 张翼龙, 王文中. 2018. 数值模拟法划分地下饮用水源保护区—以内蒙古呼和浩特市城市水源地为例[J]. 水文地质工程地质, 45(6): 23-30.
- 王凯霖. 2020. 雄安新区地下水资源和湿地的共同可持续研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京).
- 王凯霖, 李海涛, 吴爱民, 李木子, 周艺, 李文鹏. 2018. 人工补水条件下白洋淀湿地演变研究[J]. 地球学报, 39(5): 1-10.
- 王仕琴, 宋献方, 王勤学, 唐常源, 刘昌明. 2014. 华北平原地下水位微动态变化周期特征分析[J]. 水文地质工程地质, 28(3): 6-12.
- 王雨婷, 李俊霞, 薛肖斌, 田小伟, 迟秀成. 2021. 华北平原与大同盆地原生高碘地下水赋存主控因素的异同[J]. 地球科学, 46(1): 308-320.
- 吴启华, 林良俊. 2017. “保障工程”, 再创地质先行传奇——地质调查工作支撑服务京津冀协同发展战略纪实[N]. 中国矿业报, 2017-09-22.
- 杨舒媛, 魏保义, 王军, 杨东方. 2015. “以水四定”方法初探及在北京的应用[C]/中国城市规划学会. 新常态: 传承与变革——2015中国城市规划年会论文集. 北京: 中国建筑工业出版社: 11.
- 易雨君, 林楚翘, 唐彩红. 2020. 1960s以来白洋淀水文、环境、生态演变趋势[J]. 湖泊科学, 32(5): 1333-1347, 1226.
- 殷志强, 李瑞敏, 李小磊, 孟晖, 刘琼, 杨楠, 王轶, 仝晓霞, 李春燕, 高萌萌. 2018. 地质资源环境承载力研究进展与发展方向[J]. 中国地质, 45(6): 1103-1115.
- 袁瑞强, 宋献方. 2017. 白洋淀流域地下水数据集[J]. 全球变化数据学报(中英文), 1(4): 460-463, 460-463.
- 张二勇, 李长青, 李旭峰. 2009. 区域地下水流数值模拟的方法和实践——以华北平原为例[J]. 中国地质, 36(4): 920-926.
- 张源, 赵凯, 李海涛, 尤冰, 王永波, 王世雄. 2018. 雄安新区白洋淀流域平原区1:50000水文地质数据集[J]. 中国地质, 45(S2): 1-12.
- 张兆吉, 费宇红, 陈宗宇, 赵宗壮, 谢振华, 王亚斌, 苗晋祥, 杨丽芝, 邵景力, 靳孟贵, 许广明, 杨齐青. 2009. 华北平原地下水可持续利用调查评价[M]. 北京: 地质出版社, 1-471.
- 赵科锋, 王锦国, 曹慧群. 2020. 含单裂隙非饱和带中轻非水相流体修复的数值模拟[J]. 水文地质工程地质, 47(5): 43-55.
- 周超, 邵景力, 崔亚莉, 张秋兰. 2018. 基于地下水流数值模型的改进DRASTIC方法[J]. 水文地质工程地质, 45(1): 15-22.
- 周婧. 2010. 白洋淀流域水资源优化配置研究[D]. 保定: 河北农业大学.