

2001-2015年北京市地下水资源承载力变化特征分析

高飞, 王会肖, 刘昌明

引用本文:

高飞, 王会肖, 刘昌明. 2001-2015年北京市地下水资源承载力变化特征分析[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2019, 27(7): 1088-1096.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.181107>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

华北平原主要种植模式农业地下水足迹研究——以河北省吴桥县为例

Agricultural groundwater footprint of the major cropping system in the North China Plain: A case study of Wuqiao County, Hebei Province

中国生态农业学报. 2017, 25(3): 328-336 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160833>

外来调水对华北低平原区地表水和地下水水化学特征的影响*——以河北省南皮县为例

Effect of water diversion on hydro-chemical characteristics of surface water and groundwater in lowland area of the North China Plain: A case study of Nanpi County, Hebei Province

中国生态农业学报. 2016, 24(8): 1135-1144 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.160080>

"十三五"国家重点研发计划粮食丰产增效科技创新专项课题"华北春玉米密植高产宜机收品种筛选及全程机械化高效生产技术"简介

中国生态农业学报. 2017, 25(4): 623-624 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170182>

黄土高原粗质地土壤剖面水分运动与浅层地下水补给可能性模拟

Simulation of water flow and shallow groundwater recharge in coarse-textured soils on the Loess Plateau, China

中国生态农业学报. 2018, 26(2): 253-262 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.170495>

再生水灌溉区农田包气带及地下水中硝酸盐分布特征及来源研究

Distribution characteristics and sources of nitrate in the unsaturated zone and groundwater of farmlands in an area irrigated with reclaimed water

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(11): 1725-1731 <https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.190578>

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.181107

高飞, 王会肖, 刘昌明. 2001—2015年北京市地下水资源承载力变化特征分析[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(7): 1088–1096

GAO F, WANG H X, LIU C M. Variation in groundwater resources carrying capacity in Beijing between 2001 and 2015[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(7): 1088–1096

2001—2015年北京市地下水资源承载力变化特征分析*

高飞, 王会肖**, 刘昌明

(北京师范大学水科学研究院/城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室 北京 100875)

摘要: 北京市地下水超采现象严重, 由此引发了包括地面沉降等相关环境问题, 严重制约了北京市的经济社会发展。本文采用地下水可利用量和用水效率定义了地下水承载力, 并结合地下水开采程度(R_G)和经济发展程度的投影图(R_Q)对北京市 2001—2015 年的地下水资源承载力进行了评价。结果表明: 北京市地下水的供水量高于地表水的供水量, 地表水和地下水供水量波动幅度较小; 北京市农业用水效率和工业用水效率逐年升高, 其他行业用水效率除在 2014 年和 2015 年出现小幅度降低外, 其他年份均处于升高趋势, 折算后的综合用水效率也从 2001 年的 $97 \text{元}\cdot\text{m}^{-3}$ 增长到 2015 年的 $620 \text{元}\cdot\text{m}^{-3}$; 北京市地下水实际承载的 GDP 从 2001 年的 2 636 亿元增长到 2014 年的 11 469 亿元, 2015 年又减少到 11 284 亿元。以 2010 年为界限北京市地下水开采程度(R_G)和经济发展程度(R_Q)投影点分别位于 I 区和 II 区内, 表明北京市地下水承载力 2010 年以前处于相对荷载过重的状态, 2010 年以后荷载状态有所缓解。虽然北京市实际承载的 GDP 低于理论承载的 GDP, 但是北京市地下水承载力仍然面临着严峻的挑战, 逐步提高地表水使用量和提高用水效率是有效缓解北京市地下水超采的有力举措。

关键词: 北京市; 地下水资源承载力; 地下水开采程度; 经济发展

中图分类号: S271

文章编号: 2096-6237(2019)07-1088-09

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Variation in groundwater resources carrying capacity in Beijing between 2001 and 2015*

GAO Fei, WANG Huixiao**, LIU Changming

(College of Water Sciences, Beijing Normal University / Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China)

Abstract: Owing to the over-extraction of groundwater resources in Beijing over the past 40 years, Beijing has faced an increasingly sharp decline in groundwater level and storage. Few studies have been reported the variation of groundwater resources carrying capacity in Beijing. In this paper, groundwater resources carrying capacity was defined and assessed based on the available groundwater quantity and water use efficiency. Our results indicated that the water supply from groundwater in Beijing was higher than that from surface water. The agricultural water use efficiency and industrial water use efficiency increased from 2001 to 2015, except other industries water use efficiency decreased slightly from 2014 to 2015. The comprehensive water efficiency increased from $97 \text{¥}\cdot\text{m}^{-3}$ to $620 \text{¥}\cdot\text{m}^{-3}$ between 2001 and 2016. Our results also showed that the actual

* 国家自然科学基金面上项目(51779009)资助

** 通信作者: 王会肖, 主要研究方向为农业水文水资源。E-mail: huixiaowang@bnu.edu.cn

高飞, 主要研究方向为农业水文水资源。E-mail: gaofei@mail.bnu.edu.cn

收稿日期: 2018-12-27 接受日期: 2019-03-13

* This study was founded by the National Natural Science Foundation of China (51779009).

** Corresponding author, E-mail: huixiaowang@bnu.edu.cn

Received Dec. 27, 2018; accepted Mar. 13, 2019

GDP supported by the groundwater resources increased from 2 636 million Yuan to 11 469 million Yuan and then decreased to 11 284 million Yuan. Before 2010, groundwater resources in Beijing were overloaded, but this alleviated after 2010. Although the actual GDP supported by groundwater resources was lower than theoretical GDP, groundwater resources had faced a serious situation; therefore, increase in the surface water supply and improvement of the comprehensive water efficiency would be two effective ways to improve groundwater resources management in Beijing.

Keywords: Beijing; Groundwater resources carrying capacity; Groundwater exploitation; Economic development

近年来,人口的不断增加和社会经济的快速发展导致了世界上许多国家和地区对水资源需求的增加,水资源供需矛盾逐渐加深,而由此产生的水争端问题也屡见不鲜^[1-3]。地表水和地下水是农业生产、工业生产以及其他行业生产的两个重要水源,然而在水资源短缺的干旱半干旱地区地表水相对匮乏,地下水就成为这些地区主要水源^[4]。以农业为例,全球范围内每年大约有 545 km³的地下水用于灌溉,约占总灌溉量的 43%^[5]。因此,地下水资源已经成为一个区域经济发展不可或缺的重要自然资源。合理高效地利用地下水资源不仅是实现经济社会可持续发展的重要途径,也是科研工作者亟待解决的重要科学问题之一。

华北平原是我国重要的粮食生产基地,然而华北平原地处半干旱、半湿润气候带,年降水量仅为 500~800 mm 左右,加之该地区人口密集,城市用水和农业灌溉均主要依靠地下水,地下水水资源供需矛盾十分突出^[6-8]。北京市地处华北平原北端,受大陆性季风气候变化的影响,该地区地下水资源储量变化的不确定性增加^[9]。与此同时人类活动也加剧了北京市地下水资源的供需矛盾。一方面北京地区作物生长季降水量不足,作物生长对水分的需求大量依靠地下水资源。除此之外,水利工程的建设和城市化改变了原有的城市下垫面特征,导致地下水的补给排泄条件发生变化,打破了地下水均衡状态^[10]。由此引发了诸如地下水位持续下降、地面沉降、生态环境退化等相关环境问题的产生^[11]。再加之受气候变化的影响,北京市降水量呈现下降趋势^[12],严重制约了北京的社会经济发展,地下水所承载的社会经济发展能力面临严重的挑战。一个地区的地下水资源储量和经济发展程度始终处于动态变化之中,并不是恒定不变的,因此非常有必要从时间尺度评价北京地下水资源对经济社会发展承载能力的变化特征,这不仅是北京市地下水资源可持续利用研究的重要理论基础,同时也是实现北京市地下水资源优化配置、合理规划的重要依据。

水资源承载力是指在一定的水资源开发利用阶段,满足生态需水后的可利用水量能够维持该地区人口、资源与环境有限发展目标的最大的社会-经济

规模^[13]。国内关于水资源承载力的研究从20世纪90年代起就不断出现,但是关于地下水资源承载力的研究相对较少^[14]。从研究区域上看,主要集中在华北^[15]、东北^[16]和西北^[17]等主要农业生产区域,这些地区农业生产主要依赖地下水资源,地下水问题相对较为突出。从研究方法上看,主要包括经验估算法、指标体系评价法和复杂系统分析法。刘敏等^[18]利用模糊综合评价方法对华北平原地下水资源承载力进行了分析,并利用灰色关联理论讨论了影响地下水资源承载力的因素。邢旭光等^[17]选取地下水开发率、地下水供水模数、地下水补给模数、地下水排泄模数、人均地下水占有量、单位GDP用水量和水资源重复利用率等7项评价指标采用主成分分析法对西安市的地下水资源承载力进行评价,结果显示西安市地下水承载力趋于饱和且继续开发潜力较小。门宝辉等^[19]采用物元分析法建立了地下水资源承载力评价模型,对关中地区的地下水承载力进行了综合评价,结果表明咸阳、宝鸡等地的地下水资源开发程度仍存在可开发的潜力空间。韩雁等^[20]分析了外调水对北京市水资源承载力的影响,结果显示南水北调使北京市的水资源承载力提高5%,但是该研究并未对地下水资源的承载力进行分析。孙清元等^[21]采用主成分分析方法对北京市地下水承载力的阈值进行了评价,但是未对北京市地下水承载力的变化特征进行分析。目前关于从时间尺度来评价地下水资源承载力变化特征的研究相对较少,且鲜有研究将地下水的利用量与社会经济发展程度联系起来评价区域地下水资源的承载能力。因此,本文从地下水最大可利用量以及地下水资源对社会经济发展的承载能力两个方面,分析和探讨北京市2001—2015年间水资源承载力的变化情况,为北京市地下水资源承载力的调控和地下水的可持续利用提供理论支持。

1 地下水资源承载力的定义和评价方法

1.1 地下水资源承载力的定义与计算

地下水承载力定义尚未统一标准,不同气候类型区其定义各不相同。北京市大部分区域位于华北平原山前平原地带,因此本文采用刘敏等^[14]在华北平原地下水承载力评价中提出的定义作为本文讨论地下水资源承载力的基础。本研究中地下水资源承

承载力(F)是指在一定社会发展条件下,以现有的经济社会发展水平为依据,以可持续发展为原则,以地下水最大可利用量为前提,地下水资源对区域经济社会发展的最大支撑能力以可支撑的社会经济发展规模(GDP)表示。根据上述定义,地下水承载力是地下水可利用量和用水效率的函数,它反映了地下水利用和社会经济发展的定量关系,可以表达为:

$$F = \eta \times W \quad (1)$$

式中: F 为地下水支撑的社会经济发展规模,以国内生产总值 GDP 表示,单位为元; η 为用水效率; W 是地下水可利用量,是以地形地貌、气象水文、地质、水文地质条件、环境条件、地下水开采技术条件等诸多自然和社会因素为自变量的函数。

在地下水可利用量定义的基础上,各种水源工程为用户提供的包括输水损失在内的毛供水量就是地下水的供水能力。公式(1)表明,地下水资源承载力与地下水可利用量和用水效率呈正比,对于一个特定的研究区而言,在已知地下水的最大可利用量(W_{\max})的条件下,就可以计算出该地区某一用水效率下,地下水对社会经济的理论最大承载力(F_{\max})。本研究计算 F_{\max} 所采用的 W_{\max} 为华北平原地下水可持续利用调查评价结果^[11]。计算实际地下水承载力 F_a 所采用的地下水可利用量 W 为 2000—2016 年北京市水资源公报提供的地下水供水能力数据。对于用水效率而言,主要是以国内生产总值产生的来源为依据,将用水效率划分为农业用水效率、工业用水效率和其他行业用水效率,是由该地区某一产业的总产值和该产业的总用水量的比值表示:

$$\eta = G/Q \quad (2)$$

$$\eta_{\text{综}} = \frac{a\eta_{\text{农}} + b\eta_{\text{工}} + c\eta_{\text{其他}}}{a + b + c} \quad (3)$$

式中: η 为某一产业的用水效率, $\eta_{\text{综}}$ 为综合用水效率, $\eta_{\text{农}}$ 为农业用水效率, $\eta_{\text{工}}$ 为工业用水效率, $\eta_{\text{其他}}$ 为其他行业用水效率, a 、 b 、 c 分别为农业用水量、工业用水量以及其他行业用水量占总用水量的权重。由表 1 可知北京市 2001—2015 年各行业的用水量情况,由此可知 2001—2015 年 a 、 b 、 c 的变化范围分别是 45%~17%、24%~10%、32%~73%。 G 为该产业的年总产值(元), Q 为该产业的年总用水量(m^3)。

1.2 地下水资源承载力评价方法

本文采用刘敏等^[14]提出的 R_G - R_Q 关系图法来评价年际尺度条件下北京市地下水资源承载力变化特征。首先计算北京市年际尺度的农业用水效率、工业用水效率和其他行业用水效率。由于每个行业的

用水量不同,综合用水效率不能通过简单的平均得到,因此综合用水效率应该体现不同行业的用水量,是不同行业用水量占总用水量的加权平均。其次,将研究区内综合用水效率最大值作为标准值,并根据地下水的最大可利用量计算该地区理论最大承载力 F_{\max} ,并用北京市实际地下水资源承载力 F_a 除以 F_{\max} ,得到该地区的经济发展程度(R_G),同时利用地下水的实际开采量 W_a 除以地下水可利用量 W 获得该地区的地下水开采程度(R_Q),分别以 R_G 和 R_Q 为纵坐标和横坐标做出 R_G - R_Q 图。通过 R_G - R_Q 图可以比较北京市不同年份地下水资源承载力状况。如图 1 所示,将北京市 2000—2015 年的 R_G - R_Q 投影到平面区域内,如果投影点位于 区域内,说明该年度北京市经济发展对地下水的依赖程度比较低,水资源对经济发展的约束较小;如果投影点位于 区域内,则说明北京市该年度已发生地下水超采现象,经济发展并未发生超载,但综合用水效率偏小,用水效率有待提高,如果提高综合用水效率,可使地下水恢复到未超采状态;如果投影点位于 区域内,则说明北京市不但发生了地下水超采,同时也出现了经济超载现象,即便提高用水效率,也不能使地下水恢复到未超采状态;如果投影点位于用水效率线上,则说明用水效率已到达最大值。

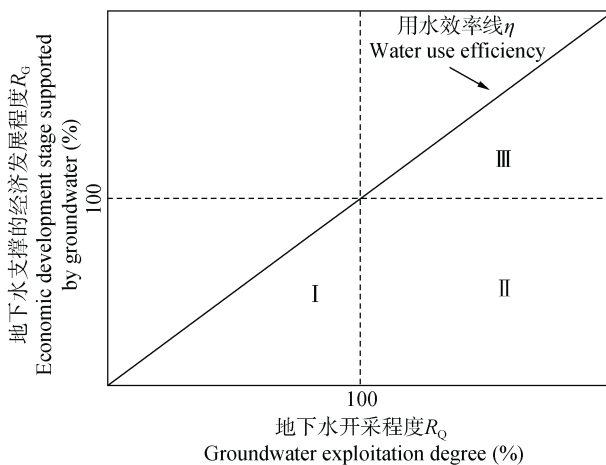


图 1 地下水开采程度(R_Q)与其支撑的经济发展程度(R_G)之间的关系^[14]

Fig. 1 Relationship between the groundwater exploitation degree (R_Q) and the economic development supported by the groundwater resources (R_G)

2 研究区概况与数据来源

北京位于华北平原西北边缘,除东南局部地区与天津市接壤外,其余地区均与河北省毗邻。东、西、北三面为山区,东南方向为倾斜平原。总面积

16 410 km²。据国家统计局统计北京市常住人口由 2000 年的 1 364 万增长到 2015 年的 2 171 万, 耕地面积则由 2000 年的 34 万 hm² 下降到 2015 年的 21 万 hm²(<http://data.stats.gov.cn/search.htm>)。北京是我国政治、经济和文化中心, 经济社会发展对水资源的需求量巨大, 是我国水资源紧缺的地区之一, 水资源供需矛盾十分突出^[22]。

北京市年平均降水量为 588 mm, 年内降雨时间分配不均匀, 6、7、8 月的总降雨量约占全年降雨的 70%。北京市年平均气温为 11.7 °C^[12]。地表水资源量、地下水资源量来自 2001—2015 年北京市水务

年鉴(表 1)。水资源总量为地表水资源量和地下水资源量的总和。地表水供水量、地下水供水量和总供水量源于 2001—2015 年北京市水务年鉴。北京市农业用水量、工业用水量和其他行业用水量数据来源于 2001—2016 年北京市水资源公报。北京市多年平均水资源量为 24 亿 m³, 其中地下水资源量为 18 亿 m³。北京市 GDP 数据来源于 2001—2015 年北京市经济统计年鉴(表 1)。地下水实际开采量数据来自 2000—2015 年北京市水资源公报。地下水资源最大可利用量数据来自华北平原地下水可持续利用调查评价结果^[11]。

表 1 2001—2015 年北京市地表水资源量、地下水资源量以及各产业用水量和产值

Table 1 Surface water and groundwater resources, and domestic, industrial and agricultural water uses, and GDP in Beijing from 2001 to 2016

年份 Year	地表水资源量 Surface water resources (10 ⁸ m ³)	地下水资源量 Groundwater resources (10 ⁸ m ³)	农业用水量 Agriculture water use (10 ⁸ m ³)	工业用水量 Industry water use (10 ⁸ m ³)	其他行业用 水量 Other water use (10 ⁸ m ³)	GDP (×10 ⁸ ¥)		
						农业 Agriculture	工业 Industry	其他行业 Others
2001	8	16	17	9	12	81	1 148	2 542
2002	5	15	16	8	12	82	1 259	3 054
2003	6	15	14	8	14	84	1 498	3 522
2004	8	17	14	8	13	85	1 868	4 212
2005	8	18	13	7	15	87	2 046	5 009
2006	7	15	13	6	15	87	2 218	6 008
2007	8	16	12	6	17	99	2 534	7 438
2008	13	21	11	5	19	111	2 642	8 639
2009	7	15	11	5	19	117	2 857	9 445
2010	7	16	11	5	19	123	3 388	10 931
2011	9	18	10	5	21	135	3 753	12 740
2012	18	22	9	5	22	148	4 060	14 142
2013	9	15	9	5	22	160	4 393	15 777
2014	6	14	8	5	24	159	4 663	17 122
2015	9	17	7	4	28	140	4 661	18 885

3 结果与讨论

3.1 北京市供水能力分析

图 2 为北京市 2001—2015 年地表水和地下水的供水量变化情况。北京市地下水供水量高于地表水供水量, 地表水、地下水和总供水量波动幅度较小。2000—2015 年间, 北京市地表水供水量为 4.8 亿~11.7 亿 m³, 地下水的供水量为 18.2 亿~27.2 亿 m³, 地下水的供水量呈现减少趋势。何维达等^[23]分析了北京市地表水和地下水的供水量特征, 研究结果显示: 地下水的供水量占总供水量的比例约为 63%且该比例呈现下降趋势, 该结果与本研究结果一致。北京市地下水供水量远高于地表水供水量的主要原因是北京市是地表水资源相对匮乏且时空分布不均匀, 河流断流现象较为严重, 生产活动主要依赖地下水^[24]。

3.2 北京市地下水资源承载力分析

地下水资源对区域的经济承载力一方面约束于地下水的可利用量, 另一方面也受到各行业的用水效率的影响。本研究分析了北京市 2001—2015 年的农业用水效率、工业用水效率和其他行业用水效率。如图 3 所示, 在 2001—2015 年期间, 北京市农业用水量和工业用水量分别从 2001 年的 17 亿 m³ 和 9 亿 m³ 减少到 2015 年的 7 亿 m³ 和 4 亿 m³, 而其他行业用水量从 2001 年的 12 亿 m³ 增长到 2015 年的 28 亿 m³; 与此同时, 农业用水效率、工业用水效率分别从 2001 年的 5 元·m⁻³ 和 125 元·m⁻³ 增长到 2015 年的 22 元·m⁻³ 和 1 226 元·m⁻³, 其他行业用水效率则从 2001 年的 206 元·m⁻³ 增加到 2013 年的 710 元·m⁻³, 2014 年和 2015 年其他行业用水效率出现了小幅减少趋势。整体来看, 折算后的综合用水效率从 2001 年的

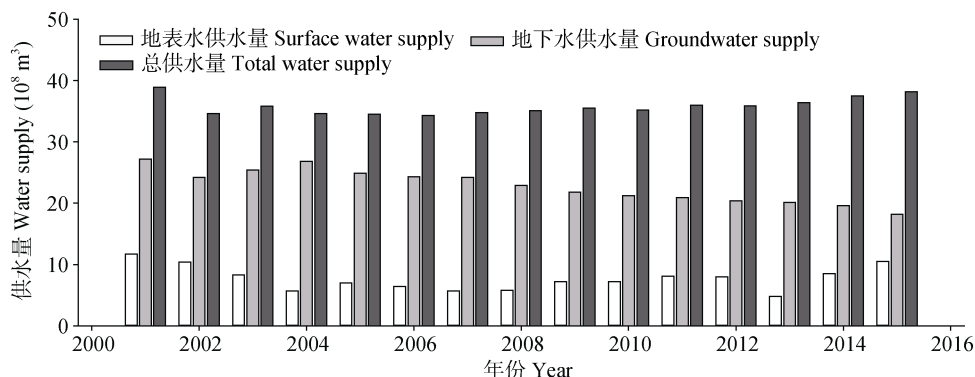


图 2 2001—2015 年北京市地表水、地下水供水量及其波动变化

Fig. 2 Fluctuation of water supply of surface water and groundwater in Beijing from 2001 to 2015

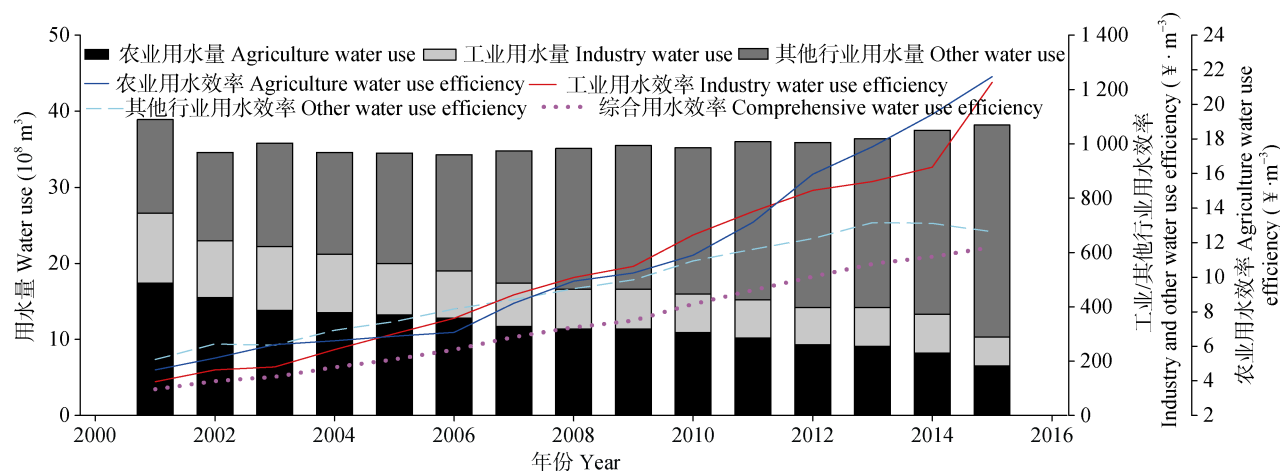


图 3 2001—2015 年北京市各产业用水量及其用水效率变化情况

Fig. 3 Domestic, industrial and agricultural water uses and water use efficiencies in Beijing from 2001 to 2015

97 元·m⁻³ 增长到 2015 年的 620 元·m⁻³。马东春等^[25]测算了北京市 2010—2015 年各行业的用水效率, 该研究定义的用水效率为单位生产总值所需的用水量, 这与本研究单位用水量产生的 GDP 有所不同, 但是都反映了用水量和 GDP 之间的关系, 是一个问题的两个方面。马东春等^[25]的研究结果同样表明工业和农业的用水效率呈现上升的趋势, 而其他行业的用水效率呈现下降的趋势。上述研究结果表明改善其他行业用水效率将是提高北京市综合用水效率的重要突破方向。

北京市各行业用水量和用水效率发生变化的同时, 地下水承载的 GDP 也发生了相应的变化。由图 3 可知北京市综合用水效率最大值为 620 元·m⁻³, 最大地下水可利用量为 21.3 亿 m³·a⁻¹^[11], 则社会经济的理论最大承载力(F_{\max})为 13 219 亿元。如图 4 所示, 2001—2015 年北京市地下水实际承载力 F_a 呈现上升趋势, 从 2001 年 2 636 亿元增长到 2014 年的 11 469 亿元, 2015 又下降至 11 284 亿元。整体上来看, 虽然北京市地下水实际支撑的 GDP(F_a)均低于地下水

理论支撑的 GDP(F_{\max}), 但是并不代表我们能够无限制地肆意开发地下水资源用于经济发展。在 2014 年以前 F_a 一直处于不断接近 F_{\max} 的状态, 地下水的承载力接近饱和状态。北京市地下水开发利用依旧面临严峻的挑战。孙清元等^[21]建立了地下水承载力评价模型和评价指标, 从地下水的人均供水量和地下水的开发利用角度分析了北京市地下水承载力状况, 研究结果显示仅有顺义和房山还存在承载潜力, 其他地区均达到饱和状态, 从整体状态来看与本研究结果一致。但是这种趋势从 2015 年开始出现缓和的趋势, 2001—2010 年 F_a 的年增长率为 14%, 而 2010—2015 年 F_a 的年增长率为 7%, F_a 增长的趋势出现了下降的趋势, 得到缓解的一个可能原因是在过去的 16 年间地下水用水量在缓慢减少。1988 年以前, 北京市地下水主要用于农业生产, 且灌溉用水是北京市农业用水的主要途径, 约占农业总用水量的 90%^[26]; 但是, 北京市 2001—2015 年以来, 农业用水和工业用水量在持续减少。主要原因是北京市的农作物播种面积从 60 万 hm² 减少到 15 万 hm²; 与

此同时, 由于农业节水灌溉措施的大力推广, 喷灌和滴灌的面积已经远远超过了大水漫灌的面积^[26-28], 很大程度上减少了地下水的使用量。同时, 一些以高

耗水和低效益为特点的工业产业退出了北京的工业领域并且提高了工业用水重复利用率和生产废水再利用率^[29-30]。

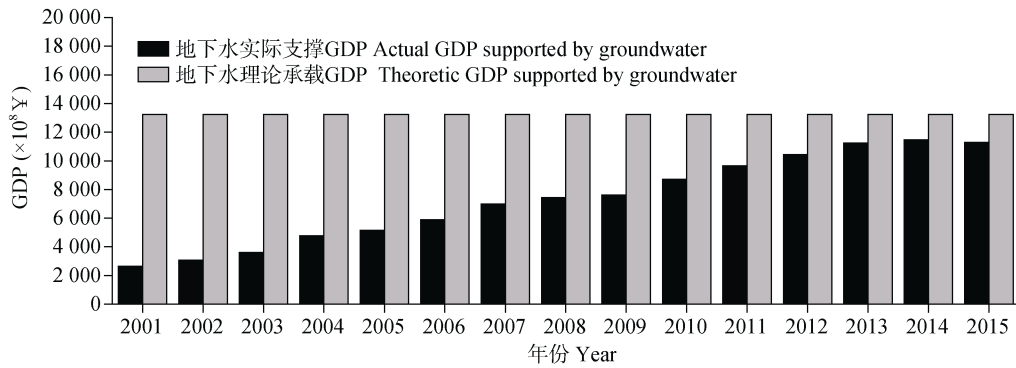


图 4 2001—2015 年北京市地下水资源实际承载与理论承载的 GDP 变化情况
Fig. 4 Changes of GDP supported by groundwater in Beijing from 2001 to 2015

3.3 北京市各年份地下水开采程度(R_G)和经济发展程度关系(R_Q)比较

将北京市 2001—2015 年地下水开采程度和地下水支撑的经济发展程度投影到 R_G-R_Q 关系图上。如图 5 所示, 北京市 R_G-R_Q 的投影点均位于 I、II 区域内, 表明北京市的地下水承载的 GDP 没有出现超载现象, 但是地下水的开采程度和其承载的经济发展程度有较大变化。多年平均 R_G-R_Q 投影点落在 I 区内, 说明 2001—2015 年间北京市的地下水平均开采量处于超采状态, 用水效率偏低。图 5 还表明, 用水效率 2001—2015 年是不断地接近最大综合用水效率。北京市 2015 年的 R_G-R_Q 投影点位于 I 区域内的用水效率线上, 说明北京市虽然用水效率已达到较高水平, 且地下水开采程度和地下水承载的 GDP 均未出现处于超采状态。在 2001 年到 2009 年间, 北京市地下水开采处于超采状态, 地下水承载的 GDP 均未出现处于超采状态。2010 年地下水开采程度刚好与经济发展程度相适应。2011 年至 2015 年, 地下水开采形势出现好转态势, 未出现超采情况。刘敏等^[14]评价了华北平原地下水资源的承载力状况, 结果表明 2011 年虽然北京市地下水开采未出现超采, 但是已接近超采状态, 这与本研究结果一致。此评价结果仅仅限于 2011 年, 但是没有分析地下水承载力随时间的变化情况。综合对比分析, 可以得出北京市地下水承载力 2010 年处于相对负载过重的状态, 2010 年以后负载状态有所缓解。

北京地下水超载现象得以缓解除除了得益于农业种植结构和灌溉方式的变化同时也得益于南水北调对北京市供水量的贡献。图 6 显示了北京市 2000—2017 年南水北调的供水量、地下水的使用量和地下

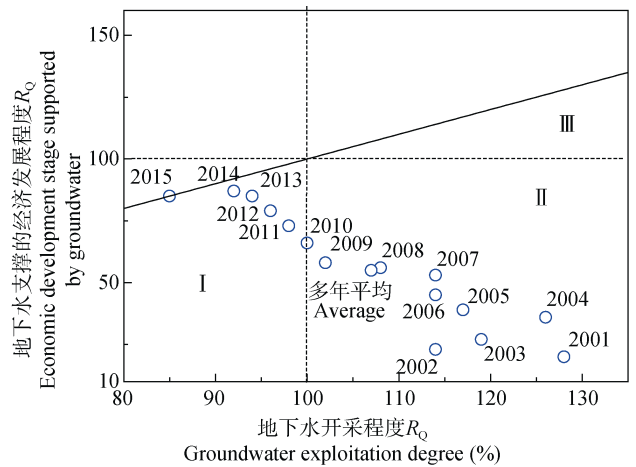


图 5 2001—2015 年北京市地下水开采程度(R_G)和经济发展程度(R_Q)关系)投影图
Fig. 5 Relationship between groundwater exploitation (R_G) and economic development supported by the groundwater resources (R_Q) in Beijing from 2001 to 2015

水埋深的变化情况。从 2000 年至 2011 年北京市地下水埋深下降了 9.5 m, 但从 2011 年至 2015 年下降不到 1 m(0.7 m), 地下水水位下降趋势放缓。与此同时, 南水北调对北京的供水量也从 2008 年的 0.7 亿 m^3 增长到 2017 年的 10.8 亿 m^3 , 增幅高达 10 亿 m^3 , 地下水的用水量也呈现略微减少趋势, 但由于北京市水资源及其降水有限^[31], 且北京城区上游用水量和人口不断增加^[32-33], 北京市地下水仍然没有达到采补平衡。南水大量供给北京后, 北京市仍需要过量使用地下水来保证供水。

3.4 北京市地下水承载力调控对策与途径

由地下水承载力的定义可知, 地下水承载力是地下水可利用量和用水效率的函数, 因此, 地下水承载力的调控途径重点从这两个方面考虑。

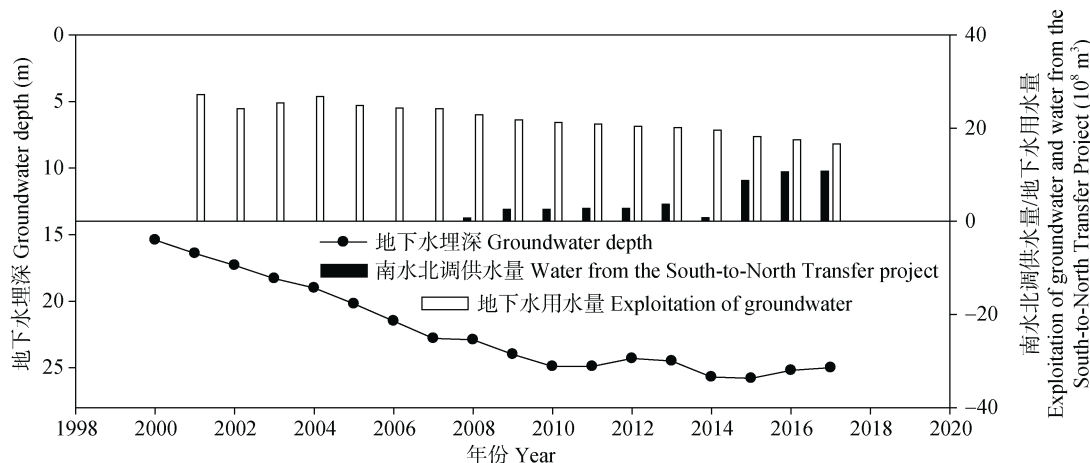


图 6 2000—2016 年北京市地下水埋深以及南水北调供水量和地下水用水量变化情况

Fig. 6 Variation of groundwater depth, groundwater use and water supply from the South-to-North Water Transfer Project in Beijing from 2000 to 2016

地下水的可利用量由于受到水文地质环境、经济技术条件和环境等的影响,其数值要以不破坏和影响生态环境为前提。因此,地下水可利用量应该根据研究区的地下水生态水位来确定。通过生态水位适宜区间范围与当前地下水位的对比,可以区分地下水过剩区和亏缺区,进而计算北京市的地下水可利用量。

用水效率与诸多社会因素相关,包括产业结构、节水技术和管理政策等。因此,不同产业应该采取不同的用水策略来提高用水效率。从农业发展角度,应该大力发展农业节水措施尤其是灌溉方式,同时,由于北京地处华北平原,冬小麦-夏玉米的种植制度消耗了大量地下水,应该调整种植模式,采用更为节水的种植制度。从工业产业角度分析,要提高工业用水的重复率,提高工业用水效率。

4 结论

本文收集了 2001—2015 年北京市地表水、地下水水资源量、地表水和地下水的供水量数据,以及各行业的用水量及其产生的 GDP 数据分析了北京市供水量的动态变化特征和各行业用水效率及其综合用水效率的时间变化特征,结合刘敏等^[14]提出的地下水承载力评价的方法,从时间尺度层面分析了北京市 2001—2015 年地下水承载力的变化特征并辨识了发生这种变化特征的原因。主要研究结果如下: 1)地表水和地下水是北京市两个重要的供水来源,受限于地表水资源时空分布不均匀,2000—2015 年北京市地下水的供水量高于地表水的供水量。且地表水、地下水和总供水量波动幅度较小,未来一段时间内地下水仍然是北京市主要的供水来源。

2)2000—2015 年,北京市农业用水效率和工业用水效率逐年升高,其他行业用水效率除了在 2014 年和 2015 年出现小幅度降低外,其他年份均处于升高趋势。折算后的综合用水效率仍然从 2001 年的 $97 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$ 增长到 2015 年的 $620 \text{ 元} \cdot \text{m}^{-3}$ 。北京市地下水的实际承载能力从 2001 年 2 636 亿元增长到 2014 年的 11 469 亿元,2015 年下降到 11 284 亿元。其中 2010 年北京市的地下水资源开采程度刚好与经济发展程度相适应。逐步完善和提高其他行业用水效率,是未来提高北京市综合用水效率的重要突破方向,也是进一步缓解北京市地下水利用超采现象的有力举措。3)在南水北调供水的影响下,北京市地下水位埋深下降速率放缓,但是为保证北京市的供水能力,在一段时间范围以内,北京市地下水仍然处于超采状态,但超采状态有所缓解。为此,应该继续改善北京市用水结构,减少地下水的开采利用,提高地表水的使用率,并进一步提高其他行业的用水效率。

参考文献 References

- [1] 顾国达,尹靖华. 全球中长期粮食供需趋势分析[J]. 华中农业大学学报: 社会科学版, 2014, (6): 6-16
GU G D, YIN J H. Analysis on mid and long-term global food supply and demand[J]. Journal of Huazhong Agricultural University: Social Sciences Edition, 2014, (6): 6-16
- [2] ALLAM M M, JAIN FIGUEROA A, MCLAUGHLIN D B, et al. Estimation of evaporation over the upper Blue Nile basin by combining observations from satellites and river flow gauges[J]. Water Resources Research, 2016, 52(2): 644-659
- [3] KI T, KANAE S. Global hydrological cycles and world water resources[J]. Science, 2006, 313(5790): 1068-1072
- [4] SUN C, REN L. Assessment of surface water resources and evapotranspiration in the Haihe River basin of China using SWAT

- model[J]. *Hydrological Processes*, 2013, 27(8): 1200–1222
- [5] DALIN C, WADA Y, KASTNER T, et al. Groundwater depletion embedded in international food trade[J]. *Nature*, 2017, 543(7647): 700–711
- [6] 刘昌明. 发挥南水北调的生态效益修复华北平原地下水[J]. *南水北调与水利科技*, 2003, 1(1): 17–19
LIU C M. Exploring an ecological benefit of South-to-North Water Transfers for rehabilitating groundwater systems in the North China Plain[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2003, 1(1): 17–19
- [7] 张凯, 周婕, 赵杰, 等. 华北平原主要种植模式农业地下水足迹研究——以河北省吴桥县为例[J]. *中国生态农业学报*, 2017, 25(3): 328–336
ZHANG K, ZHOU J, ZHAO J, et al. Agricultural groundwater footprint of the major cropping system in the North China Plain: A case study of Wuqiao County, Hebei Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(3): 328–336
- [8] 钱永, 张兆吉, 费宇红, 等. 华北平原浅层地下水可持续利用潜力分析[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(8): 890–897
QIAN Y, ZHANG Z J, FEI Y H, et al. Sustainable exploitable potential of shallow groundwater in the North China Plain[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(8): 890–897
- [9] 舒云巧, 陈素英, 雷玉平, 等. 京津走廊麦田蒸散及其与地下水位变化关系研究[J]. *中国生态农业学报*, 2006, 14(3): 71–74
SHU Y Q, CHEN S Y, LEI Y P, et al. The relationship between evapotranspiration in wheat field and the groundwater level in Beijing-Tianjin Corridor[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2006, 14(3): 71–74
- [10] 万思成, 李琼芳, 虞美秀, 等. 北京市平原地区地下水动态变化规律及影响因素分析[J]. *水电能源科学*, 2013, 31(12): 46–50
WAN S C, LI Q F, YU M X, et al. Groundwater dynamic changing characteristics and its influence factors of Beijing Plain Area[J]. *Water Resources and Power*, 2013, 31(12): 46–50
- [11] 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. The Assessment of Sustainable Groundwater Use in North China Plain[M]. Beijing: China Geology Press, 2009
- [12] 李鹏, 王新娟, 孙颖, 等. 气候变化对北京地下水资源的影响分析[J]. *节水灌溉*, 2017, (5): 80–83
LI P, WANG X J, SUN Y, et al. Analysis of the influence of climate change on groundwater resources in Beijing[J]. *Water Saving Irrigation*, 2017, (5): 80–83
- [13] 夏军, 朱一中. 水资源安全的度量: 水资源承载力的研究与挑战[J]. *自然资源学报*, 2002, 17(3): 262–269
XIA J, ZHU Y Z. The measurement of water resources security: A study and challenge on water resources carrying capacity[J]. *Journal of Natural Resources*, 2002, 17(3): 262–269
- [14] 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): 13–18
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 Transfers and Water Science & Technology*, 2017, 15(4): 13–18
- [15] 张光辉, 费宇红, 刘春华, 等. 华北平原灌溉用水强度与地下水承载力适应性状况[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(1): 1–10
ZHANG G H, FEI Y H, LIU C H, et al. Adaptation between irrigation intensity and groundwater carrying capacity in North China Plain[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(1): 1–10
- [16] 匡建超, 李宁, 姜林. 大庆市地下水资源承载力评价及对策研究[J]. *南水北调与水利科技*, 2007, 5(4): 46–49
KUANG J C, LI N, JIANG L. The potential evaluating and the countermeasure research on exploitation and utilizing of groundwater in Daqing Area[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2007, 5(4): 46–49
- [17] 邢旭光, 史文娟, 张译丹, 等. 基于主成分分析法的西安市地下水资源承载力评价[J]. *水文*, 2013, 33(2): 35–38
XING X G, SHI W J, ZHANG Y D, et al. Assessment of groundwater resources carrying capacity in Xi'an City based on principal component analysis[J]. *Journal of China hydrology*, 2013, 33(2): 35–38
- [18] 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 M, NIE Z L, WANG J Z, 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
- [19] 门宝辉, 王志良, 梁川, 等. 物元模型在区域地下水资源承载力综合评价中的应用[J]. *四川大学学报: 工程科学版*, 2003, 35(1): 34–37
MEN B H, WANG Z L, LIANG C, et al. Application of matter element model to evaluating on of resources carrying capacity of regional groundwater[J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2003, 35(1): 34–37
- [20] 韩雁, 张士锋, 吕爱锋. 外调水对京津冀水资源承载力影响研究[J]. *资源科学*, 2018, 40(11): 2236–2246
HAN Y, ZHANG S F, LYU A F. Research of effect on water resources carrying capacity in Beijing-Tianjin-Hebei region by water transfer[J]. *Resources Science*, 2018, 40(11): 2236–2246
- [21] 孙清元, 刘承国, 冯春涛. 北京市地下水资源承载力评价及其开发利用对策研究——主成分分析方法在承载力评价中的应用实证[J]. *中国国土资源经济*, 2007, 20(9): 21–24
SUN Q Y, LIU C G, FENG C T. Comprehensive evaluation on resource carrying capacity of groundwater and exploitation measures in Beijing District — Example of how to use the main component analysis method in evaluation on resource carrying capacity[J]. *Natural Resource Economics of China*, 2007, 20(9): 21–24
- [22] 张安京. 北京地下水[M]. 北京: 中国大地出版社, 2008
ZHANG A J. *Groundwater in Beijing*[M]. Beijing: China Geology Press, 2008
- [23] 何维达, 陆平, 邓佩. 北京市供水与用水政策的一般均衡分析——基于水资源 CGE 模型[J]. *河海大学学报: 哲学社会科学版*, 2015, 17(2): 72–76

- HE W D, LU P, DENG P. General equilibrium analysis of Beijing's water supply and consumption policies based on CGE-Water model[J]. Journal of Hohai University: Philosophy and Social Sciences, 2015, 17(2): 72-76
- [24] 周会珍, 汪爱华, 李丽, 等. 基于北京一号小卫星的北京及周边五大流域地表水资源监测与分析[J]. 遥感技术与应用, 2010, 25(2): 195-201
- ZHOU H Z, WANG A H, LI L, et al. Surface water detection and analysis in five basins in Beijing and its surrounding regions based on Beijing-1 small satellite data[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2010, 25(2): 195-201
- [25] 马东春, 刘建翠, 王宏伟, 等. 北京市产业部门用水效率研究[J]. 水利水电技术, 2017, 48(12): 27-33
- MA D C, LIU J C, WANG H W, et al. Study on water-use efficiencies of industrial sectors in Beijing[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(12): 27-33
- [26] 白鹏, 刘昌明. 北京市用水结构演变及归因分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(4): 1-6
- BAI P, LIU C M. Evolution law and attribution analysis of water utilization structure in Beijing[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(4): 1-6
- [27] 黄晶, 宋振伟, 陈阜. 北京市水足迹及农业用水结构变化特征[J]. 生态学报, 2010, 30(23): 6546-6554
- HUANG J, SONG Z W, CHEN F. Characteristics of water footprint and agricultural water structure in Beijing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(23): 6546-6554
- [28] 刘宝勤, 姚治君, 高迎春. 北京市用水结构变化趋势及驱动力分析[J]. 资源科学, 2003, 25(2): 38-43
- LIU B Q, YAO Z J, GAO Y C. Trend and driving forces of water consumed structure changes in Beijing[J]. Resources Science, 2003, 25(2): 38-43
- [29] 郭磊, 张士峰. 北京市工业用水节水分析及工业产业结构调整对节水的贡献[J]. 海河水利, 2004, (3): 55-58
- GUO L, ZHANG S F. Analysis of industrial water saving and contribution of industrial structure adjustment to water saving in Beijing City[J]. Haihe Water Resources, 2004, (3): 55-58
- [30] 张彪, 汪慧贞, 何建平, 等. 北京市工业用水发展趋势[J]. 给水排水, 2006, 32(S1): 153-156
- ZHANG B, WANG H Z, HE J P, et al. Trend of industrial water consumption in Beijing[J]. Water & Wastewater Engineering, 2006, 32(S1): 153-156
- [31] 廖强, 张士锋, 陈俊旭. 北京市水资源短缺风险等级评价与预测[J]. 资源科学, 2013, 35(1): 140-147
- LIAO Q, ZHANG S F, CHEN J X. Risk assessment and prediction of water shortages in Beijing[J]. Resources Science, 2013, 35(1): 140-147
- [32] 梁昊光, 刘彦随. 北京市人口时空变化与情景预测研究[J]. 地理学报, 2014, 69(10): 1487-1495
- LIANG H G, LIU Y S. Study on spatio-temporal change and simulation of population in Beijing based on census data[J]. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(10): 1487-1495
- [33] 夏军, 张永勇. 雄安新区建设水安全保障面临的问题与挑战[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(11): 1199-1205
- XIA J, ZHANG Y Y. Water resource and pollution safeguard for Xiong'an New Area construction and its sustainable development[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2017, 32(11): 1199-1205