

DOI:10.13476/j.cnki.nsbtdqk.2020.0042

陈飞,丁跃元,李原园,等. 华北地区地下水超采治理实践与思考[J]. 南水北调与水利科技(中英文),2020,18(2):191-198.
CHEN F,DING Y Y,LI Y Y,et al. Practice and consideration of groundwater overexploitation in North China Plain[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,2020,18(2):191-198. (in Chinese)

华北地区地下水超采治理实践与思考

陈飞¹,丁跃元¹,李原园¹,李激²,唐世南¹,于丽丽¹,刘昀竺¹,
羊艳¹,李佳³,张妍¹

(1. 水利部水利水电规划设计总院,北京 100120;2. 郑州大学,郑州 450000;3. 水利部南水北调规划设计管理局,北京 100038)

摘要:华北地区地下水超采问题由来已久,长期过量开采地下水给华北地区尤其是京津冀水资源安全带来重大威胁,开展地下水超采治理意义重大。针对华北地区严重的地下水超采问题,首先从水量、水位、影响范围等角度分析了地下水超采现状与形成的原因,剖析了地下水超采引发的资源枯竭、生态与地质环境损害等一系列突出问题,然后总结了近年来国家开展的南水北调受水区压采、河北地下水超采综合治理三年试点、河湖地下水回补等地下水超采治理相关的重大举措,梳理了各项举措采取的具体超采治理措施和目前取得的治理成效,介绍了下一步华北地区地下水超采治理的战略对策和主要措施,最后结合超采治理工作实践,分析了目前华北地区地下水超采治理中面临的若干突出问题,并提出了相关思考与对策建议,为今后地下水超采治理与管理提供参考。

关键词:地下水;超采治理;华北地区;南水北调;回补

中图分类号:TV21 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Practice and consideration of groundwater overexploitation in North China Plain

CHEN Fei¹, DING Yueyuan¹, LI Yuanyuan¹, LI Wei², TANG Shinan¹, YU Lili¹,
LIU Yunzhu¹, YANG Yan¹, LI Jia³, ZHANG Yan¹

(1. *Water Resources and Hydropower Planning and Design General Institute, Beijing 100120, China*;
2. *Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China*; 3. *Bureau of South to North Water Transfer of Planning, Designing and Management, Beijing 100038, China*)

Abstract: Groundwater overexploitation has vast importance in the North China Plain. The long-term overexploitation of groundwater has brought a great threat to the water resources security of North China, especially Beijing, Tianjin and Hebei. This paper firstly analyzed the status and reasons for groundwater overexploitation in terms of groundwater volume, groundwater level and over-draft area, and the related problems including resources, ecology and geology. Then several groundwater overexploitation actions were introduced and summarized and preliminary results were achieved. Moreover, strategic countermeasures and main measures for groundwater overexploitation in North China were introduced. Finally, some crucial questions were discussed about groundwater overexploitation based on the author's practical work. In addition, some suggestions and rationale were proposed for the restoration based on crucial questions.

Key words: groundwater; restoration; North Plain; South-to-North Water Transfer; recharge

收稿日期:2019-07-27 修回日期:2019-12-02 网络出版时间:2019-12-16
网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20191213.1650.004.html>
基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFC0406505)
作者简介:陈飞(1986—),男,河北南官人,高级工程师,博士,主要从事水资源规划与评价,地下水超采综合治理工作。E-mail:chenfei@giwp.org.cn

华北地区包括北京、天津、河北、山西、山东、河南,是我国政治、经济、科技、文化的核心区域,也是我国水资源最为紧缺的地区之一。20 世纪 70 年代以来,华北地区经济社会用水远超水资源承载能力^[1-2],特别是长期大规模开采地下水,造成地下水严重超采,引发水位持续下降、地面沉降等问题^[3-4]。华北地区特别是京津冀的水资源问题,事关首都水安全、京津冀协同发展、雄安新区建设,开展华北地区地下水超采综合治理意义重大^[5-7]。近年来,水利部等有关部门与地方政府共同开展了一系列地下水超采治理工作^[8-9]。笔者结合长期从事地下水超采治理的工作实践,系统分析了华北地区地下水超采问题,整体介绍近年来开展的一系列超采治理行动和下一步治理计划,研究了地下水超采治理措施中存在的问题,并针对性地提出了意见与思考。

1 地下水超采状况及引发问题

华北地区多年平均水资源总量为 1 085 亿 m^3 ,仅占全国的 4%。人均水资源量约 316 m^3 ,仅占全国平均的 1/7,世界平均的 1/28,其中京津冀人均水资源量仅为 230 m^3 ,甚至低于以色列人均资源量^[10-11]。随着经济社会快速发展,华北地区用水量逐步增长,由 20 世纪 70 年代不到 600 亿 m^3 增长到目前的 760 亿 m^3 左右^[12-15],部分地区水资源开发利用超过 100%,人口经济与水资源承载能力严重失衡。华北地区近一半供水为开采地下水,长期过量开采地下水,加之地下水管理基础薄弱^[16],导致地下水严重超采,并带来了一系列生态与地质环境问题^[17-18]。

1.1 地下水超采严重

20 世纪 70 年代以来,华北地区地下水开采量快速增加,由 200 亿 m^3 增加至 2000 年前后最高时的 500 亿 m^3 左右^[19]。根据全国地下水超采区评价成果,2010 年华北地区地下水超采量达 95.8 亿 m^3 ,其中京津冀地区超采量 64.9 亿 m^3 (见表 1)。平原区地下水超采区面积达 18.1 万 km^2 (见图 1),占华北地区平原区总面积的 60%。华北地区地下水超采区中,约 40% 为浅层超采区;约 2/3 超采区面积存在深层承压水超采问题。由于长期超采地下水,一些地区地下水水位持续下降(见图 2),形成地下水降落漏斗,导致部分地区地下水资源枯竭^[20]。目前,太行山前平原浅层地下水埋深普遍达 30~50 m,南宮—冀枣衡—沧州深层承压水漏斗中心埋深达 106 m。与 1980 年相比,华北地区地下水累计亏空量达 1 800 亿 m^3 左右,长期大量超采地下水造成含

水层疏干、地面沉降、海水入侵等生态与地质环境问题^[21]。

表 1 华北地区地下水超采量与面积

Tab. 1 Groundwater over-exploitation and area in north China

省级行政区	超采量/亿 m^3		超采区面积/万 km^2		
	2010 年	2017 年	小计	浅层	深层
合计	95.8	55.1	18.1	7.5	12.2
北京	3.3	—	0.7	0.7	0
天津	2.0	1.6	0.9	0	0.9
河北	59.6	33.1	7.1	3.8	4.2
山西	4.2	3.5	0.6	0.6	0
山东	5.6	3.8	5.0	1.0	4.3
河南	21.1	13.1	3.8	1.4	2.8



图 1 华北地区地下水超采区分布

Fig. 1 Distribution map of groundwater over-exploitation area in north China

1.2 生态与地质环境问题

地下水在形成、转换和运移过程中,对维持地表植被、调节江河径流、维系良好生态环境也具有十分重要的作用^[22]。华北地区地下水长期持续超采,引发了生态与地质环境等一系列问题^[23]。一是引发了地面沉降、地裂缝。地下水超采是引发大面积地面沉降的主要因素。华北平原是目前我国地面沉降范围最广、沉降速率最快、危害最为严重的地区,尤其以京津冀地区表现最为突出^[24]。2015 年,京津冀地区地面沉降大于 200 mm 的面积超过 6 万 km^2 ,地面沉降严重区面积占全国的 90% 以上,主要分布

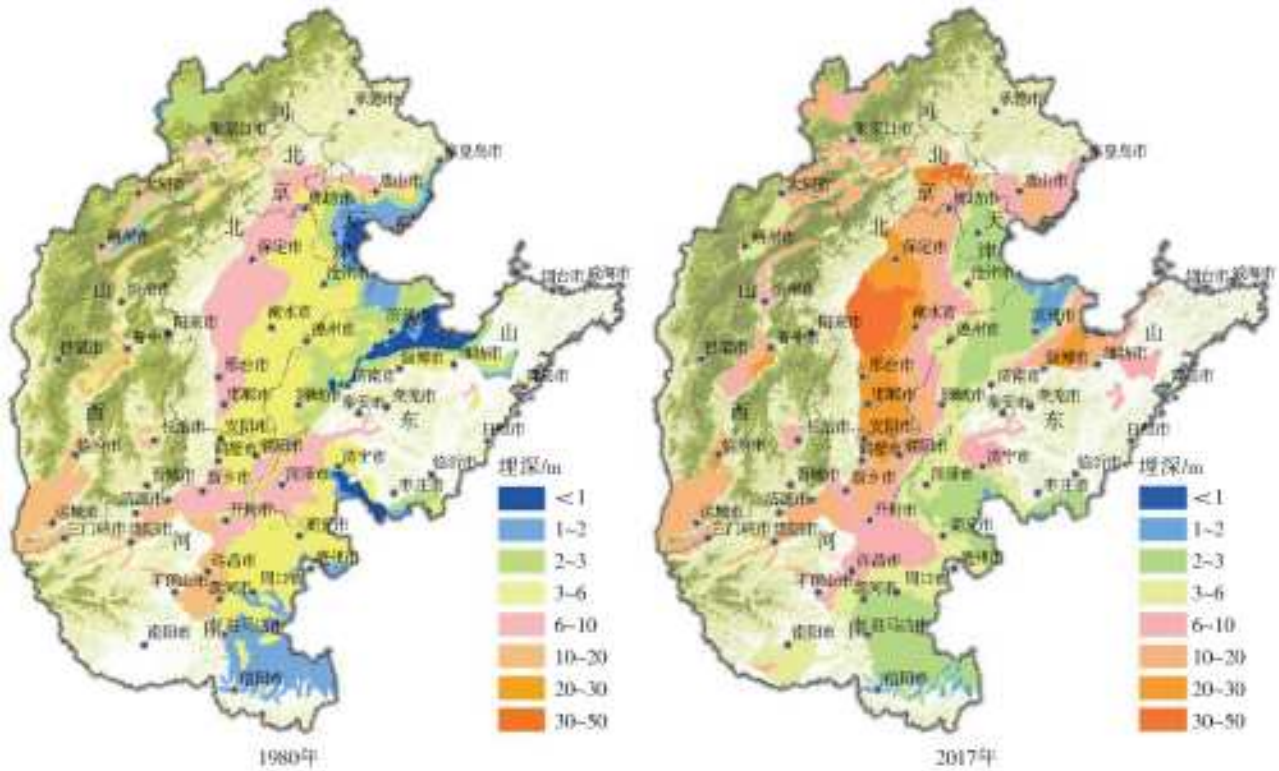


图2 华北地区浅层地下水埋深分布与变化

Fig. 2 Distribution and variation of shallow groundwater datum in north China

在北京、天津、沧州、衡水、保定、邯郸、邢台等地^[24-25]。二是加重了河湖生态损害。地下水水位持续下降,地下水失去对河流的补给作用,加重了河道断流、湖泊湿地萎缩等问题^[26]。海河流域入海水量由20世纪50年代的155亿m³下降到近16年(2001—2016)来的37亿m³(见图3),湖泊、湿地水面面积减少50%以上。

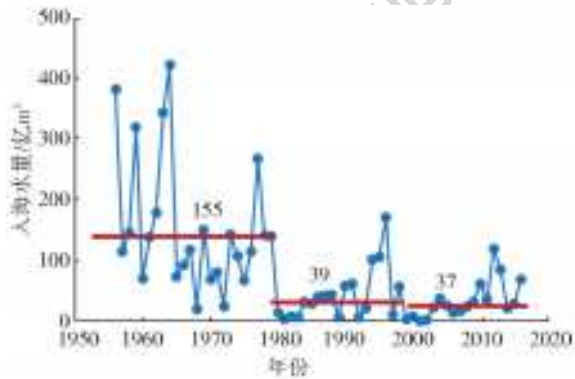


图3 海河区入海水量变化(1956—2016年)

Fig. 3 Variation of seawater intake in Haihe District(1956—2016)

2 地下水超采治理实践

华北地区特别是京津冀的水资源问题,事关首都水安全、京津冀协同发展、雄安新区建设等国家战略,开展华北地区地下水超采治理意义重大^[5-7]。近年来,水利部等有关部门与地方政府开展了一系列

地下水超采治理行动,并取得了初步成效。

2.1 已开展超采治理及取得成效

2.1.1 南水北调受水区地下水压采

华北地区南水北调东中线一期工程受水区包括北京、天津、河北、山东、河南5省市。2013、2014年东线和中线一期工程分别建成通水,为超采治理提供了水源条件。受水区利用南水北调工程置换受水区城区地下水开采,通过加快南水北调水源骨干工程与水厂、供水管网等配套工程建设,充分利用南水北调东中线工程调水,置换城区地下水开采,关停供水管网覆盖范围内自备井^[27-28]。截至2017年底,受水区5省市实际消纳南水北调水量60亿m³,受水区城区已封填机井14 000余眼,新建、改建水厂近200座。与2014年相比,压减地下水年超采量15亿m³,占华北地区城区地下水超采量的43%。

2.1.2 河北省地下水超采综合治理试点

农业开采地下水占地下水开采总量的比例超过60%,农业开采地下水是华北地区地下水超采的主要原因^[29]。针对农业地下水超采问题,2014—2016年,财政部、水利部农业部等有关部门组织河北省开展了地下水超采综合治理试点。通过实施体制机制改革、工程节水、农艺节水、调整结构节水、水源置换、严格地下水管理等多种治理措施,压减地下水开采量。3年试点期间,河北省累计发展高效节水灌

溉面积 67 余万 hm^2 , 实现地表水置换地下水灌溉 33 余万 hm^2 , 调整种植结构约 17 万 hm^2 ; 出台了《河北省地下水管理条例》, 严格禁采限采管理, 强化计量与监测, 建成地下水动态监测站 1 970 处。河北省地下水超采综合治理试点为华北地下水超采治理提供了重要经验借鉴。2017 年以来, 在河北省 3 年试点基础上, 试点治理范围扩大到山东、山西、河南等 3 省份。目前, 山东试点范围包括 8 市(德州、淄博、东营、聊城、滨州、菏泽、济宁、潍坊)的 9 个县(市、区); 河南试点范围包括安阳市、鹤壁市、开封市、濮阳市等 4 市 7 个县(市、区); 山西试点范围主要包括山西汾河流域和朔同地区。

截至 2017 年底, 与 2014 年相比, 华北地区压减农村地区地下水年超采量 21.1 亿 m^3 , 对比分析河北省试点区治理前后地下水监测井数据, 半数以上的地下水监测井地下水水位上升、稳定或者降幅减小^[30], 地下水水位持续下降趋势得到了初步遏制。

2.1.3 河湖地下水回补试点

为进一步加大河北省地下水超采综合治理力度, 水利部、河北省于 2018 年 8 月印发了《华北地下水超采综合治理河湖地下水回补试点方案》, 选择滹沱河、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, 逐步回补地下水和恢复河流生态。具体措施包括: 实施河道清洁行动, 清理河道主槽、滩地垃圾、障碍物、违章建筑清理任务, 实现河道清洁通畅, 并采取适宜的生态措施, 恢复河道生态环境; 根据上游水库蓄水、南水北调中线等水源条件, 加强水资源合理配置, 为试点河段生态补水; 加强河道巡查与管护, 强化水量监管, 严控沿程用水排污, 严禁乱挖滥采, 确保输水安全。3 条试点河流自 2018 年 9 月 13 日开始补水, 截至 2019 年 8 月底, 累计补水量达 13.2 亿 m^3 ; 补水期间形成最大水面面积 46 km^2 , 地下水水位最高时期平均回升 1.6 m。补水后, 河道地表水与周边地下水水质明显改善, 河段岸青水碧景美, 植被、鱼类、鸟类等明显增多, 生态状况显著改善。

2.1.4 地下水禁限采区划定与管理

各省级人民政府在地下水超采区评价成果的基础上, 划定并公布了地下水禁采区和限采区。其中, 禁采区主要包括: 超采区内城市管网覆盖并能满足供水要求的地区, 具备其它替代水源条件的地区, 发生了严重的生态与环境地质问题的区域, 高速铁路等国家重点基础设施保护区、重要文物保护单位, 以及其它需要禁采的区域。禁采区以外的超采区划定为限采区。如河北省划定禁采区面积 2 480.1 km^2 , 限采区

面积 73 484.7 km^2 。根据划定的地下水禁采区、限采区范围, 严格地下水禁限采区管理, 在地下水禁采区, 除临时应急供水和无替代水源的农村地区少量分散生活用水外, 严禁取用地下水, 已有的要限期关闭; 在地下水限采区, 一律不准新增地下水开采量。

2.1.5 水权水价水资源税改革

推进水权水价水资源税改革, 通过市场与经济手段强化节水, 减少地下水开采。一是落实水资源税改革要求, 确保超采地区地下水税额标准高于非超采地区, 特种行业取用水税额标准高于其他行业; 从严核定用水限额, 对超过限额的农业生产用水征收水资源税。二是统筹各类水源, 建立统一的综合水价体系, 使取用地下水的成本明显高于外调水和当地地表水, 通过价格杠杆控制超采区地下水开采; 建立健全农业用水精准补贴和节水奖励机制, 加大农业水价综合改革力度, 推行“超用加价”“一提一补”农业水价改革模式, 河北省改革面积 60 余万 hm^2 。三是推进水权制度改革, 将用水总量逐级分解落实到不同行政区域和用水户, 明晰水权, 制定农业水权交易细则, 河北省通过推动水权制度改革, 将水资源可利用量分配到行业和地块, 向 1 000 多万户农民发放了农业水权证, 引导农业用水户将水权额度内节余水量进行交易。

水权水价水资源税改革实施以来, 经济杠杆对取用水行为的调节作用逐步显现, 一些高耗水企业纷纷转变粗放的用水方式, 开展产业转型和技术革新。如天津市地下水取水量较改革前下降约 10%, 其中以地下水为水源的工商业、建筑业、医院、学校、机关和企事业单位取水量较改革前下降 30.5%; 河北省税改实施以来, 水资源税收较水资源费收入大幅增加, 多个大型钢铁、造纸等企业污水处理厂进行升级改造, 提高工业用水循环利用率, 减少地下水开采。

2.2 下一步超采治理行动

一是出台地下水管理条例。地下水管理立法是加强地下水管理和保护的法制保障^[31]。目前国家层面缺乏地下水资源管理的专门性法规, 地下水资源管理与保护的法规体系尚不健全, 《水法》和《水污染防治法》等国家层面的法律法规尽管在地下水资源管理与保护方面提出了宏观性的要求, 但规定过于原则、可操作性不强^[32]。针对地下水管理现状与超采等问题, 水利部于 2008 年启动了地下水管理立法前期工作, 编制了《地下水管理条例》, 针对性地提出了调查评价与规划制度、开采总量和水位控制制

度、分层分类管理制度、战略储备制度、超采区与禁限采区划定制度、地下水饮用水水源地管理与保护及污染防治制度等相关管理制度^[33]。目前地下水管理条例已列入国家立法计划。

二是实施华北地区地下水超采综合治理行动。为了持续推进华北地下水超采综合治理,逐步实现华北地区生态环境根本好转,必须从根本上研究制定华北地下水超采和河湖水系治理修复的方案举措。为此,水利部组织编制了《华北地区地下水超采综合治理行动方案》。以京津冀地区为治理重点,通过采取全面节水、禁采限采、水源置换、结构调整,强化监管等综合治理措施,计划到2022年,压减地下水开采量25.7亿 m^3 ,现状超采量压减率超过70%,约2/3地下水超采区实现采补平衡,超采区城镇力争全部实现采补平衡。

三是实施河湖生态补水与地下水回补。为进一步加大华北地区地下水超采综合治理力度,在综合采取已有压减地下水开采措施的同时,拟采取更加有力的措施,考虑补水水源、入渗条件、地下水补给效果、河湖区位重要性等因素,在地下水超采严重、水源条件具备的地区,在河湖地下水回补试点工作基础上,根据当地水、外调水、非常规水等水源条件,通过多水源联合调度,在保障城乡生活生产正常用水的前提下,对河湖实施清理整治和生态补水,回补地下水。2019年5月,水利部印发了《2019年度河湖生态补水方案及试点河段后续补水计划》,明确根据南水北调、引黄、引滦、上游水库、沿河再生水及其他水源等水源条件,向京津冀地区河湖生态补水约22.1亿 m^3 ,补水范围包括滹沱河、滏阳河、南拒马河、潮白河、北运河、永定河、瀑河、唐河、潞龙河、泇河、七里河、漳河、卫河、南运河等14条河流和白洋淀、衡水湖、南大港、七里海、大黄堡洼、北大港、团泊洼等7个湖泊。到2022年前,力争河湖生态补水年均20~30亿 m^3 ,年均回补地下水10~15亿 m^3 ,河湖生态功能逐步恢复。

3 思考与建议

目前,华北地区地下水超采治理取得了一定成效,压采效果逐步显现。但持续推进地下水超采治理、彻底扭转超采局面,在治理措施、种植结构等方面仍存在以下几点突出问题。

(1)种植结构调整措施政策依赖性大,建议研究建立长效机制。针对农业地下水超采问题,在无替代水源的严重超采区实施种植结构调整是超采治理的一项重要措施,具有压采效果明显、实施方便的优

点。但此类措施对政府补贴的依赖性较大。一旦补贴停止,在没有其他收入渠道的情况下,存在农民恢复冬小麦种植的风险^[34]。建议探索创新此类项目可持续性长效机制,在地下水严重超采且没有替代水源的地区,引导农民种植一些抗旱作物,并培育相关市场与加工产业,提高农民收入,适当减少高耗水的冬小麦种植面积^[35]。

(2)现状分散种植模式下节水潜力有限,应鼓励土地流转与规模化种植。华北地区大部分耕地是“一家一户”的分散种植经营模式,土地流转程度不高。在分散种植模式下,不适宜大规模推广喷灌、滴管等高效节水技术。而且,现行分散种植模式和农业水价水平下,农民节水收益不明显,导致节水内生动力不足,如对于拥有0.67 hm^2 (10亩)耕地的家庭来说,种植小麦-玉米实施高效节水后每公顷节水750~900 m^3 估算,节水后减少成本仅约150元,占投入成本比例约为3~4%,尚不足以充分激励农民改变种植模式和灌溉习惯^[36]。建议研究制定鼓励土地流转的政策,支持发展规模化种植模式,提高节水效益,并建立有效且易操作的节水奖励机制,激发社会节水意识。

(3)蔬菜种植规模呈增大趋势,建议合理控制蔬菜发展。随着经济社会发展,近年来华北地区蔬菜种植规模呈逐渐增长趋势。华北地区蔬菜种植面积由2000年的365万 hm^2 增长至2017年的527万 hm^2 ,其中河北省蔬菜规模由2000年的73.6万 hm^2 增长至2017年的123.6万 hm^2 (见图4)。华北地区大部分蔬菜属于高耗水作物,一些蔬菜灌溉用水量甚至是小麦的2~3倍。蔬菜种植规模持续增加,必然导致用水量快速增大,给地下水超采治理带来较大的压力和风险。建议华北地区合理布局蔬菜生产,深入研究制定控制缺水地区尤其是地下水超采地区蔬菜发展规模的政策,适当减少这些地区蔬菜输出量。

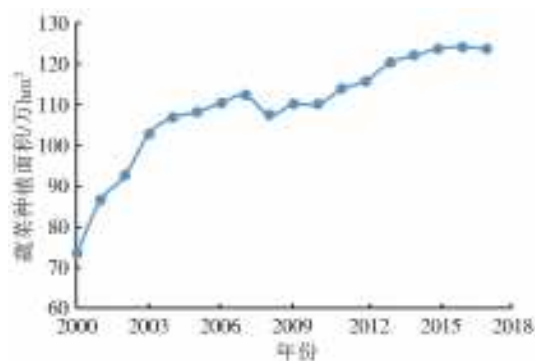


图4 河北省蔬菜种植面积变化(2000—2017年)

Fig. 4 Variation of vegetable planting area in Hebei Province(2000-2017)

(4)外调水源缺口较大,建议优化调度、增供水源。华北地区尤其是京津冀地区水资源严重短缺,压采成功与否很大程度上取决于外调水源数量及其使用情况,但是目前京津冀地区外调水源仍然面临较大缺口。(a)由于供水管网等配套工程建设相对滞后,华北地区消纳南水北调水源能力受到较大限制,加之丹江口水库来水偏少,受水区城区水源置换受到一定程度影响。(b)受引黄指标、引黄时间等多种因素制约,河北省引黄等农业灌溉替代水源严重短缺,很多地区仍然大量使用深层承压水作为灌溉水源。(c)引黄、引江缺乏必要的调蓄工程,在长江、黄河等外调水源来水偏多情况下,也难以充分消纳和利用。建议加强华北地区尤其是京津冀地区多水源联合优化调度,修建必要的水源调蓄工程,尽可能多利用外调水源,置换地下水开采量。

(5)地下水计量基础薄弱,建议开展计量技术攻关。目前,华北地区有效地下水开采计量体系尚未建立,尤其对农业地下水开采量及变化缺乏动态监测,仍然是当前地下水管理面临的突出短板,对地下水管理与超采治理无法及时提供有力数据支撑。如河北省共有规模以上机井数量102万眼,其中农业灌溉机井96万眼,除少数安装了水表可以直接计量外,其余大部分农灌机井没有安装计量设施。目前推广使用的“以电折水”计量技术,受制于电力部门用电量数据、水量—电量转换系数等影响因素,仍需进一步校验和完善。建议国家组织开展农业开采地下水监测计量研究攻关,高层推动协调水利、电力、农业等部门共同开展“以电折水”等新型地下水取水计量工作。

4 结论

(1)华北地区经济社会用水大大超过水资源承载能力,导致严重的生态赤字。特别是长期大规模开采地下水,造成地下水严重超采,导致地下水位下降、河湖水面萎缩、地面沉降、海水入侵等生态环境问题,对保障国家水安全和区域可持续发展构成严重威胁。

(2)针对地下水超采问题,水利部等有关部门与地方政府共同开展了一系列地下水超采治理行动,通过实施南水北调受水区地下水压采、河北省地下水超采综合治理试点、河湖地下水回补等一系列工作,减少了地下水开采量,部分地区地下水位回升或稳定,在一定程度上遏制了地下水超采趋势。下一步将继续推动超采治理行动,出台地下水管理条例,落实《华北地区地下水超采综合治理行动方案》,在海河流域继续扩大实施河湖生态补水与地下水回补。

(3)目前地下水超采治理中仍然存在种植结构及其调整政策、种植模式、外调水源、准确计量等一些突出矛盾与问题,需要深入研究、尽快破解,为成功完成华北地区地下水超采治理工作、进一步改善生态环境提供基础支撑。

参考文献(References):

- [1] 谢新民,郭洪宇,唐克旺,等.华北平原区地表水与地下水统一评价的二元耦合模型研究[J].水利学报,2002(12):95-100.(XIE X M, GUO H Y, TANG K W, et al. Dual coupled model for integrated assessment of surface water and groundwater in North China Plain[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002(12):95-100. (in Chinese)) DOI:10.3321/j.issn.0559-9350.2002.12.018.
- [2] 刘敏,聂振龙,王金哲,等.华北平原地下水资源承载力评价[J].南水北调与水利科技,2017,15(4):13-33.(LIU M, NIE Z L, WANG J Z, et al. Evaluation of groundwater resources carrying capacity in North China Plain[J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2017, 15(4):13-33. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdqk.2017.04.003.
- [3] 李玲,邵景力,崔亚莉,等.华北平原区地下水开采量估算研究[J].南水北调与水利科技,2013,11(5):82-85.(LI L, SHAO J L, CUI Y L, et al. Estimation of groundwater withdrawal in the North China Plain[J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2013, 11(5):82-85. (in Chinese)) DOI:10.3724/SP.J.1201.2013.05082.
- [4] 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 J Y, GUO H P, LI W P, et al. Relationship between land subsidence and deep groundwater yield in the North China Plain[J]. South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology, 2014, 12(3):165-169. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdqk.2014.03.036.
- [5] 郭珉媛,牛桂敏,杨志,等.京津冀水环境协同治理的实践与经验[J].环境保护,2019,47(19):51-55.(GUO M Y, NIU G M, YANG Z, et al. Practice and experience of water environment cooperative governance in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Environmental Protection, 2019, 47(19):51-55. (in Chinese)) DOI:10.14026/j.cnki.0253-9705.2019.19.013.
- [6] 王丽.京津冀地区资源开发利用与环境保护研究[J].经济研究参考,2015(2):47-71.(WANG L. Study on resources exploitation and environment protection in Beijing-Tianjin-Hebei Region[J]. Review of Economic Research, 2015(2):47-71. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.2095-3151.2015.02.004.

- [7] 席北斗,李娟,汪洋,等.京津冀地区地下水污染防治现状、问题及科技发展对策[J].环境科学研究,2019,32(1):1-9. (XI B D, LI J, WANG Y, et al. Strengthening the innovation capability of groundwater science and technology to support the coordinated development of Beijing-Tianjin-Hebei Region: Status Quo, Problems and Goals [J]. Research of Environmental Sciences, 2019, 32(1): 1-9. (in Chinese)) DOI: 10. 13198/j. issn. 1001-6929. 2018. 09. 27.
- [8] 邱彦昭,王东,杨兰琴,等.京津冀三地水资源协同保护现状及对策建议[J].人民长江,2018,49(11):24-28. (QIU Y Z, WANG D, YANG L Q, et al. Current situation and countermeasures of water resource coordinated protection in Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Yangtze River, 2018, 49 (11): 24-28. (in Chinese)) DOI: 10. 16232/j. cnki. 1001-4179. 2018. 11. 006.
- [9] 陈飞,侯杰,于丽丽,等.全国地下水超采治理分析[J].水利规划与设计,2016(11):3-7. (CHEN F, HOU J, YU L L, et al. Analysis of national groundwater overdraft treatment [J]. Water Resources Planning and Design, 2016 (11): 3-7. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-2469. 2016. 11. 002.
- [10] 朱建民.以色列的水务管理及其对北京的启示[J].北京水务,2008(2):1-5. (ZHU J M. Israel's water management and its enlightenment to Beijing [J]. Beijing Water, 2008 (2): 1-5. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1673-4637. 2008. 02. 002.
- [11] 秦丽杰,李明.以色列水足迹及其对我国西北干旱区的启示[J].世界地理研究,2008(1):67-73. (QIN L J, LI M. The water footprint of israel and its inspirations for the arid regions of Northwest China [J]. World Regional Studies, 2008(1): 67-73. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1004-9479. 2008. 01. 009.
- [12] WU X F, QI Y Q, SHEN Y J. Change of winter wheat planting area and its impacts on groundwater depletion in the North China Plain [J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29 (6): 891-908. DOI: 10. 1007/s11442-019-1635-9.
- [13] 金菊良,崔毅,杨齐祺,等.山东省用水总量与用水结构动态关系分析[J].水利学报,2019,46(5):551-557. (JIN J L, CUI Y, YANG Q Q, et al. Dynamic relationship analysis between total water consumption and water utilization structure in Shandong Province based on the VAR model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 46 (5): 551-557 (in Chinese)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20141268.
- [14] 孙素艳,李云玲,郭东阳,等.河北省供用水现状及水资源平衡分析[J].水利规划与设计,2018(10):62-67. (SUN S Y, LI Y L, GUO D Y, et al. Current situation of water supply and use and analysis of water resources balance in Hebei province [J]. Water Resources Planning and Design, 2018(10): 62-67. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1672-2469. 2018. 10. 017.
- [15] 水利部.中国水资源公报2017[R].北京:中国水利水电出版社,2018. (Ministry of Water Resources, China Water Resources Bulletin of 2017 [R]. Beijing: China Water Resources and Hydropower Press, 2018. (in Chinese))
- [16] 杨建青,章树安.关于我国地下水监测与预测预报研究的几点思考[A].水生态监测与分析论文集[C].济南:山东省地图出版社,2008,207-211. (YANG J Q, ZHANG S A. A tentative discussion on groundwater monitoring and prediction practice in China [A]. Symposium on Aquatic Ecological Monitoring and Analysis [C]. Jinan: Shandong Atlas Publishing House, 2008, 207-211. (in Chinese))
- [17] 费宇红,张兆吉,张凤娥,等.气候变化和人类活动对华北平原水资源影响分析[J].地球学报,2007,28(6):567-571. (FEI Y H, ZHANG Z J, ZHANG F E, et al. An analysis of the influence of human activity and climate change on water resources of the north China plain [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2007, 28 (6): 567-571. (in Chinese)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1006-3021. 2007. 06. 009.
- [18] 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,2014,35(5):527-534. (SHI J S, LI G M, LIANG X, et al. Evolution mechanism and control of groundwater in the north China plain [J]. Acta Geoscientica Sinica, 2014, 35 (5): 527-534. (in Chinese)) DOI: 10. 3975/cagsb. 2014. 05. 01.
- [19] 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 Z J, FEI Y H, CHEN Z Y, et al. Groundwater Environment Evolution in the North China Plain [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2009. (in Chinese))
- [20] 张光辉,费宇红,李慧娣,等.海河流域平原浅层地下水位持续下降动因与效应[J].干旱区资源与环境,2002,16(2):32-36. (ZHANG G H, FEI Y H, LI H D, et al. Mechanism and consequence of continual decline of shallow ground water level in Haihe River basin [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2002, 16 (2): 32-36. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1003-7578. 2002. 02. 007.
- [21] 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 Y H, MIAO J X, ZHANG Z J, 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)) DOI: 10. 3321/j. issn: 1007-7588. 2009. 03. 007.
- [22] 张光辉,聂振龙,申建梅,等.地下水功能评价体系属

- 性层组成与意义[J]. 水文地质工程地质, 2009(5): 61-65. (ZHANG G H, NIE Z L, SHEN J M, et al. Constituents and meaning of the attributive index of groundwater function assessment system [J]. Resources Science, 2009(5): 61-65. (in Chinese)) DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2009.05.002.
- [23] 张宗枯, 沈照理, 薛禹群, 等. 华北平原地下水环境演化[M]. 北京: 地质出版社, 2000. (ZHANG Z H, SHEN Z L, XUE Y Q, et al. Evolution of groundwater environment in North China Plain[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000. (in Chinese))
- [24] 郭海朋, 白晋斌, 张有全, 等. 华北平原典型地段地面沉降演化特征与机理研究[J]. 中国地质, 2017, 44(6): 1115-1127. (GUO H P, BAI J B, ZHANG Y Q, et al. The evolution characteristics and mechanism of the land subsidence in typical areas of the North China Plain[J]. Geology in China, 2017, 44(6): 1115-1127. (in Chinese)) DOI: 10.12029/gc20170606.
- [25] 骆祖江, 王琰, 田小伟, 等. 沧州市地下水开采与地面沉降地裂缝模拟预测[J]. 水利学报, 2013, 44(2): 198-204. (LUO Z J, WANG Y, TIAN X W, et al. Simulating and forecasting of groundwater exploitation, land subsidence and ground fissure in Cangzhou City[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 44(2): 198-204. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2013.02.002.
- [26] 郝利霞, 孙然好, 陈利顶. 海河流域河流生态系统健康评价[J]. 环境科学, 2014, 35(10): 3692-3701. (HAO L X, SUN R H, CHEN L D. Health assessment of river ecosystem in Haihe River basin, China[J]. Environmental Science, 2014, 35(10): 3692-3701. (in Chinese)) DOI: 10.13227/j.hjlx.2014.10.008.
- [27] 王艳霞, 程林, 刘西汉, 等. 南水北调中线工程河北受水区地下水资源利用及保护对策研究[J]. 河北地质大学学报, 2018(3): 30-36. (WANG Y X, CHENG L, LIU X H, et al. Groundwater exploitation status and countermeasures in Hebei Province of the South-to-North Water Diversion Middle Route Project [J]. Journal of Hebei GEO University, 2018(3): 30-36. (in Chinese)) DOI: 10.13937/j.cnki.hbdzdx.2018.03.005.
- [28] 章燕喃, 田富强, 胡宏昌, 等. 南水北调来水条件下北京市多水源联合调度模型研究[J]. 水利学报, 2014, 45(7): 844-849. (ZHANG Y N, TIAN F Q, HU H C, et al. Joint operation model of multiple water sources in Beijing[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(7): 844-849. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2014.07.011.
- [29] 胡振通, 王亚华. 地下水超采综合治理的农户评价、原因分析与改进建议[J]. 中国人口·资源与环境, 2018, 28(10): 160-168. (HU Z T, WANG Y H. Farmers' evaluation, cause analysis and improvement suggestions on groundwater over-exploited comprehensive governance[J]. China Population, Resources and Environment, 2018, 28(10): 160-168. (in Chinese)) DOI: 10.12062/cpre.20180702.
- [30] 王平权, 陈连胜. 河北衡水综合治理地下水超采一部分地区地下水位得到明显回升[J]. 河北水利, 2017(3): 23. (WANG P Q, CHEN L S. Groundwater over-exploitation comprehensive governance in Hengshui City of Hebei Province; the groundwater level in some areas has been significantly recovered[J]. Hebei Water Resources, 2017(3): 23. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-7700.2017.03.014.
- [31] 关锋, 袁建平, 赵辉, 等. 我国地下水管理总体框架研究[J]. 人民黄河, 2010, 32(10): 91-92. (GUAN F, YUAN J P, ZHAO H, et al. Research on the overall framework of groundwater management in China[J]. Yellow River, 2010, 32(10): 91-92. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2010.10.039.
- [32] 董四方, 赵辉, 高磊. 地下水管理条例立法研究[J]. 水利发展研究, 2012(9): 75-77. (DONG S F, ZHAO H, GAO L. Groundwater management regulations legislation research[J]. Water Resources Development Research, 2012(9): 75-77. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1671-1408.2012.09.018.
- [33] 陈飞, 于丽丽, 侯杰, 等. 地下水管理立法分析与制度研究[J]. 人民黄河, 2018, 40(1): 46-49. (CHEN F, YU L L, HOU J, et al. Groundwater management legislation analysis and system research[J]. Yellow River, 2018, 40(1): 46-49. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2018.01.011.
- [34] 王学, 李秀彬, 辛良杰, 等. 华北地下水超采区冬小麦退耕的生态补偿问题探讨[J]. 地理学报, 2016, 71(5): 829-839. (WANG X, LI X B, XIN L J, et al. Ecological compensation for winter wheat abandonment in groundwater over-exploited areas in the North China Plain[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71(5): 829-839. (in Chinese)) DOI: 10.11821/dlxb201605011.
- [35] 王学, 李秀彬, 谈明洪, 等. 华北平原 2001—2011 年冬小麦播种面积变化遥感监测[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 190-199. (WANG X, LI X B, TAN M H, et al. Remote sensing monitoring of changes in winter wheat area in North China Plain from 2001 to 2011[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(8): 190-199. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2015.08.028.
- [36] 刁广付, 刁广强, 王健. 河北省主要粮食成本收益分析[J]. 农业与技术, 2018, 38(17): 152-167. (DIAO G F, DIAO G Q, WANG J. Analysis of main grain cost and income in Hebei Province[J]. Agriculture and Technology, 2018, 38(17): 152-167. (in Chinese)) DOI: 10.11974/nyyjs.20180931066.