

doi: 10.12029/gc20220615001

孟瑞芳, 杨会峰, 包锡麟, 徐步云, 李磊, 李谨丞. 2024. 京津冀平原非常规水资源利用前景分析及其生态环境效应[J]. 中国地质, 51(1): 221–233.
Meng Ruifang, Yang Huifeng, Bao Xilin, Xu Buyun, Li Lei, Li Jincheng. 2024. Prospect analysis of unconventional water resources utilization and eco-environmental effects in Beijing–Tianjin–Hebei Plain[J]. Geology in China, 51(1): 221–233(in Chinese with English abstract).

京津冀平原非常规水资源利用前景分析及其生态环境效应

孟瑞芳^{1,2}, 杨会峰^{1,2}, 包锡麟^{1,2}, 徐步云¹, 李磊³, 李谨丞⁴

(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 石家庄 050061; 3. 河北省地矿局第九地质大队, 河北 邢台 054000; 4. 水发规划设计有限公司, 山东 济南 250100)

摘要:【研究目的】京津冀平原水资源严重短缺, 供需矛盾十分突出, 加大非常规水资源利用力度, 形成多元供水格局, 可有效缓解水资源供需矛盾, 对支撑京津冀协同发展区社会经济协调发展和推动生态文明建设具有重要意义。【研究方法】文章系统开展非常规水资源供水方向、开发利用模式和供水规模分类数据统计, 依据各省(直辖市)非常规水资源供水规划及配置目标, 分析其开发利用前景及其生态环境效应。【研究结果】该区非常规水资源主要包括微咸水、再生水、淡化海水、雨洪水, 其中微咸水主要分布于中东部平原的天津、沧州、衡水等地, 供水前景为 $5.43 \times 10^8 \text{ m}^3$; 再生水利用以北京、天津等大中型及工业城市为主, 供水前景为 $34.22 \times 10^8 \text{ m}^3$; 淡化海水利用以天津等滨海城市为主, 供水前景为 $4.19 \times 10^8 \text{ m}^3$; 雨洪水利用较分散。【结论】(1)微咸水用于农业灌溉存在土壤盐渍化风险, 需加强水盐调控。(2)再生水用于河流生态补水, 沿线地表水富营养化, 地下水体未受到明显污染; 地下水浅埋区开展再生水灌溉, 会增加硝酸盐污染风险; 建议将高风险的新兴污染物纳入再生水利用监控体系。(3)海水淡化尾液浓盐水、冷却热水可能改变天然海洋生态系统的分布、构成与多样性, 应予以关注。(4)雨洪水利用可降低污水入河的水质风险, 但过度利用可能影响区域生态系统的稳定性, 建议城市区适度扩大利用。

关键词:非常规水资源; 微咸水; 再生水; 海水淡化; 雨洪水; 开发利用模式; 供水规模; 生态环境效应; 水文地质调查工程; 京津冀平原

创新点:(1)系统开展京津冀平原非常规水资源供水方向、开发利用模式和供水规模数据分析, 评估了其供水前景;(2)针对当前非常规水资源开发利用中存在的问题, 提出了开发利用建议。

中图分类号: X171.1; TV213.9 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2024)01-0221-13

Prospect analysis of unconventional water resources utilization and eco-environmental effects in Beijing–Tianjin–Hebei Plain

MENG Ruifang^{1,2}, YANG Huifeng^{1,2}, BAO Xilin^{1,2}, XU Buyun¹, LI Lei³, LI Jincheng⁴

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, Hebei, China; 2. National Field Scientific Observation and Research Station on Groundwater and Ground Subsidence in the Plain Area of

收稿日期: 2022-06-15; 改回日期: 2023-04-17

基金项目: 国家自然科学基金地质联合基金(U2244214)、中国地质调查局项目(DD20190336, DD20221752)、中国地质科学院基本科研业务费项目(SK202118、SK202216)及河北省创新能力提升计划高水平人才团队建设专项(225A4204D)联合资助。

作者简介: 孟瑞芳, 男, 1988年生, 硕士, 副研究员, 主要从事水文地质与水资源研究工作; E-mail: mengruifang@mail.cgs.gov.cn。

通讯作者: 杨会峰, 男, 1977年生, 博士, 研究员, 主要从事水文地质与水资源研究工作; E-mail: yanghuifeng@mail.cgs.gov.cn。

Cangzhou, Shijiazhuang 050061, Hebei, China; 3. No.9 Geological Brigade, Hebei Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development, Xingtai 054000, Hebei, China; 4. Water Development Planning and Design Co., LTD, Jinan 250100, Shandong, China)

Abstract: This paper is the result of hydrogeological survey engineering.

[Objective] The Beijing–Tianjin–Hebei Plain faces a serious shortage of water resources, and the contradiction between supply and demand is very prominent. Increasing the use of unconventional water resources and forming a diversified water supply pattern is of great significance to effectively alleviate the contradiction between supply and demand and support the socio-economic development and ecological civilization construction of the Beijing Tianjin Hebei Urban Agglomeration. **[Methods]** This paper systematically carries out classified data statistics on supply directions, development and utilization models, and water supply scale of unconventional water resources. We analyze their development and utilization prospects and ecological environment effects according to the planning and allocation objectives of unconventional water resources in Beijing–Tianjin–Hebei Plain. **[Results]** Unconventional water resources in the area include brackish water, recycled water, desalinated seawater, rain water. The brackish water is mainly distributed in Tianjin, Cangzhou, Hengshui in the central and eastern plains, with a water supply prospect of 5.43×10^8 m³; Recycled water is mainly used in large industrial cities such as Beijing and Tianjin, with a water supply prospect of 34.22×10^8 m³; Desalinated seawater is mainly used in Tianjin and other coastal cities, with a water supply prospect of 4.19×10^8 m³; The use of rainwater is relatively scattered. **[Conclusions]** (1) There is a risk of soil salinization when brackish water is used for agricultural irrigation, and water and salt regulation should be strengthened. (2) The recycled water is used for ecological replenishment of rivers, the surface water is eutrophic and the groundwater is not obviously polluted; Irrigation with recycled water in shallow groundwater buried areas will increase the risk of nitrate pollution; It is suggested that high-risk emerging pollutants be included in the monitoring system of recycled water use. (3) The concentrated brine and cooling hot water from the tail liquor of seawater desalination may change the distribution, composition and diversity of natural marine ecosystems, which should be paid attention to. (4) The use of rainwater can reduce the water quality risk of sewage entering the river, but excessive use may affect the stability of the regional ecosystem. It is recommended that urban areas appropriately expand the use.

Key words: unconventional water resources; brackish water; recycled water; seawater desalination; rain water; development and utilization mode; water supply scale; eco-environmental effect; hydrogeological survey engineering; Beijing–Tianjin–Hebei Plain

Highlights: (1) We carry out systematic analysis on supply directions, development and utilization models, and water supply scale of unconventional water resources in the Beijing–Tianjin–Hebei Plain, and evaluate their water supply prospects; (2) In view of the problems existing in the development and utilization of unconventional water resources, the development and utilization suggestions are put forward.

About the first author: MENG Ruifang, male, born in 1988, master, associate researcher, mainly engaged in hydrogeology and water resources research; E-mail: mengruifang@mail.cgs.gov.cn.

About the corresponding author: YANG Huifeng, male, born in 1977, Ph.D., researcher, mainly engaged in hydrogeology and water resources research; E-mail: yanghuifeng@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported by Geological Joint Fund of the National Natural Science Foundation of China (No.U2244214), the projects of China Geological Survey (No.DD20190336, No.DD20221752), basic scientific research project of Chinese Academy of Geological Sciences (No.SK202118, No.SK202216) and Hebei Province Innovation Capability Enhancement Plan High Level Talent Team Construction Project (No.225A4204D).

1 引 言

京津冀平原是中国的政治、文化中心,同时也是中国粮食主产区,长期以来水资源供需矛盾十分突出(杨会峰等, 2021a)。自 20 世纪 70 年代以来,

平原区地下水开采强度不断增大,超采问题日益凸显,引发了地下水位降落漏斗、地面沉降等一系列环境地质问题(刘春燕等, 2023)。为缓解水资源供需紧张局面,2014 年以来,南水北调中线工程向京津冀平原区内供水,并开展地下水超采综合治理行

动, 水资源供需紧张局面有所缓解, 但年均地下水超采量仍高达 $24.73 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。常规水资源支撑社会经济发展的同时, 保障生态环境健康发展难以为继, 亟需拓宽非常规供水水源, 保障京津冀城市群供水安全和粮食产量。

国内外学者对非常规水资源利用开展了大量研究工作。研究 (Stephen et al., 2004; Qadir et al., 2007; Hussain et al., 2019) 表明随着人口未来增长趋势, 缺水国家将不得不更多地依赖非常规水资源的使用, 包括微咸水、淡化海水、雨洪水、工业废水、家庭废水等用于农业灌溉, 并加以推广, 以保障国家粮食安全。Lian et al. (2018) 认为雨水利用有助于减少受纳水体中的污染和侵蚀问题, 但需要评估与雨水质量相关的人类健康问题, 城市雨水中大肠杆菌处于中等以上水平, 利用时必须采取补救措施。Salgot and Tapias (2004) 认为必须考虑对常规水和非常规水资源进行联合管理, 以应对沿海缺水地区, 人口密度高、经济活动和旅游业密集引发的季节性用水需求过高问题, 非常规水可用于浇灌草坪、洗车、冲洗厕所和冷却系统等。为应对未来灌溉农业的挑战, Hamdy (2002) 和 Beithou (2015) 总结了非常规水资源进行灌溉的最新技术、管理和实用方法, 强调促进使用劣质水用于农业灌溉、工业的策略, 同时尽量减少对土壤生产力、作物生产和环境影响等不利因素。Kelly et al. (2019) 回顾了世界各地再生水利用因公众反对而失败的例子, 以及通过让公众获取再生水利用的测试报告和数据, 提高公众接受度的方法。陈卫平 (2011) 总结了美国加州再生水利用具有详细的规划、系统地法律法规和完备的管理体系与灌溉终端用户管理经验。科学的再生水利用规划、严格的水质控制方案、简单易操作的再生水水质标准、明确的管理体系以及完备的风险控制体系是加州再生水成功利用的关键环节。基于对加州再生水利用经验的分析, 提出了推动中国再生水利用发展建议。倪欣业等 (2022) 系统调研总结了目前中国与再生水、雨水和淡化海水三大类主要非常规水资源相关的标准规范, 形成了包含规划建设、运行维护和水质及检测等利用全流程中的各项环节的标准规范体系, 提出了推动非常规水利用规划指南编制、完善运行维护规范导则和加快制修订相关水质标准等建议。马涛等 (2020a) 将

非常规水资源定义为因水质等不能直接利用但经处理后可开发利用, 或不易开发利用但通过一定的技术手段可开发利用的水, 总结了我国非常规水资源的现状开发利用量和开发利用模式, 分析非常规水资源开发利用中存在的主要问题, 并针对性地提出对策建议。崔丙健等 (2019) 概述了国内外非常规水资源在农业中的利用与研究现状, 总结了非常规水资源农业回用的生态风险和相关标准规范, 并对非常规水资源农业利用的安全性和可持续性提出相关建议。

京津冀平原非常规水资源主要包括微咸水、再生水、淡化利用的海水、集蓄利用的雨洪水等, 本文系统开展非常规水资源供水方向、开发利用模式和供水规模分类数据统计, 依据各级行政区非常规水资源供水规划及配置目标, 分析其开发利用前景及其生态环境效应。适度提高非常规水资源开发利用程度, 可拓宽京津冀平原供水渠道, 缓解水资源供需矛盾, 对该区地下水超采治理、生态环境保护与修复具有重要支撑作用。

2 研究区概况

京津冀平原位于 $35^\circ \sim 43^\circ \text{N}$, $112^\circ \sim 120^\circ \text{E}$, 面积 $9.38 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。其北靠燕山山脉, 南接鲁北、豫北平原, 西倚太行山脉, 东临渤海湾, 地势西南部较高, 东部稍低, 地形较为平坦。该地区地处半干旱、半湿润大陆性季风气候区 (杨会峰等, 2021a), 水系由滦河、蓟运潮白河、永定河、大清河、子牙河、漳河等组成 (图 1)。

京津冀平原以松散岩类孔隙水为主, 自上而下分为 4 个含水层组 (杨会峰等, 2021b)。第 I 含水层组底界埋深一般小于 50 m, 地下水循环更新较快。第 II 含水层组底界埋深 120~210 m, 属于微承压、半承压地下水, 地下水循环更新较快, 是山前平原农业用水主要地下水开采层。第 III 含水层组底界埋深 250~310 m, 属于承压含水层, 地下水循环缓慢, 是中东部平原农业用水主要地下水开采层。第 IV 含水层组底界埋深 350~550 m, 地下水循环十分缓慢, 仅在滨海平原局部开采该层位。京津冀平原浅层地下水在山前平原主要赋存于第 I、II 含水层组, 在中东部平原主要赋存于第 I 含水层组, 该区微咸水、咸水广泛分布; 深层地下水在山前平原主

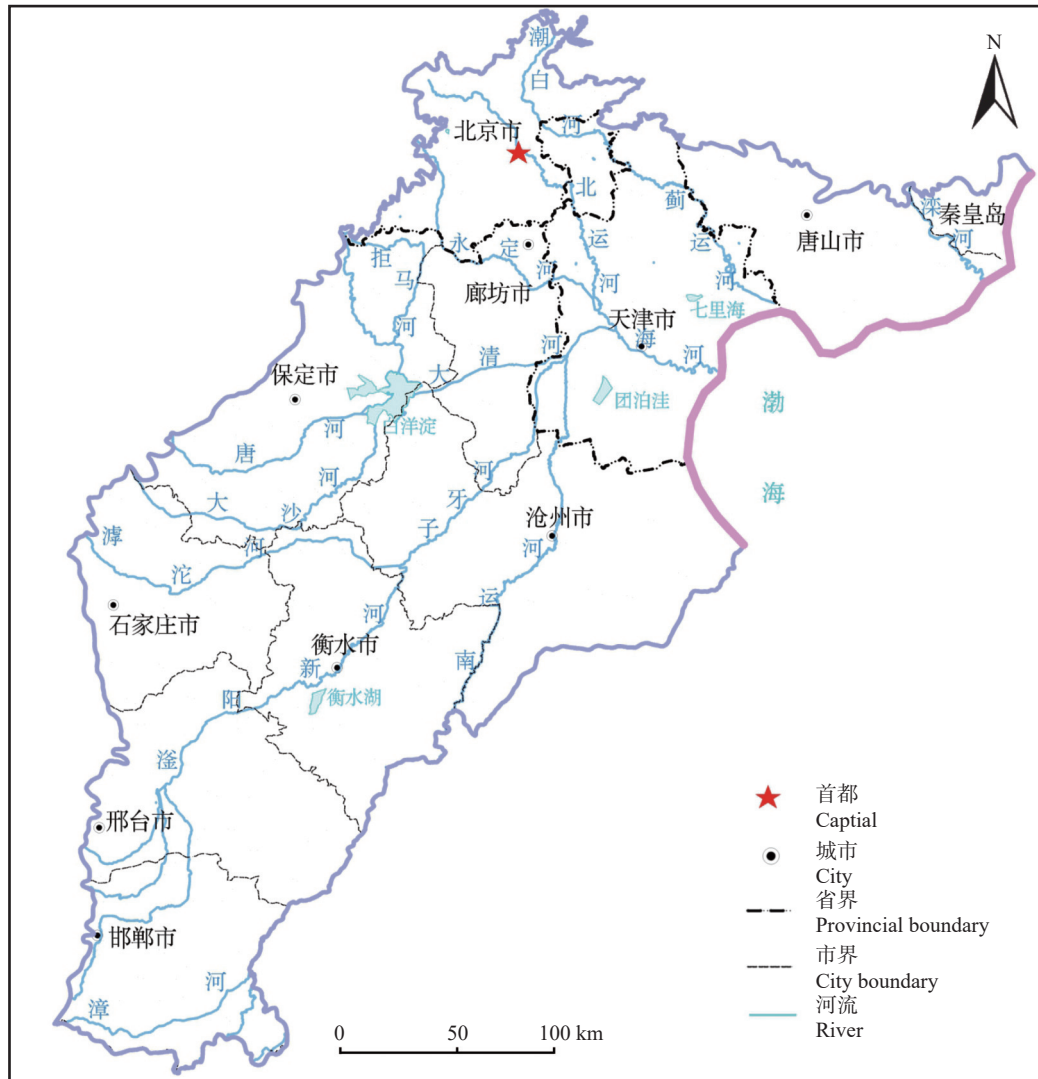


图1 京津冀平原地理位置图

Fig.1 Geographical location of Beijing Tianjin Hebei Plain

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(图2)(张兆吉等,2009)。

3 非常规水资源开发利用进展

2012年,《国务院关于实行最严格水资源管理制度的意见》明确提出将非常规水资源开发利用纳入水资源统一配置。2017年8月,水利部印发《关于非常规水源纳入水资源统一配置的指导意见》,要求大力推进非常规水源开发利用,缓解水资源供需矛盾,将再生水、集蓄雨水、微咸水、淡化海水等非常规水资源纳入水资源统一配置。2019年4月,国家发改委、水利部联合印发《国家节水行动方案》,进一步提出到2022年非常规水利用占比进一

步增大,在缺水地区形成非常规水多元、梯级和安全利用格局,缺水城市非常规水资源利用占比平均提高2个百分点。中国2000年非常规水资源开发利用量 $21.1 \times 10^8 \text{ m}^3$,2010年增加至 $33.1 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2012年实行最严格水资源管理制度实施以来,非常规水资源开发利用量增速加快,据全国水资源公报数据,2020年全国非常规水资源开发利用量增加至 $120.4 \times 10^8 \text{ m}^3$,占总供水量2.07%,其中微咸水、再生水、集雨工程利用量分别为 $3.57 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $108.89 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $7.94 \times 10^8 \text{ m}^3$,分别占非常规水资源开发利用量2.97%、90.44%、6.59%,淡化海水受价格影响利用规模相对较小。

为深入贯彻实施《国家节水行动方案》,2020年

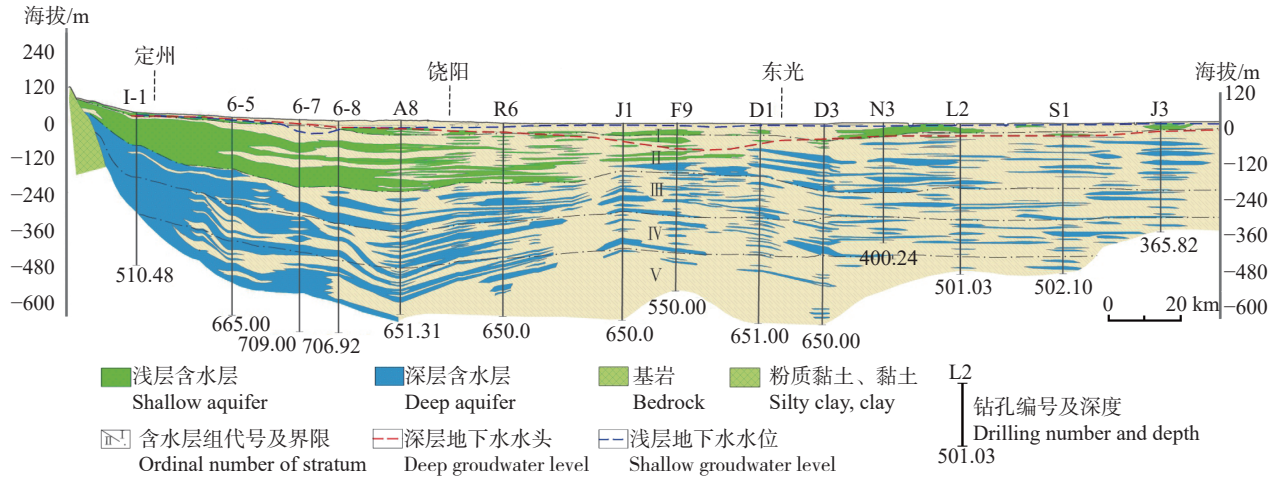


图 2 京津冀平原水文地质剖面图(据张兆吉等, 2009)
Fig.2 Hydrogeological profile of the Beijing-Tianjin-Hebei Plain (after Zhang Zhaoji et al., 2009)

北京市率先印发《北京市节水行动实施方案》，2022 年天津市、河北省先后出台《天津市深化节水型社会建设提升水资源集约节约利用水平实施方案》、《河北省 2022 年全社会节约用水工作要点》，各地政府要求推动非常规水纳入水资源统一配置，加大再生水、微咸水、淡化海水、雨洪水等非常规水资源利用力度，逐年提高其用水比重，并加强非常规水资源利用技术的研发与推广。其中《北京市节水行动实施方案》，要求园林绿化、洗车等行业，优先利用再生水、雨水等非常规水源；住宅小区、单位内部景观环境用水和其他市政杂用水，全部置换为再生水或雨洪水。《天津市深化节水型社会建设提升水资源集约节约利用水平实施方案》，要求火力发电、钢铁、纺织、造纸、石化和化工等高耗水新建、改建、扩建项目应使用再生水、淡化海水等非常规水源；提高深处理再生水利用规模，重点用于工业及市政杂用。《河北省 2022 年全社会节约用水工作要点》，要求各级政府严格落实非常规水源用水指标；沿海地区高耗水行业和工业园区优先利用海水。

3.1 微咸水开发利用进展

中国从 20 世纪 60—70 年代开始微咸水利用方面的研究。天津、河北中东部平原浅层地下水广泛分布微咸水、半咸水资源，该地区水资源供需矛盾尤为突出，加大微咸水、半咸水资源可较大程度缓解供水紧张局面。河北省沧州地区 1976 年开始利用矿化度 2~5 g/L 的微咸水、半咸水灌溉小麦(姚素梅和吴大付, 2008); 河北省水利科学研究所 1980—

1989 年在沧州市南皮试验区，利用浅层微咸水和咸水灌溉，实行旱涝碱咸综合治理，实现了黑龙港运东地区浅层地下咸水、微咸水的改造利用，为农业发展增辟了水源(张俊杰, 2011)。

经评价，天津平原、河北平原微咸水、半咸水开采资源量为 $10.86 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ，其中微咸水 $6.28 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ，半咸水 $4.58 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ ，主要分布在中东部平原的天津、沧州、衡水、唐山南部、邢台及邯郸东部地区(图 3, 表 1)。目前京津冀平原微咸水开发利用主要集中在河北平原，2014 年以来微咸水利用量呈震荡下降趋势，至 2020 年利用量仅为 $0.55 \times 10^8 \text{ m}^3$ ，开发利用程度仅为 5.06%。

3.2 再生水开发利用进展

20 世纪 80 年代以来，北京、天津等缺水大城市相继开展了污水回用、再生水资源化利用。天津市纪庄子污水处理厂 1986 年投产，开创了中国城市市政污水规模化集中处理的先河，随后经改造升级开展再生水处理。21 世纪以来，《城市污水再生利用地下水回灌水质》(GB/T 19772-2005)、《城市污水再生利用工业用水水质》(GB/T 19923-2005)、《城市污水再生利用农田灌溉用水水质》(GB 20922-2007)等国家标准相继出台，极大地促进了我国污水资源化利用的发展(马涛等, 2020b)。为实现污水的资源化利用，北京高碑店污水处理厂经改造升级为再生水处理厂，处理规模 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ (冯凯, 2012)。

再生水为京津冀平原主要非常规水资源利用类型，2014—2020 年再生水利用量年均增长率

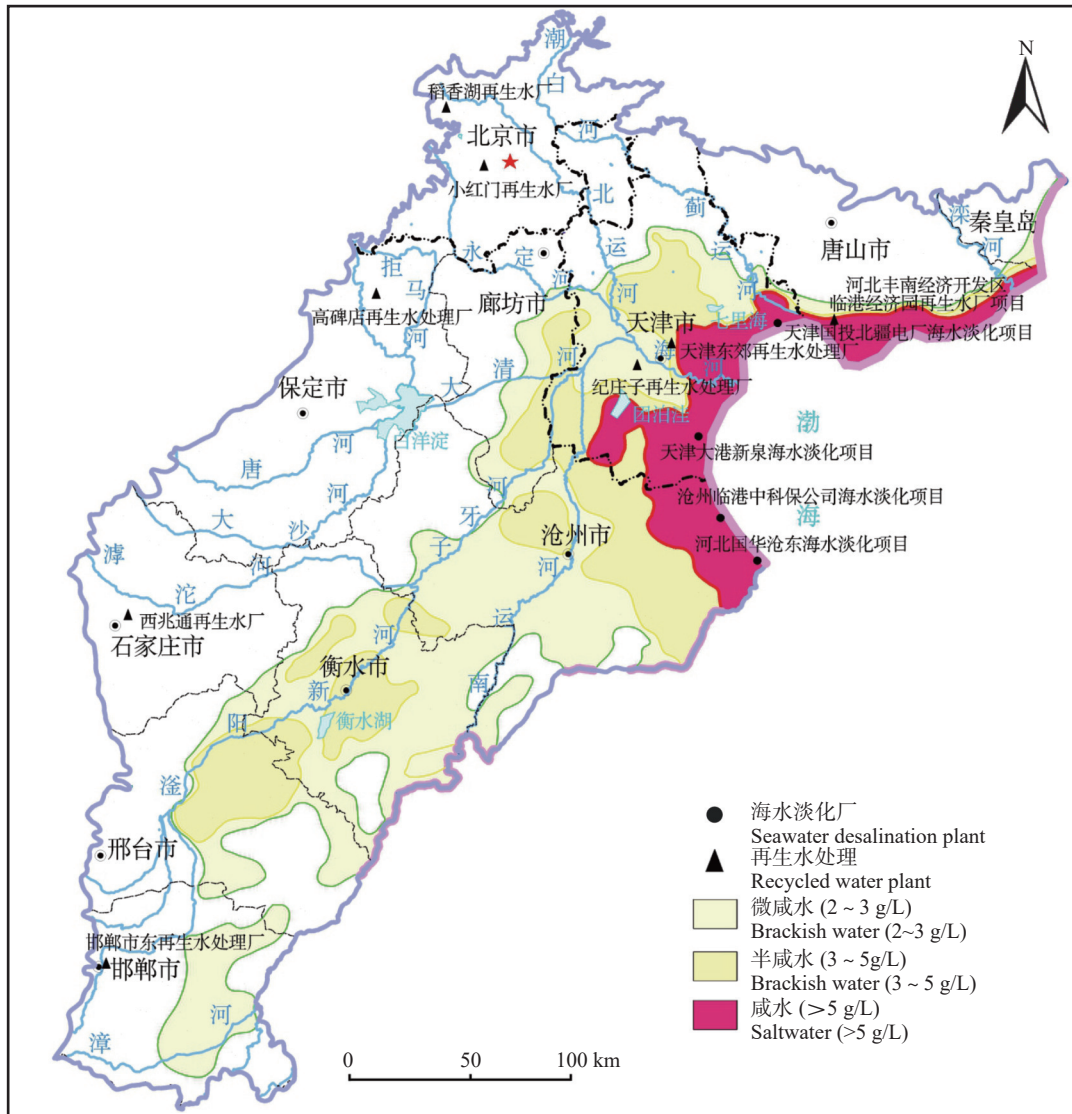


图3 京津冀平原非常规水资源分布
Fig.3 Distribution of unconventional water resources in Beijing-Tianjin-Hebei Plain

表1 京津冀平原微咸水、半咸水可开采资源量 (10⁸ m³/a)

Table 1 Exploitable resources of brackish water in Beijing-Tianjin-Hebei Plain (10⁸ m³/a)

行政区	微咸水(2~3g/L)	半咸水(3~5g/L)	合计
天津平原	0.75	1.41	2.16
石家庄市	0.20	/	0.20
唐山市	0.85	0.62	1.47
秦皇岛	0.14	0.01	0.15
邯郸市	0.48	/	0.48
河北平原	1.07	0.7	1.77
沧州市	1.18	1.27	2.45
廊坊市	0.06	0.01	0.07
衡水市	1.55	0.56	2.11
合计	5.53	3.17	8.70
京津冀平原	6.28	4.58	10.86

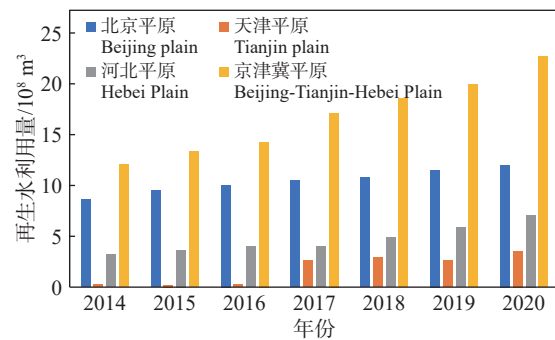


图4 京津冀平原再生水利用状况
Fig.4 Utilization of recycled water in Beijing-Tianjin-Hebei Plain

11.04%, 2020 年利用量达 $22.65 \times 10^8 \text{ m}^3$ (图 4), 占非常规水资源利用量的 94.27%。其中北京平原、天津平原、河北平原 2020 年再生水开发利用量分别占京津冀平原 53.06%、15.66%、31.28%。

3.3 淡化海水开发利用进展

随着沿海地区缺水形势不断加剧, 一些沿海城市开始尝试将海水淡化纳入水资源配置体系, 积极推进淡化海水的推广与应用。为引导海水利用快速健康发展, 2005 年国家颁布了全国第一部《海水利用专项规划》, 2006 年出台了《海水利用标准发展计划》, 随后京津冀海水淡化规模逐渐扩大(张金顺, 2008)。天津、河北沧州、唐山、秦皇岛沿海缺水城市先行试点, 2009 年天津国投北疆电厂海水淡化项目投产, 海水淡化能力为 $20 \times 10^4 \text{ t/d}$, 是目前我国最大规模的海水淡化工程, 开创了我国海水淡化向城市规模化供水的先例(刘淑静等, 2018); 同年建成天津大港新泉海水淡化有限公司海水淡化项目, 淡化海水为沿海城市水资源配置提供了新的水源。

海水淡化受价格较高影响, 增长较为缓慢, 至 2020 年利用量仅为 $0.82 \times 10^8 \text{ m}^3$ (图 5), 占京津冀平原非常规水资源利用量 3.43%。天津平原海水淡化利用量增速缓慢, 2020 年利用量 $0.42 \times 10^8 \text{ m}^3$; 河北平原海水淡化利用量增速较快, 2020 年利用量 $0.40 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

3.4 雨洪水开发利用进展

我国集蓄雨水利用研究始于 20 世纪 90 年代, 1996 年在兰州召开了第一届全国雨水利用学术研讨会, 2000 年北京正式启动“城市雨洪控制与利用”工程。2001 年水利部颁发了《雨水集蓄利用工程技术

技术规范》, 标志这项技术的初步成熟(高传昌和刘兴, 2007)。京津冀平原城市以建筑集雨、农村以坑塘集蓄利用雨洪水为主, 利用相对较分散。京津冀城市雨水利用方面, 北京市海淀区双紫园小区、天津市梅江居民区建成集雨利用示范工程(高传昌和刘兴, 2007; 刘杰等, 2011); 河北平原农村地区广泛利用集蓄雨水, 就近发展养殖或进行农业灌溉。

4 非常规水资源供水方向及开发利用模式

微咸水、再生水、淡化海水、雨洪水等非常规水资源, 因其空间分布、水质特征、开发利用条件、政策及价格因素等差异, 具有不同供水方向及开发利用模式。

4.1 微咸水供水方向及开发利用模式

目前京津冀平原微咸水主要用于农业灌溉, 2~3 g/L 微咸水、3~5 g/L 半咸水灌溉统称为微咸水灌溉(高传昌和刘兴, 2007; 刘静和高占义, 2012; 蔡达伟等, 2020), 主要包括 3 种: 微咸水直接灌溉、咸淡水混灌和咸淡水轮灌(姚素梅和吴大付, 2008; 崔丙建等, 2019)。

(1) 微咸水直接灌溉。20 世纪 70 年代, 河北省沧州市最早利用矿化度小于 5 g/L 的地下水直接用于农业灌溉。研究表明华北平原冬小麦、棉花和玉米的耐盐度阈值分别为 3~4 g/L、1~5 g/L 和 3~4 g/L (王辉, 2016)。(2) 咸淡水混灌, 是指浅层微咸水、半咸水, 与地表河水、渠水、引黄水、深层地下水等淡水混合, 将矿化度降至 2 g/L 以下, 用于农业灌溉(龙秋波等, 2010)。主要适用于中东部平原河流两侧、地表水灌区, 或开采深层地下水的农业区。咸淡水混灌可增加农业灌溉用水总量, 缓解农业用水紧张局面。(3) 咸淡水轮灌, 是在作物不同生长期利用微咸水和淡水轮流灌溉, 在作物耐盐生长阶段利用微咸水灌溉, 非耐盐阶段(如苗期阶段)用淡水灌溉(姚素梅和吴大付, 2008; 马中昇等, 2019)。

4.2 再生水供水方向及开发利用模式

京津冀平原再生水供水方向主要包括生态环境用水(主要为河湖补水)、工业冷却水、城市杂用、农业灌溉。但由于城镇污水含威胁人体健康的有毒有害物质, 从而限制了再生水用于农田灌溉的发展(穆莹和王金丽, 2020)。2006 年北京再生水利

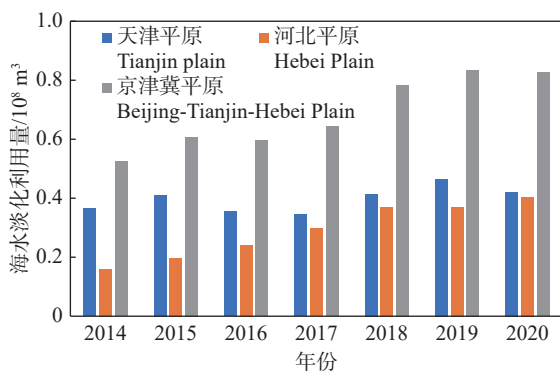


图 5 京津冀平原海水淡化利用状况
Fig.5 Utilization of desalinated seawater in Beijing-Tianjin-Hebei Plain

用量 $3.6 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中农业灌溉用水 $1.99 \times 10^8 \text{ m}^3$, 工业冷却水 $0.9 \times 10^8 \text{ m}^3$, 景观用水 $0.57 \times 10^8 \text{ m}^3$, 第三产业用水 $0.15 \times 10^8 \text{ m}^3$ (何江涛和沈照理, 2010), 北京市探索利用再生水开展温榆河地下水回补(何江涛和沈照理, 2010; 陈坚等, 2016)。天津东郊污水处理厂再生水主要用于河湖湿地生态景观用水、城市杂用等。河北省高碑店污水处理厂再生水主要用于景观河湖补水, 部分用于工业循环冷却水、再生水地下水回灌等(冯凯, 2012; 陈坚等, 2016)。

京津冀平原再生水利用模式主要为集中供水, 通过再生水管网对河湖湿地、大型工业等进行供水; 部分再生水通过分散供水方式对市政单位、企业、社区进行供水(马涛等, 2020a)。

4.3 淡化海水供水方向及开发利用模式

京津冀平原淡化海水供水以天津平原为主, 已建海水淡化工程主要分布在滨海新区、汉沽区、大港区和开发区, 淡化海水以满足工业用水为主, 兼作市政供水的补充水源(李磊和刘淑静, 2015)。

工业用水为“点对点”供水模式, 主要为电力、钢铁、石化等高耗水行业提供锅炉用水以及满足高纯水用户用水需求; 市政供水模式, 为淡化海水进入市政管网, 由水务公司或自来水公司统一调配, 与自来水混合后供沿海居民饮用, 供水稳定性较好(李磊和刘淑静, 2015; 马涛等, 2020a)。北疆电厂淡化海水主要用于电厂自用水、汉沽市政供水和中心生态城供水等, 但由于能耗、价格过高, 大部分产能处于闲置状态(刘淑静等, 2018)。

4.4 雨洪水供水方向及开发利用模式

雨洪水利用是指通过一定的工程措施将雨水汇集蓄存加以利用。京津冀平原集蓄雨洪水, 在农村主要用于农业、养殖用水, 在城市主要用于生态

环境用水、杂用水, 包括园林井灌绿化、道路喷洒、消防、洗车、冲厕等(张岳, 2013; 马涛等, 2020a)。

农业用水模式为: 通过修建汇水渠系, 将田面、路面、场院、屋顶集流雨水引至坑塘(部分需防渗处理)进行利用(李国正等, 2005); 城市雨洪水利用模式是利用建筑屋顶、草坪、庭院、道路等, 或建设雨水收集池、处理池等设施收集处理雨水加以利用(马涛等, 2020a), 为社区环境景观用水、洗车等行业提供水源。

5 非常规水资源供水状况及前景分析

5.1 非常规水资源供水状况

为遏制地下水超采局面, 缓解水资源供需矛盾, 2014 年以来京津冀地区加大了非常规水资源开发利用规模。2017 年国家《关于非常规水源纳入水资源统一配置的指导意见》、2019 年《国家节水行动方案》相继出台, 非常规水资源供水规模进一步提高。据 2014—2020 年《北京市水资源公报》、《天津市水资源公报》、《河北省水资源公报》、住房和城乡建设部《城乡建设统计年鉴》数据, 至 2020 年供水量增加至 $24.03 \times 10^8 \text{ m}^3$ (图 3), 全面完成京津冀非常规水源配置量超过 20 亿 m^3 配置目标, 其中北京市、天津市、河北省非常规水资源供水分别占京津冀的 50.02%、16.52%、33.46%, 其中北京市以再生水利用为主; 天津市为再生水、淡化海水利用; 河北省包括再生水、淡化海水(刘天旭, 2015; 杨豪杰等, 2021)、微咸水利用(表 2)。

2014—2020 年京津冀非常规水资源利用量年均增长 10.00%, 2017 年以来增长速率明显加快, 至 2020 年增长至 $24.03 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。京津冀非常规水资源利用量占供水比重逐年增长, 至 2020 年达 12.44%,

表 2 京津冀非常规水资源供水状况 (10^8 m^3)

Table 2 Supply of unconventional water resources in Beijing, Tianjin and Hebei (10^8 m^3)

行政区	非常规水资源	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年	2019年	2020年
北京市	再生水	8.64	9.48	10.04	10.50	10.76	11.52	12.02
	再生水	0.26	0.21	0.26	2.61	2.91	2.60	3.55
天津市	海水淡化	0.37	0.41	0.35	0.35	0.41	0.47	0.42
	天津小计	0.63	0.62	0.61	2.96	3.32	3.07	3.97
河北省	再生水	3.18	3.64	3.97	4.02	4.86	5.84	7.09
	海水淡化	0.16	0.20	0.24	0.30	0.37	0.37	0.40
	微咸水	0.96	1.19	1.01	0.97	1.04	0.78	0.55
	河北小计	4.30	5.03	5.22	5.29	6.27	6.99	8.04
京津冀	再生水	12.08	13.33	14.27	17.13	18.53	19.96	22.65
	海水淡化	0.53	0.61	0.60	0.64	0.78	0.84	0.82
	微咸水	0.96	1.19	1.01	0.97	1.04	0.78	0.55
	京津冀小计	13.57	15.13	15.87	18.74	20.35	21.57	24.03

其中北京市占比最高, 为 29.61%, 天津市次之, 为 14.27%, 河北省比例相对较低, 为 8.35% (图 6)。

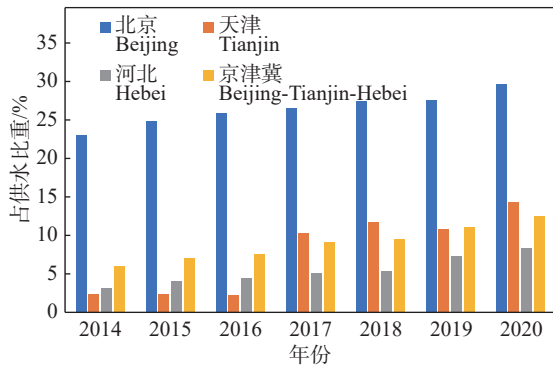


图 6 京津冀地区非常规水资源供水比重

Fig. 6 Supply proportion of unconventional water resources in Beijing-Tianjin-Hebei Region

5.2 非常规水资源利用前景分析

5.2.1 微咸水利用前景分析

2014 年以来, 随着南水北调中线工程供水和地下水超采综合治理不断推进, 京津冀平原大中城市区地下水位有所回升, 至 2020 年农业区地下水位仍以下降为主, 尤其是以河北、天津平原农业区, 主要依靠超采地下水开展农业灌溉, 目前亟需加强中东部平原浅层微咸水开发利用规模。若 2030 年微咸水开发利用程度提升至 50%, 微咸水资源开发利用前景为 $5.43 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中天津平原为 $1.08 \times 10^8 \text{ m}^3$, 河北平原为 $4.35 \times 10^8 \text{ m}^3$, 将较大程度缓解农业区地下水超采状况。

5.2.2 再生水利用前景分析

据住房和城乡建设部《城乡建设统计年鉴》及各省水资源公报数据: 2020 年北京市污水排放总量已达到峰值, 为 $20.42 \times 10^8 \text{ m}^3$, 再生水利用率 59.06%, 若 2030 年利用率提高至 80%, 再生水利用量将达到 $16.34 \times 10^8 \text{ m}^3$; 2020 年天津市污水处理总量 $10.87 \times 10^8 \text{ m}^3$, 再生水利用量 $3.55 \times 10^8 \text{ m}^3$, 利用率为 32.66%, 若 2030 年利用率达到 70%, 再生水利用量将达到 $7.61 \times 10^8 \text{ m}^3$; 2020 年河北省城市污水排放量已到达峰值, 为 $17.13 \times 10^8 \text{ m}^3$, 再生水利用率 41.37%, 若 2030 年利用率达到 60%, 再生水利用量将达到 $10.28 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2030 年京津冀平原再生水利用前景为 $34.22 \times 10^8 \text{ m}^3$, 较 2020 年增长 51.08%。

5.2.3 海水淡化利用前景分析

河北省自然资源厅联合印发《河北省海水淡化

利用发展行动实施方案(2021—2025 年)》, 明确了河北省到 2025 年海水淡化总规模达到 $49 \times 10^4 \text{ t/d}$ 以上, 若 2030 年进一步达到 $60 \times 10^4 \text{ t/d}$, 河北平原海水淡化利用前景 $2.19 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。2022 年天津市发展改革委印发《天津市促进海水淡化产业高质量发展实施方案》, 明确到 2025 年初步建成全国海水淡化产业创新中心和全国海水淡化产业先进制造研发基地, 海水淡化水年供水量达 $1 \times 10^8 \text{ m}^3$, 至 2030 年海水淡化利用可进一步增加至 $2.00 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

5.2.4 雨洪水利用前景分析

京津冀平原区雨洪水利用相对较分散。雨洪水利用将增加径流拦蓄量, 部分随农业灌溉、生态用水方式消耗于作物蒸散发或入渗补给地下水, 部分随坑塘水面蒸发、城市杂用水方式直接消耗。大规模开发利用雨洪水对流域降水产流能力有一定的削弱作用。建议京津冀平原农村雨洪水利用维持现状, 城市雨洪水利用规模适度扩大。

6 非常规水资源利用生态环境效应

6.1 微咸水利用生态环境效应

京津冀平原农业利用微咸水灌溉, 若水盐调控不合理, 可能会形成土壤季节性积盐而导致土壤次生盐渍化, 研究表明降水淋滤、咸淡水轮灌、咸淡水混灌配合相应水盐调控措施对土壤次生盐渍化具有一定缓解作用。(1)降水淋滤: 京津冀平原雨季多大雨、暴雨, 降雨之后土壤盐分能得到有效淋洗, 能有效防止土壤积盐。研究表明一次超过 25 mm 降雨, 就能将根层土壤盐分向深层淋洗, 脱盐率达 34% (方生和陈秀玲, 2005); 河北南皮实验区的多年实践表明利用微咸水灌溉, 经过雨季淋洗后不会影响土质 (任荣和王宗杰, 1991)。(2)咸淡水轮灌: 研究表明微咸水轮灌方式, 有利于降低土壤盐分积累, 对次生盐渍化土有一定的改良作用 (苏莹等, 2005; 朱瑾瑾等, 2019)。(3)咸淡水混灌, 将微咸水与淡水混合降至合理的矿化度, 并采取相应的水盐调控措施, 可减轻盐分对土壤及作物的胁迫危害 (崔丙健等, 2019)。

此外京津冀中东部平原, 地表水资源匮乏, 浅层地下水为微咸水、半咸水, 农业灌溉主要开采深层淡水。利用微咸水、半咸水灌溉, 可减少深层淡水农业开采量, 可有效缓解深层地下水位降落漏斗、地面沉降等环境地质问题。同时浅层地下水

浅埋区微咸水、半咸水利用,可有效降低浅层地下水水位,增加包气带的调蓄能力,并增强区域防涝能力(张亚哲等,2009)。

6.2 再生水利用生态环境效应

再生水开展河流生态补水方面,对沿线地表水、地下水水质产生了一定的影响。再生水开展生态补水对地表水环境影响方面,补水缓解了地表水资源短缺问题,但沿线地表水产生富营养化和 pH 值上升,同时再生水中的抗生素、环境激素(EDCs)等有机污染物对地表水体存在一定安全隐患(姜瑞雪等,2020)。再生水开展生态补水对地下水环境影响方面,高碑店污水处理厂再生水回灌试验研究表明,回灌过程中经过土壤-含水层处理系统可以起到自净作用,不会对地下水造成污染(何江涛和沈照理,2010;耿直等,2016);再生水补水后地下水中盐分、硝态氮有增加趋势,重金属、病原微生物污染风险较小,有机污染物具有不确定性(陈卫平等,2013)。

再生水用于农业灌溉方面,因再生水含一定量的氮素化合物,若施肥方式或灌排系统不合理,会增加土壤 $\text{NO}_3\text{-N}$ 的淋洗,造成地下水浅埋区地下水中 $\text{NO}_3\text{-N}$ 积累,导致地下水体硝酸盐污染(姚素梅和吴大付,2008;李平等,2008)。此外再生水农业灌溉可能会使药品及个人护理品(PPCPs)从土壤转移至植物体内,三氯卡班、三氯生和二甲双胍等新兴污染物在块茎类蔬菜中有较高的生物富集水平,而卡马西平、双氯芬酸和三氯生等在叶菜类蔬菜的茎叶中也有累积趋势(Wu et al., 2015)。

6.3 淡化海水利用生态环境效应

现行的海水淡化方法,海水回收率较低,约 50%~70% 海水尾液经浓缩后排向海洋,尾液盐度约为天然海水的两倍,其排放导致局部海洋盐度增加,而且渤海湾相对封闭,海水更新速率慢,尾液排放导致海洋盐度分布不均;海水淡化冷却水排放伴随一定的热量排放,对海洋环境造成一定热污染。盐度增高和热污染可能改变天然海洋生态系统的分布、构成与多样性(马学虎等,2011)。

6.4 雨洪水利用生态环境效应

雨洪水资源利用,具有提高城市防洪滞洪能力,减少污水入河,降低河水水质风险(冯平等,2006)。但雨洪水过度利用对区域的入渗、径流、蒸发及地下水位产生影响,进而对降水产流能力有一定的削弱作用,可能对区域生态系统的稳定性带来负面影

响(姚素梅和吴大付,2008)。农村用于农业灌溉的雨洪水,健康风险高低取决于农村生活环境的清洁程度,生活垃圾堆放、化粪池等增加雨洪水利用潜在风险。此外氮磷等营养物质的存在也可能导致储存过程中水质发生变化,藻类生长和细菌增殖是雨水利用需要关注的问题(崔丙健等,2019)。

7 非常规水资源开发利用建议

加大非常规水资源利用可支撑社会经济的发展,缓解了水资源供需矛盾,但不合理开发利用带来生态环境负效应,为引导非常规水资源合理开发利用,提出以下开发利用建议:

(1)京津冀平原微咸水资源利用程度仅为 5.06%,中东部平原农业区应加大浅层微咸水利用力度,配套合理排灌系统,并加强水盐调控与土壤盐分长期动态监测,规避不合理开发利用导致的土壤次生盐渍化。

(2)完善再生水回补、灌溉水质标准,将高风险的新兴污染物纳入水质监控体系,强化再生水利用风险评估;重点关注再生水灌溉条件下农作物的健康风险。

(3)降低海水淡化能耗与价格是其大规模利用的关键所在,同时应重点关注海水淡化尾液浓盐水、冷却热水对海洋环境的影响,减弱对天然海洋生态系统多样性的破坏。

(4)雨洪水过度利用可能影响区域生态系统的稳定性。建议农村雨洪水利用维持现状,城市雨洪水利用规模适度扩大。

(5)2014 年以来南水北调中线工程通水并开展河流生态补水,建议适度增加沿线雨洪水、再生水非常规水源河流生态补水量,增加对地下水的补给,加快修复山前平原地下水位降落漏斗区地下水位,并重点加强对补水区地下水水质监测。

8 结 论

(1)京津冀平原非常规水资源利用包括微咸水、再生水、淡化海水、雨洪水,其中微咸水主要分布于中东部平原的天津、沧州、衡水等地;再生水利用以北京、天津、石家庄、唐山、邯郸等大中型及工业城市为主;淡化海水利用包括天津、沧州、唐山、秦皇岛等滨海城市;雨洪水利用,城市以建筑集雨、

农村以坑塘集蓄收集雨洪水, 利用相对较分散。

(2) 至 2030 年非常规水资源利用规模将进一步扩大, 利用前景为 $43.84 \times 10^8 \text{ m}^3$, 其中微咸水 $5.43 \times 10^8 \text{ m}^3$, 再生水 $34.22 \times 10^8 \text{ m}^3$, 海水淡化 $4.19 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。由于雨洪水过度利用对降水产流能力有一定的削弱作用, 建议农村雨洪水利用维持现状, 城市雨洪水利用规模适度扩大。

(3) 微咸水主要用于农业灌溉, 存在土壤次生盐渍化风险, 需配套水盐调控措施, 并加强土壤盐分监测。再生水主要用于河流生态补水及农业灌溉, 补水后沿线地表水富营养化、pH 值上升, 但包气带及含水层具有自净作用, 地下水不会受到污染; 地下水浅埋区开展再生水灌溉, 会增加地下水硝酸盐污染风险。海水淡化尾液浓盐水、冷却热水可能改变天然海洋生态系统的分布、构成与多样性, 应予以关注。雨洪水资源利用可减少污水入河, 降低水质风险, 但过度利用可能影响区域生态系统的稳定性。

References

- Beithou N. 2015. Non-conventional water resources: Review and developments[J]. *International Journal of Research in Sciences*, 3(1): 1-8.
- Cai Dawei, Kong Shuqiong, Liu Ruiqi. 2020. A review of brackish water for agricultural safe irrigation[J]. *Water Saving Irrigation*, (10): 91-95, 100 (in Chinese with English abstract).
- Chen Jian, Liu Weijiang, Bai Fugao, Zhang Man. 2016. Suggestions for risk management of groundwater recharge with reclaimed water[J]. *Environmental Protection Science*, 42(5): 22-25 (in Chinese with English abstract).
- Chen Weiping. 2011. Reclaimed water reuse experience in California and hints to China[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 5(5): 961-966 (in Chinese with English abstract).
- Chen Weiping, Lü Sidan, Wang Meie, Jiao Wentao. 2013. Effects of reclaimed water recharge on groundwater quality: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 24(5): 1253-1262 (in Chinese with English abstract).
- Cui Bingjian, Gao Feng, Hu Chao, Li Zhongyang, Fan Xiangyang, Cui Erping. 2019. The use of brackish and reclaimed waste water in agriculture: A review[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 38(07): 60-68 (in Chinese with English abstract).
- Fang Sheng, Chen Xiuling. 2005. Influence of atmospheric precipitation on soil leaching and desalinization in the north China plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, (5): 28-34 (in Chinese with English abstract).
- Feng Kai. 2012. Upgrading and reconstruction process design for the Gaobeidian reclaimed water treatment plant in Beijing City[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 48(12): 35-39 (in Chinese with English abstract).
- Feng Ping, Liu Wei, Luo Sha. 2006. Utilization of rainwater resources and its experiment[J]. *Journal of Tianjin University(Science and Technology)*, (3): 269-272 (in Chinese with English abstract).
- Gao Chuanchang, Liu Xing. 2007. Research progress on the application of urban unconventional water resources[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 26(S1): 68-70 (in Chinese).
- Geng Zhi, Wu Zhongqiang, Wang Xiaojun, Wang Yuening. 2016. Case analysis of water quality variation in the shallow groundwater recharging with reclaimed water[J]. *Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 14(4): 304-310 (in Chinese with English abstract).
- Hamdy A. 2002. Sustainable use and management of non-conventional water resources in the arid regions[J]. *Acta Horticulturae*, 573: 159-174.
- He Jiangtao, Shen Zhaoli. 2010. Trends of reclaimed water infiltration recharge[J]. *Chinese Journal of Nature*, 32(6): 348-352 (in Chinese with English abstract).
- Hussain M I, Muscolo A, Farooq M, Ahmael W. 2019. Sustainable use and management of non-conventional water resources for rehabilitation of marginal lands in arid and semiarid environments[J]. *Agricultural Water Management*, 221: 462-476
- Jiang Ruixue, Han Dongmei, Song Xianfang, Yang Lihu, Li Binghua. 2020. Impacts of reclaimed water recharge to a river channel on ambient water bodies: A case study of the Chaobai River in Beijing[J]. *Resources Science*, 42(12): 2419-2433 (in Chinese with English abstract).
- Kelly S F, Sara D, Tracy S. 2019. Public acceptance of recycled water[J]. *International Journal of Water Resource Development*, 35(4): 551-586.
- Li Guozheng, Su Xiaohong, Jian Mingkai. 2005. Current situation, potential analysis and countermeasures of non-ordinary water resources in Hebei Province[J]. *Water Resources Protection*, (3): 58-60 (in Chinese with English abstract).
- Li Lei, Liu Shujing. 2015. Development potential and patterns of sea water desalination in Binhai New Area of Tianjin[J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 33(1): 48-50, 75 (in Chinese with English abstract).
- Li Ping, Qi Xuebin, Kang Lianqiang, Fan Xiangyang, Fan Tao, Zhao Zhijuan, Qiao Dongmei. 2008. Soil nitrogen transport and transformation of reclaimed water irrigated summer-maize under different groundwater levels[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, (6): 1384-1388 (in Chinese with English abstract).
- Liu Chunyan, Huang Guanxing, Jing Jihong, Liu Jingtao, Zhang Ying, Guo Weixuan. 2023. Characteristics and driving mechanisms of evolution of groundwater chemistry in Huang-Huai-Hai Plain and suggestions for its exploitation and utilization[J]. *Geology in China*, 50(6): 1705-1719 (in Chinese with English abstract).
- Lian L, Michael R, Bryan E. 2018. An impact assessment for urban

- stormwater use[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 25: 19259–19270.
- Liu Jie, Guo Jingjing, Ma Yunxia. 2011. Analysis on utilization status of unconventional water resources in Tianjin[J]. *Haihe Water Resources*, (1): 11–14 (in Chinese).
- Liu Jing, Gao Zhanyi. 2012. Advances in study and practice of brackish water irrigation in China[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 43(1): 101–104 (in Chinese with English abstract).
- Liu Shujing, Wang Jing, Xing Shuying, Li Lei. 2018. Suggestions on further promoting seawater desalination water into water resource allocation system[J]. *Science and Technology Management Research*, 38(17): 233–236 (in Chinese with English abstract).
- Liu Tianxu. 2015. Development and utilization of unconventional water sources in Hebei Province[J]. *Water Science and Engineering Technology*, (4): 28–31.
- Long Qiubo, Yuan Gang, Wang Lizhi, Wu Junjian. 2010. Study on present situation and exploitation and utilization of brackish water in Guantao County of Hebei Province[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 21(4): 126–129 (in Chinese with English abstract).
- Ma Tao, Liu Jiufu, Peng Anbang, Zheng Jintao, Wang Wenzhong, Zheng Hao, Deng Xiyuan. 2020. Progress in development and utilization of non-conventional water resources in China[J]. *Advances in Water Science*, 31(6): 960–969 (in Chinese with English abstract).
- Ma Tao, Liu Jiufu, Deng Xiyuan. 2020. The development course and suggestions of wastewater reuse in China[J]. *China Water Resources*, (7): 32–34, 37 (in Chinese with English abstract).
- Ma Xuehu, Lan Zhong, Wang Sifang, Li Lu. 2011. Impact of discharges in seawater desalination on marine environment and progress of zero liquid discharge[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 30(1): 233–242 (in Chinese with English abstract).
- Ma Zhongsheng, Tan Junli, Wei Tong. 2019. The variation of salt-tolerance of crops in different regions irrigated with brackish water in China[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 38(3): 70–75 (in Chinese with English abstract).
- Mu Ying, Wang Lijin. 2020. Application status and utilization prospect of several unconventional water resources[J]. *Science & Technology Vision*, (11): 222–224 (in Chinese with English abstract).
- Ni Xinye, Hao Tian, Wang Zhenzhen, Wei Jincheng. 2022. Research on standard and specification system of unconventional water resources utilization in China[J]. *China Water & Wastewater*, 38(14): 52–59 (in Chinese with English abstract).
- Qadir M, Sharma B R, Bruggeman A, Choukr-Allah R, Karajeh F. 2007. Non-conventional water resources and opportunities for water augmentation to achieve food security in water scarce countries[J]. *Agricultural Water Management*, 87: 2–22
- Ren Rong, Wang Zongjie. 1991. Analysis on utilization of brackish water in Nanpi salt reform test area[J]. *Geotechnical Investigation & Surveying*, (2): 38–43 (in Chinese with English abstract).
- Salgot M, Tapias J C. 2004. Non-conventional water resources in coastal areas: a review on the use of reclaimed water[J]. *Geologica Acta*, 2(2): 121–133.
- Stephen N N, Hubert H G S, Josephine N T, Johan R, Penning D V F W T. 2004. Agro-hydrological evaluation of on-farm rainwater storage systems for supplemental irrigation in Laikipia district, Kenya[J]. *Agricultural Water Management*, 73: 21–41.
- Su Ying, Wang Quanjiu, Ye Haiyan, Shi Xiaonan. 2005. Research of soil water and salt transport feature for alternative irrigation of fresh and saline water[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, (1): 50–53 (in Chinese with English abstract).
- Wang Hui. 2016. Advances in study of brackish water irrigation in China[J]. *Water Saving Irrigation*, (6): 59–63 (in Chinese with English abstract).
- Wu X Q, Dodgen K L, Conkle L J, Gan J. 2015. Plant uptake of pharmaceutical and personal care products from recycled water and biosolids: A review[J]. *Science of The Total Environment*, 536: 655–666.
- Yang Haojie, Song Zelin, LiuTiantian, Li Yan. 2021. Development status and application analysis of seawater desalination industry in Hebei Province[J]. *Journal of Hebei University of Water Resources and Electric Engineering*, 31(4): 44–49 (in Chinese with English abstract).
- Yang Huifeng, Cao Wengeng, Zhi Chuanshun, Li Zeyan, Bao Xilin, Ren Yu, Liu Futian, Fan Cunliang, Wang Shufang, Wang Yabin. 2021a. Evolution of groundwater level in the North China Plain in the past 40 years and suggestions on its overexploitation treatment[J]. *Geology in China*, 48(4): 1142–1155 (in Chinese with English abstract).
- Yang Huifeng, Meng Ruifang, Li Wenpeng, Li Zeyan, Zhi Chuanshun, Bao Xilin, Li Changqing, Liu Futian, Wu Haiping, Ren Yu. 2021b. Groundwater resources of the Haihe River Basin and its development potential[J]. *Geology in China*, 48(4): 1032–1051 (in Chinese with English abstract).
- Yao Sumei, Wu Dafu. 2008. Some studies on unconventional water resources utilization in agriculture[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, (4): 24–27, 32 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Jinshun. 2008. Prospect of open source water resources in Haihe River Basin from seawater desalination in Tianjin[J]. *Haihe Water Resources*, (2): 21–23 (in Chinese).
- Zhang Junjie. 2011. Discussion on comprehensive development and utilization of brackish water and brackish water[J]. *Ground Water*, 33(1): 44–45 (in Chinese).
- Zhang Yazhe, Shen Jianmei, Wang Ying, Wang Jianzhong. 2009. Distribution characteristics and development and utilization of underground (slightly) saline water in Hebei Plain[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 26(6): 29–33 (in Chinese).
- Zhang Yue. 2013. Speeding up the development and utilization of

- unconventional water resources[J]. *Water Resources Development Research*, 13(1): 13–16, 68 (in Chinese).
- Zhang Zhaoji, Fei Yuhong, Chen Zongyu. 2009. Investigation and Evaluation of Groundwater Sustainable Utilization in North China Plain[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).
- Zhu Jinjin, Sun Junna, Zhang Zhenhua, Yang Runya, Pan Yinghua, Yang Mao. 2019. Effects of alternate irrigation with brackish and fresh water on water and salt movement in coastal saline soil[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 26(5): 113–117, 122 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 蔡达伟, 孔淑琼, 刘瑞琪. 2020. 微咸水农田安全灌溉研究进展[J]. *节水灌溉*, (10): 91–95, 100.
- 陈坚, 刘伟江, 白福高, 张嫚. 2016. 再生水回灌地下水风险管理建议[J]. *环境保护科学*, 42(5): 22–25.
- 陈卫平. 2011. 美国加州再生水利用经验剖析及对我国的启示[J]. *环境工程学报*, 5(5): 961–966
- 陈卫平, 吕斯丹, 王美娥, 焦文涛. 2013. 再生水回灌对地下水水质影响研究进展[J]. *应用生态学报*, 24(5): 1253–1262.
- 崔丙健, 高峰, 胡超, 李中阳, 樊向阳, 崔二苹. 2019. 非常规水资源农业利用现状及研究进展[J]. *灌溉排水学报*, 38(7): 60–68.
- 方生, 陈秀玲. 2005. 华北平原大气降水对土壤淋洗脱盐的影响[J]. *土壤学报*, (5): 28–34.
- 冯凯. 2012. 北京高碑店再生水处理厂升级改造工艺方案设计[J]. *给水排水*, 48(12): 35–39.
- 冯平, 刘伟, 罗莎. 2006. 雨水资源的利用及其实验[J]. *天津大学学报*, (3): 269–272.
- 高传昌, 刘兴. 2007. 城市非常规水资源的应用研究进展[J]. *灌溉排水学报*, 26(S1): 68–70.
- 耿直, 武中强, 王小军, 王玥宁. 2016. 再生水回灌浅层地下水水质变化实例分析[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 14(4): 304–310.
- 何江涛, 沈照理. 2010. 再生水入渗回灌利用的发展趋势[J]. *自然杂志*, 32(6): 348–352.
- 姜瑞雪, 韩冬梅, 宋献方, 杨丽虎, 李炳华. 2020. 再生水补给河道周边水体特征——以北京潮白河顺义段为例[J]. *资源科学*, 42(12): 2419–2433.
- 李国正, 苏晓虹, 简明凯. 2005. 河北省“非常规水资源”现状、潜力分析及对策[J]. *水资源保护*, (3): 58–60.
- 李磊, 刘淑静. 2015. 天津滨海新区海水淡化发展潜力与模式分析[J]. *水利经济*, 33(1): 48–50, 75.
- 李平, 齐学斌, 亢连强, 樊向阳, 樊涛, 赵志娟, 乔冬梅. 2008. 不同潜水埋深再生水灌溉夏玉米土壤氮素运移研究[J]. *中国生态农业学报*, (6): 1384–1388.
- 刘春燕, 黄冠星, 荆继红, 刘景涛, 张英, 郭维轩. 2023. 黄淮海平原地下水化学演化特征、形成机制及其开发利用建议[J]. *中国地质* 50(6): 1705–1719.
- 刘杰, 郭晶晶, 马云霞. 2011. 天津市非常规水资源利用现状分析[J]. *海河水利*, (1): 11–14.
- 刘静, 高占义. 2012. 中国利用微咸水灌溉研究与实践进展[J]. *水利水电技术*, 43(1): 101–104.
- 刘淑静, 王静, 邢淑颖, 李磊. 2018. 海水淡化纳入水资源配置现状及发展建议[J]. *科技管理研究*, 38(17): 233–236.
- 刘天旭. 2015. 河北省非常规水源开发利用[J]. *水科学与工程学报*, (4): 28–31.
- 龙秋波, 袁刚, 王立志, 武军剑. 2010. 邯郸市东部平原区微咸水现状及开发利用研究[J]. *水资源与水工程学报*, 21(4): 126–129.
- 马涛, 刘九夫, 彭安帮, 郑锦涛, 王文种, 郑皓, 邓晰元. 2020b. 中国非常规水资源开发利用进展[J]. *水科学进展*, 31(6): 960–969.
- 马涛, 刘九夫, 邓晰元. 2020a. 我国污水资源化利用的发展历程与推进建议[J]. *中国水利*, (7): 32–34, 37.
- 马学虎, 兰忠, 王四芳, 李璐. 2011. 海水淡化浓盐水排放对环境的影响与零排放技术研究进展[J]. *化工进展*, 30(1): 233–242.
- 马中昇, 谭军利, 魏童. 2019. 中国微咸水利用的地区和作物适应性研究进展[J]. *灌溉排水学报*, 38(3): 70–75.
- 穆莹, 王金丽. 2020. 几种非常规水资源应用现状及利用前景[J]. *科技视界*, (11): 222–224.
- 倪欣业, 郝天, 王真臻, 魏锦程. 2022. 我国非常规水资源利用标准规范体系研究[J]. *中国给水排水*, 38(14): 52–59.
- 任荣, 王宗杰. 1991. 以南皮盐改试区为例浅析咸水的利用[J]. *工程勘察*, (2): 38–43.
- 苏莹, 王全九, 叶海燕, 史晓楠. 2005. 咸淡轮灌土壤水盐运移特征研究[J]. *灌溉排水学报*, (1): 50–53.
- 王辉. 2016. 我国微咸水灌溉研究进展[J]. *节水灌溉*, (6): 59–63.
- 杨豪杰, 宋泽霖, 刘甜甜, 李岩. 2021. 河北省海水淡化产业发展现状及应用分析[J]. *河北水利电力学院学报*, 31(4): 44–49.
- 杨会峰, 曹文庚, 支传顺, 李泽岩, 包锡麟, 任宇, 柳富田, 范存良, 王树芳, 王亚斌. 2021a. 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*, 48(4): 1142–1155.
- 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. 2021b. 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.
- 姚素梅, 吴大付. 2008. 非常规水资源农业利用的若干问题研究[J]. *水资源与水工程学报*, (4): 24–27, 32.
- 张金顺. 2008. 从天津市海水淡化看海河流域水资源开源的前景[J]. *海河水利*, (2): 21–23.
- 张俊杰. 2011. 微咸水、咸水综合开发利用探讨[J]. *地下水*, 33(1): 44–45.
- 张亚哲, 申建梅, 王莹, 王建中. 2009. 河北平原地下(微)咸水的分布特征及开发利用[J]. *农业环境与发展*, 26(6): 29–33.
- 张岳. 2013. 加快非常规水资源的开发利用[J]. *水利发展研究*, 13(1): 13–16, 68.
- 张兆吉, 费宇红, 陈宗宇. 2009. 华北平原地下水可持续利用调查评价[M]. 北京: 地质出版社.
- 朱瑾璐, 孙军娜, 张振华, 杨润亚, 潘英华, 杨懋. 2019. 咸淡水交替灌溉对滨海盐碱土水盐运移的影响[J]. *水土保持研究*, 26(5): 113–117, 122.