

京津冀地区水安全挑战与应对战略研究

赵勇^{1,2}, 王庆明^{1,2*}, 王浩^{1,2}, 何凡^{1,2}, 李海红^{1,2}, 翟家齐^{1,2}, 刘蓉^{1,2}, 胡鹏^{1,2}, 王静^{1,3}

(1. 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 2. 中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038;
3. 中国水利水电科学研究院防洪抗旱减灾研究中心, 北京 100038)

摘要: 京津冀地区是我国水资源承载压力最大、水生态系统受损最严重的区域之一, 面向地区未来发展需求, 系统研判水安全风险并提出针对性的应对策略, 是实现京津冀协同发展和世界级城市群建设目标的科技保障。本文较为系统地梳理了有关京津冀地区的国家重大政策、经济社会发展态势、生态保护要求, 分析了京津冀地区水安全现状、面临的形势以及有关重大科学问题。研究表明, ①水资源供需矛盾是京津冀地区水安全保障的首要问题, 未来区域水资源大概率将持续衰减 $1\times 10^9\sim 2\times 10^9\text{ m}^3$, 南水北调后续工程需调水量为 $3.9\times 10^9\sim 6\times 10^9\text{ m}^3$ 以保障区域水系统安全; ②针对区域河湖萎缩干涸、地下水超采严重的水生态现状, 提出了河湖生态保护修复布局建议, 明确了分区“健康地下水位”, 即在恢复地下水埋深方面, 山前平原区为8~20 m、中部平原区为3~5 m、城市区为6~10 m、东部沿海区为2~3 m; ③针对防洪达标率低、蓄滞洪区启用难度大等地区防洪体系的薄弱环节, 可加强常态与应急统筹管理, 提前布局超标洪水等应对措施。相关研究立足京津冀地区新发展方位, 着力形成前瞻且可操作的对策建议, 以期京津冀地区一系列重大国家战略任务的推进实施提供基础性参考。

关键词: 京津冀地区; 水安全; 水资源高效利用; 地下水位恢复; 河湖生态保护

中图分类号: TV213.9 **文献标识码:** A

Water Security in Beijing–Tianjin–Hebei Region: Challenges and Strategies

Zhao Yong^{1,2}, Wang Qingming^{1,2*}, Wang Hao^{1,2}, He Fan^{1,2}, Li Haihong^{1,2}, Zhai Jiaqi^{1,2},
Liu Rong^{1,2}, Hu Peng^{1,2}, Wang Jing^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, Beijing 100038, China; 2. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Research Center on Flood and Drought Disaster Reduction, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: The Beijing–Tianjin–Hebei region suffers from a high bearing pressure of water resources and its water ecosystem is severely damaged. For future development, it is necessary to analyze the water security risks and propose targeted countermeasures, thus to ensure the coordinated development of the Beijing–Tianjin–Hebei region and build this region into a world-class urban agglomeration. In this study, we summarize the key national policies, socio-economic development trends, and ecological protection requirements of the region. In addition, we analyze the water security status and relevant major scientific issues. Our findings are as follows. (1) The contradiction between supply and demand of water resources is the primary problem that threatens water security in the Beijing–Tianjin–Hebei region, and water resources in the region will probably continue to decay by 1–2 billion m^3 . Therefore, to guarantee the security of the regional water system, 3.9–6 billion m^3 of water needs to be transferred into this region via the South-to-

收稿日期: 2021-11-29; 修回日期: 2021-12-30

通讯作者: *王庆明, 中国水利水电科学研究院水资源研究所高级工程师, 研究方向为水文水资源; E-mail: wangqm@iwhr.com

资助项目: 中国工程院咨询项目“面向2050年京津冀水安全挑战与应对战略”(2021-XY-06); 国家杰出青年科学基金(52025093)

本刊网址: www.engineering.org.cn/ch/journal/sscae

North Water Diversion Project. (2) To address the shrinkage and drying of regional rivers and lakes, groundwater overexploitation, and other severe water ecological problems, we propose a layout for the ecological protection and restoration of rivers and lakes and clarify the healthy groundwater levels for different areas: 8–20 m in piedmont plains, 3–5 m in central plains, 6–10 m in urban areas, and 2–3 m in the eastern coastal area. (3) To improve the weak links of the flood control system in the region such as a low pass rate of flood control standards and the difficulty in activating flood detention areas, this region needs to strengthen the routine–emergency integrated management and prepare countermeasures for over-level floods.

Keywords: Beijing–Tianjin–Hebei region; water security; efficient utilization of water resources; groundwater level restoration; river and lake ecology protection

一、前言

京津冀地区既是我国人口密集且经济发达的区域，也是水资源短缺、水污染严重、水生态退化显著、资源环境支撑力与发展矛盾尖锐的地区，相应的水安全保障形势十分严峻 [1]。当前，京津冀协同发展、雄安新区建设、永定河生态修复、华北地下水超采综合治理等一系列重大国家战略及水治理举措在京津冀地区相继布局，也将深刻影响区域未来水安全保障态势。面对新的形势，研究如何统筹应对区域水资源保障、地下水恢复、河湖生态修复、超标洪水防御等问题，对京津冀地区发展具有重要的现实意义 [2~4]。

中国工程院组织完成的“我国水安全战略和相关重大政策研究”咨询项目（2016年），提出了国家水安全保障总体战略框架、重大策略、具体发展建议 [5]，为京津冀地区水安全保障研究提供了顶层技术指导。在“十三五”国家重点研发计划支持下，“京津冀水资源安全保障技术研发集成与示范应用”项目系统答复了强人类活动区水循环演变机理与健康水循环模式、强烈竞争条件下水资源多目标协同配置两大科学问题，这是围绕京津冀地区水资源安全保障形成的重要研究成果 [6]。基于这些研究进展，结合国家在水治理方面的新理念，研究提出解决京津冀地区水安全问题的战略措施，既是保障区域生态环境、经济社会健康可持续发展的必然要求，也为类似缺水地区水资源高效配置、利用及管理提供可靠案例。

整体来看，京津冀地区水安全问题既有资源承载力不足与开发利用过载的矛盾，也有经济发展结构失衡与生态环境保障滞后的矛盾，各类影响因素相互交织，加之在发展过程中不断呈现的新特征，使得以往的研究结论在全面性、适用性方面仍有待提升。针对于此，本文充分借鉴已有研究成果，把握有关水治理的新要求，围绕京津冀地区生态修复

与高质量发展目标，开展水安全现状研判、形势分析、科学问题凝练，进而提出区域水安全保障策略。

二、京津冀地区水安全现状

（一）经济社会发展与水供给能力不匹配，水资源供需矛盾突出

京津冀地区水资源量仅占全国的0.7%，却承载着全国5%的耕地、8%的人口、10%的经济总量；用水需求受到水资源承载能力的严重制约，供水用水长期处于紧平衡态势。2014—2020年，京津冀地区多年平均用水量为 $2.53 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ，其中本地地表水和地下水供水约 $2.11 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ，再生水和外调水供水约 $4.2 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。2020年，京津冀地区人均用水量为 227 m^3 ，万元国内生产总值（GDP）用水量为 29 m^3 ，万元工业增加值用水量为 12.8 m^3 ，农业灌溉平均用水量为 $160 \text{ m}^3/\text{亩}$ （ $1 \text{ 亩} \approx 666.67 \text{ m}^2$ ），在国内外处于较先进水平 [7]。

也要注意，一方面，随着京津冀协同发展和生态文明建设推进，北京城市副中心、河北雄安新区等重点区域在疏解北京非首都功能的同时也会产生集聚效应，对发展用水、生态用水提出了新的更高要求；另一方面，海河流域是全国一级流域中地表水衰减最剧烈的流域，与第一次水资源评价期（1956—1979年）相比，2001—2016年平均地表水资源减少了 $1.66 \times 10^{10} \text{ m}^3$ （超过南水北调中线一期工程向京津冀地区规划调水量的3倍，超过京津冀地区用水总量的60%），其中山丘区水资源减少量占比超过75%。水资源衰减加剧了区域用水矛盾。

（二）经济社会长期挤占生态环境用水，水生态环境损害严重

京津冀地区为支撑经济社会发展用水需求，水资源开发利用一度达到106%，在南水北调东线、中线一期工程通水后仍高达70%；区域水资源超载

严重，水生态系统受到严重损害，突出表现为河道断流、湖泊湿地萎缩、河流连通性低、水生生物多样性低等。

根据第三次水资源调查评价，1980—2017年京津冀地区河流主要河段年均干涸（断流）217天，70%的河段干涸（断流）天数超过300天，白洋淀、衡水湖等主要湖泊面积较20世纪50年代减少了70%。例如，20世纪50年代初京津冀地区年入海水量平均为 $2.38 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ，随后大中型蓄水工程开始修建，加之受气候变化和经济社会用水量激增的影响，下泄水量越来越少，2000年后年入海水量已不足 $2 \times 10^9 \text{ m}^3$ ；2010年后年入海水量呈回升趋势，但也仅增加到 $6.3 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。

京津冀地区还是我国最严重的地下水超采区，超采面积和超采量约占全国的37%。京津冀平原区地下水累计超采超过 $1.5 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ，其中河北平原几乎全域超采。1986—2013年，河北平原地下水水位累计下降了6.68 m，年均降幅高达0.247 m，成为世界上最大的地下水超采区和漏斗区。地下水超采导致了地面沉降、海水入侵等一系列生态环境问题 [8~10]。

（三）流域防洪体系短板依然突出，防洪减灾新老问题并存

京津冀地区特殊的地貌格局决定了防汛的重要性：位于太行山、燕山山脉前缘，山前到平原过渡带短，河流水系呈扇形分布；源短流急，洪水陡涨陡落，极易在短时间内发生暴雨洪水。这对洪水预测预报、防汛抗旱应急反应能力提出了极高要求。

目前，京津冀地区的大中型水库、主要骨干河道以及中小河流等水利薄弱环节治理任务尚未全面完成，如骨干河道现状防洪标准达标率不足50%，河道淤障拥塞、堤防老化失修、河口无序开发等造成了泄洪能力的普遍下降。京津冀蓄滞洪区内居住人口超过500万人，耕地面积超过 $6 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ，蓄滞洪区启用难度加大；蓄滞洪区的工程建设和安全建设达不到实际要求，一旦分洪流量控制不好，容易扩大洪水灾害的范围和影响，甚至会造成“小水大淹”的情况。

近年来，城市防洪排涝问题成为新的焦点。由于城市建筑面积、水泥硬化道路增多，天然“海绵体”面积明显减少，导致城市内涝等现象频发。2017—2019年，京津冀地区因城市内涝导致受灾人

口累计为241万人，造成直接经济损失为44亿元；部分城市因特大暴雨造成内涝，出现了人员伤亡情况。排涝能力与经济社会发展水平不匹配、不适应，成为区域内城市发展的短板和制约因素。

三、京津冀地区水安全形势

（一）国家提出更高要求

《京津冀协同发展规划纲要》的提出，标志着京津冀协同发展进入全面实施、加快推进的新阶段 [11]。保障国家重大战略的推进实施，成为京津冀地区水治理的核心任务，也对区域水安全保障提出新要求。对京津冀地区而言，以下方面尤为关键：做好“山水林田湖草”系统治理，实现多功能统筹协调；响应建设“幸福河”的号召，实现水资源、水安全、水生态、水环境、水文化以及社会经济的多维度治理与发展；着力推进水资源集约利用，做好“节水优先”工作。

（二）人口和经济发展格局出现调整

2001年以来，全国人口增长率持续降低。当前，全国人口变化呈现新态势（见图1），相关研究预测“十四五”时期进入负增长 [12,13]。在京津冀地区，人口增长率表现为两个阶段：2010年以前人口快速增长，2010年之后人口增长率急剧下降（2015年后已经低于全国水平）。从人口流动情况看，近十年来京津冀地区的人口流入区主要是北京市、天津市，净流出区是河北省。“十三五”时期，京津冀城市群扣除人口自然增长部分后均呈净流出态势；北京市已由人口净流入转为净流出 [14]，天津也有类似趋势。由此可见，京津冀地区人口峰值极有可能提前到达。

京津冀地区是我国经济发展的重要引擎，在重大战略引领下经济社会发展格局逐步调整。河北雄安新区以绿色生态宜居新城区、创新驱动发展引领区、协调发展示范区、开放发展先行区为基本定位；北京城市副中心正在发展成为国际一流的和谐宜居之都示范区、新型城镇化示范区、京津冀区域协同发展示范区；大运河文化带建设在区域水治理与城市建设、文化发展与历史保护有机结合方面力争走在全国前列。经济社会格局的调整对区域水资源保障提出了新要求，既能推进京津冀地区水生态

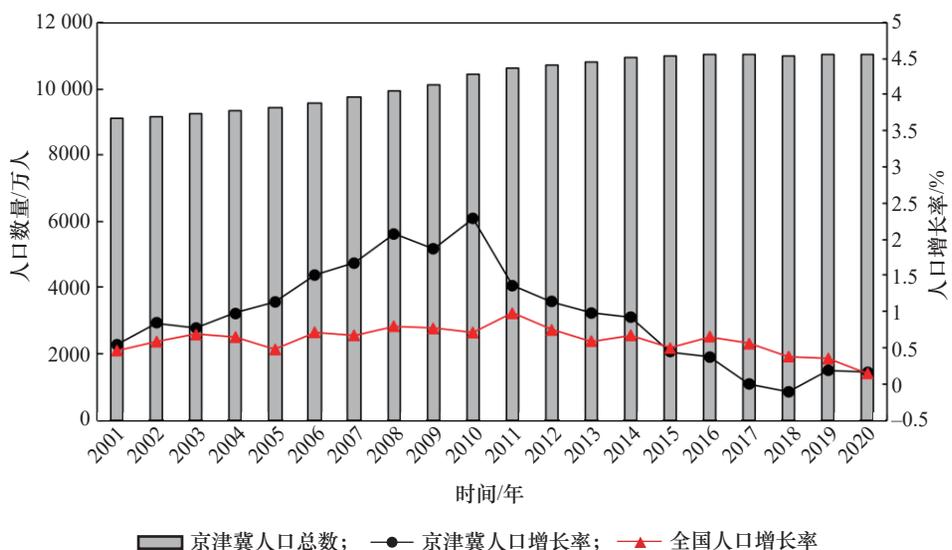


图1 全国及京津冀地区人口变化趋势 (2001—2020年)

修复治理,又可保障经济社会发展用水安全,是京津冀地区水资源调控的重大挑战。

(三) 生态环境治理保持目标更新

2014年起,多部委联合推动实施河北省地下水超采综合治理三年试点工作。《华北地区地下水超采综合治理行动方案》(2019年)提出[15],到2022年,在正常来水情况下,京津冀地区年压减地下水开采量 $2.57 \times 10^9 \text{ m}^3$,现状超采量压减率不低于70%;到2035年,力争全面实现地下水采补平衡,超采亏空水量逐步填补。这些综合性管理举措,对京津冀地区水资源供给侧保障、需求侧管控提出新的目标要求。

河湖生态复苏是京津冀高质量发展的重要内涵。为解决京津冀地区河湖干涸等问题,水利部协调京津冀三省市共同开展河湖生态补水行动;至2020年年底,京津冀地区河湖生态补水累计为 $1.14 \times 10^{10} \text{ m}^3$,治理区内补水河湖有水河长增加至1873 km(为补水前的2.1倍),新增水面734 km^2 (为补水前的1.9倍)。尽管如此,京津冀地区河湖生态缺水的形势没有得到根本扭转,与区域定位目标仍有不小的差距。

四、京津冀地区水安全重大科学问题分析

(一) 流域水资源衰减规律与演变预测

京津冀地区92%的面积在海河流域,海河流域

范围的67%在京津冀地区。受气候变化、人类活动双重影响,京津冀地区所在的海河流域地表水资源总量从1956—1979年的 $2.88 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 减少到2001—2016年的 $1.22 \times 10^{10} \text{ m}^3$,减幅达到58%。“京津冀水资源安全保障技术研发集成与示范应用”项目研究表明[16],1980—2000年较1956—1979年的平均地表水资源量衰减 $1.17 \times 10^{10} \text{ m}^3$,其中首要影响因素是降雨变化(占比为60%),其次是植被修复影响;2001—2016年较1980—2000年的平均地表水资源量衰减 $4.9 \times 10^9 \text{ m}^3$,其中贡献最大的是山区植被修复对地表水资源量衰减的影响(占比为54%),其次是降雨变化影响。

海河流域水资源量受到气候变化、土地利用格局、植被质量、地下水埋深等因素的显著影响。本文围绕4种关键要素来配置未来预测情景方案,通过不同情景要素组合,采用构建的分布式水循环模型(WACM)预测了未来海河流域水资源量的演变规律。研究发现,即使保持现状气候条件及地下水埋深,受城镇化高速发展、植被大规模修复的影响,海河流域水资源仍将持续衰减,较当前情景继续衰减 $1 \times 10^9 \sim 2 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。

(二) 用水峰值研判与需求预测

用水自然发展峰值、水资源承载能力是影响区域用水总量的关键因素。根据本课题组研究成果[17],用水总量发展可表征为“经济社会规模增长正向驱动—用水效率水平提升逆向驱动—水资源

供给条件约束”的三元驱动机制，显现为受制于资源约束的适应性增长曲线；根据水资源约束程度不同，用水增长曲线分为3种：自然增长型（曲线ABDEF）、发展约束型（曲线ABDGH）、严重胁迫型（曲线ABIJ）（见图2）。

主要发达国家已经出现了用水峰值，参照其用水总量与经济社会的发展历程可以发现，自然发展用水峰值取决于经济社会发展因素，包括经济社会规模（人均GDP达到2万美元）、产业结构（第三产业比重达到60%）、社会结构（城镇化率超过70%）。按此标准，北京市已经达到用水峰值的经济社会条件，天津市接近此条件，河北省没有达到此条件。进一步预测京津冀地区用水需求，以2018年实际用水作为现状水平年需水基准，经济社会需水量将在2035年左右达到峰值，总量为 $2.57 \times 10^{10} \sim 2.75 \times 10^{10} \text{ m}^3$ ，2035年后基本维持该规模或略有下降。

（三）南水北调工程需调水量测算

南水北调工程调水是保障京津冀地区水安全的重要水源，合理的调水量是支撑区域未来健康发展的基础 [18]。“京津冀水资源安全保障技术研发集成与示范应用”项目系统分析了不同新增外调水规模下京津冀水系统安全保障状况 [16]。按现状评价的水资源量、中线一期工程和引黄水量，在保障经

济社会合理用水需求、最小化生态用水、平衡地下水采补等条件下，若不考虑新增外调水，2035年京津冀地区缺水量将达 $2.9 \times 10^9 \text{ m}^3$ ；当新增外调水量为 $2.9 \times 10^9 \text{ m}^3$ 时，仅能保障最低限度的生态用水和地下水采补平衡，超载的水生态系统难以得到修复；若新增外调水为 $5 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，在保障适宜生态用水的同时可满足地下水50年恢复要求，京津冀地区将不再缺水，生态系统可全面恢复。

由此可见，为保障京津冀地区未来经济社会正常发展及水系统安全，南水北调工程的基准调水量应配置为 $2.9 \times 10^9 \sim 5 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。考虑到流域水资源持续衰减，将进一步增大供水缺口约 $1 \times 10^9 \text{ m}^3$ ，故南水北调理想调水量应配置为 $3.9 \times 10^9 \sim 6 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。

（四）地下水健康修复量—位目标

在京津冀地区，实现地下水的采补平衡，是超采综合治理的阶段性目标；在采补平衡的基础上对地下水量进行回补，使地下水位恢复到能保持生态环境健康的水平，是超采综合治理的最终目标。本文据此提出“健康地下水位”概念，建议以此作为未来地下水修复的方案框架。健康地下水位指在保障区域生态健康的基础上，最大限度支撑经济社会发展的地下水位；根据地下水功能不同，可分为上限水位、下限水位两类：前者包括维持地表水体健

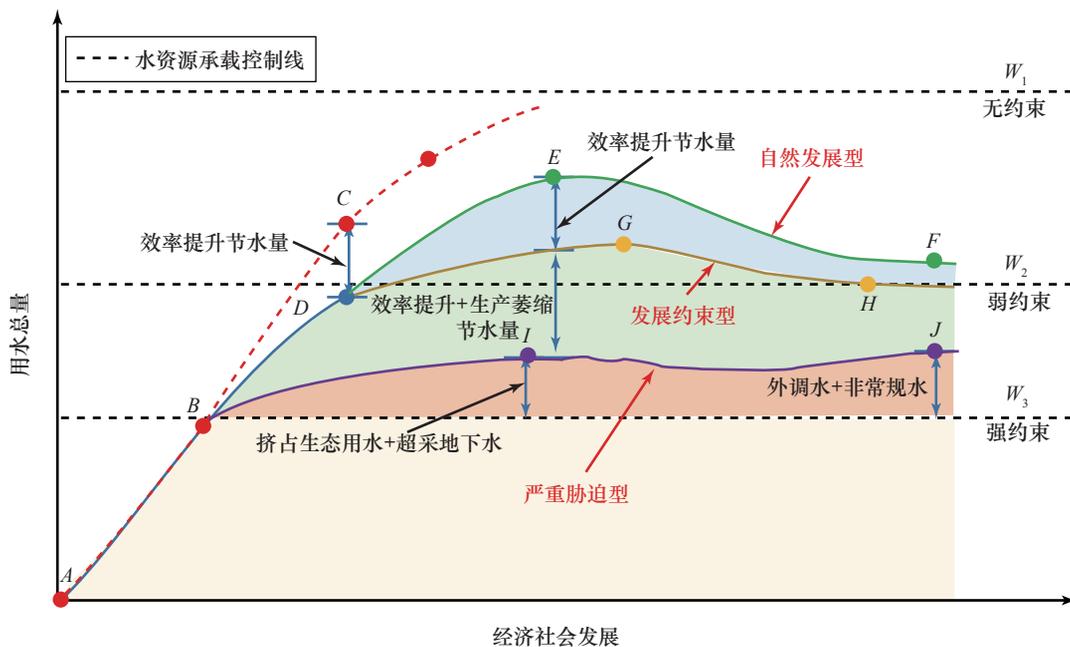


图2 受制于资源约束的适应性增长曲线

注： W_1 为无水资源约束情景的用水总量； W_2 为弱水资源约束情景的用水总量； W_3 为强水资源约束情景的用水总量。

康补给地下水位、遏制海水入侵地下水位、植被健康地下水位；后者包括控制盐渍化地下水位、城镇建筑物安全地下水位、地下含水层调蓄地下水位。

综合已有研究成果来看 [19~21]，有关京津冀地区的适宜地下水埋深（见图3），山前平原区为8~20 m，中部平原区为3~5 m，城市区为6~10 m，东部沿海区为2~3 m。除恢复地下水位外，超采的地下水量也应恢复。根据1959—2019年地下水位及地面沉降体积变化情况，基于地下水数值模拟获得初步结果：截至2019年，京津冀平原累计超采量为 $1.375 \times 10^{11} \text{ m}^3$ ，可恢复的地下水超采量为 $8.77 \times 10^{10} \text{ m}^3$ （浅层地下水占80%，深层地下水占20%，见图4）。

（五）河湖生态保护修复布局与路径

京津冀地区河湖萎缩、干涸问题严重，生态功能受损，河湖生态保护修复需要依靠流域水生态的整体性改善。本文在分析海河流域主要河湖特征及水生态问题的基础上，论证提出了河湖生态保护修复布局（见图5）。①在滦河区，开展上游水源涵养与生态屏障建设，增强生态补水能力，推动生态水量考核向生态流量转变，强化岸线治理。②在北四

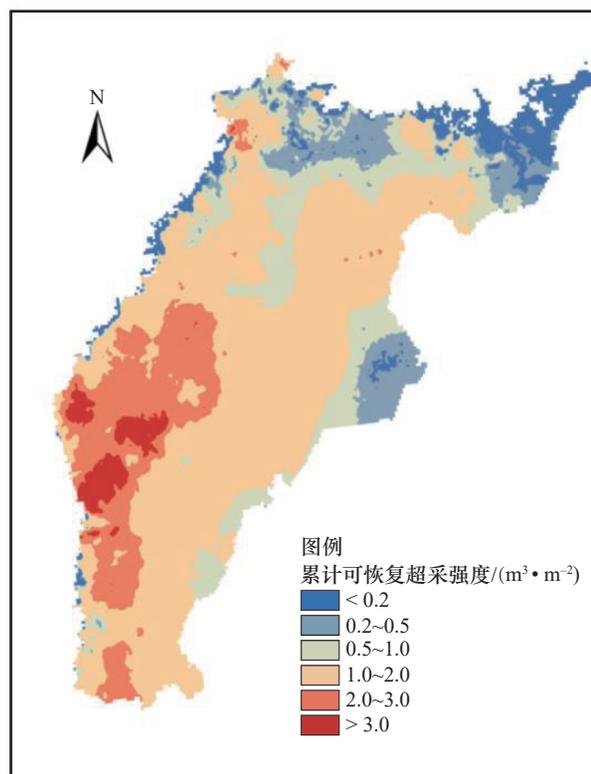


图4 京津冀平原可恢复地下水量分布

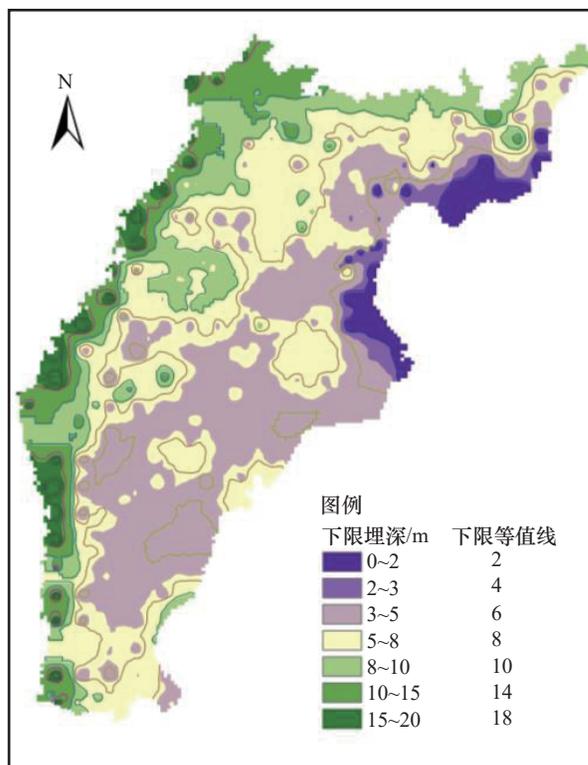


图3 京津冀平原下限地下水埋深分布



图5 海河流域水生态修复“五区三带”总体布局

河区，增强生态屏障建设，建立生态调度、生态用水保障机制，防控城市面源污染，实施清水退河战略。③在大清河区，通过多水源联合调配，增强上游水库生态补水能力，恢复白洋淀等区域生态水文节律，强化农业节水减排。④在子—漳卫河区，增强生态调度，恢复并保障重要湿地和廊道功能，强化农业节水减排。⑤在徒骇马颊河区，强化农业节水减排。⑥建设南水北调中线水源调配与生态补水带、南水北调东线—大运河水质保障与生态修复带、沿海滩涂湿地保护修复与功能提升带。

在时间维度，按照“三步走”战略实现京津冀地区河湖全面复苏：2020—2025年，遏制水域空间面积萎缩态势，恢复河湖水域面积，致力于重要河道全线通水；2026—2035年，河湖生态流量得到常态化保障，区域水环境生态整体达到“安全”水平；2036—2050年，区域水环境问题全面解决，水生态安全保障长效机制建成并高效运行。

五、京津冀地区水安全应对举措

（一）控总量、优结构、提效率，强化水资源节约集约利用

为了缓解京津冀地区内部节水不均衡、农业用水占比高、高用水行业占比大等问题，需要深度加强全流域、全行业水资源需求管理。

一是适水控制灌溉面积和城市规模两大总量。根据水资源承载能力，合理确定发展布局与规模，研究制定阶段承载上限。在地下水严重超采区，综合协调地下水压采、粮食安全等国家战略目标，严格控制灌溉面积、高耗水作物种植面积。在坝上区域，以建设首都水源涵养功能区、生态环境支撑区为目标，有序退减水浇地面积，压减地下水开采量。加强城镇绿化节水，科学实施山区植被修复，量水而行、适地适绿。

二是持续优化产业、种植、贸易、消费主要结构。严控水资源开发利用强度，合理确定经济布局，优化产业结构，从“重工业+生产性服务业”转向“高端制造+科技创新”。

三是实施生活、工业、农业全行业深度节水。在传统节水工作之外，深度挖掘各行业节水潜力并优化节水模式。例如，农业由高产灌溉模式转向高效率用水模式，工业以颠覆性节水技术研发与推广

应用为主来推动跨越式发展，生活从终端节水拓展到建筑系统节水。

四是加强再生水、海水等非常规水源利用。严格落实《关于推进污水资源化利用的指导意见》（2021年），科学设定区域污水资源化利用总体目标。及时制定沿海地区海水淡化产业发展专项规划，推进高耗水产业逐步向沿海布局，提升海水淡化供水保障水平，健全海水淡化产业相关的政策法规。

（二）以地下水系统健康为目标，加强“量—位—质”立体化修复

京津冀地区地下水长期累计超采量巨大，需要在现状地下水超采综合治理的基础上，以实现地下水系统健康为目标，加强地下水“量—位—质”立体化、持久化修复。

一是明确“健康地下水位”目标。京津冀区域是强人类活动地区，地下水位的恢复目标不仅需要考虑自然生态，也应考虑人类活动与社会发展需求，由此满足不同类型地下水服务功能，实现地下水良性健康发展。

二是防控地下水安全系统风险。沿海地区长期过度开采地下水，造成海水入侵内陆淡水，导致水质咸化；应严控开采地下水，防止海水入侵。地下水开采导致地面沉降具有极大的危害性，而从20世纪70年代开始，京津冀地区开采利用地下水规模逐步扩大；地面沉降问题越来越突出，已经开始影响建筑物安全（甚至压缩梳干含水层）。

三是建设地下水动态监测预警系统。未来京津冀地区降水量情况，将是影响地下水全面采补平衡目标的重要因素。构建地下水季尺度动态预测模型，实时评估地下水的水位现状及变化趋势；根据不同超采区地下水的预警等级及阈值，建立地下水动态监测预警系统。

四是完善机井管理，加强地下水储备。健全地下水井封管机制，实行地下水机井的动态跟踪、分类管理。实施地下水战略储备，如太行山前平原呈近南北向条带状分布并构成容量巨大的山前淡水含水系统，可作为水资源地下调蓄空间。

五是重视地下水治理的持久性。当前，通过短期内高投入所产生的治理效果已开始显现，但地下水与地表水相比响应速度慢、修复周期长（国际上

通常以 10 年为单位评估地下水治理效果)；应将地下水治理纳入国家层面的水利中长期发展规划，针对性、持续性保持资源投入。

(三) “本地-外调-再生” 三水互补，促进河湖湿地生态复苏

鉴于京津冀地区经济社会发展态势和水资源条件，唯有通过“本地水-外调水-再生水”三水互补，才能解决生态水量不足的问题。

一是实施山前水库生态基流保障行动。建立山前水库生态基流泄放设施与生态调度机制，保障生态基流。计及山前水库建设前后的天然及现状下泄流量，制定分区分类的生态基流目标。

二是实施京津冀地区生态水量提升行动。加强用水总量控制和水量分配，发挥水资源最大刚性约束作用。加强南水北调东线、中线的生态补水，切实提升区域生态水量、入海水量的保障程度。

三是实施城市用水清水退河与再生利用行动。城市退排水是区域平原区河湖的主要水源，实施清水退河与再生利用是解决平原区河湖水质不佳、生态水量不足的重要手段。完善废污水收集管网，提升废污水收集率及进场浓度；完善污水处理厂的基础能力及出水水质，逐步推行IV类、准IV类水排放标准。

四是实施河湖横向与立体连通性提升行动。京津冀地区位于“东亚-澳大利亚”候鸟重要迁徙路线上，候鸟栖息地、迁徙路径是区域水生态保护重点，这对区域河湖湿地的横向与立体连通性提出了较高要求。加大干支流河漫滩、洲滩、湖泊、库湾、岸线、河口滩涂等生物多样性保护与恢复力度，提升江河与附属湖泊、湿地之间横向连通性；加强湿地网络格局恢复工作，提升区域水域湿地面向候鸟栖息迁徙的立体连通性。

(四) 优化山区水保治理模式，防控山丘区径流进一步衰减

2000 年以来，海河流域山区水资源量剧烈衰减，严重威胁流域供水安全和生态安全，需防控山区径流性水资源进一步衰减。

一是转变山丘区治理模式。在山丘区国土绿化、水土保持、生态修复等工作中，以水定绿，量化水资源的植被承载力。对于植被覆盖度较高的区

域，不应大规模开展人工植树等水土保持措施，而宜坚持近自然修复；保护好现存的天然林，以天然更新、自然生态恢复作为植被建设的主要形式。

二是加强山丘区农业节水。合理规划山丘区农田灌溉面积，发展低耗水作物及种植模式，推广滴灌、微灌等高效节水灌溉生产方式，提高水资源利用率。持续实施退耕还林(草)工程，以自然植被恢复为主，避免过度建设蓄水池、集水窖、梯田、鱼鳞坑等拦蓄设施；在维持山区生态环境健康度的同时，保护有限的径流性水资源。

三是充分考虑水资源衰减对南水北调东线、中线后续工程需调水量规模的影响。当前，国家相关部门正在研究制定南水北调东线、中线的后续工程规划；应充分考虑京津冀地区水资源衰减因素的影响，研判南水北调东线、中线工程受水区的水资源供需平衡关系，科学明确需调水量的规模及总体布局，着眼长远来保障京津冀地区水资源安全。

(五) 以优化南水北调中线、东线后续工程为核心，完善水网格局

京津冀水网是典型的自然-人工复合水网，在天然水系的基础上优化调水工程等人工水网格局，对区域经济社会可持续发展、地下水压采、水生态功能提升具有重要意义。

一是优化南水北调东线后续工程规模与线路。东线工程建设通水以来，黄河以北增供水量消纳率的最高值不足 20%，资产闲置问题突出；可充分利用东线一期工程穿黄隧洞 100 m³/s 的供水能力，扩大京津冀地区供水量，缓解地下水超采问题。后续工程需要北调水量到北京市，构建首都双源保障的稳定格局；可比选论证经白洋淀进京方案(见图 6)，相应优势在于：①生态效益发挥更充分，串联白洋淀、衡水湖、永定河等重要河湖湿地，兼顾向滏阳河、大清河、永定河等平原河网水系的自然补水；②自流覆盖范围更广泛，与南水北调中线、引黄入冀补淀等工程的联动作用更强，有利于构建多元互补的京津冀水资源保障网；③调水水质目标保障对水环境治理刚性约束更强，经白洋淀进京线路更深入华北平原的腹地，有利于带动整个京津冀地区水生态环境治理；④对于北京市，无论是工程综合效益，还是供水可靠性、用水经济性，经白洋淀进京线路方案的比较优势更为明显、更有持续性；⑤对

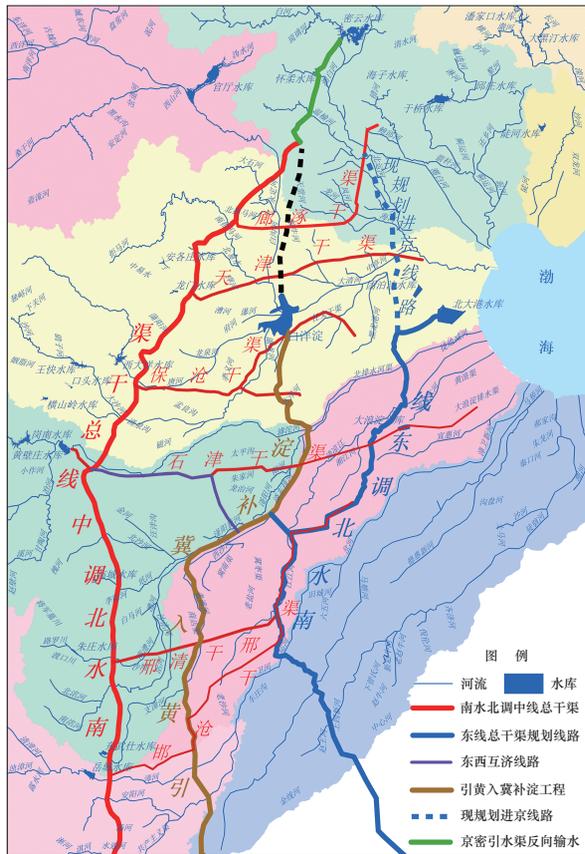


图6 南水北调东线后续工程线路

注：蓝虚线为东线现有规划线路；黑虚线为比选经白洋淀进京方案。

于河北雄安新区，经白洋淀调蓄调水，可为供水稳定、生态宜居的城区建设提供重要保障。

二是南水北调中线、东线工程效益可北延至滦河流域。无论是已经通水的南水北调东线、中线一期工程，还是后续工程的原有规划方案，受水区最北端只供水到北京市，受水范围并不包括滦河流域；但20世纪80年代初建设的引滦入津工程，为南水北调受水区与滦河流域建立了工程联系，如果能够整体优化南水北调工程受水区和非受水区的水量配置方案、完善滦河水系格局、共享南水北调工程红利，则不需要新增工程措施和资金投入，仅通过引滦水量分配方案的调整，即可将南水北调工程的战略效益向北延伸到滦河流域（惠及承德市、唐山市、秦皇岛市等地，受益人口超过1000万人），潜在经济社会和生态效益显著。具体实施需在南水北调中线、东线后续工程规划方案中，考虑滦河下游地区发展需求，进一步优化常态水量分配方案，保障滦河流域经济社会高质量发展。

三是南水北调中线、东线后续工程的京津冀供

水规模应考虑区域水资源衰减因素。南水北调中线、东线后续工程对京津冀地区发展具有重要作用，应清醒认识到区域水资源持续衰减的客观事实。以2035年京津冀需水达到峰值为保障目标，当南水北调中线、东线后续工程增调水量达到 $3.9 \times 10^9 \text{ m}^3$ 时，在保障正常发展用水需求的同时，可实现河湖最小生态需水和地下水采补平衡目标；当增调水量达到 $6 \times 10^9 \text{ m}^3$ 时，可实现河湖适宜生态需水和地下水采补平衡目标。

四是增强受水区水资源调蓄能力。南水北调工程通水以来，受水区对引江水的依赖程度越来越高；需要充分利用已有调蓄水库，适当兴建在线调蓄工程，增强受水区调蓄能力，切实保障供水安全。同步开展水库汛限水位、旱限水位的动态调控，建立相应的科学测算与决策体系，提升水库全水文周期管理（常态运行、抗旱应急运行、防洪应急运行）的综合效率与效益。

（六）统筹常态与应急，完善流域特大洪涝灾害防御短板

针对京津冀地区洪水预测预报难度大、水库防洪联合调度覆盖率低、蓄滞洪区工程建设滞后等薄弱环节，加强常态与应急统筹管理，完善洪涝灾害防御短板。

一是统筹常态与应急，做好常规应对措施。除了做好应急状态的紧急救灾，也应加强日常防范应对措施。① 开展重要河段的防洪工程建设，重点提高河北雄安新区周边新盖房分洪道、赵王新河的泄洪能力。② 建设“空天地一体化”洪水监测系统，通过高分辨率空间、航空遥感技术，地面水文监测技术的有机结合，实现对流域雨情、河湖水情、工程险情、洪涝灾情等的全方位、全过程、实时协同监测及处理。③ 确保蓄滞洪区的合理有效运用，根据地形地物变化，及时修订细化蓄滞洪区运用与抢险预案，确保洪水“分得进、蓄得住、退得出”。

二是做好“四预”建设，改善超标洪水应对措施。① 提高洪水预报精度水平，开展流域下垫面调查，修正现有预报模型参数并修订预报方案，利用实时监测数据实施滚动预报。② 拓展洪水灾害预警服务范围，拓展并深化现有洪水灾害预警信息服务；从行业内向与社会公众以及与洪水灾害相关联的交通、能源、供水、供电、通信等“生命线”系

统行业全面扩展,形成常态化的专业预警服务机制。③提高洪水灾害预演的智慧化水平,充分运用信息技术手段,结合雨水情预报,对水库、河道、蓄滞洪区的蓄泄情况进行模拟预演;实时动态更新洪水演进、防洪工程体系运行、淹没影响等信息,为工程调度提供决策支持。④动态修编洪水灾害防御预案,推行基于多情景、海量方案的预案编制方法,形成超标洪水预案实时修正与动态调整体系;充分利用洪水风险图成果,细化人员转移预案。

六、结语

水资源紧缺是京津冀地区突出的水安全保障问题,水资源衰减加剧了区域的用水竞争;未来随着北京城市副中心、雄安新区等重点区域建设带来的吸聚效应,预测经济社会用水需求仍将持续攀升。应对水资源供需矛盾,既要优化产业结构、提高用水效率,持续强化水资源需求管理,也要在确定南水北调中线、东线后续工程的京津冀供水规模时考虑区域水资源衰减因素。

河湖萎缩干涸、地下水长期超采是京津冀地区严重的生态问题。为实现重要河湖生态功能恢复、地下水位总体回升,研究提出了河湖生态保护修复布局与“健康地下水位”修复目标;根据区域水资源禀赋,建议实施“本地-外调-再生”三水互补、促进河湖湿地生态复苏、“量-位-质”立体化地下水修复等战略措施。

针对京津冀地区防洪体系短板突出、城市洪涝风险加剧问题,研究提出了常态与应急统筹管理策略。在常规应对措施方面,建议提高水文监测水平,对蓄滞洪区规模及布局进行优化调整;在超标洪水应对方面,综合运用数字流域、洪水风险数值模拟等先进技术手段,做好预警、预报、预演、预案。

解决京津冀地区水安全保障问题是支撑京津冀协同发展国家战略的必要环节,南水北调工程通水、区域地下水超采综合治理、河湖生态修复行动实施,为全面提升水安全保障带来契机。着眼中长期发展,在提升水安全保障水平的同时,后续应重点关注京津冀地区水资源持续衰减应对、水资源不足与粮食生产任务矛盾、地下水位回升带来的面源污染、河湖生态修复过度依赖外调水等问题。

利益冲突声明

本文作者在此声明彼此之间不存在任何利益冲突或财务冲突。

Received date: November 29, 2021; **Revised date:** December 30, 2021

Corresponding author: Wang Qingming is a professor-level senior engineer from the Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research. His major research field is hydrology and water resources. E-mail: wangqm@iwahr.com

Funding project: Chinese Academy of Engineering project “Challenges and Countermeasures for Water Security in Beijing – Tianjin – Hebei Region toward 2050” (2021-XY-06); National Science Fund for Distinguished Young Scholars (52025093)

参考文献

- [1] 鲍超,贺东梅.京津冀城市群水资源开发利用的时空特征与政策启示[J].地理科学进展,2017,36(1):58-67.
Bao C, He D M. Spatiotemporal characteristics of water resources exploitation and policy implications in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration [J]. Progress in Geography, 2017, 36(1): 58-67.
- [2] 王文生.提升水安全保障能力助力京津冀协同发展[N].中国水利报,2021-01-22(01).
Wang W S. Improving water security capacity will contribute to the coordinated development of the Beijing-Tianjin-Hebei Region [N]. China Water Resources News, 2021-01-22(01).
- [3] 曹寅白,韩瑞光.京津冀协同发展中的水安全保障[J].中国水利,2015(1):5-6.
Cao Y B, Han R G. Water security in Beijing-Tianjin-Hebei coordinated development [J]. China Water Resources, 2015 (1): 5-6.
- [4] 程晓陶.京津冀协同发展进程中水安全保障的压力与挑战[J].北京水务,2018(3):3-7.
Cheng X T. Pressure and challenge of water security in the process of Beijing-Tianjin-Hebei cooperative development [J]. Beijing Water, 2018 (3): 3-7.
- [5] 王浩,胡春宏,王建华,等.我国水安全战略和相关重大政策研究[M].北京:科学出版社,2019.
Wang H, Hu C H, Wang J H, et al. Water security strategy in China and related policy studies [M]. Beijing: Science Press, 2019.
- [6] 赵勇,翟家齐.京津冀水资源安全保障技术研发集成与示范应用[J].中国环境管理,2017,9(4):113-114.
Zhao Y, Zhai J Q. Beijing-Tianjin-Hebei water resources security technology R & D integration and demonstration application [J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2017, 9(4): 113-114.
- [7] 中华人民共和国水利部.中国水资源公报(2020年)[M].北京:中国水利水电出版社,2021.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. China water resources bulletin(2020) [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2021.
- [8] 宫辉力,李小娟,潘云,等.京津冀地下水消耗与区域地面沉降演化规律[J].中国科学基金,2017,31(1):72-77.
Gong H L, Li X J, Pan Y, et al. Groundwater depletion and regional land subsidence of the Beijing-Tianjin-Hebei Area [J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2017,

- 31(1): 72–77.
- [9] 张建云, 贺瑞敏, 齐晶, 等. 关于中国北方水资源问题的再认识 [J]. 水科学进展, 2013, 24(3): 303–310.
Zhang J Y, He R M, Qi J, et al. A new perspective on water issues in North China [J]. *Advances in Water Science*, 2013, 24(3): 303–310.
- [10] 于紫萍, 宋永会, 魏健, 等. 海河 70 年治理历程梳理分析 [J]. 环境科学研究, 2021, 34(6): 1347–1358.
Yu Z P, Song Y H, Wei J, et al. 70 years' governance process of Haihe River [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2021, 34(6): 1347–1358.
- [11] 京津冀协同发展领导小组. 京津冀协同发展规划纲要 [R]. 北京: 中央财经领导小组, 2015.
Leading Group for Coordinated Beijing–Tianjin–Hebei Development. Beijing–Tianjin–Hebei coordinated development planning outline [R]. Beijing: Central Finance and Economics Leading Group, 2015.
- [12] 张现苓, 翟振武, 陶涛. 中国人口负增长: 现状, 未来与特征 [J]. 人口研究, 2020, 44(3): 3–20.
Zhang X L, Zhai Z W, Tao T. Trends and patterns of negative population growth in China [J]. *Population Research*, 2020, 44(3): 3–20.
- [13] 杨舸. 我国“十四五”时期的人口变动及重大“转变” [J]. 北京工业大学学报(社会科学版), 2021, 21(1): 17–29.
Yang G. China's population changes and major transition during the 14th Five-Year Plan Period [J]. *Journal of Beijing University of Technology(Social Science Edition)*, 2021, 21(1): 17–29.
- [14] 曹广忠, 陈思创, 刘涛. 中国五大城市群人口流入的空间模式及变动趋势 [J]. 地理学报, 2021, 76(6): 1334–1349.
Cao G Z, Chen S C, Liu T. Changing spatial patterns of internal migration to five major urban agglomerations in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(6): 1334–1349.
- [15] 中华人民共和国水利部. 华北地区地下水超采综合治理行动方案 [R]. 北京: 中华人民共和国水利部, 2019.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Action plan for comprehensive treatment of groundwater over exploitation in North China [R]. Beijing: Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2019.
- [16] 赵勇. 京津冀水资源安全保障技术研发集成与示范应用 [R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2021.
Zhao Y. Beijing–Tianjin–Hebei water resources security technology R & D integration and demonstration application [R]. Beijing: China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2021.
- [17] 赵勇, 李海红, 刘寒青, 等. 增长的规律: 中国用水极值预测 [J]. 水利学报, 2021, 52(2): 129–141.
Zhao Y, Li H H, Liu H Q, et al. The law of growth: Prediction of peak water consumption in China [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2021, 52(2): 129–141.
- [18] 曹晓峰, 胡承志, 齐维晓, 等. 京津冀区域水资源及水环境调控与安全保障策略 [J]. 中国工程科学, 2019, 21(5): 130–136.
Cao X F, Hu C Z, Qi W X, et al. Strategies for water resources regulation and water environment protection in Beijing–Tianjin–Hebei Region [J]. *Strategic Study of CAE*, 2019, 21(5): 130–136.
- [19] 张长春, 邵景力, 李慈君, 等. 华北平原地下水生态环境水位研究 [J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2003, 33(3): 323–326.
Zang C C, Shao J L, Li C J, et al. A study on the ecological groundwater table in the North China Plain [J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Edition)*, 2003, 33(3): 323–326.
- [20] 李和平, 史海滨, 苗澍, 等. 生态地下水研究进展和管理阈值指标体系框架 [J]. 中国农村水利水电, 2008 (11): 8–11.
Li H P, Shi H B, Miao S, et al. Research on threshold index system and investigative survey ecological groundwater management [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2008 (11): 8–11.
- [21] 盖美, 耿雅冬, 张鑫. 海河流域地下水生态水位研究 [J]. 地域研究与开发, 2005, 24(1): 119–124.
Gai M, Geng Y D, Zhang X. Research on groundwater ecology water level of Haihe River Basin [J]. *Regional Research and Development*, 2005, 24(1): 119–124.