

新水情影响下华北平原深层地下水水平衡演变与更新能力分析

杨会峰, 李泽岩, 孟瑞芳, 白 华, 宋 博, 郭 伟, 包锡麟

Evolution of deep groundwater balance and renewability analysis in the North China Plain under new hydrological conditions

YANG Huifeng, LI Zeyan, MENG Ruifang, BAI Hua, SONG Bo, GUO Wei, and BAO Xilin

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202409073>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

华北平原地下水位驱动下的地面沉降现状与研究展望

Present situation and research prospects of the land subsidence driven by groundwater levels in the North China Plain

郭海朋, 李文鹏, 王丽亚, 陈晔, 臧西胜, 王云龙, 朱菊艳, 卞跃跃 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 162-171

保定平原区地下水生态水位阈值的探讨

Discussion on ecological water level threshold of groundwater in Baoding Plain area

靳博文, 王文科, 段磊, 马稚桐, 王一, 黄鑫慧 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 166-175

基于地表水循环遥感观测的黑河流域水平衡分析

Water balance analysis based on remote sensing observation of surface water cycle in the Heihe River watershed

闫柏琨, 李文鹏, 甘甫平, 郑跃军, 祁晓凡, 白娟, 郭艺, 吴艳红, 王龙凤, 马燕妮 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 44-56

三江平原地下水流场演化趋势及影响因素

An analysis of the evolution trend and influencing factors of the groundwater flow field in the Sanjiang Plain

刘伟朋, 崔虎群, 刘伟坡, 程旭学, 李志红 水文地质工程地质. 2021, 48(1): 10-17

黑河流域中游盆地地下水动态特征及其调蓄能力分析

Research on the dynamic characteristics of groundwater and regulation capability of aquifers in the intermediate section of Heihe River Basin

凤蔚, 李文鹏, 邵新民, 祁晓凡, 黎涛 水文地质工程地质. 2022, 49(3): 11-21

对既保冬小麦产量又防承压水耗竭的灌溉策略之探讨

A study of the irrigation strategy to maintain winter wheat production and prevent confined groundwater depletion

李佩, 任理 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 207-214



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202409073

杨会峰, 李泽岩, 孟瑞芳, 等. 新水情影响下华北平原深层地下水水平衡演变与更新能力分析 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(3): 28-42.

YANG Huifeng, LI Zeyan, MENG Ruifang, et al. Evolution of deep groundwater balance and renewability analysis in the North China Plain under new hydrological conditions[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(3): 28-42.

新水情影响下华北平原深层地下水水平衡演变与更新能力分析

杨会峰^{1,2}, 李泽岩^{1,2}, 孟瑞芳^{1,2}, 白 华^{1,2,3}, 宋 博^{1,2}, 郭 伟^{1,2}, 包锡麟^{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. 河北沧州平原区地下水与地面沉降国家野外科学观测研究站, 河北 沧州 061000;

3. 中国地质大学(武汉)环境学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 地下水是支撑华北平原社会发展的重要供水水源, 深层地下水长期超采、水头大幅度下降, 引发系列生态环境地质问题。2015 年以来, 南水北调、地下水超采综合治理和连续强降水等新水情通过置换水源、农业节水以及强降水灌溉农业等方式减少了华北平原深层地下水开采量, 深层地下水水平衡发生显著变化。基于深层地下水区域水平衡分析方法, 探讨了水平衡关键指标变化特征, 分析了新水情对深层地下水水平衡的影响效应。利用¹⁴C 年龄、中更新统岩相古地理分布特征 2 个地质背景指标和渗透系数、水力梯度、深浅层水头差以及越流系数 4 个水力评价指标对深层地下水更新能力进行综合评价。基于地下水降落漏斗修复和地面沉降防控, 识别地下水水头恢复阈值, 科学评价深层地下水可利用量。结果表明: 与 2005 年相比, 在新水情影响下, 2020 年深层地下水渗流速度显著增大, 侧向补给量增加 $0.25 \times 10^8 \text{ m}^3$, 越流补给量增加 $0.88 \times 10^8 \text{ m}^3$, 中东部深层地下水水头仍处于下降状态是主要原因; 地下水年均开采量减少 $1.41 \times 10^8 \text{ m}^3$, 地下水年度储量减少量由 $12.29 \times 10^8 \text{ m}^3$ 变为 $9.70 \times 10^8 \text{ m}^3$; 从空间分析, 西部山前较大的渗透系数使得其更新性好于中东部, 从时间分析, 开采量的变化使得垂向越流量和水平侧向径流的组成及数量发生了变化, 2020 年深层地下水更新能力较 2005 年总体增强; 深层地下水可利用量为 $8.52 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, 主要分布于山前平原的中更新统冲洪积扇区。依据深层地下水补径排条件、开发利用程度差异, 以不同水文地质单元开展水平衡演变分析, 2015 年以来深层地下水失衡状况得到缓解, 但尚未得到根本扭转。研究结果对认识北方平原区深层地下水循环规律和可持续开发利用等方面具有借鉴意义。

关键词: 华北平原; 新水情; 水平衡变化; 地下水更新能力; 可持续利用对策

中图分类号: P641.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)03-0028-15

Evolution of deep groundwater balance and renewability analysis in the North China Plain under new hydrological conditions

YANG Huifeng^{1,2}, LI Zeyan^{1,2}, MENG Ruifang^{1,2}, BAI Hua^{1,2,3}, SONG Bo^{1,2}, GUO Wei^{1,2}, BAO Xilin^{1,2}

(1. *Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang, Hebei 050061, China;*

2. *Hebei Cangzhou Groundwater and Land Subsidence National Observation and Research Station, Cangzhou, Hebei 061000, China;* 3. *School of Environmental Studies, China University of Geosciences (Wuhan),*

Wuhan, Hubei 430074, China)

收稿日期: 2024-09-08; 修订日期: 2024-12-17

投稿网址: www.swdzcgdz.com

基金项目: 国家自然科学基金地质联合基金项目(U2244214); 中国地质调查局地质调查项目(DD20230078; DD20221752); 河北省创新能力提升计划高水平人才团队建设专项(225A4204D)

第一作者: 杨会峰(1977—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事水平衡研究与水资源评价区划。E-mail: yanghuifeng@mail.cgs.gov.cn

通讯作者: 李泽岩(1993—), 女, 硕士, 助理研究员, 主要从事水资源评价相关工作。E-mail: lizeyan@mail.cgs.gov.cn

Abstract: Groundwater serves as a vital water resource supporting the socio-economic development of the North China Plain. Long-term overexploitation of deep groundwater and a significant decline in groundwater levels have led to a series of ecological and environmental geological problems. Since 2015, new hydrological conditions—such as water source replacement, regular ecological water replenishment, and comprehensive management of overexploitation of groundwater—have influenced deep groundwater dynamics by reducing extraction through alternative water supplies, agricultural water-saving measures, and heavy precipitation-based irrigation. Consequently, the deep groundwater balance has undergone substantial changes. This study used groundwater balance calculation to study the characteristics of key indicators of water balance changes. Using two geological background indicators, ^{14}C age and the distribution characteristics of the middle Pleistocene lithofacies paleogeography, and four hydrologic evaluation indicators, permeability, hydraulic gradient, the difference in groundwater levels between shallow and deep layers, and the interflow coefficient, the renewal capacity of deep groundwater was evaluated. Based on groundwater depression cones and land subsidence, thresholds for groundwater level recovery are identified to scientifically estimate the sustainable yield of deep groundwater. Compared to 2005, the lateral replenishment in 2020 increased by $0.25 \times 10^8 \text{ m}^3$, and interflow replenishment increased by $0.88 \times 10^8 \text{ m}^3$. These are primarily because the deep groundwater level in the middle and eastern part is still declining; The average annual exploitation of groundwater decreased by $1.41 \times 10^8 \text{ m}^3$ and the reduction in groundwater storage has changed from $12.29 \times 10^8 \text{ m}^3$ to $9.70 \times 10^8 \text{ m}^3$. Spatial analysis indicates that the renewal capacity in the piedmont plains is better than that in the central and eastern regions because of the larger hydraulic conductivity. Temporal analysis shows that the renewal capacity of deep groundwater in 2020 has generally increased compared to 2005. The composition and quantity of vertical interflow replenishment and horizontal lateral replenishment change with the change of mining yield. The availability of deep groundwater was evaluated to be $8.52 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, primarily concentrated in the middle Pleistocene alluvial fan region of the piedmont plains. Based on the conditions of recharge, flow, and discharge of deep groundwater, as well as differences in the degree of development and utilization, the imbalance of deep groundwater has been alleviated since 2015, fundamental reversal has not yet been achieved. This study provides critical insights into deep groundwater circulation dynamics and offers guidance for the sustainable development and management of groundwater resources in the North China Plain.

Keywords: North China Plain; new hydrological conditions; changes in water balance; renewability of groundwater; sustainable utilization strategies

华北平原是中国人口最密集、经济最发达的地区之一,京津冀协同发展区、千年大计雄安新区皆位于此,以全国 2.7% 的土地面积生产了全国 25% 以上的粮食,地下水在支撑华北平原经济发展、保障粮食安全中发挥了巨大作用^[1-2]。然而华北平原人均水资源占有量仅为全国的 1/7, 仅为世界人均水资源量的 1/32。由于地表水资源短缺,深层地下水是中东部平原工农业发展的主要供水水源。深层地下水循环更新速度慢,随着地下水长期超采,“天津—沧州—衡水—德州—邢台”一带形成巨大连片漏斗区,水头大幅度降低,产生严重的地面沉降、海水入侵、浅层咸水下移等生态环境地质问题^[3-6]。针对地下水超采问题,国家实施了系列超采治理举措,加之近年来连续

强降水,以上新水情通过置换水源、农业节水以及强降水灌溉农业等方式减少了华北平原深层地下水开采量,使得地下水循环与水平衡随之发生显著变化^[1],深层地下水超采状况在一定程度上得到缓解,但超采态势并未完全扭转。

关于深层地下水水平衡和更新性等方面,郭永海等^[7]根据地面沉降量反求深层地下水开采量构成,由此获得深层地下水资源属性及合理评价的新认识。石建省等^[8]以深层地下水可利用量/现状开采量、地面沉降、水头下降速率为指标评估地下水超采情况,表明深层地下水总体处于超采状态,已无开采潜力。朱菊艳等^[9]探讨华北平原地面沉降和深层地下水开采的关系,计算了深层地下水开采量中压密释水占比,明

确深层地下水的资源属性。李绍恒等^[10]联用³H、⁴He、¹³C、¹⁴C等同位素研究得出雷州半岛深层地下水从补给区到排泄区的年龄变化。程中双^[11]运用同位素水文学识别并划分了华北平原深层承压含水层地下水年龄组成,揭示了地下水更新性、脆弱性与水质变化过程与驱动机制。苏晨等^[12]利用CFCs和³H估算穆星平原北部的地下水年龄,评估区域地下水资源可持续性。以往的研究中针对地下水更新性分析,多从年龄和补给速率方面考虑确定质点运移的时间^[13-14]。而地下水更新能力是含水层中储存的地下水通过接受水源补给而得以更新或更替的能力^[15],是地下水系统获得外界水源补给的能力及其对水分传输能力的综合反映^[16],以往研究对水力传输所需的时间尚不清楚,并且缺少系统考虑地下水年龄、岩相古地理、渗透系数、水力梯度、深浅层水头差等指标的综合评价方法。

受到2014年以来新水情影响,深层地下水水循环、水平衡要素、地下水更新性等发生显著变化^[17-18],2023年水利部等联合印发的《华北地区地下水超采综合治理实施方案(2023—2025年)》^[19]中明确了深层地下水超采治理工作的重要性。因此本文分析新水情对深层地下水水平衡的影响效应,选用多指标联合的地下水更新性评价方法,明确深层地下水更新能力的变化特征等,以环境地质问题防控为目标,评价深层地下水可利用量,提高对新水情下华北平原深层地下水循环规律的认识,对深层地下水可持续开发利用具有借鉴意义。

1 研究区概况

华北平原位于中国东部,西依太行山,北靠燕山,东临渤海,南界黄河,包括北京、天津、河北平原全部以及黄河以北的豫北、鲁北平原,面积约 $13.9 \times 10^4 \text{ km}^2$ ^[20]。深层地下水主要赋存于第四系孔隙地下含水岩系中,山前平原区主要赋存于第Ⅲ和第Ⅳ含水层组,中东部平原赋存于第Ⅱ和第Ⅲ含水层组^[21-23]。

天然状态下,深层地下水水头标高皆在海平面上,主要补给来源为山前隐伏岩溶水的顶托补给和山前侧向径流补给,排泄以向下游径流排泄为主,地下水循环速度较为缓慢^[24]。1965年以前,地下水开采基本以浅层水为主,中东部平原浅层广泛分布咸水,难以直接利用,且缺乏足够的地表替代水源,1965—1980年随着农业和经济快速发展,中东部平原开始开采深层承压淡水,开采量为 $15 \times 10^8 \sim 17 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,深层承压含水层水头开始下降^[25]。1980—2005年,水资源

需求迅猛增加,深层地下水开采量增加,集中在衡水—沧州—天津一带,形成了深层地下水降落漏斗^[24]。2005年以后,政府对水资源重视程度增加,在限制开采的影响下,地下水水头震荡缓慢下降^[11]。20世纪60年代至2014年,中东部深层地下水水头平均累计下降45.4 m,最大下降达114.4 m。受到长期大规模开采深层地下水影响,2019年在中东部平原形成“天津—沧州—衡水—德州—邢台”连片漏斗。中东部平原水头下降使得深层地下水循环系统发生巨大改变,区域流动系统由于地下水的开发被割裂,中间流动系统形成了源汇的逆转,浅层地下水开始全面向深层地下水越流,深层地下水水头下降导致黏性土大量释水,沿海地带深层地下水水头下降至海平面以下,局部导致海水入侵(图1)。

2014年启动河北省地下水超采综合治理试点;2018年对滹沱河、滏阳河、南拒马河3条典型河流开展了河湖地下水回补试点;第三轮国家地下水资源调查评价(2000—2020年)结果显示,2021—2023年华北平原持续偏丰降水共计入渗补给地下水 $731.5 \times 10^8 \text{ m}^3$,较近20 a入渗补给量平均值增加 $197.5 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。在以上新水情综合影响下,华北平原地下水失衡问题有所缓解,深层地下水水头总体回升,截至2022年,中东部深层地下水水头上升区平均回升7.6 m,弥补亏损量 $6.7 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。深层地下水超采状况得到缓解,但态势并未完全扭转。

2 数据与研究方法

2.1 数据

2.1.1 新水情数据

收集2014年以来南水北调中线工程向华北平原各市供水量、地下水源置换量;2018年以来潮白河、永定河、南拒马河、滹沱河、滏阳河等15条河流,以及白洋淀、北大港、衡水湖等7个湖泊的生态补水数据;2000年以来华北平原182个气象站逐月降水数据。

2.1.2 深层地下水流场数据

2005年地下水流场来自《华北平原地下水可持续利用图集》^[24],2014年地下水流场来自各省级地下水监测工程数据,2019—2023年各年地下水流场来自《海河南系水文地质调查》项目2.1万点次统测数据和1230个国家地下水监测站点数据。

2.1.3 深层地下水补排项数据

华北平原深层水主要补给项包括侧向径流补给、越流补给,主要排泄量为开采。侧向补给断面参考文

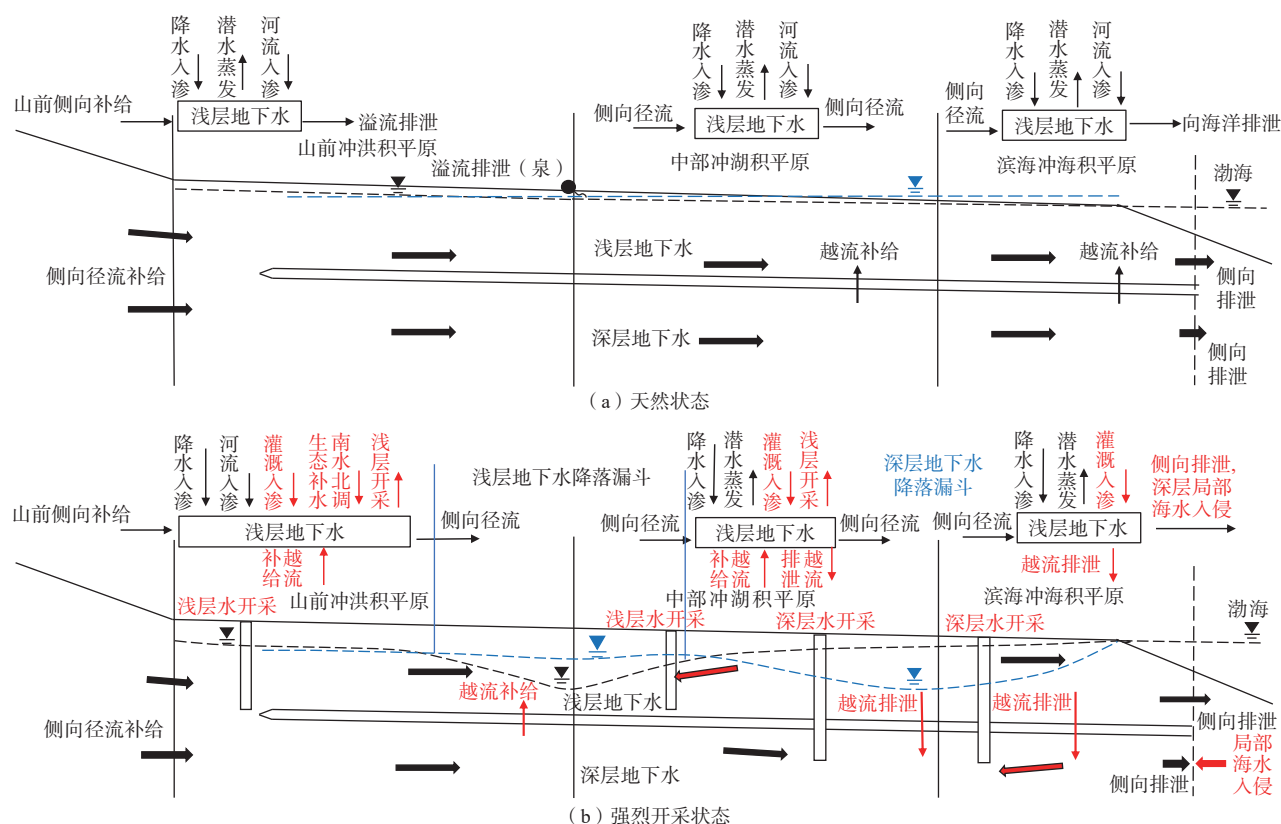


图 1 地下水循环示意图

Fig. 1 Groundwater circulation

献[24];含水层厚度结合水位变化状况更新后获取;渗透系数依据国家地下水监测工程水文孔和1:5万水文地质调查抽水试验数据对前人参数研究校核后获取;越流系数来源于河北省地质环境监测总站等单位研究成果;深层逐县地下水开采量数据搜集自各省水资源公报、水利年鉴等资料[26-35]。

2.1.4 深层地下水 D-¹⁸O 与 ¹⁴C 同位素数据

地下水同位素数据来自文献[24],结合2019—2021年《海河南系水文地质调查》项目采集的典型剖面的深层地下水 D-¹⁸O 与 ¹⁴C 同位素数据,其中 D-¹⁸O 样品 165 组, ¹⁴C 年龄样品 166 组。

2.2 研究方法

2.2.1 环境同位素分析方法

水体在循环过程中存在同位素分馏现象,不同水体间 D-¹⁸O 同位素含量存在显著差别,可直接体现水体运移和转化的不同过程,反映地下水的状态[36-38]。存在较稳定隔水层的承压含水层,一般从补给区到排泄区,地下水年龄由新变老,地下水的 D-¹⁸O 同位素含量变小[39]。¹⁴C 测年是分析深层地下水补给形成时代最常用的测年方法[40],其测年估算最长地下水年龄可达 50 ka,华北平原地下水年龄不超过 30 ka[41-43],因而

¹⁴C 测年可研究深层地下水流动特征的演化[11,44-45]。

2.2.2 深层地下水区域水平平衡分析方法

深层地下水水平平衡通量包括补给量、排泄量、储变量。深层地下水接受山前侧向补给、越流补给,排泄量包括开采量、向浅层地下水越流排泄量和向海洋的侧向排泄量。其中向浅层地下水越流排泄量仅在山前平原局部地区存在,2000年后向海洋的地下水侧向排泄已不存在。深层地下水遵循水均衡原理,补给量($Q_{补}$)和排泄量($Q_{排}$)之差等于含水层中孔隙水体积的变化量($\Delta Q_{储}$),地下水均衡方程为:

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

$$\Delta Q_{储} = F \Delta h S^* + FS \quad (1)$$

式中: Δh ——计算时间段内水位平均变化量/m;

S^* ——砂性土弹性释水系数;

F ——深层水计算面积/km²;

S ——计算时间段内年平均地面沉降量/mm。

运用 GIS 空间叠加分析技术,分析不同水文地质单元深层地下水的含水层结构、水文地质参数空间分布特征、地下水水头变化特征等,根据它们的空间分布特征进行网格剖分,确定每一个网格单元的补给

量、排泄量、储变量等水平衡指标,分析各平衡要素变化及其对区域水平衡影响。

2.2.3 地下水更新能力研究方法

利用综合评分法对地下水更新能力进行定量评价,能有效反映各个评价指标对地下水更新能力的贡献。选用与地下水更新能力相关的指标,采用专家打分法对评价指标赋值,建立评估指标体系后,运用层次分析法确定评估指标的权重。其基本原则是根据专家打分对影响地下水更新性的评价指标进行评分;根据各种指标对地下水更新性影响大小给予不同的权重,权重的大小采用层次分析法确定;对各单项指标评分值与权重的乘积进行求和,以综合评分评价深层地下水更新能力。

(1) 选取评价指标

本文选取了地质背景指标和水力指标 2 个一级指标,构建了 6 个二级指标,其中地质背景指标为¹⁴C 年龄、中更新统岩相古地理分布特征,水力指标为与深层地下水补给有关的渗透系数(*K*)、水力梯度(*I*)、深

浅层水头差(ΔH)以及越流系数。其中,¹⁴C 年龄和中更新统岩相古地理分布特征反映了地下水更新能力的天然属性,¹⁴C 年龄越小,表示越接近补给区,越有利于地下水循环更新;沉积地层颗粒越粗,越有利于地下水径流,一般来说,在冲洪积扇区、古河道带地区,沉积颗粒粗,有利于地下水流动,在湖泊及洼地地区,沉积颗粒细,不利于地下水流动。渗透系数、水平水力梯度反映了人为影响下地下水侧向径流变化的特征,渗透系数越大,水平水力梯度越大,侧向径流量越大;深浅层水头差以及越流系数反映了人为影响下越流通量变化的特征,水头差越大、越流系数越大,越流通量越大。

(2) 构建综合评价指标体系

综合评价指标评分采用专家打分方法,对 6 类评价指标的等级赋予不同的分值,各评价指标见表 1。根据各指标得分计算综合评价分值,按分级标准评价地下水更新能力。

表 1 更新能力综合评价指标
Table 1 Evaluation index of groundwater renewability

一级评价指标	二级评价指标	好(5)	较好(4)	一般(3)	较差(2)	差(1)
水力指标	水力梯度	≥0.001 0	0.000 7 ~ <0.001 0	0.000 35 ~ <0.000 7	0.000 18 ~ <0.000 35	<0.000 18
	渗透系数/(m·d ⁻¹)	≥35.0	15.0 ~ <35.0	7.5 ~ <15.0	2.5 ~ <7.5	<2.5
	深浅层水头差/m	≥70	50 ~ <70	35 ~ <50	15 ~ <35	<15
	越流系数	≥2.54×10 ⁻⁶	9.92×10 ⁻⁷ ~ <2.54×10 ⁻⁶	4.50×10 ⁻⁷ ~ <9.92×10 ⁻⁷	6.20×10 ⁻⁸ ~ <4.50×10 ⁻⁷	<6.20×10 ⁻⁸
地质背景指标	¹⁴ C 年龄/ka	<6	6 ~ <14	14 ~ <18	18 ~ <22	≥22
	中更新统岩相古地理分布特征	冲洪积扇	中部平原河道带	中部泛滥平原	滨海平原河道带、冲洪积扇内部阶地	滨海泛滥平原、湖泊及洼地

(3) 采用层次分析法确定各评价因子的权重

按各指标对目标层的相对重要性进行两两比较,定量标度赋值,根据建立的层次结构图,分别构造两两比较判断矩阵。

该矩阵应满足如下条件:

$a_{ij}>0; a_{ij}=1/a_{ji}(i\neq j); a_{ii}=1; i, j=1, 2, \cdots, n。$

判断矩阵中每个因子(a_{ij})的大小及其倒数作为衡量尺度的标度方法给出。根据判断矩阵对各项指标进行两两打分,利用 Matlab 数学软件计算得出各个指标的权重。见表 2。

3 结果

3.1 新水情影响下水平衡关键指标的变化特征

3.1.1 地下水渗流速度(侧向径流)的变化特征

利用不同年份深层地下水流场计算水力梯度,结

合渗透系数,计算得出渗流速度。总体而言,水力梯度变化范围为 0 ~ 0.159‰,中东部平原水力梯度大,周边平原水力梯度小。受含水层岩性影响,西部山前地区渗透系数较大,最大超过 50 m/d,中东部渗透系数较小,为 2.5 ~ 7.5 m/d。

从空间尺度分析,受到岩性特征和较强补给来源影响,西部山前渗流速度明显大于中部平原和滨海平

表 2 综合评价指标体系权重
Table 2 Weight of evaluation index

指标	权重
水力梯度	0.17
渗透系数	0.35
深浅层水头差	0.12
越流系数	0.16
¹⁴ C 年龄	0.07
中更新统岩相古地理分布特征	0.13

原。从时间尺度分析,1980 年,中部平原和滨海平原在天然状态下的深层地下水渗流速度较小,全区平均值为 0.004 6 m/d(表 3)。2005 年受到大规模开采影响,中部平原深层地下水水头降低,水力梯度增大,渗流速度增大,全区均值为 0.008 5 m/d。2014 年,随着城市区持续开采深层地下水,中东部平原天津、沧州、衡水和德州等城市区渗流速度增大,衡水等周边农业区受到农业灌溉大量开采深层地下水影响,渗流速度显著增大,全区均值为 0.008 8 m/d。随后开始利用南水北调工程置换城区地下水开采,2019 年启动华北地区地下水超采综合治理行动方案,以上举措在不同程度上缓解了深层地下水资源紧张局面,但水头仍处于下降状态。2020 年,中东部平原“衡水—德州”深层地下水降落漏斗中心一带水头持续下降,渗流速度增大,全区均值为 0.012 7 m/d。总体来看,1980—2020 年中部平原深层地下水水头持续下降,尤其是农业区

渗流速度明显增大;西部与中部平原水头差增大,因此西部山前地区水力梯度不断增大,导致渗流速度增大。2021 年以来,受到强降水影响,用于农业灌溉的深层地下水开采减少,水头有所抬升,渗流速度变小。华北平原深层地下水渗流速度方向与流场方向一致,自平原周边向平原中东部沧州—衡水—德州一带流动^[20],其他条件基本不变的情况下,渗流速度的增大使得深层地下水侧向补给来源增强(图 2)。

表 3 不同时间不同单元地下水平均渗流速度
Table 3 Average seepage velocity of different unit

年份	渗流速度/(m·d ⁻¹)			
	山前	中部	滨海	全区
1980	0.013 5	0.002 6	0.002 5	0.004 6
2005	0.019 4	0.006 3	0.005 0	0.008 5
2014	0.021 6	0.006 1	0.004 3	0.008 8
2020	0.029 8	0.009 1	0.007 0	0.012 7

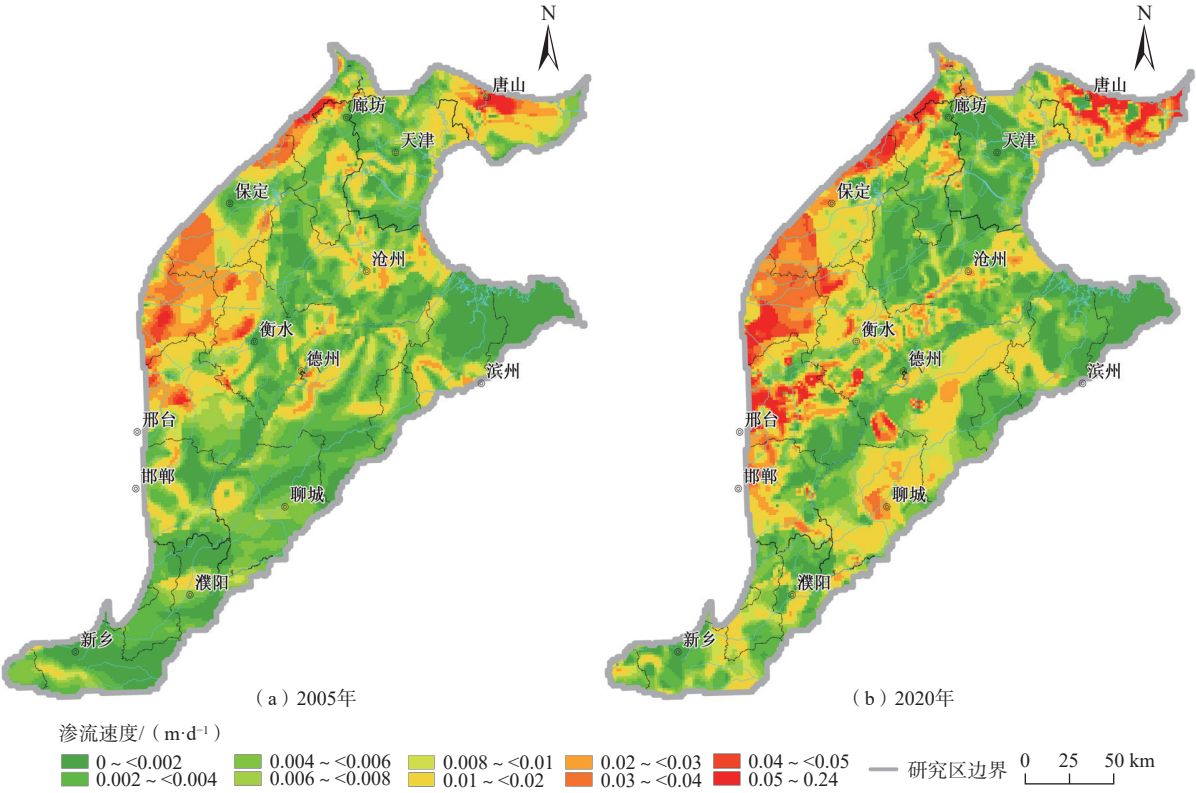


图 2 深层地下水渗流速度
Fig. 2 Seepage velocity of deep groundwater

3.1.2 地下水越流通量的变化特征

利用不同年份深浅层地下水水头差,以及河北省地质环境监测院多年水文地质试验和监测数据获取的越流系数,计算得出深层地下水越流补给量。1956—1979 年天然状态下,深层地下水来源以侧向补

给为主,占 75.03%;越流补给相对较少,为 24.97%。在东部平原区特别是东部自流区,由于深层地下水水头远高于浅层地下水水位,深层地下水向浅层地下水越流排泄^[43]。

1980—2005 年间,随着深层地下水的大幅度开发

利用, 深层地下水水头持续下降, 许多地区深层地下水水头明显低于浅层地下水, 浅层地下水转而越流补给深层, 并使得越流补给成为深层地下水的重要补给源^[24]。在华北中东部平原, 浅部含水层组普遍分布有咸水或微咸水, 深部的第Ⅲ含水层组地下水成为主要的地下水开采水源。随着深层淡水的过度开采, 浅层地下水通过越流形式向下补给, 造成下伏淡水发生咸化^[46]。至2005年, 深层地下水越流补给占比上增到73.57%, 侧向补给占比下降到26.43%, 但侧向补给量较天然状态有较显著增加。

2006—2020年间, 随着2014年以来地下水压采政策的实施以及南水北调等替代水源的利用, 平原区深层地下水开采量总体处于下降趋势, 深层地下水超采情况得到了一定程度的遏制, 深层地下水水头年均下降速率减缓。但从华北平原整体看, 深层地下水水头仍处于下降趋势, 水力梯度仍有所增大, 导致深层地下水侧向补给量和越流补给量较2005年均有所增加(图3)。

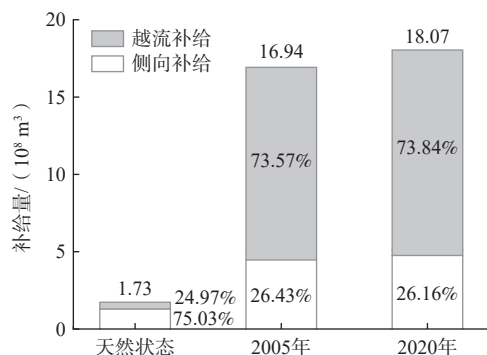


图3 深层地下水补给来源与比例

Fig. 3 Source and proportion of deep groundwater recharge

越流模数(K)可以表征区域单位面积上的越流量:

$$K = Q_{\text{越流}} / (F \cdot Y) \quad (2)$$

式中: K ——越流模数/(10⁴ m³·km⁻²·a⁻¹);

$Q_{\text{越流}}$ ——计算面积和时段内深层地下水越流补给量/(10⁸ m³);

Y ——计算时段/a。

2020年, 华北平原地下水越流模数低值区主要分布在衡水—德州—沧州一带的中东部平原区, 其次是唐山、廊坊、保定、石家庄等城市区, 这些地区浅层地下水越流补给深层地下水。山前平原区及河南、山东北部地区为深层地下水越流补给浅层地下水(图4)。

3.1.3 深层地下水开采量与储量变化特征

1980年以前尚未大规模开采深层地下水, 深层

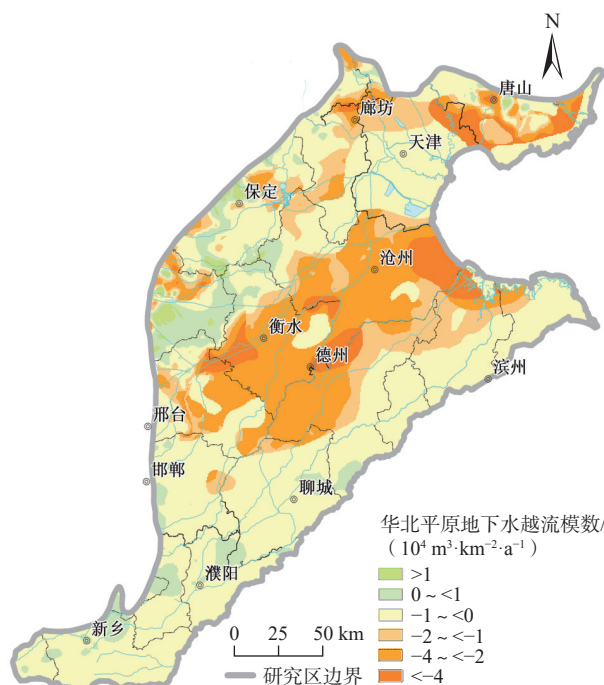


图4 2020年地下水越流模数

Fig. 4 Groundwater leakage modulus in 2020

地下水储量较为丰富。1980—2005年, 深层地下水的开采量逐渐增大, 储量开始减少, 至2005年地下水开采量为29.14×10⁸ m³, 年度储量减少12.29×10⁸ m³。2006—2014年, 为满足工农业经济快速发展需要, 开采量持续增加。2015年后随着地下水超采治理推进, 至2020年开采量降低为27.73×10⁸ m³, 年度储量减少9.70×10⁸ m³(图5)。

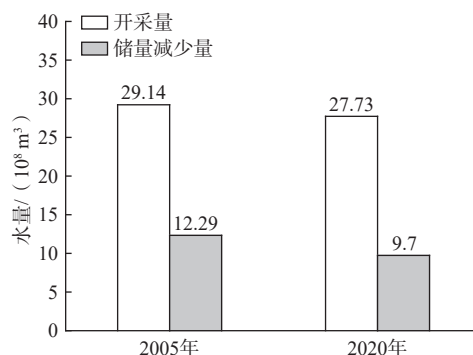


图5 深层地下水开采量与储量变化

Fig. 5 Changes in groundwater extraction and stocks

3.2 地下水年龄与更新能力变化特征

3.2.1 D-¹⁸O 同位素变化特征

根据本论文依托的海河南系水文地质调查项目数据, 华北平原深层地下水的δ¹⁸O稳定同位素变化范围相对较小, 为-11.3‰~-7.4‰。从空间分布特征看, 中部平原δ¹⁸O含量最低, 均值为-10.33‰; 山前平

原含量最大, 为 -9.01‰ ; 滨海平原相对较高, 为 -9.53‰ 。从垂向看, $\delta^{18}\text{O}$ 随深度增加而减小, 深层地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值明显低于浅层地下水, 与浅层地下水相比, 深层地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 平均值较浅层地下水贫 0.73‰ 。

从石家庄—蠡县—天津剖面图看出(图 6), 深层地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 稳定同位素从山前到平原中部的水平分带性明显, 自平原西部山前向东, $\delta^{18}\text{O}$ 逐渐减小。低

值区位于平原中部的浅层地下水漏斗区, 为 -10.7‰ ~ -10.2‰ , 该区深层地下水水头高于浅层地下水水位, 深层地下水可能越流补给上部浅层地下水。进入深层漏斗区后深层地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 有所增加, 为 -10.1‰ ~ -9.4‰ 。该区深层地下水水头远低于浅层地下水水位, 深层地下水的过度开采造成浅层地下水越流补给深层地下水^[39], 导致深层地下水的 $\delta^{18}\text{O}$ 有所增加。

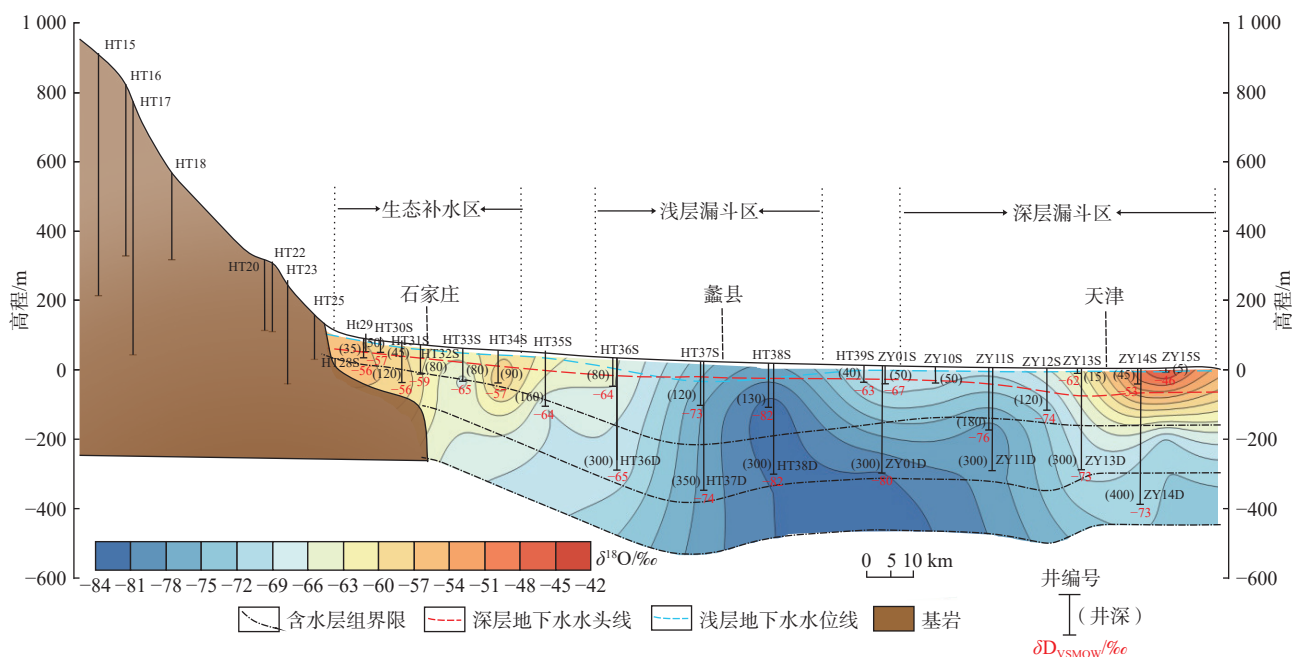


图 6 石家庄—蠡县—天津剖面地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 分布图

Fig. 6 Distribution of $\delta^{18}\text{O}$ in profile of Shijiazhuang-Lixian-Tianjin

3.2.2 ^{14}C 同位素变化特征

华北深层地下水 ^{14}C 校正年龄范围为 6.88 ~ 34.43 ka。自山前至平原中部, 深层地下水的年龄逐渐增加。其中, 太行山和燕山山前平原的地下水 ^{14}C 校正年龄一般小于 8 ka, 中部平原一般大于 18 ka, 呈北东向的中部平原中心地带的地下水 ^{14}C 年龄在 20 ka 以上, 至天津市静海区及沧州黄骅附近地下水年龄增加至 30 ka 以上(图 7)。

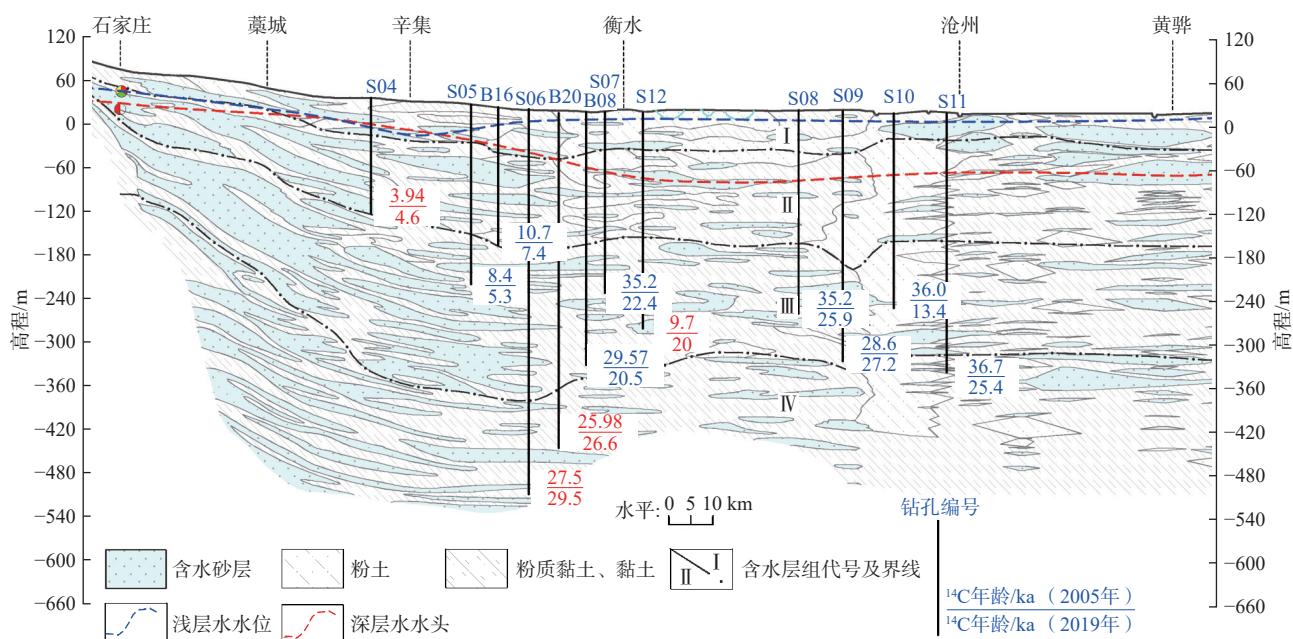
对比分析石家庄—衡水—沧州—黄骅同位素剖面 2005 年和 2019 年的样品数据, 可以发现 2 期地下水 ^{14}C 年龄发生了较大的变化。除了衡水地区第Ⅳ含水层组以及山前地区辛集第Ⅱ含水层组 ^{14}C 年龄略有增大外, 在第Ⅲ含水层组为主要开采层的衡水—沧州深层地下水漏斗区, 深层地下水 ^{14}C 年龄基本呈现年轻化趋势, 且漏斗中心的年龄比周边低。2005 年以来地下水补排条件发生了转变, 这与深浅层水头差增大导致的浅层地下水向深层地下水越流补给量增多, 以及

水力梯度增加引起的地下水侧向径流量增加有关。上述分析结果表明, 在开采条件下华北平原局部地区深层地下水有一定的更新能力。

开采条件下衡水地区第Ⅳ含水层组地下水年龄变老, 这是由于该区含水层富水性差, 环境较为封闭。沉积地层形成时期一般早于地下水形成时期, 黏性土中的孔隙水与地层形成时期基本一致, 比含水层中的地下水形成时期早得多。因此, 随着地下水开采地下水水头持续下降, 隔水层或弱透水层压缩释水补给含水层地下水, 会导致地下水变老。说明在相对封闭的沉积环境下, 深层地下水可更新性较弱。

3.2.3 深层地下水更新能力变化特征

通常评价地下水更新能力的常用指标是地下水补给速率和年龄。地下水补给速率多应用于浅层地下水更新能力评价, 地下水年龄代表水从补给区到采样点的质点运移时间, 即地下水水质年龄, 与水力传输年龄有所区别。天然条件下, 深层地下水以活塞运

图7 石家庄—衡水—黄骅剖面地下水 ^{14}C 年龄分布图Fig. 7 Distribution of ^{14}C age in profile Shijiazhuang-Hengshui-Huanghua

动为主, 从山前平原向滨海平原流动, 侧向径流是深层地下水主要补给来源; 强烈的人类活动改变了深层地下水动力条件, 水平方向上受水力梯度变化驱使, 地下水渗流速度发生了变化, 导致侧向径流发生变化。此外, 在深层地下水漏斗区, 激发了垂向越流补给, 使深层地下水来源及组成发生变化。同位素分析结果表明, 在地下水浅层漏斗区与深层地下水漏斗区, 垂向交换量以及水平侧向径流量的变化引起同位素分布特征变化, 改变了深层地下水更新性。

本研究利用2005年和2020年2期数据综合评价了华北平原深层(第Ⅲ含水层组)地下水更新能力。综合评分 ≥ 3.5 、 $3.0 \sim < 3.5$ 、 $2.5 \sim < 3.0$ 、 $2.0 \sim < 2.5$ 、 < 2.0 分别为更新性好区、较好区、一般区、较差区、差区, 评价结果见图8。深层地下水更新能力评价好区位于山前平原一带, 较好区位于更新能力好区前缘呈条带分布, 这与深层地下水在该区渗透系数较大, 渗流速度较大有关, 说明山前侧向径流是深层地下水的重要补给来源。更新能力较差区及差区主要分布于中东平原, 该区沉积颗粒较细, 渗透系数、越流系数相对较小, 导致深层地下水侧向径流补给量及越流补给量较小。一般区主要分布于山前与中部平原接触带, 及深层地下水漏斗中心一带, 说明越流量增加导致更新性发生了变化, 中东部平原深层地下水更新能力有一定增强。

对比2005、2020年地下水更新能力评价结果, 见表4。相比于2005年, 2020年地下水更新能力好区面积

增加了 $0.86 \times 10^4 \text{ km}^2$, 分布于山前平原, 地下水渗流速度由2005年的 0.0194 m/d 增加至2020年的 0.0298 m/d , 渗流速度增大导致山区向平原区侧向径流量增加是山前平原地下水更新能力增强的主要原因。2020年更新能力一般区面积增加了18.11%, 主要位于鲁北平原中东部平原。2020年更新能力较差区和差区分别减少了18.83%、18.68%, 这是由于地下水渗流速度小, 侧向补给量较少, 越流补给量为深层地下水主要补给来源。深层地下水的开发利用改变了天然地下水流场, 增加了浅层地下水向深层地下水的越流补给量, 使深层地下水具有一定更新能力。然而在天津—廊坊—沧州一带, 较差区面积略有增大, 主要原因在于地面沉降防控引起的深层地下水水头抬升, 深浅层水头差减少, 越流量减少。总之, 随着开采量的变化, 垂向越流量和水平侧向径流的组成及数量发生了变化, 深层地下水更新能力总体有所提升, 但空间差异明显。

地下水年龄揭示了地下水的循环时间和更新能力, 一般认为地下水年龄越大, 更新能力越差。然而, 地下水年龄反映了质点传输的绝对时间, 实际上地下水更新是一个“新水推老水”的流动过程, 应该是利用水力传输来反映地下水补给速率特征。因此, 在评价地下水更新能力时应该把地下水年龄作为背景值参考, 应该重点选取反映地下水补给速率相关的指标进行评价。结合华北平原2005年 ^{14}C 同位素年龄分布可

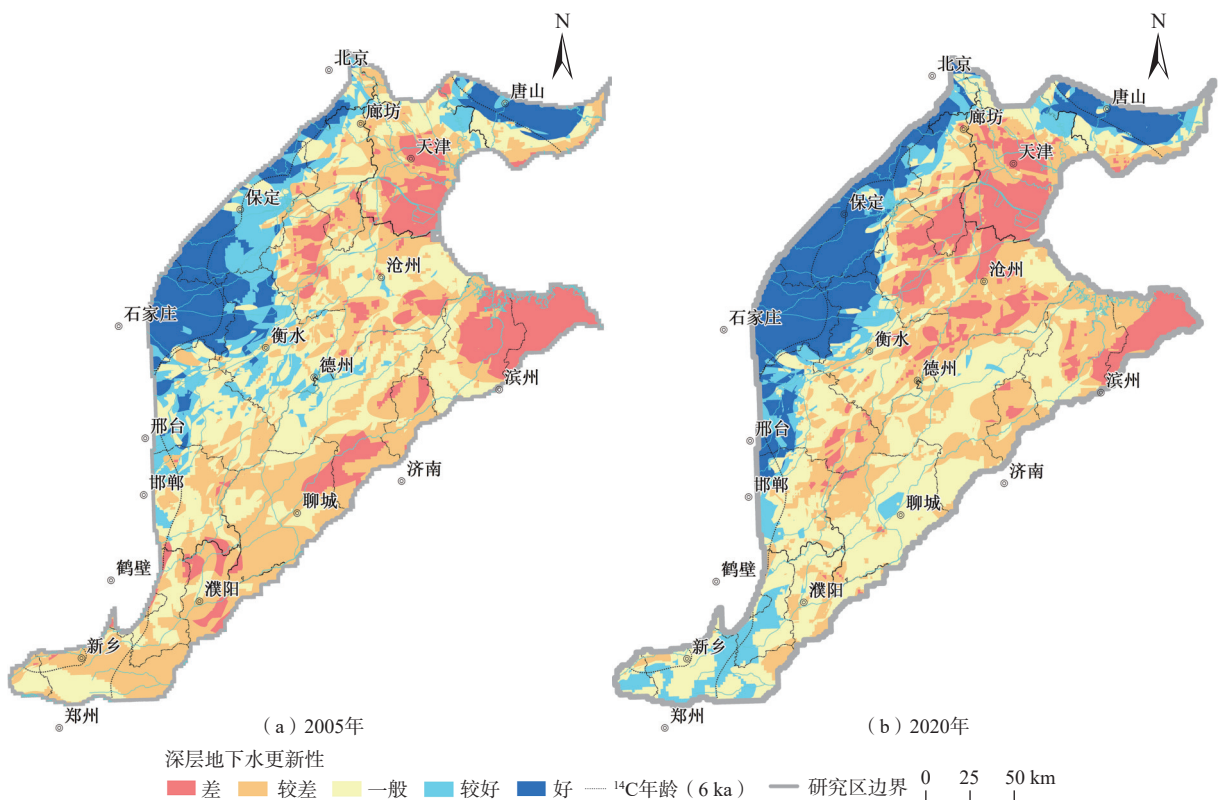


图 8 深层地下水更新能力综合评价

Fig. 8 Renewability evaluation of deep groundwater

表 4 深层地下水更新能力评价分区面积变化

Table 4 Area changes in renewability evaluation of deep groundwater

分区类型	面积/km ²			百分比/%
	2005年	2020年	变化量	
好区	10 848	19 459	8 611	79.38
较好区	13 243	10 041	-3 202	-24.18
一般区	33 597	39 682	6 085	18.11
较差区	41 620	33 785	-7 835	-18.83
差区	19 585	15 926	-3 659	-18.68

以看出,地下水 ^{14}C 年龄小于8 ka的区域与本次评价的更新能力良好区较为一致,主要位于山前平原地带,这是由于山前平原地下水渗流速度大,水循环更新速度快,地下水更新能力好。在中东平原、滨海平原,本次评价的地下水更新能力分布特征更多反映了深层地下水开采引起的局部区域越流量与侧向径流综合变化特征,这与深层地下水 ^{14}C 年龄随着离补给区距离的增大而增大的趋势不一致。这是由于利用地下水水力传输和质点传输时间在评价地下水更新能力时所代表的含义不同。

3.3 深层地下水可利用量分析

深层地下水可利用量评价以环境地质问题防控

为目标,识别地下水水头恢复阈值,确保地下水的资源、环境和生态功能协同发挥。地下水降落漏斗防控区地下水水头恢复阈值以20世纪80年代初地下水尚未大规模开采,尚未引发区域地下水降落漏斗的地下水流场为主要依据。地面沉降防控区地下水水头恢复阈值通过分析深层地下水水头下降诱发地面沉降的临界值进行研判。姜媛等^[47]研究表明,地面沉降速率与深层地下水水头下降速率有很好的相关性,研究表明北京平原的深层地下水水头埋深大于25 m时地面沉降快速发展;沧州平原的深层地下水水头埋深小于50 m时,地面沉降处于缓慢发展阶段,水头埋深50~70 m时地面沉降加速扩展至整个漏斗区。刘敏等^[48]研究表明天津平原的第Ⅱ含水层组水头埋深控制在30~35 m,第Ⅲ含水层组水头埋深控制在40 m以内时,基本不引发地面沉降,超过这一水头埋深,地面沉降将剧烈发展。基于地下水降落漏斗修复和地面沉降防控,结合深层地下水水头恢复的可行性与水位连续性,确定华北平原地下水水头恢复阈值^[49]。

在深层地下水均衡计算基础上,充分考虑规划期内深层水恢复需水量,科学界定深层地下水可利用量:

$$Q_{\text{可利用}}=Q_{\text{侧补}}+Q_{\text{越补}}-Q_{\text{水位恢复需水量}}$$

(3)

式中: $Q_{\text{可利用}}$ ——深层地下水可利用量/($\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$);
 $Q_{\text{侧补}}$ ——深层水侧向补给量/($\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$);
 $Q_{\text{越补}}$ ——深层地下水越流补给量/($\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$);
 $Q_{\text{水位恢复需水量}}$ ——规划期内基于环境地质问题防控的地下水水头恢复年均需水量/($\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)。

地下水水头恢复年均需水量评价基于环境地质问题防控展开,以 20 年一轮地下水资源评价周期作为规划期,目前深层地下水水头普遍低于识别的地下水水头恢复阈值,具体评价方法为:

$$Q_{\text{年均恢复需水量}} = \sum [(Q_{\text{恢复水位阈值}} - Q_{\text{现状水位}})FS^*]/t \quad (4)$$

式中: $Q_{\text{年均恢复需水量}}$ ——基于环境地质问题防控的地下水水头恢复年均需水量/($\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$);
 $Q_{\text{恢复水位阈值}}$ ——基于环境地质问题防控的地下水水头恢复阈值/m;
 $Q_{\text{现状水位}}$ ——现状地下水水头标高/m;
 t ——规划期/a。

经评价,华北平原深层地下水水头恢复需水量为 $4.50 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,深层地下水可利用量为 $8.52 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,主要分布于山前平原的中更新统冲洪积扇区,该区域接受侧向补给、越流补给,深层水更新循环速率较快;中东部平原深层水更新循环缓慢,不具有资源属性,可作为地下水战略储备开展应急供水。

3.4 新水情下深层地下水平衡分析

以山前平原、中部平原、滨海平原和深层地下水连片漏斗区为单元开展水平衡演变分析,评价时段为 1980—2005 年、2006—2014 年、2015—2020 年 3 个时段,见表 5。20 世纪 80 年代以来,深层地下水大规模开采,排泄量大幅增加,随着深层地下水水头下降,至 2005 年深层水储量亏空速率为 $12.29 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,区域性深层地下水降落漏斗随之不断扩大,深层地下水失衡凸显。2006—2014 年,深层地下水开采进一步加剧,依据水均衡计算该阶段年均排泄量较上一阶段增加 46.74%,深层水水头下降速率随之增加,储量亏空速率达 $18.97 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,区域性深层地下水降落漏斗呈连片趋势发展,深层地下水失衡加剧。2015 年以来,随着地下水超采综合治理推进,部分城区地下水水头止跌回升,农业区由于缺乏替代水源,水头仍处于下降趋势,但降速减缓,降落漏斗中心由城区向农业区转移,深层地下水年均亏空量较 2006—2014 年明显减少,但深层地下水失衡状况尚未得到根本扭转。

从深层地下水水头变幅看,连片漏斗区水头下降速率最大,水失衡程度最为严重;中部平原、滨海平原水头下降速率次之,水失衡程度较为严重;山前平原水头下降速率最小,区域水失衡程度较低。

表 5 深层水水平衡分析

Table 5 Analysis of deep groundwater balance / ($10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)

评价分区	水平衡分析项	1980—2005年	2006—2014年	2015—2020年
山前平原	补给量	5.68	6.44	7.78
	排泄量	8.71	11.48	10.26
	储变量	-3.28	-4.01	-2.69
中部平原	补给量	9.13	12.62	9.04
	排泄量	15.96	25.24	19.33
	储变量	-7.03	-11.28	-9.97
滨海平原	补给量	2.29	3.08	2.4
	排泄量	4.47	6.04	4.27
	储变量	-1.98	-3.68	-2.49
连片漏斗区	补给量	4.01	4.29	3.93
	排泄量	7.88	10.05	8.01
	储变量	-3.65	-6.15	-4.11

2015 年以来,在地下水超采综合治理等新水情背景下,深层地下水开采强度呈下降趋势。中部、滨海平原主要深层地下水开采区开采量降幅分别达 23.42%、29.30%;连片漏斗区以农业区为主,由于缺乏置换水源,深层水开采量降幅为 20.30%。

深层地下水水头降速是水失衡演变的关键表征指标,可反映水失衡的缓解程度。2015 年以来,中部、滨海平原深层地下水水头降速分别减缓 38.64%、35.06%,水失衡缓解程度较大,连片漏斗区水头降速减缓 20.49%,水失衡缓解程度较小。地下水超采综合治理下一步应重点关注农业区,探索利用南水北调中线、东线工程引江水置换部分农业供水,从根本上缓解华北平原地下水失衡问题。

4 讨论

本文利用地质背景指标和水力指标,探索采用综合评分法评价了华北平原深层地下水更新能力。然而,地下水更新能力随地域、埋藏深度、含水层变化、时间而变化^[50],其大小受自然条件和人类活动(以人工排泄为主)共同影响,具有时空变化特征。特别是在开采影响下,地下水可更新性能力的评价越发复杂,需要综合考虑多种因素。以华北平原为例,其深层地下水更新能力的大小或强弱除了与地下水径流性指标(渗透系数、水力梯度、深浅层水头差以及越

流系数、含水层厚度、含水层埋藏深度)有关外,还与地下水系统结构及连通性等天然属性(如第四系底界形态、弱透水层分布及厚度、古河道等岩相古地理特征)、地下水物理状态(如密度、黏滞性)以及地下水时间指标(地下水形成时期及年龄)等有关,在今后评价深层地下水更新能力方面,需要综合考虑上述多种因素进一步深入研究,以期得到更加符合客观实际的定量评价结果。

5 结论

(1)受新水情影响,深层地下水水平衡关键指标发生变化。与2005年相比,2020年深层地下水渗流速度增大,侧向补给量增加 $0.25 \times 10^8 \text{ m}^3$,越流补给量增加 $0.88 \times 10^8 \text{ m}^3$,地下水开采量减少 $1.41 \times 10^8 \text{ m}^3$,地下水年度储量减少量由 $12.29 \times 10^8 \text{ m}^3$ 变为 $9.70 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

(2)从空间分析,受到渗透系数影响,山前平原深层地下水更新能力强,中东部平原更新能力弱。从时间分析,开采量的变化使得垂向越流量和水平侧向径流的组成及数量发生了变化,2020年深层地下水更新能力较2005年总体增强,存在空间差异性。

(3)评价得出深层地下水可利用量为 $8.52 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$,主要分布于山前平原的中更新统冲洪积扇区,该区域接受侧向补给、越流补给,深层水更新循环速率较快。中东部平原深层水更新循环缓慢,不具有资源属性,可作为地下水战略储备开展应急供水。

(4)受到新水情影响,深层地下水水平衡随时间发生演变。20世纪80年代开始,深层地下水受到开采影响,水头开始下降;2006—2014年,深层水开采进一步加剧,深层地下水失衡加剧;2015年以来,随着地下水超采治理系列举措的开展,深层水开采规模逐步回落,但地下水失衡状况尚未得到根本扭转。

参考文献 (References):

- [1] 李文鹏,王龙凤,杨会峰,等.华北平原地下水超采状况与治理对策建议[J].中国水利,2020(13):26-30. [LI Wenpeng, WANG Longfeng, YANG Huifeng, et al. The groundwater overexploitation status and countermeasure suggestions of the North China Plain[J]. China Water Resources, 2020(13): 26-30. (in Chinese with English abstract)]
- [2] 邵景力,赵宗壮,崔亚莉,等.华北平原地下水流模拟及地下水资源评价[J].资源科学,2009,31(3):361-367. [SHAO Jingli, ZHAO Zongzhuang, CUI Yali, et al.

Application of groundwater modeling system to the evaluation of groundwater resources in north China plain[J]. Resources Science, 2009, 31(3): 361-367. (in Chinese with English abstract)]

- [3] 石建省,李国敏,梁杏,等.华北平原地下水演变机制与调控[J].地球学报,2014(5):527-534. [SHI Jiansheng, LI Guomin, LIANG Xing, et al. Evolution mechanism and control of groundwater in the north China plain[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2014(5): 527-534. (in Chinese with English abstract)]
- [4] 王晓光,郭常来,何海洋,等.地下水降落漏斗分类研究[J].地质与资源,2019,28(5):487-492. [WANG Xiaoguang, GUO Changlai, HE Haiyang, et al. Study on the classification of groundwater depression cone[J]. Geology and Resources, 2019, 28(5): 487-492. (in Chinese with English abstract)]
- [5] 朱琳,宫辉力,李小娟,等.区域地面沉降研究进展与展望[J].水文地质工程地质,2024,51(4):167-177. [ZHU Lin, GONG Huili, LI Xiaojuan, et al. Research progress and prospect of land subsidence[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(4): 167-177. (in Chinese with English abstract)]
- [6] 白华,杨会峰,张英平,等.京津冀山区水平衡演变及其影响因素识别[J].水文地质工程地质,2023,50(6):26-40. [BAI Hua, YANG Huifeng, ZHANG Yingping, et al. Identifying the evolution of water balance and influencing factors in the mountainous area of Beijing-Tianjin-Hebei[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2023, 50(6): 26-40. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 郭永海,沈照理,钟佐桑,等.从地面沉降论河北平原深层地下水资源属性及合理评价[J].地球科学——中国地质大学学报,1995,20(4):415-420. [GUO Yonghai, SHEN Zhaoli, ZHONG Zuoshen, et al. The property of deep-lying groundwater resources in Hebei plain and its reasonable evaluation in view of land subsidence[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 1995, 20(4): 415-420. (in Chinese with English abstract)]
- [8] 石建省,王昭,张兆吉,等.华北平原深层地下水超采程度计算与分析[J].地学前缘,2010,17(6):215-220. [SHI Jiansheng, WANG Zhao, ZHANG Zhaoji, et al. Assessment of over-exploitation of deep groundwater in the North China Plain[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(6): 215-220. (in Chinese with English abstract)]
- [9] 朱菊艳,郭海朋,李文鹏,等.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, 2014, 12(3): 165 - 169. [ZHU Juyan, GUO Haipeng, LI Wenpeng, et al. Relationship between land subsidence and deep groundwater yield in the north China plain[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(3): 165 - 169. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 李绍恒, 陈建耀, CENDÓN I Dioni, 等. 基于多同位素联用的雷州半岛中深层地下水年龄初探[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2022, 61(4): 95 - 103. [LI Shaoheng, CHEN Jianyao, CENDÓN I Dioni, et al. Preliminary study on the age of groundwater in the middle and deep aquifers of Leizhou Peninsula based on multi-isotopes[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2022, 61(4): 95 - 103. (in Chinese with English abstract)]
- [11] 程中双. 基于地下水年龄与水化学论华北平原地下水开采可持续性[D]. 北京: 中国地质科学院, 2023. [CHENG Zhongshuang. Using groundwater age and hydrochemistry discuss sustainability of groundwater exploitation in North China Plain[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2023. (in Chinese with English abstract)]
- [12] 苏晨, 程中双, 郑昭贤, 等. 穆兴平原北部地下水年龄及更新性[J]. 中国地质, 2019, 46(2): 328 - 336. [SU Chen, CHENG Zhongshuang, ZHENG Zhaoxian, et al. Groundwater age and renewability in the north of Muling-Xingkai plain[J]. Geology in China, 2019, 46(2): 328 - 336. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 翟远征, 王金生, 滕彦国, 等. 地下水更新能力评价指标问题刍议——更新周期和补给速率的适用性[J]. 水科学进展, 2013, 24(1): 56 - 61. [ZHAI Yuanzheng, WANG Jinsheng, TENG Yanguo, et al. Humble opinion on assessment indices for groundwater renewability: Applicability of renewal period and recharge rate[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(1): 56 - 61. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 翟远征, 王金生, 左锐, 等. 地下水年龄在地下水研究中的应用研究进展[J]. 地球与环境, 2011, 39(1): 113 - 120. [ZHAI Yuanzheng, WANG Jinsheng, ZUO Rui, et al. Progress in applications of groundwater ages in groundwater research[J]. Earth and Environment, 2011, 39(1): 113 - 120. (in Chinese with English abstract)]
- [15] 王金生, 翟远征, 滕彦国, 等. 试论地下水更新能力与再生能力[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2011, 47(2): 213 - 216. [WANG Jinsheng, ZHAI Yuanzheng, TENG Yanguo, et al. Study on groundwater renewal capacity and reproducibility[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2011, 47(2): 213 - 216. (in Chinese with English abstract)]
- [16] 文冬光. 用环境同位素论区域地下水资源属性[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 2002, 27(2): 141-147. [WEN Dongguang. Groundwater resources attribute based on environmental isotopes[J]. Earth Science-Journal of China University of Geosciences, 2002, 27(2): 141-147. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 刘义, 史佩东, 刘森, 等. 基于生态需水的黄河中游水平衡分析[J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(1): 30 - 40. [LIU Yi, SHI Peidong, LIU Miao, et al. Analysis of water balance in the middle reaches of the Yellow River based on ecological water demand: A case study on Qinhe River Basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(1): 30 - 40. (in Chinese with English abstract)]
- [18] 郭晓东, 刘强, 李文鹏, 等. 西辽河平原地下水失衡及其与土地利用的互馈关系[J]. 水文地质工程地质, 2024, 51(4): 77 - 87. [GUO Xiaodong, LIU Qiang, LI Wenpeng, et al. Groundwater imbalance and its mutual feedback relationship with land use in West Liaoh River Plain[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(4): 77 - 87. (in Chinese with English abstract)]
- [19] 水利部, 财政部, 国家发展改革委, 等. 关于印发《华北地区地下水超采综合治理实施方案(2023—2025年)》的通知: 水资管[2023]218号[Z]. (2023-07-05) [2024-08-04]. [Ministry of Water Resources, Ministry of Finance, National Development and Reform Commission. Ministry of Agriculture and Rural Affairs. Notice on the issuance of the Implementation Plan for the Comprehensive Control of Groundwater Overexploitation in north China (2023—2025): Water management[2023] 218[Z]. (2023-07-05) [2024-08-04]. (in Chinese)]
- [20] 杨会峰, 曹文庚, 支传顺, 等. 近 40 年来华北平原地下水位演变研究及其超采治理建议[J]. 中国地质, 2021, 48(4): 1142 - 1155. [YANG Huifeng, CAO Wengeng, ZHI Chuanshun, et al. Evolution of groundwater level in the North China Plain in the past 40 years and suggestions on its overexploitation treatment[J]. Geology in China, 2021, 48(4): 1142 - 1155. (in Chinese with English abstract)]
- [21] 陈望和. 河北地下水[M]. 北京: 地震出版社, 1999. [CHEN Wanghe. Groundwater of Hebei[M]. Beijing: Seismological Press, 1999. (in Chinese)]

- [22] 张宗祜. 华北大平原地下水的历史和现状 [J]. *自然杂志*, 2005, 27(6): 311 – 315. [ZHANG Zonghu. Groundwater in the vast north China plain[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2005, 27(6): 311 – 315. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 费宇红, 苗晋祥, 张兆吉, 等. 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*, 2009, 31(3): 394 – 399. [FEI Yuhong, MIAO Jinxiang, ZHANG Zhaoji, et al. Analysis on evolution of groundwater depression cones and its leading factors in north China plain[J]. *Resources Science*, 2009, 31(3): 394 – 399. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 张兆吉, 费宇红, 陈宗宇, 等. 华北平原地下水可持续利用调查评价 [M]. 北京: 地质出版社, 2009. [ZHANG Zhaoji, FEI Yuhong, CHEN Zongyu, et al. Investigation and assessment of sustainable utilization of groundwater resources in the north China Plain[M]. Beijing: Geology Press, 2009. (in Chinese)]
- [25] 陈宗宇, 王莹, 聂振龙, 等. 中国北方区域地下水演变 [M]. 北京: 地质出版社, 2015. [CHEN Zongyu, WANG Ying, NIE Zhenlong, et al. Groundwater evolution in northern China[M]. Beijing: Geology Press, 2015. (in Chinese)]
- [26] 北京市水务局. 2000—2020 年度北京市水资源公报 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000—2020. [Department of Water Resources of Beijing. Beijing water resources bulletin of 2000—2020[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2000—2020. (in Chinese)]
- [27] 天津市水务局. 2000—2020 年度天津市水资源公报 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000—2020. [Department of Water Resources of Tianjin. Tianjin water resources bulletin of 2000—2020[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2000—2020. (in Chinese)]
- [28] 河北省水利厅. 2000—2020 年度河北省水资源公报 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000—2020. [Department of Water Resources of Hebei Province. Hebei water resources bulletin of 2000—2020[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2000—2020. (in Chinese)]
- [29] 河南省水利厅. 2000—2020 年度河南省水资源公报 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000—2020. [Department of Water Resources of Henan Province. Henan water resources bulletin of 2000—2020[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2000—2020. (in Chinese)]
- [30] 山东省水利厅. 2000—2020 年度山东省水资源公报 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000—2020. [Department of Water Resources of Shandong Province. Shandong water resources bulletin of 2000—2020[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2000—2020. (in Chinese)]
- [31] 北京市水务局. 2000—2020 年度北京市水务统计年鉴 [M]. 北京: 北京水利水电出版社, 2000—2020. [Department of Water Resources of Beijing. Beijing water statistical yearbook of 2000—2020[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2000—2020. (in Chinese)]
- [32] 天津市水务局. 2000—2020 年度天津市水务年鉴 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000—2020. [Department of Water Resources of Tianjin. Tianjin water statistical yearbook of 2000—2020[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2000—2020. (in Chinese)]
- [33] 河北省水利厅. 2000—2020 年度河北水利统计年鉴 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000—2020. [Department of Water Resources of Hebei Province. Hebei Province water statistical yearbook of 2000—2020[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2000—2020. (in Chinese)]
- [34] 山东省水利厅. 2000—2020 年度山东水利统计年鉴 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000—2020. [Department of Water Resources of Shandong Province. Shandong Province water statistical yearbook of 2000—2020[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2000—2020. (in Chinese)]
- [35] 河南省水利厅. 2000—2020 年度河南水利统计年鉴 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000—2020. [Department of Water Resources of Henan Province. Henan Province water statistical yearbook of 2000—2020[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2000—2020. (in Chinese)]
- [36] 苏小四, 林学钰. 银川平原地下水循环及其可更新能力评价的同位素证据 [J]. *资源科学*, 2004, 26(2): 29 – 35. [SU Xiaosi, LIN Xueyu. Cycle pattern and renewability evaluation of groundwater in yinchuan basin: Isotopic evidences[J]. *Resources Science*, 2004, 26(2): 29 – 35. (in Chinese with English abstract)]
- [37] AYADI R, TRABELSI R, ZOUARI K, et al. Hydrogeological and hydrochemical investigation of groundwater using environmental isotopes (^{18}O , ^2H , ^3H , ^{14}C) and chemical tracers; A case study of the intermediate aquifer, Sfax, southeastern Tunisia[J]. *Hydrogeology Journal*, 2017, 26(4): 983 – 1007.
- [38] 苏晨. 伊犁河谷地下水年龄和补给流动模式的多元

- 同位素示踪研究[D]. 北京: 中国地质科学院, 2021. [SU Chen. Study of groundwater age and patterns of groundwater recharge and flow in Ili River Valley based on multi isotopes[D]. Beijing: Chinese Academy of Geological Sciences, 2021. (in Chinese with English abstract)]
- [39] 贾秀梅, 孙继朝, 陈玺, 等. 银川平原承压水氢氧同位素组成与 ^{14}C 年龄分布特征[J]. 现代地质, 2009, 23(1): 15–22. [JIA Xiumei, SUN Jichao, CHEN Xi, et al. Distribution characteristics of hydrogen and oxygen isotopic compositions and ^{14}C ages in confined water of Yinchuan Plain[J]. Geoscience, 2009, 23(1): 15–22. (in Chinese with English abstract)]
- [40] 孙继朝, 贾秀梅. 地下水年代学研究[J]. 地球学报, 1998, 19(4): 383–386. [SUN Jichao, JIA Xiumei. Chronologic study of groundwater[J]. ACTA Geoscientia Sinica, 1998, 19(4): 383–386. (in Chinese with English abstract)]
- [41] 郭娇, 石建省, 王伟. 华北平原地下水年龄校正[J]. 地球学报, 2007, 28(4): 396–404. [GUO Jiao, SHI Jiansheng, WANG Wei. Age correction of the groundwater in north China plain[J]. Acta Geoscientia Sinica, 2007, 28(4): 396–404. (in Chinese with English abstract)]
- [42] 毛绪美, 梁杏, 王凤林, 等. 华北平原深层地下水 ^{14}C 年龄的TDIC校正与对比[J]. 地学前缘, 2010, 17(6): 102–110. [MAO Xumei, LIANG Xing, WANG Fenglin, et al. Calibrating deep groundwater ^{14}C ages of North China Plain with TDIC and a comparative study[J]. Earth Science Frontiers, 2010, 17(6): 102–110. (in Chinese with English abstract)]
- [43] 陆垂裕, 赵勇, 刘蓉, 等. 华北平原深层地下水可更新性与水位管控探讨[J]. 水资源管理, 2024(7): 22–28. [LU Chuiyu, ZHAO Yong, LIU Rong, et al. Discussion on renewability of deep aquifer and water level control in the North China Plain[J]. China Water Resources, 2024(7): 22–28. (in Chinese with English abstract)]
- [44] BHANDARY H, AL SENAFY M, MARZOUK F, et al. Usage of carbon isotopes in characterizing groundwater age, flow direction, flow velocity and recharge area[J]. Procedia Environmental Sciences, 2015, 25: 28–35.
- [45] MEREDITH K T, HAN L F, CENDÓN D I, et al. Evolution of dissolved inorganic carbon in groundwater recharged by cyclones and groundwater age estimations using the ^{14}C statistical approach[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2018, 220: 483–498.
- [46] 时孟杰. 咸水越流过程中粘性土层的阻盐效应研究——以沧州地区为例[D]. 青岛: 山东科技大学, 2020. [SHI Mengjie. Salt blocking effect of the clay layer in saline water overflow process: A case study in Cangzhou area[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2020. (in Chinese with English abstract)]
- [47] 姜媛, 田芳, 罗勇, 等. 北京地区基于不同地面沉降阈值的地下水位控制分析[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2015, 26(1): 37–42. [JIANG Yuan, TIAN Fang, LUO Yong, et al. Groundwater control target under different threshold of land subsidence in Beijing[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2015, 26(1): 37–42. (in Chinese with English abstract)]
- [48] 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 Min, NIE Zhenlong, WANG Jinzhe, 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 with English abstract)]
- [49] YANG Huifeng, MENG Ruifang, BAO Xilin, et al. Assessment of water level threshold for groundwater restoration and over-exploitation remediation the Beijing-TianjinHebei Plain[J]. Journal of Groundwater Science and Engineering, 2022, 10(2): 113–127.
- [50] 马致远, 侯光才. 环境同位素技术在区域地下水资源补给及可更新性中的应用[J]. 工程勘察, 2005(5): 21–24. [MA Zhiyuan, HOU Guangcai. Application of the technique of environmental isotope to the recharge of regional groundwater resource[J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2005(5): 21–24. (in Chinese with English abstract)]

编辑: 张若琳