

doi: 10.12029/gc20210404

杨会峰, 孟瑞芳, 李文鹏, 李泽岩, 支传顺, 包锡麟, 李长青, 柳富田, 吴海平, 任宇. 2021. 海河流域地下水资源特征和开发利用潜力[J]. 中国地质, 48(4): 1032–1051.

Yang Huifeng, Meng Ruifang, Li Wenpeng, Li Zeyan, Zhi Chuanshun, Bao Xilin, Li Changqing, Liu Futian, Wu Haiping, Ren Yu. 2021. Groundwater resources of the Haihe River Basin and its development potential[J]. *Geology in China*, 48(4): 1032–1051(in Chinese with English abstract).

海河流域地下水资源特征和开发利用潜力

杨会峰^{1,2}, 孟瑞芳^{1,2}, 李文鹏³, 李泽岩^{1,2}, 支传顺^{1,2}, 包锡麟^{1,2},
李长青³, 柳富田⁴, 吴海平⁵, 任宇^{1,2}

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 2. 京津冀平原地下水与地面沉降国家野外科学观测研究站, 河北 石家庄 050061; 3. 中国地质环境监测院, 北京 100081; 4. 天津地质调查中心, 天津 300170; 5. 中国国土勘测规划院, 北京 100035)

摘要:海河流域水资源严重短缺,地下水长期超采是制约社会经济可持续发展的主要瓶颈。开展流域地下水资源及开发利用潜力研究,对支撑服务地下水超采治理、地下水资源可持续利用和生态环境保护都具有重要意义。经系统评价,海河流域天然资源量 $252.99 \times 10^8 \text{ m}^3$,生态水位约束条件下的浅层地下水开采资源量 $172.98 \times 10^8 \text{ m}^3$,可更新的深层水可利用量 $4.68 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。海河流域山区地下水质量总体较好, I~III类水占比40.83%,平原区浅层地下水质量较差, I~III类水占比14.10%,深层地下水质量优于浅层地下水, I~IV类水占比74.25%。海河流域山区地下水开采潜力总体较小,燕山和太行山北部山区,地下水资源禀赋较差,基本无开采潜力,太行中部山区地下水开采程度较高,无开采潜力或开采潜力较小,太行南部山区地下水资源禀赋良好,开采潜力较大;平原区浅层地下水在不同水文地质单元开采潜力差异较大,山前平原浅层地下水长期超采形成大范围降落漏斗,无开采潜力或潜力较小,中东部平原浅层地下水资源禀赋较差,以微咸水为主,开采潜力较小,山东省鲁北平原区浅层地下水开采程度较低,聊城—德州一带开采潜力较大;雄安新区地下水总体无开采潜力。平原区深层地下水基本无开采潜力。

关键词:海河流域;水文地质调查工程;地下水资源;空间分布;开采潜力;北京;天津;河北;山西;河南;山东
中图分类号:P641 文献标志码:A 文章编号:1000-3657(2021)04-1032-20

Groundwater resources of the Haihe River Basin and its development potential

YANG Huifeng^{1,2}, MENG Ruifang^{1,2}, LI Wenpeng³, LI Zeyan^{1,2}, ZHI Chuanshun^{1,2},
BAO Xilin^{1,2}, LI Changqing³, LIU Futian⁴, WU Haiping⁵, REN Yu^{1,2}

(1. *Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, Hebei, China*; 2. *National Observation and Research Station on Groundwater and Land Subsidence in Beijing–Tianjin–Hebei Plain, Shijiazhuang 050061, Hebei, China*; 3. *Chinese Institute of Geo–Environment Monitoring, Beijing 100081, China*; 4. *Tianjin Geological Survey Center, Tianjin 300170, China*; 5. *China National Land Survey and Planning Institute, Beijing 100035, China*)

收稿日期:2021-03-24; 改回日期:2021-07-12

基金项目:中国地质调查局项目(DD20190336, DD20160230)及自然资源部自然资源专项调查项目(B202012)联合资助。

作者简介:杨会峰,男,1977年生,博士,高级工程师,主要从事水文地质与水资源研究工作;E-mail:yanghuifeng@mail.cgs.gov.cn。

通讯作者:孟瑞芳,男,1988年生,硕士,助理研究员,主要从事水资源研究工作;E-mail:mengruifang@mail.cgs.gov.cn。

Abstract: There is serious shortage of water resources in the Haihe River Basin, and long-term over exploitation of groundwater is the bottleneck for the sustainable social and economical development. Therefore, it is of great significance to carry out study on groundwater resources and utilization potential of the river basin, for dealing with the groundwater overexploitation, and ensuring the sustainable use of groundwater resources and the protection of the ecological environment. The systematic evaluation shows that there is $252.99 \times 10^8 \text{ m}^3$ of groundwater natural resources in the Haihe River Basin, and $172.98 \times 10^8 \text{ m}^3$ of exploitable resources under ecological water level constraints, and $4.68 \times 10^8 \text{ m}^3$ availability of deep water. The quality of groundwater in the mountainous areas of Haihe River Basin is generally good, type I-III groundwater accounting for 40.83%, and the quality of the shallow groundwater in the plain area is worse; type I-III groundwater accounts for 14.10%, meanwhile the quality of deep groundwater is better than the shallow groundwater; and type I-IV groundwater accounts for 74.25%. The overall potential of groundwater exploitation in the mountainous areas of Haihe River Basin is relatively small. There is almost no exploitation potential in Yanshan and the north part of Taihang Mountain because of poor groundwater resource. There is no or little exploitation potential in the central part of Taihang Mountain because of a high degree of groundwater exploitation. There is comparatively great exploitation potential in the southern Taihang Mountain because of abundant groundwater resource. The exploitation potential of shallow groundwater in different hydrogeological units in the plain area is quite different. Because of large-scale groundwater drop funnel caused by long-time over exploitation, the shallow groundwater in the piedmont plain has no more exploitation potential. Meanwhile, there is little exploitation potential in the central and eastern plain, with mainly brackish water. Because of a low degree of groundwater exploitation in the Lubei plain, the exploitation potential of Liaocheng-Dezhou is comparatively great. There is no exploitation potential in Xiong'an New District. There is no exploitation potential of deep groundwater in the plain area.

Key words: Haihe River Basin; hydrogeological survey project; groundwater resources; spatial distribution; exploitation potential; Beijing; Tianjin; Hebei; Shanxi; Henan ; Shandong

About the first author: YANG Huifeng, male, born in 1977, doctor, senior engineer, engaged in hydrogeology and water resources; E-mail: yanghuifeng@mail.cgs.gov.cn.

About the corresponding author: Meng Ruifang, male, born in 1988, master, assistant researcher, engaged in the research of water resources; E-mail: mengruifang@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No.DD20190336, No.DD20160230), special investigation project of natural resources of Ministry of Natural Resources (No.B202012).

1 引言

海河流域是中国政治、文化中心和经济发达地区,同时也是粮食主产区之一,京津冀协同发展国家战略规划,雄安新区位于区内,地理位置极其重要。20世纪70年代末以来,地下水超采问题不断加剧,海河流域平原区地下水位持续下降并形成巨大的地下水降落漏斗(石建省等,2014),2020年漏斗面积已扩大到 $4.19 \times 10^4 \text{ km}^2$,引发了地面沉降、海水入侵等一系列环境地质问题(朱菊艳等,2014)。海河流域水资源严重短缺,地下水占总供水量70%左右,且长期处于超采状态,据统计2001—2013年平原区地下水年均超采量达到峰值 $61.35 \times 10^8 \text{ m}^3$,地下水超采及引发的环境地质问题极大制约着流域社会经济可持续发展,迫切需要开展地下水资源和开发利用潜力研究,为地下水超采治理、地下水资源

可持续利用和生态环境保护提供科学依据。

流域尺度的地下水资源开发利用研究一直是水资源研究的热点问题,20世纪30—70年代,美国地质调查局(USGS)对各州及21个重点区开展了流域尺度地下水资源评价,提出地下水资源优化管理对策(A.D'Brudiffret, 1965;杨建锋等,2007),20世纪60—80年代前苏联、澳大利亚等国家相继开展流域尺度地下水资源评价。20世纪60年代以来,中国陆续开展全国尺度的地下水资源评价,海河流域作为地下水资源调查研究的重点区域,在地下水的更新性、地下水超采引起的环境地质问题、地下水资源及可持续利用等方面开展了大量的工作。地下水更新性方面,诸多学者进行了研究,主要观点是:平原区浅部含水层与外界水力联系密切,水循环更新速度快,属于可更新的地下水资源(张光辉等,2009);人类开采活动诱发了深层地下水的补给,加

快了地下水的循环速度,增强了深层水的可更新性(王家兵,2002;张海涛,2019);通过氡、 ^{14}C 等同位素技术对地下水的更新性进行分析,认为山前平原深层地下水更新强度大于每年3%,地下水 ^{14}C 年龄小于10 ka B.P,具有可更新的地下水资源属性,中东部深层地下水 ^{14}C 年龄为10~25 ka B.P.,为储存资源,不具有更新性(陈宗宇等,2009)。地下水超采引发的环境地质问题方面,学者提出地表水过度拦蓄、地下水开采强度过大是平原地下水超采主要原因,浅层、深层地下水分别在山前倾斜平原、中东部平原形成巨型超采区(李文鹏等,2020);人类活动是影响地下水位降落漏斗演变的主导因素(费宇红等,2009a);结合地面沉降、地下水位下降,系统评价了华北平原深层地下水超采状况(石建省等,2010);深层地下水超采是引发地面沉降的主要因素(张光辉等,2004);提出了扭转地下水超采局面、遏制地下水环境问题的对策建议等(陈飞等,2020;于洋等,2020)。在地下水资源及可持续利用,尤其是地下水潜力研究方面,国外主要是选定不同水文地质要素,如地貌、岩性、降水、地下水埋深、土地利用类型等进行综合分析,确定地下水开发潜力分区(Panigrahi et al.,1995;Murthy et al.,2000;Shahid et al.,2000;Ettazarini et al.,2007;Igor et al.,2014),相关研究在干旱、缺水区的印度泰米尔纳德邦、埃及西奈半岛、韩国浦项港口、希腊中部农业区取得了良好效果(Krishnamurthy et al.,1996;Elewa et al.,2011;Oh et al.,2011;Selim and Abdel-Raouf,2013;Oikonomidis et al.,2015)。海河流域20世纪80年代以来系统开展了地下水资源评价及可持续利用研究,国家六五、七五科技攻关先后开展了海河流域第一次地下水资源评价,提出了地矿部、水利部协调一致的地下水资源量;水利部海河水利委员会开展海河流域第二次水资源评价,山区采用排泄量法,平原区采用均衡法,评价了流域地下水资源数量及其分布(任宪韶等,2007);中国地质调查局水文地质环境地质研究所,开展华北平原区地下水资源及可持续利用评价(张兆吉等,2009a)。在地下水资源潜力及可持续利用研究方面,许多学者根据地下水允许开采量与开采程度进行地下水潜力分级(闻人雪星等,1991;商广宇等,1998;陈德华等,2000);也有学者考虑农业节水潜力、微咸水开发潜

力,地质环境约束,探索地下水潜力评价方法(王贵玲等,2003;鲍其云等,2001;康凤新等,2005);海河流域平原区地下水潜力研究比较深入(王金哲等,2005;张兆吉等,2009b;石建省等,2010;钱永等,2014;于开宁等,2018),认为浅层淡水开采潜力一般,但微咸水开采潜力较大,深层地下水总体处于超采状态,无开采潜力;平原区北京、天津、石家庄等大中型城市基本无开采潜力,西部山区岩溶水具有一定开采潜力(贺国平等,2005;张燕君,2006;王家兵等,2010;王晓红等,2011)。2010年以后,海河流域水资源研究主要集中在水循环演变和水资源调控方面,2010—2014年,中国地质调查局水环所完成了973项目“华北平原地下水演变机制与调控”,围绕人类强烈活动对区域地下水系统的影响、含水层系统结构变异与资源环境效应、地下水的涵养与调控机制等重大科学问题开展了系统研究;中国水利科学院提出了海河流域二元水循环理论模式、驱动机理,分析了“万年—千年—百年”尺度上水循环演变历程和变化规律,提出了水资源调控途径(王建华等,2015),对海河流域水循环及其伴生过程的机理识别和过程模拟进行系统研究,提出“水资源—生态—环境”综合调控建议(王浩等,2016)。总之,海河流域进行了大量的地下水资源及开发利用潜力方面的研究,取得丰硕的成果,但也存在需要进一步探索的问题:一是强烈人类活动影响下流域水循环和水文地质参数变化对地下水资源的影响;二是以往对浅层地下水开采资源通常采用天然补给资源减掉不可袭夺的排泄量进行评价,未完全考虑在地下水超采和存在巨大水位降落漏斗条件下,漏斗恢复到最优生态水位所需的水量,即生态水位约束下开采资源评价方法亟需深入研究;三是对平原区深层地下水可利用量评价,以往主要是采用侧向径流量和浅层越流量进行计算,未很好考虑深层地下水的年龄及更新性来确定可利用地下水的空间分布,尤其中东部地区深层地下水是否具备可利用条件,未完全界定。本次研究中,根据近年来实施的国家地下水监测工程和1:5万水文地质调查的抽水试验数据对水文地质参数进行了校核,结合笔者所承担的海河流域水文地质调查项目对区域水循环条件变化进行了分析,在第二次地下水资源评价基础上,利用最新的调查数

据,开展了地下水资源评价及潜力研究,其中对浅层地下水可采资源,综合考虑地下水位降落漏斗恢复、大中城市地下空间安全、土壤盐渍化防控,湿地维系等保障地下水资源、环境和生态功能得到充分发挥的生态水位约束进行评价;对深层地下水可利用量则分别考虑地面沉降防控水头和地下水更新性进行评价。

2 研究区概况

2.1 自然地理

海河流域位于 $112^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$, $35^{\circ}\sim 43^{\circ}\text{N}$,行政区划包括北京、天津全境以及河北、山西、河南、山东、内蒙古、辽宁部分地区(图1),是我国政治、经济和文化中心。流域东临渤海,南接黄河,西依太行山,北连内蒙古高原,地势总体呈西北高、东南低,燕山、太行山环抱海河流域,平原区地势自西、北、西南三面向渤海湾倾斜,总面积约 $32.11\times 10^4\text{km}^2$ 。海河流域地处暖温带半湿润、半干旱大陆性季风气候区,多年平均降水量535 mm,多年平均水面蒸发量850~1300 mm。水



图1 海河流域地理位置图

Fig.1 Geographical location of the Haihe River Basin

系由滦河、蓟运—潮白河、永定河、大清河、子牙河、漳卫河、徒骇河、马颊河组成。

2.2 水文地质状况

海河流域山区地下水分为山间盆地松散岩类孔隙水、碳酸盐岩类岩溶水、基岩裂隙水三大类(图2)。松散岩类孔隙水主要赋存于大同、张宣、延庆、忻定、长治等盆地,富水性强或中等;岩溶水主要赋存于娘子关泉域、辛安泉域、黑龙洞泉域、邢台百泉泉域、威州泉域等岩溶泉域,含水岩组以寒武系—奥陶系灰岩、蓟县系—长城系白云岩为主,一般富水性较强;基岩裂隙水主要赋存于碎屑岩、岩浆岩、变质岩裂隙和构造破碎带中,贮水构造分布极不均匀,含水性能差异很大,一般富水性较弱。

平原区地下水主要赋存于第四系松散层中,自上而下分为4个含水层组,第I含水层组底界埋深一般小于50 m,第II含水层组底界埋深120~210 m,第III含水层组底界埋深250~310 m,第IV含水层组底界埋深350~550 m。浅层地下水在山前平原主要赋存于80~120 m以浅的第I、II含水层组,在中东部平原主要赋存于60 m以浅的第I含水层组为主,该区微咸水、咸水广泛分布;深层地下水在山前平原主要赋存于第III、IV含水层组,在中东部平原主要赋存于II、III含水层组。

3 研究方法与数据来源

利用最新的调查评价数据,研究降水、径流、开采量、地下水位、地下水位降落漏斗等水循环要素演变特征,融合《海河流域水资源评价》山区地下水资源评价成果、《华北平原地下水可持续利用调查评价》平原区地下水资源评价成果,开展海河流域地下水天然资源量汇总评价。

山区采用排泄量法进行地下水资源评价,以总排泄量作为地下水资源量。平原区采用均衡法进行评价,水文地质参数主要来源于《华北平原地下水可持续利用调查评价》等成果,并根据近年来实施的国家地下水监测工程和1:5万水文地质调查的抽水试验数据对水文地质参数进行校核。

浅层地下水均衡方程:

$$\sum Q_{\text{补}} - \sum Q_{\text{排}} = \Delta Q$$

$$\text{总补给量: } \sum Q_{\text{补}} = Q_{\text{降水}} + Q_{\text{河流}} + Q_{\text{渠道}} + Q_{\text{渠灌}} +$$

$$Q_{\text{井灌}} + Q_{\text{越流补}} + Q_{\text{侧入}}$$

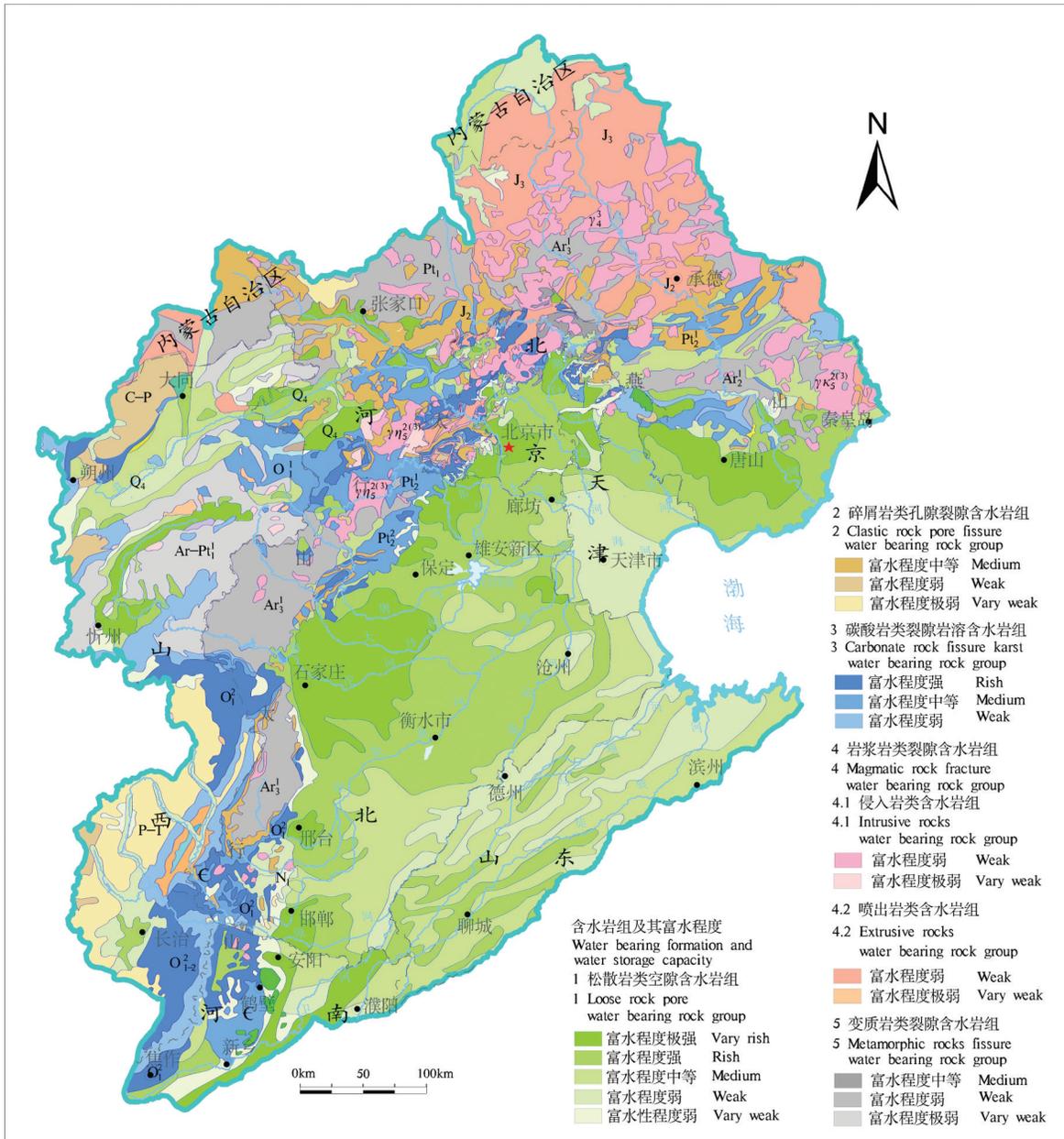


图2 海河流域水文地质图

Fig.2 Hydrogeological map of the Haihe River Basin

总排泄量: $\sum Q_{排} = Q_{蒸发} + Q_{开采} + Q_{侧出} + Q_{越流排} + Q_{溢出}$

蓄变量: $\Delta Q = \Delta h \times \mu \times F$

$Q_{降水}$ 为降水入渗补给量, $Q_{河流}$ 为河流入渗补给量, $Q_{渠道}$ 为引水渠道渗漏补给量, $Q_{渠灌}$ 为渠水灌溉入渗补给量, $Q_{井灌}$ 为浅层地下水井灌回归量, $Q_{越流补}$ 为浅层地下水越流补给量, $Q_{侧补}$ 为浅层地下水侧向流入量, $Q_{蒸发}$ 为潜水蒸发量, $Q_{开采}$ 为浅层地下水开采量, $Q_{侧出}$ 为浅层地下水侧向流出量, $Q_{越流排}$ 为浅层地

下水越流排泄量, $Q_{溢出}$ 为浅层地下水溢出量, Δh 为浅层地下水水位变幅(m), μ 为浅层地下水变幅带给水度, F 为均衡区面积(km²).

深层地下水均衡方程:

$$\sum Q_{补} - \sum Q_{排} = \Delta Q$$

$$\text{总补给量: } \sum Q_{补} = Q_{侧补} + Q_{越流补}$$

$$\text{总排泄量: } \sum Q_{排} = Q_{开采} + Q_{侧排} + Q_{越流排}$$

$$\text{蓄变量: } \Delta Q = Q_{弹} + Q_{压密}$$

$Q_{侧补}$ 为深层地下水侧向补给量, $Q_{越流补}$ 为深层地

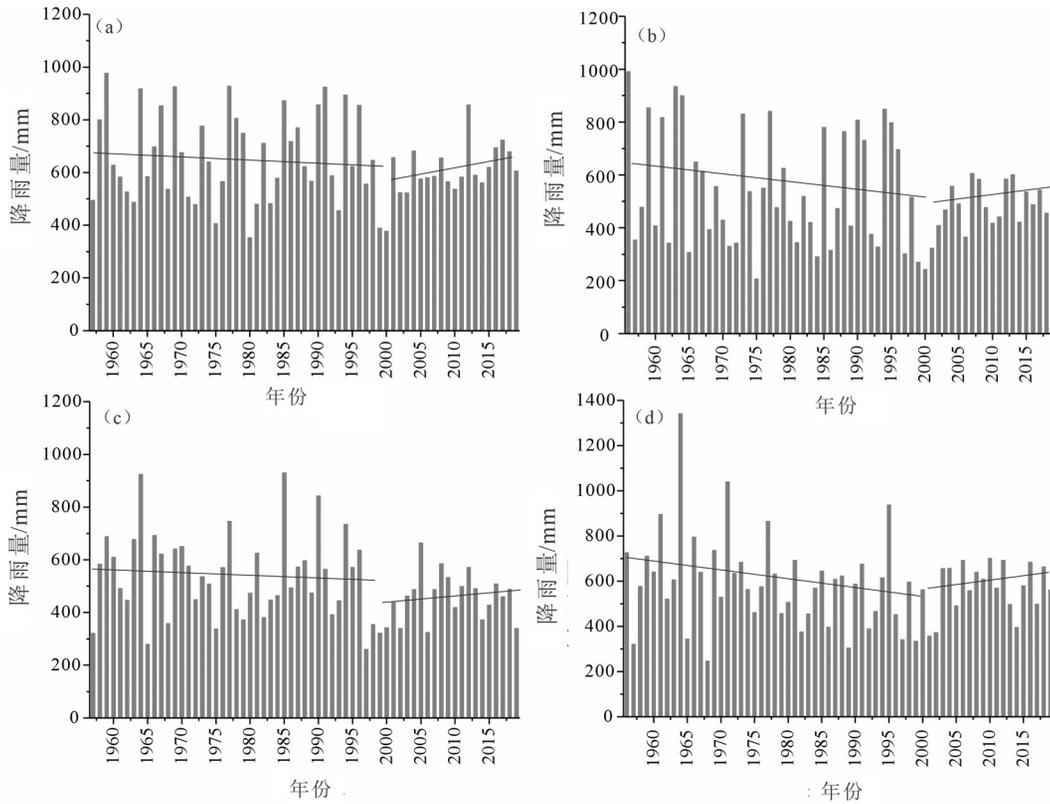


图3 海河流域降水量变化趋势
a—密云站-山区;b—保定站-山前平原;c—饶阳站-中部平原;d—黄骅站-滨海平原

Fig.3 Trends of precipitation in the Haihe River Basin

a—Miyun Station—Mountain; b—Baoding Station—Piedmont Plain; c—Raoyang Station—Central Plain; d—Huanghua Station—Coastal Plain

下水越流补给量, $Q_{\text{开采}}$ 为深层地下水开采量, $Q_{\text{侧排}}$ 为深层地下水侧向排泄量, $Q_{\text{越流排}}$ 为深层地下水越流排泄量, $Q_{\text{弹}}$ 为深层含水层弹性释水量, $Q_{\text{压密}}$ 为深层黏性土层压密释水量。

山区地下水开采资源量为天然资源量减去现状条件下不可袭夺的排泄量。平原区浅层水开采资源量,以水生态环境改善为目标,以保障地下水的资源、环境和生态功能得到发挥为约束条件进行评价。深层地下水可利用量,仅评价地下水循环积极,地下水年龄小于 1×10^4 a,具有更新性的山前地带,深层地下水可利用量为山前侧向补给与越流补给之和,以地面沉降防控为约束条件进行评价。

采用自然资源部国家地下水监测工程2020年度水质数据,依据《地下水质量标准》(GB/T14848-2017)指标限值,采用地下水质量综合评价方法开展地下水质量评价。基于《地下水潜力评价技术要求》(GWI-D4),开展海河流域地下水开采潜力评价。

4 结果与分析

4.1 水循环要素演变

4.1.1 降水量变化

选取不同地貌单元气象站,进行海河流域降水量变化趋势分析。海河流域降水量2000年前山区、平原降水量总体呈下降趋势,其中山前平原保定站、滨海平原黄骅站降幅较大,山区密云站、中部平原饶阳站降幅相对较小,21世纪初期流域降水量减小到1956年以来的低值,1997—2002年山区密云站、山前平原保定站、中部平原饶阳站、滨海平原黄骅站平均降水量,仅为多年平均降水量的81.36%、65.34%、66.79%、72.82%;2000年以后山区、平原降水量均呈小幅增加,但仍低于历史平均降水量,该阶段山区密云站、山前平原保定站、中部平原饶阳站、滨海平原黄骅站平均降水量占多年平均降水量比重为94.31%、90.01%、90.08%、97.46%(图3)。降

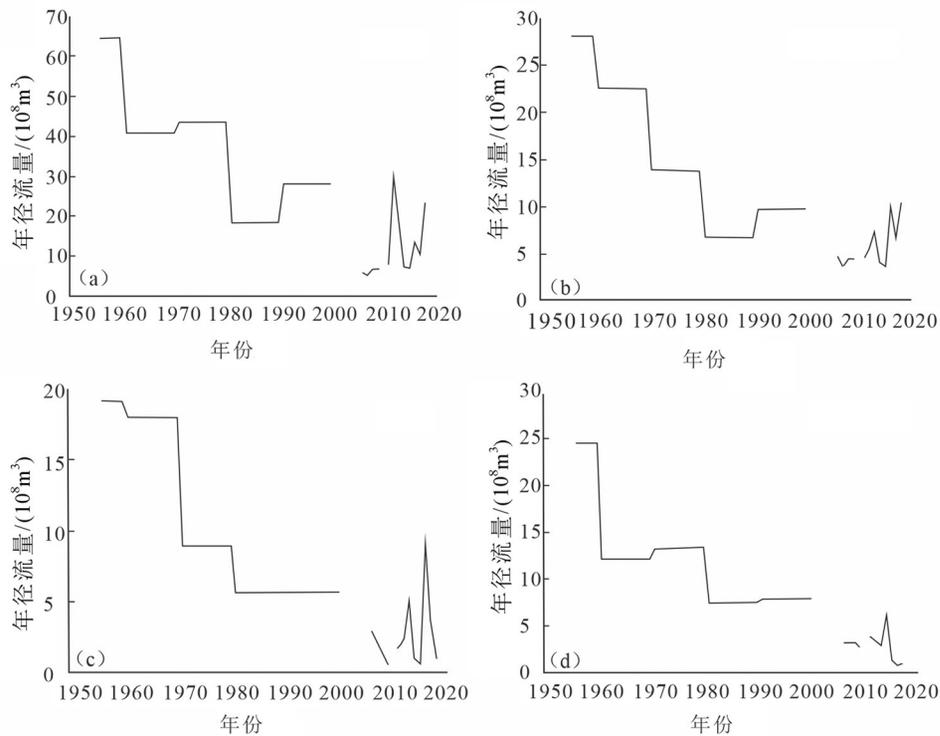


图4 海河流域主要河流出山口实测径流量

a—滦县站;b—黄壁庄水库站;c—观台站;d—密云水库站

Fig.4 Measured runoff at the mountain pass hydrologic stations in Haihe River Basin

a—Luanxian station; b—Huangbizhuang reservoir station; c—Guantai station; d—Miyun reservoir station

水入渗补给是地下水资源的主要来源,降水量变化对地下水资源量有显著影响。

4.1.2 河川径流量变化

海河流域主要河流出山口水文站径流量,其基流是山区地下水资源量,其径流量进入平原区后入渗量也是平原区地下水天然资源量的重要组成,径流量的变化对山区、平原区地下水资源量的变化也有一定指示意义。自北向南,在滦河、潮白河、滹沱河、漳河分别选取滦县站、密云水库站、黄壁庄水库站、观台站分析径流量变化特征,由图4可见20世纪60—90年代,主要河流出山口径流量大幅度减少,呈现快速下降趋势,主要原因是20世纪50年代中期到60年代末,海河流域开展了大规模水利工程建设,截至1969年末,累计建成大型水库26座,拦蓄地表水径流量63%,再加之降水持续减少,导致出山口径流量大幅度减少,平原区出现有河皆干的局面;20世纪90年代以后,尤其是2000年以后,流域总用水量有所减少,外调水和再生水利用有所增加,山区本地地表水拦蓄及供水量有所下降,主要河流出山口径流量有所增加,但出山口径流量在河

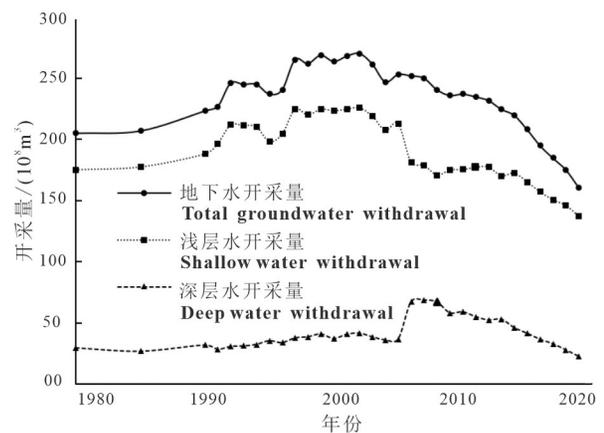


图5 海河流域地下水开采量变化趋势

Fig.5 Variation trend of groundwater exploitation in the Haihe River Basin

川径流量中所占比例依然很低,平原区河道断流、湿地萎缩等水生态问题依然严峻,平原区地下水的河流补给作用仍然没有得到明显改善。

4.1.3 地下水开采量变化

据《海河流域水资源评价》报告和2000年以来海河流域水资源公报数据统计,流域地下水在21世

纪初期以前一直处于高强度开采状态,20世纪80年代至90年代初期地下水开采量为 $211.76 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ (图5),20世纪90年代至21世纪初期,地下水开采量显著增大,达 $249.85 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,其中2002年更是达到开采量峰值 $270.29 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$;2003年以后,由于工农业用水效率有所提高,流域总用水量有所减少,地下水开采量也呈缓慢下降趋势,但开采总量依然较大,至2014年均开采量依然达到 $240.62 \times 10^8 \text{ m}^3$;2014年之后,随着南水北调供水,地下超采治理逐步推进,通过水源置换、地下水压采实施,地下水开采量显著下降至 $188.08 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。地下水开采量下降,一定程度上缓解了地下水位降落漏斗和地面沉降等环境地质问题,但由于长期超采的累积作用,上述问题依然非常严峻。

4.1.4 地下水位变化

山前平原浅层地下水位总体在21世纪初期以前呈快速下降趋势,2014年以后随着南水北调供水、地下水超采治理推进,山前平原主要城市浅层地下水位下降趋势得到扭转,呈回升趋势,但农业

区水位仍呈持续下降趋势,太行山前“保定—石家庄—邢台”冲洪积扇缘一带水位降幅最大,累计降幅达到60~70 m。中东部平原浅层地下水呈自然波动状态(图6)。

以山前平原的潮白河冲洪积扇为例,2007年之前受地下水开采及山区水库拦蓄影响,浅层地下水位年均下降0.15 m;2008—2012年,随着应急调水、北京市节水农业推广、再生水及雨洪水利用,地下水位呈现小幅抬升趋势,水位年均上升0.4 m;2014年后,随着南水北调中线工程供水,以及地下水超采治理工作持续推进,潮白河冲洪积扇开展生态补水,浅层地下水位年均上升幅度增大至0.6 m。

中东部平原浅层地下水以微咸水、半咸水为主,开采程度低,地下水位基本呈自然波动状态。以沧州市区浅层监测井为例,仅在1996—2002年降水量偏少,时段水位呈下降趋势,其余年份地下水位均呈自然波动状态。

平原区深层地下水头总体处于持续下降趋势,1980—2005年,深层地下水头降速1~3 m/a,其中平

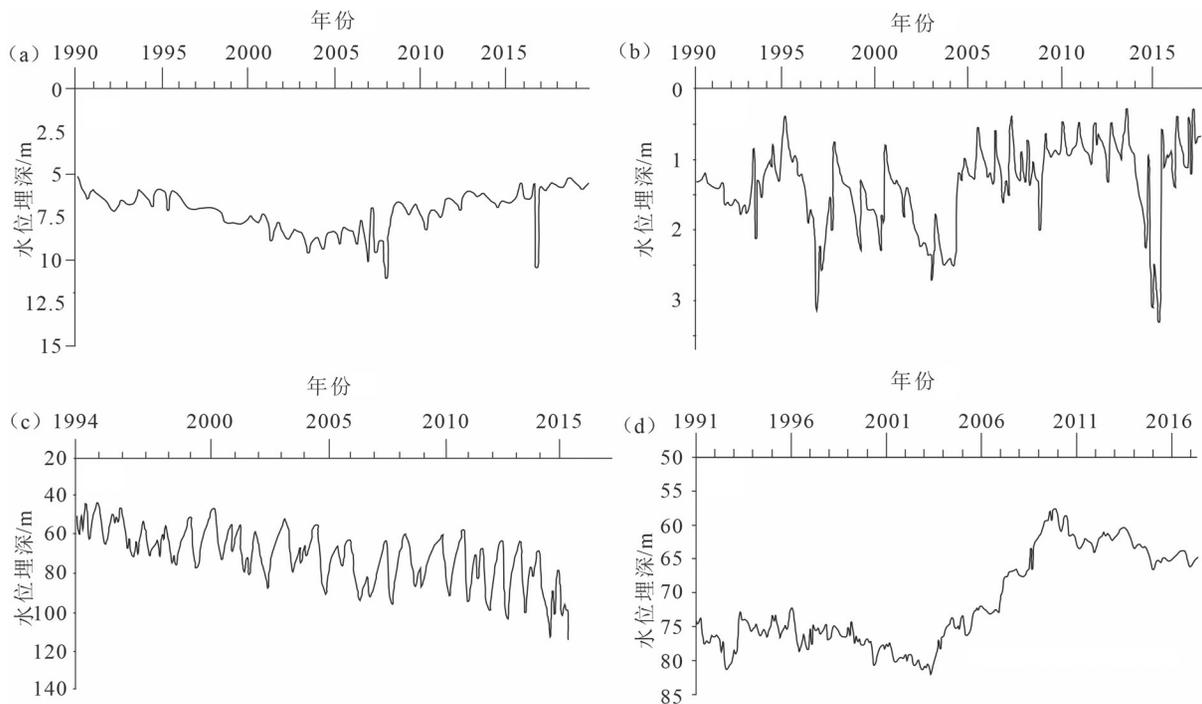


图6 海河流域平原地下水位动态曲线
a—潮白河冲洪积扇-浅层水-山前平原;b—沧州市-浅层水-中东部平原;
c—中东部平原-衡水景县;d—沧州市-深层水-城市区

Fig.6 Fluctuation of groundwater level in plain area of the Haihe River Basin
a—Chaobai river alluvial fan—shallow water—piedmont plain; b—Cangzhou city—shallow water—middle east plain;c—Central and Eastern Plain—Hengshui Jing County; d—Cangzhou City—deep water—urban district

原中东部的衡水、沧州等地水头降速最大,为3~4 m/a,2005—2020年,受农业开采影响,中东部农业区水头仍呈快速下降趋势,但降速有所减小,为2~4 m/a;超采治理实施以来城市区深层地下水头有所回升,但农业区仍处于下降趋势。以处于农业区的衡水市景县和处于城市区的沧州市区为例,衡水市景县浅层地下水以微咸水、半咸水为主,农业灌溉主要开采深层地下水,深层地下水超采状况未得到有效缓解,水头仍在持续下降,降速达2 m/a;沧州市区2005年以来,随着自备井关停,地下水压采,深层地下水头总体呈上升趋势。

4.1.5 地下水位降落漏斗变化

近15年来,浅层地下水位降落漏斗范围持续扩张,总体呈增速加大的趋势。2005—2020年,漏斗总面积累计增大 $1.01 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。其中2005—2014年漏斗面积增速为 $0.04 \times 10^4 \text{ km}^2/\text{a}$,浅层漏斗群沿西部山前冲洪积扇缘呈串珠状分布;2014—2019年漏斗面积增速达 $0.11 \times 10^4 \text{ km}^2/\text{a}$,各浅层地下水降落漏斗范围持续扩张,呈现复合连片趋势;2019—2020年漏斗面积增速有所减缓,为 $0.09 \times 10^4 \text{ km}^2/\text{a}$,浅层漏斗群连片更趋明显,原“宁柏隆漏斗”及“高蠡清漏斗”已经形成“高蠡清—宁柏隆连片漏斗”,总面积达到 $0.95 \times 10^4 \text{ km}^2$;2020年浅层漏斗面积增加至 $1.58 \times 10^4 \text{ km}^2$ (表1)。

深层地下水位降落漏斗范围扩张明显,2005—2020年,深层漏斗总面积扩大为原来的2.9倍,达 $2.61 \times 10^4 \text{ km}^2$,增幅 $0.11 \times 10^4 \text{ km}^2/\text{a}$ 。其中2005—2014年漏斗面积增速为 $0.03 \times 10^4 \text{ km}^2/\text{a}$,2014—2019年漏斗面积增速持续加大,达 $0.28 \times 10^4 \text{ km}^2/\text{a}$,2019—2020年,漏斗面积增幅有所减小,为 $0.03 \times 10^4 \text{ km}^2/\text{a}$,但平原中东部以往存在的衡水、德州、沧州、霸州—静海等深层降落漏斗已无法单独区分,扩张形成“天津—沧州—衡水—德州深层复合漏斗”,面积达

到 $2.38 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

4.1.6 地面沉降变化

地下水长期超采导致地下水位下降,破坏了地层内原有的应力状态,使地层内孔隙水压力减小,土粒间有效应力增加,导致砂层弹性变形,黏性土层固结排水,引发地面沉降(张兆吉等,2009a)。

海河流域平原区地面沉降最早始于20世纪20年代,20世纪60年代中期至80年代中期整体进入快速发展阶段,其中天津市形成了中心城区、塘沽区、汉沽区及海河下游工业区等沉降中心,河北中东部平原、鲁北平原德州市地面沉降范围不断扩展,北京平原东郊形成大郊亭和来广营两个沉降中心。20世纪80年代后期至90年代中期,各地对地面沉降管控力度不一,导致地面沉降差异性发展,天津市实施了三期三年控沉计划,集中治理地面沉降,地面沉降快速发展趋势逐步得到遏制;河北中东部平原地面沉降仍在继续发展,尤其中小城市和农村地区地下水开采量大幅增加导致沉降范围由城市向农村扩展,并在区域上呈连片发展。20世纪90年代中期之后,地面沉降发展地区性差异仍较显著,天津市地面沉降进入综合治理阶段,武清杨村、中心城区、塘沽等地面沉降中心沉降得到有效控制,但市区周边及郊县沉降发展较快;河北平原除沧州市区地面沉降有所缓解之外,其余地区地面沉降仍在快速发展,北京平原形成一南一北两大沉降区,且沉降范围仍在不断向外扩展(郭海朋等,2017年)。

综上所述,海河流域2000年以前降水量呈显著下降趋势,山区水库大量拦蓄地表径流量,平原区有河皆干,地下水位大幅度下降;21世纪初期以后,降水量小幅增加,主要河流出口径流量有增加,地下水超采量在2014年以来显著下降,水循环要素的演变对流域地下水资源量的空间分布、地下水开发利用潜力都有显著的影响。

4.2 地下水资源状况

4.2.1 地下水资源评价的生态约束条件

山区不可袭夺的排泄量包括山前侧向排泄量、河川基流量、岩溶泉域大泉排泄量。其中河川基流量利用2001—2019年度水文监测资料获取;岩溶大泉排泄量为2019—2020年度实测流量;山前侧向排泄量基于2019—2020年高密度地下水位统测绘制的等水位线图,结合水文地质参数求取。可以维系

表1 平原区地下水降落漏斗面积演变

Table 1 Evolution of groundwater depression cone in plain area

年份	浅层漏斗/(10^4 km^2)	深层漏斗/(10^4 km^2)
2005年	0.57	0.91
2014年	0.96	1.17
2019年	1.48	2.57
2020年	1.58	2.61

河流基流量、岩溶大泉排泄量,保证山区水生态良性发展为约束来评价山区开采资源量。

平原区浅层水开采资源量,充分考虑生态水位约束条件,以20世纪80年代初大规模开采尚未引发严重区域环境地质问题的地下水水流场为基本约束,在此基础上,西部山前平原重点考虑有利于降水入渗补给及地下水调蓄,地下水降落漏斗防控、大中城市地下空间安全利用等因素,中东部平原重点考虑土壤盐渍化防控,综合确定地下水位恢复目标阈值。西部山前平原区地下水漏斗区水位埋深控制在15~30 m,大中型城市地下水安全利用区水位埋深大于30 m,有利于降水补给及地下水调蓄区水位埋深控制在10~15 m,中东部平原土壤盐渍化防控区水位埋深控制在3~5 m。参照水利部等四部委《华北地区地下水超采综合治理行动方案》确定的2035年实现地下水采补平衡目标,考虑2050年实现水位恢复条件下,评价浅层地下水开采资源量。

深层地下水可利用量,主要评价地下水¹⁴C年龄小于 1×10^4 a,近山前地带的更新性较强的地下水。生态水位约束条件重点考虑地面沉降防控和地下水更等因素,地面沉降区水头埋深控制在30~45 m,近山前地区水头埋深控制在10~30 m,分别考虑2035年实现采补平衡和2050年实现水位恢复,评价深层地下水可利用量。

4.2.2 地下水资源及空间分布

海河流域地下天然资源量($TDS \leq 2$ g/L的淡水资源) 252.99×10^8 m³/a,其中山区天然资源量 119.13×10^8 m³/a,平原区天然资源量 158.96×10^8 m³/a,山区-平原重复量 25.1×10^8 m³/a(表2,图7,图8)。海河流域地下水资源空间分布不均,其中山区面积占比59.87%,地下淡水资源量占比37.17%;平原区面积占比40.13%,地下淡水资源占比62.83%;平原区地下淡水资源主要赋存于山前地区,中东部地区赋存大范围微咸水、半咸水。

浅层地下水开采资源量 172.98×10^8 m³/a,其中山区开采资源量 41.89×10^8 m³/a,平原区 131.09×10^8 m³/a。

可更新的深层地下水分布面积 1.98×10^4 km²,可利用量 4.68×10^8 m³/a。就地下水资源区而言,可更新的深层地下水可利用量主要分布于大清河流域平原、子牙河流域平原、漳卫河流域平原,合计占比85.6%;就行政区而言,主要分布于唐山、保定、石家庄、邢台、邯郸、新乡的山前平原,合计占比91.7%,见图9。

4.3 地下水质量状况

基于国家地下水监测工程2020年度865个浅层水质点、532个深层水质点,按照35项常规指标,开展地下水质量评价。

浅层地下水水质山区优于平原区,山区(169个

表2 地下水资源量及其分布(按地下水资源区, $TDS \leq 2$ g/L)

Table 2 groundwater resources and distribution(according to groundwater resource division)

地下水资源区	面积 /(10 ⁴ km ²)	山区天然资源 /(10 ⁸ m ³ /a)	平原区天然资源 /(10 ⁸ m ³ /a)	山区-平原重复量 /(10 ⁸ m ³ /a)	天然资源量合计 /(10 ⁸ m ³ /a)	开采资源量 /(10 ⁸ m ³ /a)
滦河流域山区	4.81	21.2	—	2.02	19.18	5.95
滦河流域平原区	0.70	—	10.82	—	10.82	9.34
蓟运—潮白河流域山区	2.20	15.87	—	3.33	12.54	3.06
蓟运—潮白河流域平原区	1.20	—	22.74	—	22.74	20.19
永定河流域山区	4.54	20.67	—	4.34	16.33	11.23
永定河流域平原区	0.66	—	10.26	—	10.26	9.91
大清河流域山区	1.91	16.69	—	6.58	10.11	2.15
大清河流域平原区	1.48	—	33.68	—	33.68	29.47
子牙河流域山区	3.15	24.84	—	5.63	19.21	11.06
子牙河流域平原区	2.38	—	17.41	—	17.41	13.29
漳卫河流域山区	2.61	19.86	—	3.2	16.66	8.44
漳卫河流域平原区	1.82	—	16.62	—	16.62	13.42
古黄河冲积海积平原	4.65	—	47.43	—	47.43	35.47
海河流域合计	32.11	119.13	158.96	25.1	252.99	172.98

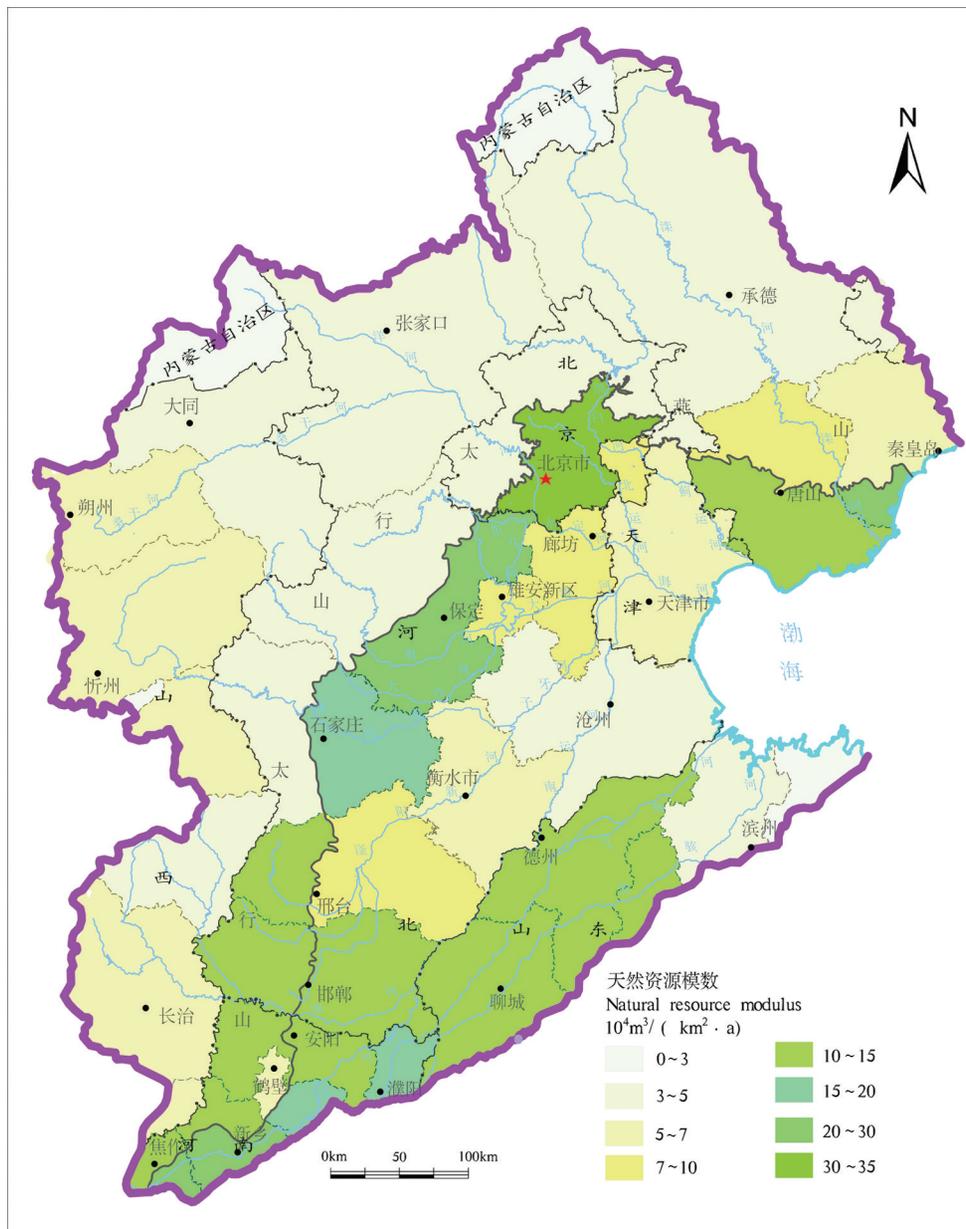


图7 海河流域天然资源模数分区图

Fig.7 Partition map of natural resources modulus of the Haihe River Basin

采样点)以 I~III 类水及 IV 类水为主,其中 I~III 类水占 40.83%,IV 类水占 55.03%,V 类水占 4.14%;平原区(696 个采样点)水质较差,其中 I~III 类水占 10.92%,IV 类水占 44.11%,V 类水占 44.97%,从山前至中东部平原水质逐渐变差,山前冲洪积平原以 I~III、IV 类水为主,中东部平原以 IV、V 类水为主(图 10)。

深层地下水水质优于浅层地下水。I~III 类水占 14.10%,IV 类水占 60.15%,V 类水占 25.75%,由

山前至中东部平原水质逐渐变差,变化特征与浅层地下水基本一致。

海河流域平原区地下水质量总体较差,主要受地质背景及水文地质条件控制。影响浅层水质量的指标包括总硬度、锰、溶解性总固体、钠、硫酸盐、氯化物、碘化物、氟化物、铁等,表现为“高硬度”、“高铁锰”、“高盐”、“高氟”、“高碘”等特征。“高硬度”、“高铁锰”主要与研究区碳酸盐岩矿物、铁-锰矿物等地质背景有关,“高硬度”地下水主要分布

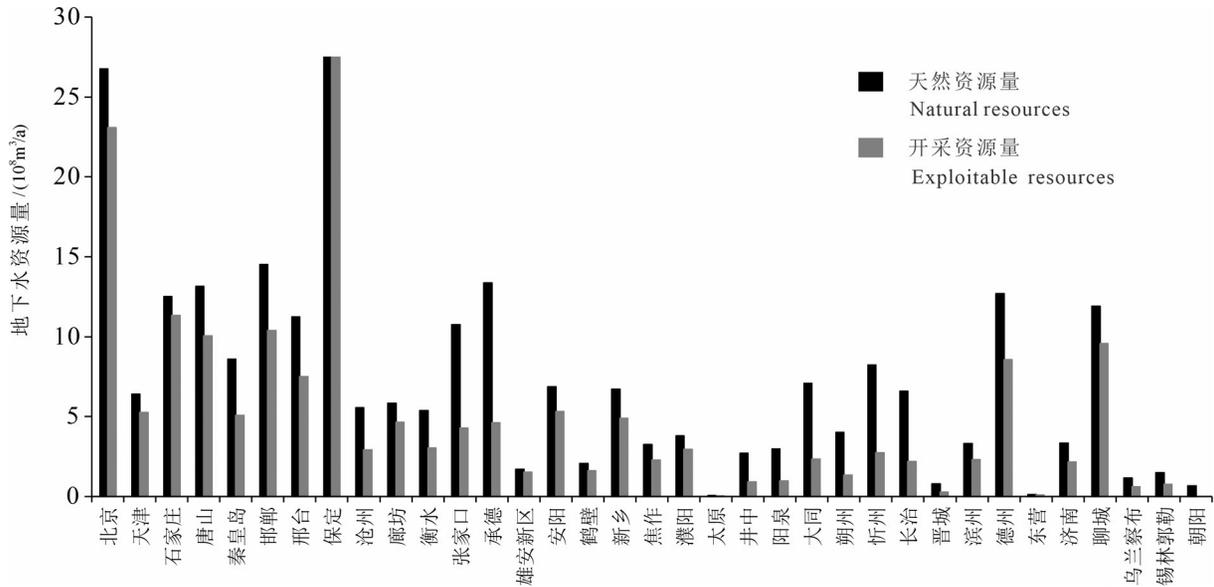


图8 海河流域地下水资源量(按行政区)

Fig.8 Groundwater resources amount of the Haihe River Basin(According to administrative region)

于山前平原,受强烈的溶滤作用影响;而“高铁锰”主要分布于中东部平原,受还原环境的控制,参与微生物地球化学过程(郭华明等,2014)。“高盐”地下水一方面与晚更新世以来中东部平原3次大范围海侵有关,古海水及海相沉积是咸水形成的主要原因;另一方面中东部平原强烈的蒸发进一步使地下水盐度升高。“高氟”、“高碘”主要为地质成因(Pi et al., 2015);“高氟”受萤石溶解、HCO³⁻竞争吸附、蒸发浓缩、方解石-白云石沉淀等多种作用影响(邢丽娜等,2012);“高碘”分布主要受气候、水力梯度、海相沉积物的控制(Qian Yong et al., 2013)。影响平

原区深层水质量的指标主要包括氟化物、锰、溶解性总固体、碘化物、氯化物、硫酸盐、总硬度、铁等。另外,人类活动也是影响地下水质量的另一个重要因素。山前冲洪积扇地下水超采导致硫酸盐等地表污染物迁移,污染地下水(田夏等,2020);中东部深层水超采引起咸水下移,进而导致矿化度升高(费宇红等,2009b)。

4.4 地下水开采潜力状况

4.4.1 开采潜力评价方法

地下水开采潜力评价公式:

$$\alpha = (Q_{\text{开采}} + Q_{\text{可扩大开采}}) / Q_{\text{开采}}$$

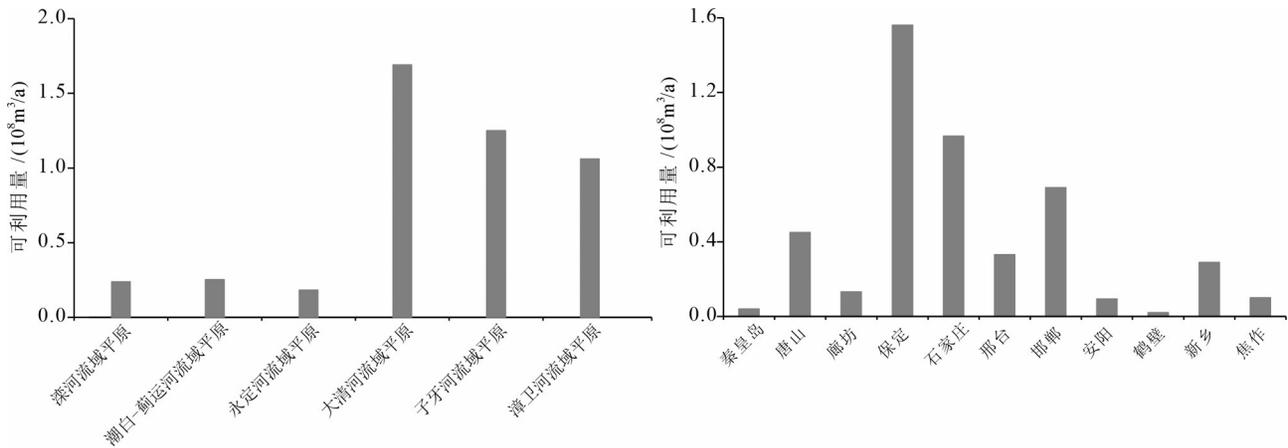


图9 深层水可利用量(a,按地下水资源区;b,按行政区)

Fig.9 Availability of deep groundwater (a, groundwater resource division; b, administrative region)

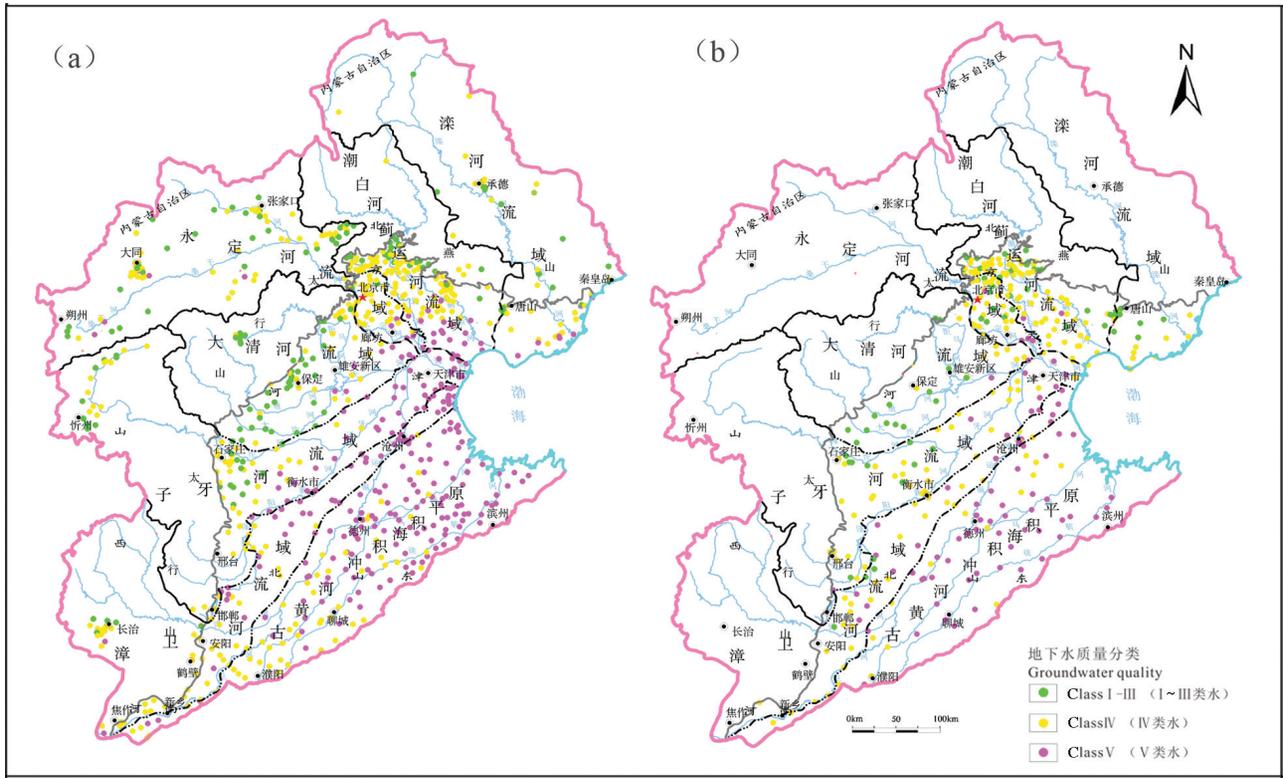


图10 地下水质量图 (a—浅层地下水质量;b—深层地下水质量)
 Fig.10 Map of groundwater quality
 (a—Shallow groundwater; b—Deep groundwater)

α 为开采潜力系数;

$Q_{\text{开采}}$ 为开采资源量; $Q_{\text{可扩大开采}}$ 主要指微咸水可扩大开采量; $Q_{\text{开采}}$ 为地下水实际开采量。

潜力分级: $\alpha \geq 1.4$,潜力大; $1.2 \leq \alpha < 1.4$,潜力较大; $1.0 \leq \alpha < 1.2$,潜力较小; $\alpha < 1.0$,无潜力。

结合地下水资源禀赋、地下水富水性及开采状况、微咸水可扩大开采量、环境地质问题分布等进行综合分析,进行地下水开采潜力评价。

4.4.2 浅层地下水开采潜力状况

海河流域开采盈余量 $19.80 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,主要分布于豫北山区、北京平原、天津平原、鲁北平原;微咸水可扩大开采量 $14.89 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,主要分布于天津平原、河北中东部平原、鲁北平原(表3)。

就山区而言,燕山—太行山北部的北京山区、承德、张家口、大同、朔州、乌兰察布,含水岩组以火成岩、变质岩为主,局部为山间盆地,富水性弱,地下水资源禀赋较差,无开采潜力,其中北京山区、承德、张家口为京津冀生态涵养区,应加强水源涵养区水资源保护,改善生态环境;太行山中部的忻州、

阳泉、晋中、保定山区、邢台山区、邯郸山区,含水岩组以碳酸盐岩为主,富水性以中等、弱为主,地下水资源禀赋中等,但该区岩溶水开发利用程度较高,大部分泉流量衰减,部分泉域断流,忻州、阳泉、晋中、保定山区开采潜力较小,开采潜力模数小于 $2 \times 10^4 \text{ m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,邢台—邯郸山区由于矿山排水,百泉、黑龙洞泉均已断流,石家庄山区地下水开采程度高,基本无开采潜力;太行山南部的豫北山区,含水岩组以碳酸盐岩为主,富水性强或中等,地下水资源禀赋好,该区地下水开发利用程度较低,开采潜力较大,开采潜力模数大于 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,见图11。

就平原区而言,山前平原地下水资源禀赋好,富水性强,但该区域同时也是地下水开采强度最大的地区,由于浅层地下水长期超采,山前平原冲积扇扇缘处形成“高蠡清—宁柏隆”等大范围地下水位降落漏斗,仅秦皇岛平原开采潜力大,北京、唐山平原区开采潜力较小,其他区域基本无开采潜力;中东部平原的天津、衡水、沧州,地下水资源禀

表3 浅层地下水开采潜力状况

Table 3 Potential of shallow groundwater exploitation

行政区	面积 /(10 ⁴ km ²)	开采资源量 /(10 ⁸ m ³ /a)	开采量 /(10 ⁸ m ³ /a)	盈余量 /(10 ⁸ m ³ /a)	微咸水可扩大 开采量/(10 ⁸ m ³ /a)	潜力系数	潜力等级	潜力模数 /(10 ⁴ m ³ /(km ² ·a))
北京山区	1.04	2.52	2.88	-	-	0.88	无潜力	-
北京平原	0.60	20.55	17.95	2.60	-	1.14	潜力较小	4.31
天津山区	0.08	0.36	0.29	-	-	1.25	潜力较小	0.88
天津平原	1.08	4.90	2.74	2.16	1.14	2.20	潜力较小	3.07
石家庄山区	0.74	1.73	5.40	-	-	0.32	无潜力	-
石家庄平原	0.67	9.60	17.69	-	0.32	0.56	无潜力	-
唐山山区	0.60	1.99	3.61	-	-	0.55	无潜力	-
唐山平原	0.79	8.07	9.11	-	1.46	1.05	潜力较小	0.52
秦皇岛山区	0.58	1.61	2.70	-	-	0.60	无潜力	-
秦皇岛平原	0.19	3.47	2.69	0.78	0.83	1.60	潜力大	8.40
邯郸山区	0.46	2.22	2.63	-	-	0.84	无潜力	-
邯郸平原	0.75	8.17	11.72	-	0.38	0.73	无潜力	-
邢台山区	0.36	1.68	1.69	-	-	0.99	无潜力	-
邢台平原	0.88	5.82	8.48	-	2.35	0.96	无潜力	-
保定山区	1.12	3.70	1.55	0.40	-	2.38	潜力较小	1.91
保定平原	0.90	23.77	20.47	3.30	-	1.16	无潜力	-
沧州	1.41	2.92	2.97	-	1.01	1.32	潜力较小	0.68
廊坊	0.64	4.64	5.34	-	-	0.87	无潜力	-
衡水	0.88	3.03	4.32	-	1.54	1.06	潜力较小	0.29
张家口	2.59	4.29	5.47	-	-	0.79	无潜力	-
承德	3.53	4.63	5.12	-	-	0.90	无潜力	-
雄安新区	0.20	1.51	1.68	-	0.09	0.95	无潜力	-
安阳山区	0.30	2.63	1.35	1.28	-	1.95	潜力较大	4.31
安阳平原	0.27	2.68	6.22	-	0.06	0.44	无潜力	-
鹤壁山区	0.08	0.26	0.24	0.02	-	1.08	潜力较小	0.24
鹤壁平原	0.11	1.36	2.73	-	-	0.50	无潜力	-
新乡山区	0.15	1.18	0.35	0.83	-	3.37	潜力较大	5.54
新乡平原	0.20	3.71	4.63	-	0.48	0.90	无潜力	-
焦作山区	0.11	0.99	0.55	0.45	-	1.82	潜力较大	4.20
焦作平原	0.07	1.30	2.19	-	0.19	0.68	无潜力	-
濮阳	0.19	2.95	3.56	-	0.23	0.89	无潜力	-
太原	0.07	0.02	0.03	-	-	0.80	无潜力	-
晋中	0.73	0.90	0.34	0.56	-	2.65	潜力较小	0.76
阳泉	0.46	0.98	0.49	0.50	-	2.02	潜力较小	1.09
大同	1.44	2.34	3.75	-	-	0.62	无潜力	-
朔州	0.78	1.32	2.27	-	-	0.58	无潜力	-
忻州	1.35	2.73	2.37	0.36	-	1.15	潜力较小	0.26
长治	1.14	2.18	2.74	-	-	0.80	无潜力	-
晋城	0.13	0.26	0.16	0.11	-	1.68	潜力大	0.79
滨州	0.66	2.30	1.10	1.20	0.91	2.93	潜力较小	3.19
德州	1.03	8.55	6.93	1.62	1.79	1.49	潜力较大	3.31
东营	0.29	0.08	0.0025	0.08	0.73	319.85	潜力较小	2.79
济南	0.23	2.16	0.57	1.59	0.48	4.62	潜力较大	9.19
聊城	0.86	9.55	7.69	1.86	0.90	1.36	潜力较大	3.23
乌兰察布	0.59	0.60	0.67	-	-	0.89	无潜力	-
锡林郭勒	0.64	0.76	0.66	0.10	-	1.15	潜力较小	0.16
海河流域	32.11	172.98	188.08	19.80	14.89	-	-	-

赋较差,微咸水、半咸水广泛分布,开采潜力较小,潜力模数 $0.29 \times 10^4 \sim 3.07 \times 10^4 \text{ m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$;黄河北岸的鲁北平原,地下水资源禀赋中等,微咸水广泛分布,农业以引黄灌溉为主,地下水开采强度较低,聊城—德州一带开采潜力较大,开采潜力包括开采盈余量及微咸水可扩大开采量,潜力模数 $3.23 \times 10^4 \sim 3.31 \times 10^4 \text{ m}^3/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$,滨海平原的东营、滨州,主要为半咸水、咸水分布区,开采潜力较小。

4.4.3 深层地下水开采潜力状况

河北山前平原深层地下水更新性较好,但开采程度高,基本无开采潜力;豫北山前平原,深层地下水更新性一般,山前侧向补给强度较低,安阳、新乡、焦作平原区地下水开采潜力较小,鹤壁平原区基本无开采潜力(表4)。

4.4.4 雄安新区地下水开采潜力状况

雄安新区地处北京、天津、保定腹地,规划范围主要涵盖河北省雄县、容城、安新3个行政县域,远期规划控制区面积约 2000 km^2 ,定位疏解北京非首都功能、探索人口经济密集地区优化开发新模式、建设国际一流智慧城市、打造水城共融的生态城市、培育创新驱动发展新引擎,优化京津冀城市布局。

雄安新区地下资源量 $1.69 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,开采资源量 $1.51 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,2014年以来浅层地下水开采量 $1.68 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,开采程度110.95%;雄安新区微咸水可扩大开采量 $0.09 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,主要分布于雄安县米家务镇东—双堂乡、安新县同口镇北部地区。经评价,雄安新区浅层水开采潜力系数0.95,总体处于超

采状态,基本无开采潜力。雄安新区水资源短缺、供需矛盾突出,地下水超采严重(夏军等,2017)。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》,雄安新区全区处于浅层地下水一般超采区,雄县城区、安新城区、容城城区为浅层地下水禁采区。由于区域地下水长期超采,雄县大部分地区位于雄县—霸州浅层地下水降落漏斗内,安新县西部、容城县西南处于高鑫清浅层地下水降落漏斗范围之内。建议雄安新区浅层地下水严格按照 $1.51 \times 10^8 \text{ m}^3$ 可开采淡水资源严格控制开采量,在此基础上可进一步加强南水北调水和微咸水的合理开发利用,缓解新区建设中的水资源短缺问题。

雄安新区深层地下水 ^{14}C 年龄以10~18 ka B.P.为主,地下水循环交替缓慢,更新性差,基本为地下水储存资源(陈宗宇等,2009),建议雄安新区深层地下水以保护为主。

雄安新区城市供水,应以南水北调中线工程、本地地表水(西大洋水库、王快水库)联合供水为主,坚持“以水定城,以水定地,以水定人,以水定产”,合理规划不同阶段的发展规模和承载人口。建议加强白洋淀湿地生态保护,80年代以来,白洋淀出现多次干淀(王凯霖等,2018),为避免白洋淀生态退化,继续开展河湖生态补水,改善湿地生态环境。依据《河北雄安新区规划纲要》,实施退耕还淀,维持白洋淀6.5~7.0 m水位高程和 360 km^2 湿地面积;在开展人工生态补水,维持湿地生态水位的同时,加强湿地地表水、浅层地下水水质监测,规避水环境风险。

5 讨论与建议

海河流域水资源极度短缺,供需矛盾突出,南水北调工程一定程度上缓解了供水紧张局面,但目前尚不能满足社会经济快速发展需求,亟需研究流域水平衡状态,从供给侧开展多水源联合调配,从需求侧开展水资源优化配置,通过水资源管理和调控解决面临的严峻问题;近40年来流域地下水位大幅度下降,地下水超采治理后水位下降趋势有所减缓,但农业区水位下降趋势尚未得到遏制,亟需开展农业区地下水位恢复的控制目标和地下水超采精准治理方案研究;流域平原区浅层地下水局部污

表4 深层地下水开采潜力状况

Table 4 Exploitation potential of deep groundwater

行政区	可利用量 ($10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)	开采量 ($10^8 \text{ m}^3/\text{a}$)	开采 程度/%	潜力系数	潜力等级
唐山	0.45	1.42	316.06	0.32	无潜力
秦皇岛	0.04	0.04	104.63	0.96	无潜力
廊坊	0.13	0.14	108.33	0.92	无潜力
保定	1.56	1.59	101.94	0.98	无潜力
石家庄	0.97	2.85	295.13	0.34	无潜力
邢台	0.33	0.39	116.74	0.86	无潜力
邯郸	0.69	1.21	175.11	0.57	无潜力
安阳	0.09	0.04	42.99	2.33	潜力较小
鹤壁	0.02	0.04	211.47	0.47	无潜力
新乡	0.29	0.28	96.67	1.03	潜力较小
焦作	0.10	-	0.00	-	潜力较小

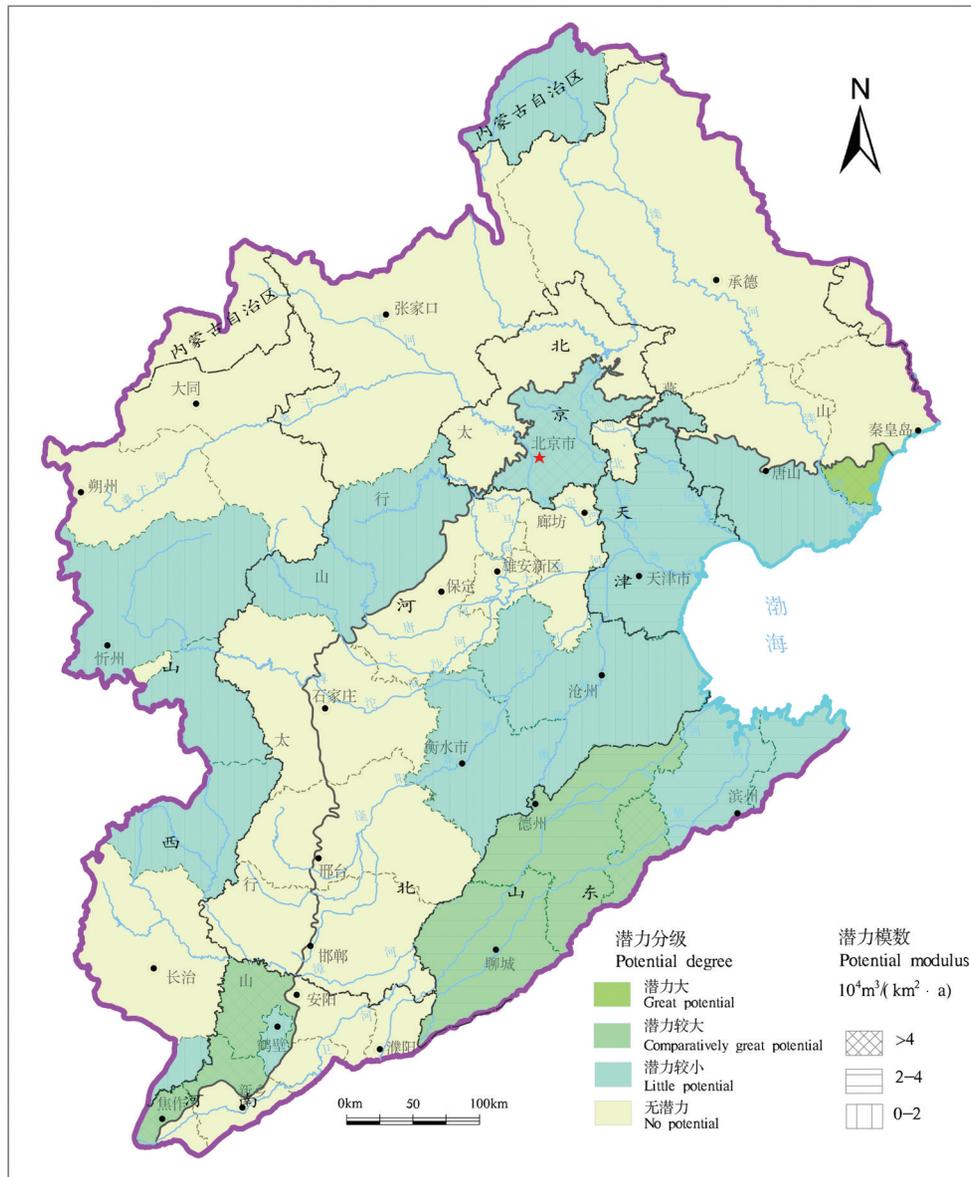


图11 海河流域浅层地下水开采潜力图

Fig.11 Exploitation potential of shallow groundwater in the Haihe River Basin

染严重,农业区地下水氮污染较严重,部分城市和工矿企业周边重金属污染较严重,有毒有害有机污染物在平原北部城市人口密集区及古河道带检出明显,亟需加强地下水污染调查和修复治理研究。为解决海河流域地下水资源问题,提出以下建议:

(1)以水平衡研究为核心,以水资源承载能力为刚性约束,调整优化海河流域国土空间开发利用格局,把水作为国土空间开发和生态环境保护的核心要素,开展水资源优化配置与管理研究,从供给

侧优化地下水、地表水、外调水、非常规水等多水源调配,从需求侧进行生态、生活、生产用水优化配置,支撑地下水可持续利用与生态环境保护。

(2)开展地下水超采区防控目标水位精细评价,以遏制地下水超采和水生态环境改善为目标,分区、分含水层段精细化评价,确定保证地下水的资源、环境和生态功能得到发挥的超采区防控目标水位阈值;建立并落实水量-水位双控治理体系,支撑超采治理精准施策。

(3)在山前平原加强地下水回补工程。优选回补靶区,评估回补能力及环境风险,探索研究雨洪水、外调水、本地地表水等多水源联合高效回补模式,评估天然河道、坑塘、人工渗漏坝、地下水坝等回补方案,逐步实现超采区采补平衡,使地下水位恢复至合理水平。

(4)在中东部平原区充分挖掘微咸水开采潜力和实施水源置换工程。研究南水北调中东线二期工程用于农业灌溉可行性,加强从干渠到田间的灌溉渠网规划建设,逐步置换农业灌溉水源,减少深层地下水开采。

(5)建立周期性水污染调查制度,划定水质恶化和污染风险分区,构建硝酸盐、重金属、有机污染防治等关键技术方法体系,增强污染防治技术支持能力;以现有国家地下水监测工程为基础,建设海河流域平原地下水环境监测网,提高地下水环境监测预警能力。

6 结 论

(1)2000年以前流域降水量、河川径流量均呈减小趋势,地下水资源量随之减少;2001年以后,降水量与河川径流量小幅增加;2014年以来,随着南水北调供水,地下水超采治理实施,地下水开采量显著减少,但农业区地下水超采尚未得到有效遏制,地下水位降落漏斗仍在进一步扩展。

(2)流域地下淡水资源量 $252.99 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,其中山区地下水资源量 $119.13 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,平原区地下水资源量 $158.96 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,山区—平原重复量 $25.1 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$;生态约束条件下浅层水开采资源量 $172.98 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$;可更新的深层地下水可利用量 $4.68 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 。

(3)山区地下水水质总体较好,I~Ⅲ类水占40.83%;平原区浅层地下水水质较差,I~Ⅲ类水占14.10%,从山前至中东部平原水质逐渐变差;深层水水质优于浅层水,I~Ⅳ类水占74.25%,水质变化特征与浅层地下水基本一致。

(4)燕山—太行山北部山区,地下水资源禀赋较差,基本无开采潜力;太行山中部山区地下水开采程度较高,无开采潜力或开采潜力较小;豫北山区地下水资源禀赋好,开采潜力较大,可适度作为地下水应急水源地勘查,同时注意岩溶水资源保

护。山前平原区浅层地下水长期超采形成大范围降落漏斗,基本无开采潜力或潜力较小;中东部平原区浅层地下水以微咸水为主,开采潜力较小;黄河沿岸鲁北平原浅层地下水开采程度较低,聊城—德州一带开采潜力较大。平原区深层地下水基本无开采潜力。

(5)雄安新区浅层地下水基本无开采潜力,深层地下水更新性差,应以保护为主。

References

- A.D'Brudiffret.1965. Ground water— A key resource by c.l. mcguinness—jonyary[J]. Groundwater,3(2):45.
- Bao Qiyun. 2001. A study of comprehensive factors effective on evaluating exploitation potentialities of groundwater resources[J]. Zhejiang Geology, (1): 73–76 (in Chinese) .
- Chen Dehua, Qin Yisu,Wang Zhao.2000.Reasonable exploitation and potentialities analysis of groundwater resources in the Yellow River drainage area[J].Geography and Territorial Research,16(2):48– 52 (in Chinese with English abstract).
- Chen Fei, Ding Yueyuan, Li Yuanyuan, Li Wei, Tang Shinan,Yu Lili, Liu Yunzhu,Yang Yan,Li Jia,Zhang Yan. 2020. Practice and consideration of groundwater overexploitation in North China Plain[J]. South– to– north Water Transfers and Water Science & Technology, 18(2):191–198(in Chinese with English abstract) .
- Chen Zongyu, Hao Hongqiang, Wei Wen, Chen Jingsheng, Zhang Fenge, Wang Ying. 2009. Groundwater renewal and characteristics in the deep confined aquifer in North China Plain[J]. Resources Science, 31: 388–393(in Chinese with English abstract) .
- Elewa H H, Qaddah Atef A. 2011. Groundwater potentiality mapping in the Sinai Peninsula, Egypt, using remote sensing and GIS– watershed–based modeling[J]. Hydrogeology Journal, 19(3): 613–628.
- Ettazarini S. 2007. Groundwater potentiality index: A strategically conceived tool for water research in fractured aquifers[J]. Environmental Geology, 52(3):477–487.
- Fei Yuhong, Miao Jinxiang, Zhang Zhaoji, Chen Zongyu, Song Haibo, Yang Mei. 2009. Analysis on evolution of groundwater depression cones and its leading factors in North China Plain[J]. Resources Science, 31(3): 394–399(in Chinese with English abstract) .
- Fei Yuhong, Zhang Zhaoji, Song Haibo, Qian Yong, Chen Jingsheng, Meng Suhua. 2009. Discussion of vertical variations of saline groundwater and mechanism in North China Plain[J]. Water Resources Protection, 25: 21–23(in Chinese with English abstract) .
- Guo Haipeng, Bai Jinbin,Zhang Youquan, Wang Liya, Shi Jusong, Li Wenpeng, Zhang Zuochen, Wang Yunlong, Zhu Juyan, Wang

- Haigang. 2017. The evolution characteristics and mechanism of the land subsidence in typical areas of the North China Plain[J]. *Geology in China*, 44(6):1115–1127(in Chinese with English abstract) .
- Guo Huaming, Ni Ping, Jia Yongfeng, Guo Qi, Jiang Yuxiao. 2014. Types chemical characteristics and genesis of geogenic high-arsenic groundwater in the world[J]. *Earth Science Frontiers*, 21:1–12(in Chinese with English abstract).
- He Guoping, Zhou Dong, Yang Zhongshan, Zhao Hongyi, Li Cijun. 2005. Current status and evaluation of groundwater resources exploitation in the plain area of Beijing[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, (2): 45–48(in Chinese with English abstract) .
- Igor J. 2014. Estimating potential for exploitation of karst aquifer: case example on two Serbian karst aquifer[J]. *Environmental Earth Sciences*, 71(2).
- Kang Fengxin. 2005. Research on allowable yield of groundwater and its potential evaluation[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, (3):29–33(in Chinese with English abstract) .
- Krishnamurthy J , Kumar N V , Manivel V J M. 1996. An approach to demarcate ground water potential zones through remote sensing and a geographical information system[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 17:1867–1884.
- Li Wenpeng, Wang Longfeng, Yang Huifeng, Zheng Yuejun, Cao Wengeng, Liu Ke. 2020. The groundwater over exploitation status and countermeasure suggestions of the North China Plain[J]. *China Water Resources*, (13):26–30(in Chinese with English abstract) .
- Mckenzie D J. 1990. Water–resources Potential of the Freshwater Lens at Key West, Florida[R]. USGS:Water– Resources Investigations Report , 90–4115 .
- Murthy K S R. 2000. Groundwater potential in a semi–arid region of Andhra Pradesh – a geographical information system approach[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 21(9):1867–1884.
- Oh Hyun–Joo, Kim Yong–Sung, Choi Jong–Kuk, Park Eungyu, Lee Saro. 2011. GIS mapping of regional probabilistic groundwater potential in the area of Pohang city, Korea[J]. *Journal of Hydrology*, 399(3/4):158–172.
- Oikonomidis D, Dimogianni S, Kazakis N, Voudouris K. 2015. A GIS/remote sensing–based methodology for groundwater potentiality assessment in Tirnavos area, Greece[J]. *Journal of Hydrology*, 525: 197–208.
- Panigrahi B, Nayak A K, Sharma S D. 1995. Application of remote sensing technology for groundwater potential evaluation[J]. *Water Resources Management*, 9(3):161–173.
- Pi Kunfu, Wang Yanxin, Xie Xianjun, Su Chunli, Ma Teng, Li Junxia, Liu Yaqing. 2015. Hydrogeochemistry of co–occurring geogenic arsenic, fluoride and iodine in groundwater at Datong basin, Northern China[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 300:652–661.
- Qian Yong, Zhang Zhaoji, Fei Yuhong, Chen Jingsheng, Zhang Fenge, Wang Zhao. 2014. Sustainable exploitable potential of shallow groundwater in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco–agriculture*, 22(8):890–897(in Chinese with English abstract) .
- Qian Yong, Zhang Zhaoji, Fei Yuhong, Li Yasong, Chen Jingsheng. 2013. Preliminary study on distribution and iodine's origin of iodine–rich groundwater in North China Plain[C]//Proceedings of International Conference on Digital Manufacturing & Automation, 940–943.
- Ren Xianshao, Hu Zuoliang, Cao Yinbai, He Shan. 2007. Evaluation of water resources in the Haihe River Basin[M]. Beijing: China Water & Power Press(in Chinese with English abstract) .
- Selim E S I, Abdel–Raouf O. 2013. The use of magnetic and geo–electrical data to delineate the subsurface structures and groundwater potentiality in southeastern Sinai, Egypt[J]. *Environmental Earth Sciences*, 70(4):1479–1494.
- Shahid S, Nath S K, Roy J. 2000. Groundwater potential modelling in a soft rock area using a GIS[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 21(9): 1919–1924.
- Shang Guangyu, Zhao Shixian, Kong Xianfang. 1998. Analysis of groundwater occurrence condition and development potential in Yellow River irrigation area of Shandong Province[J]. *Ground Water*, (2): 80–81(in Chinese) .
- 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*, (5):527–534 (in Chinese with English abstract) .
- Shi Jiansheng, Wang Zhao, Zhang Zhaoji, Fei Yuhong, Li Yasong, Zhang Fenge, Chen Jingsheng, Qian Yong. 2010. Assessment of over–exploitation of deep groundwater in the North China Plain[J]. *Earth Science Frontiers*, 17(6):215–220(in Chinese with English abstract) .
- Tian Xia, Li Yasong, Fei Yuhong, Cao Shengwei, Feng Chuangye, Meng Yan. 2020. Sulfate source identification, migration and transformation in the groundwater over–exploited area of the Hutuo River Basin[J]. *Science Technology and Engineering*, 20(7): 2583–2589(in Chinese with English abstract) .
- Wang Guiling, Liu Zhiming, Liu Huatai, Zhang Junpai, Gao Yexin, Lin Wenjing. 2003. Assessment method of groundwater exploitation potential[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, (1): 63–66(in Chinese with English abstract) .
- Wang Hao, Wang Jianhua, Jia Yangwen. 2016. Evolution Mechanism of Water Circulation and Efficient Utilization of Water Resources in Haihe River Basin[M]. Beijing: Science Press(in Chinese with English abstract) .
- Wang Jiabing, Li Ping, Zhang Baiming, Wang Yabin. 2010. Allowable

- groundwater withdrawal and its determination basis in Tianjin plain[J]. *Earth Science Frontiers*, 17(6): 221–226(in Chinese with English abstract) .
- Wang Jiabing. 2002. Leakage recharge from pores saline groundwater to deep fresh groundwater on the condition of pumping in Huabei Plain—A case of Tianjing Plain[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 29: 35–37(in Chinese with English abstract) .
- Wang Jianhua, Wang Hao, Qin Dayong. 2015. Dual Water Cycle Model and Water Resources Evolution Mechanism in Haihe River Basin[M]. Beijing Science Press(in Chinese with English abstract) .
- Wang Jinzhe, Fei Yuhong, Zhang Guanghui, Shen Jianmei, Nie Zhenlong. 2005. Evaluation of the exploitation potential of groundwater in the Haihe Plain[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, (4):56–59(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 Geosciences*, 39(5):549–558.
- Wang Xiaohong, Liu Wenchen, Shen Yuanyuan, Liu Shicheng. 2011. Analysis on the hydrogeology characteristics and exploitation potential of the emergency karst water source field in Xishan region, Beijing[J]. *Carsologica Sinica*, 30(2):216–221(in Chinese with English abstract) .
- Wen Ren xuexing. 1991. Present situation and potentiality analysis of groundwater resources exploitation and utilization in North China[J]. *Ground Water*, 13(2): 75–78(in Chinese) .
- Xia Jun, Zhang Yongyong. 2017. The problems and challenges faced by the water security in the construction of Xiong'an New District [J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 32(11): 1199–1205.
- Xing Lina, Guo Huaming, Wei Liang, Zhan Yanhong, Hou Chuntang, Li Ruimin, Wang Yi. 2012. Evolution feature and genesis of fluoride groundwater in shallow aquifer from North China Plain[J]. *Journal of Earth Sciences and Environment*, 34:57–67(in Chinese with English abstract) .
- Yang Jianfeng, Wan Shuqin. 2007. History and illumination of hydrogeological survey in the Unites States[J]. *Resources & Industries*, 9(1): 22–26(in Chinese with English abstract) .
- Yu Kaining, Liao Anran. 2018. Evaluation of groundwater exploitation potentiality in the Hebei plain based on niche theory[J]. *Earth Science Frontiers*, 25(1):259–266(in Chinese with English abstract) .
- Yu Yang, Qi Tianlong. 2020. Analysis on the effect of comprehensive control pilot project of groundwater supplement for groundwater over-abstraction in Northern China[J]. *Haihe Water Resources*, 3: 7–16(in Chinese with English abstract) .
- Zhang Guanghui, Fei Yuhong, Liu Keyan. 2004. Groundwater Evolution and Countermeasure in Haihe Plain[M]. Beijing: Science Press(in Chinese with English abstract) .
- Zhang Guanghui, Liu Zhongpei, Lian Yingli, Yan Mingjiang, Wang Jinzhe. 2009. Geohistory characteristics and temporal-spatial diversity of groundwater evolution in North China Plain in Holocene[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 30: 848–854(in Chinese with English abstract) .
- Zhang Haitao. 2019. Groundwater recoverability analysis in the central and eastern Hebei Plain[J]. *Ground Water*, 41:54–56(in Chinese) .
- Zhang Yanjun. 2006. Potential evaluation and sustainable utilization of groundwater resources in Shijiazhuang city[J]. *China Rural Water and Hydropower*, (3):9–11(in Chinese with English abstract) .
- Zhang Zhaoji, Luo Guozhong, Wang Zhao, Liu Chunhua, Li Yasong, Jiang Xianqiao. 2009. Study on sustainable utilization of groundwater in North China Plain[J]. *Resources Science*, 31(3): 355–360(in Chinese with English abstract) .
- Zhang Zhaoji, Fei Yuhong, Chen Zongyu. 2009. Investigation and evaluation of sustainable utilization of groundwater in North China Plain[M]. Beijing: Geological Publishing House(in Chinese with English abstract) .
- Zhu Juyan, Guo Haipeng, Li Wenpeng, Tian Xiaowei. 2014. Relationship between land subsidence and deep groundwater yield in the North China Plain[J]. *South-to-north Water Transfers and Water Science & Technology*, (3):165–169(in Chinese with English abstract) .

附中文参考文献

- 鲍其云. 2001. 地下水资源开采潜力评价的综合因素浅析[J]. *浙江地质*, (1):73–76.
- 陈德华, 秦毅苏, 王昭. 2000. 黄河流域地下水资源开发利用与潜力分析[J]. *地理与地理信息科学*, 16(2):48–52.
- 陈飞, 丁跃元, 李原园. 2020. 华北地区地下水超采治理实践与思考[J]. *南水北调与水利科技*, 18(2):191–198
- 陈宗宇, 皓洪强, 卫文, 陈京生, 张凤娥, 王莹. 2009. 华北平原深层地下水的更新与资源属性[J]. *资源科学*, 31(3):388–393.
- 费宇红, 苗晋祥, 张兆吉, 陈宗宇, 宋海波, 杨梅. 2009a. 华北平原地下水降落漏斗演变及主导因素分析[J]. *资源科学*, 31(3):394–399.
- 费宇红, 张兆吉, 宋海波, 钱永, 陈京生, 孟素花. 2009b. 华北平原地下咸水垂向变化及机理探讨[J]. *水资源保护*, 25: 21–23.
- 郭海朋, 白晋斌, 张有全, 王丽亚, 石菊松, 李文鹏, 张作辰, 王云龙, 朱菊艳, 王海刚. 2017. 华北平原典型地段地面沉降演化特征与机理研究[J]. *中国地质*, 44(6):1115–1127.
- 郭华明, 倪萍, 贾永锋, 郭琦, 姜玉肖. 2014. 原生高砷地下水的类型、化学特征及成因[J]. *地学前缘*, 21:1–12.
- 贺国平, 周东, 杨忠山, 赵泓漪, 李慈君. 2005. 北京市平原区地下水资源开采现状及评价[J]. *水文地质工程地质*, (2):45–48.

- 康凤新. 2005. 地下水允许开采量及其潜力评价研究[J]. 工程勘察, (3):29-33.
- 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.
- 钱永, 张兆吉, 费宇红, 陈京生, 张凤娥, 王昭. 2014. 华北平原浅层地下水可持续利用潜力分析[J]. 中国生态农业学报, 22(8):890-897.
- 任宪韶, 户作亮, 曹寅白, 何杉. 2007. 海河流域水资源评价[M]. 北京: 中国水利水电出版社.
- 商广宇, 赵士贤, 孔宪芳. 1998. 山东省引黄灌区地下水赋存条件与开发潜力分析[J]. 地下水, (2): 80-81.
- 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, (5): 527-534.
- 石建省, 王昭, 张兆吉, 费宇红, 李亚松, 张凤娥, 陈京生, 钱永. 2010. 华北平原深层地下水超采程度计算与分析[J]. 地学前缘, 17(6): 215-220.
- 田夏, 李亚松, 费宇红, 曹胜伟, 冯创业, 孟艳. 2020. 滹沱河超采区地下水硫酸盐来源识别及迁移转化[J]. 科学技术与工程, 20(7): 2583-2589.
- 王贵玲, 刘志明, 刘花台, 张俊牌, 高业新, 蔺文静. 2003. 地下水潜力评价方法[J]. 水文地质工程地质, (1): 63-66.
- 王浩, 王建华, 贾仰文. 2016. 海河流域水循环演变机理与水资源高效利用[M]. 科学出版社.
- 王家兵, 李平, 张百鸣, 王亚斌. 2010. 天津平原地下水可开采量与确定依据[J]. 地学前缘, 17(6): 221-226.
- 王家兵. 2002. 华北平原深层淡水在开采条件下接受上覆咸水越流补给—以天津平原为例[J]. 水文地质工程地质, 29: 35-37.
- 王建华, 王浩, 秦大庸. 2015. 海河流域二元水循环模式与水资源演变机理[M]. 科学出版社.
- 王金哲, 费宇红, 张光辉, 申建梅, 聂振龙. 2005. 海河平原地下水资源可持续利用前景评价[J]. 水文地质工程地质, (4): 56-59.
- 王晓红, 刘文臣, 沈媛媛, 刘士成. 2011. 北京西山岩溶水应急水源水文地质特征及开采潜力分析[J]. 中国岩溶, 30(2): 216-221.
- 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): 549-558.
- 闻人雪星. 1991. 华北地区地下水资源开发利用现状及潜力分析[J]. 地下水, 13(2):75-78.
- 夏军, 张永勇. 2017. 雄安新区建设水安全保障面临的问题与挑战[J]. 中国科学院院刊, 32(11):1199-1205.
- 邢丽娜, 郭海朋, 魏亮, 詹燕红, 侯春堂, 李瑞敏, 王轶. 2012. 华北平原浅层含氟地下水演化特点及成因[J]. 地球科学与环境学报, 34: 57-67.
- 杨建锋, 万书勤. 2007. 美国水文地质调查发展历程及启示[J]. 资源与产业, 9(1):22-26
- 于开宁, 廖安然. 2018. 基于生态位理论的河北平原地下水开采潜力评价[J]. 地学前缘, 25(1): 259-266.
- 于洋, 齐天龙. 2020. 华北地下水超采综合治理河湖地下水回补试点成效浅析[J]. 海河水利, 3:7-16
- 张光辉, 费宇红, 刘克岩. 2004. 海河平原地下水演变与对策[M]. 科学出版社.
- 张光辉, 刘中培, 连英立, 严明疆, 王金哲. 2009. 华北平原地下水演化地史特征与时空差异性研究[J]. 地球学报, 30: 848-854.
- 张海涛. 2019. 河北中东部平原地下水可恢复性分析[J]. 地下水, 41: 54-56.
- 张燕君. 2006. 石家庄市地下水资源潜力评价与可持续利用[J]. 中国农村水利水电, (3):9-11.
- 张兆吉, 费宇红, 陈宗宇. 2009a. 华北平原地下水可持续利用调查评价[M]. 北京: 地质出版社.
- 张兆吉, 雒国中, 王昭, 刘春华, 李亚松, 姜先桥. 2009b. 华北平原地下水资源可持续利用研究[J]. 资源科学, 31(3): 355-360.
- 朱菊艳, 郭海朋, 李文鹏, 田小伟. 2014. 华北平原地面沉降与深层地下水开采关系[J]. 南水北调与水利科技, (3): 165-169.