



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2017.04.003

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, 33. LIU Min, NIE Zhenlong, WANG Jinzhe, 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, 33. (in Chinese)

华北平原地下水资源承载力评价

刘敏, 聂振龙, 王金哲, 田言亮, 汪丽芳, 刘少玉

(中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 石家庄 050061)

摘要: 华北平原地下水严重超采, 并带来一系列资源环境问题, 地下水资源承载力的可持续性面临严重挑战。本研究定义了地下水资源承载力的概念, 提出了一种定量评价地下水承载力的新方法, 并对华北平原地下水承载力进行了评价。结果表明, 华北平原地区地下水资源支撑的 GDP 从 2003 年的 15 608.18 亿元迅速提高到 2011 年的 37 584.9 亿元, 33.3% 的地市位于未超采未超载区; 华北平原整体及 57.2% 的地市均位于超采未超载区, 已发生地下水超采, 但通过提高用水效率, 未来社会经济规模仍有发展空间; 9.5% 的地市位于超采超载区。最后探讨地下水资源的承载力的提高途径, 主要包括增加地下水资源可利用量和提高用水效率两方面, 其中提高用水效率效果更显著。

关键词: 华北平原; 地下水资源承载力; 地下水开采程度; 社会经济发展程度

中图分类号: T V213 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2017)04-0013-06

Evaluation of groundwater resources carrying capacity in North China Plain

LIU Min, NIE Zhenlong, WANG Jinzhe, TIAN Yanliang, WANG Liliang, LIU Shaoyu

(Institute of Hydrogeology And Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, China)

Abstract: Groundwater is over exploited in North China Plain, and this brings a series of environmental problems. The sustainability of groundwater carrying capacity in NCP is faced with an unprecedented challenge. The definition of groundwater carrying capacity was put forward in this study and a new evaluation method for groundwater carrying capacity was proposed. The cities were grouped into three regions, i.e. the non over-exploited and non overloaded region (NN), the over-exploited but non overloaded region (ON), and the over-exploited and overloaded region (OO). The results showed that the GDP supported by groundwater was 1560.8 billion RMB in 2003, and it quickly increased to 3758.5 billion RMB in 2011. 33.3% of the cities belong to the NN region. NCP as a whole and 57.2% of the cities belong to the ON region, where groundwater has been over-exploited, but the water use efficiency is relatively low, so there is still room for social and economic development if the water use efficiency is enhanced. 9.5% of the cities belong to the OO region. In the end, we discussed the approaches to enhancing the groundwater carrying capacity, including increasing the available groundwater quantity and enhancing the water use efficiency.

Key words: North China Plain; groundwater carrying capacity; groundwater exploitation degree; social and economic development level

随着近几十年中国社会经济的快速发展和人口的剧增, 社会各方面对水的需求迅速增长, 水资源供

收稿日期: 2016-05-29 修回日期: 2016-10-22 网络出版时间:

网络出版地址:

基金项目: 973 项目(2010CB428805); 水环所基本科研业务项目(SK201306); 国土资源部公益性行业科研专项(201211079)

Funds: 973 Project(2010CB428805); Basic Research Project of Water Ring Institute(SK201306); Ministry of Land and Resources Public Welfare Industry Research(201211079)

作者简介: 刘敏(1982-), 女, 河北邯郸人, 博士, 助理研究员, 主要从事气候变化与水文水资源、水文地质等方面的研究。E-mail: agnes0505@163.com

通讯作者: 聂振龙(1972-), 男, 河北保定人, 博士, 研究员, 主要从事水文地质和水资源方面的研究。E-mail: nzlngj@163.com

需矛盾日益突出^[1]。华北平原地处半干旱半湿润地区,水资源有限且气候呈暖干化趋势^[2,3],作为地下水支撑农业高产的重要粮食产区之一,该区地下水长期过量开采,区域地下水位持续下降,形成了世界上最大的地下水降落漏斗,并引起地面沉降、地面塌陷、地裂缝等一系列资源环境问题^[4],引起了国际范围内的广泛关注,严重制约了区域社会经济的健康发展。“华北平原地下水资源对社会经济的承载力上限到底有多大?”、“是否还有可调控的空间?”等问题成为我国政府、公众、甚至国际社会共同关注的问题,也成为资源环境领域必须要回答的问题。开展华北平原地区地下水资源承载能力评价是回答上述问题的关键,这不仅是华北地区水循环和地下水资源可持续发展研究的重要课题,也对保障水资源生态环境、社会经济、粮食安全的协调可持续发展具有紧迫的现实意义。

目前,国际上对水资源承载力的单项研究成果较少,大多将其纳入可持续发展的理论范畴^[5-9]。在我国,关于水资源承载力的研究相对较多,尤其是20世纪90年代以来相关研究如雨后春笋般不断涌现^[10-15],提出的概念和研究方法也层出不穷。定义主要可以归纳为水资源开发规模论和水资源承载最大规模论两种,代表性研究分别为高彦春^[16]和阮本清^[17]等,持第二种观点的学者较多^[18-19]。水资源承载力的研究方法目前采用较多有常规趋势法、背景分析法、层次分析法、动态模拟递推算法、状态空间法、模糊评价方法、主成分分析法、系统动力学方法等,主要可归为经验估算法、指标体系评价法和复杂系统分析法等三类^[11],其中经验估算法一般精度较低,指标体系法评价指标的选取有一定的局限性,复杂系统法参数较多、不易把握和推广。关于地下水资源承载力的研究相对较少,尚处于探索阶段。直到2000年以后相关才不断增多^[20-24],各种方法和指标也颇为丰富,并成为水资源承载力研究领域的一个研究热点。地下水资源承载力的概念和方法也多直接沿用水资源承载力的方法,目前也尚无统一、明确的定义和成熟的方法。

基于以上背景,本研究拟从地下水资源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角度出发,定义地下水资源承载力的概念和内涵;并结合用水效率提出区域地下水资源承载力评价的新方法;并对现状条件下华北平原地区各城市地下水资源承载力进行评价,力求能明确、清晰表示地下水资源对社会经济发展的支撑能力,最后探讨地下水资源承载力的调控途径及提高对策。

1 地下水资源承载力的方法与理论

1.1 地下水资源承载力的概念与内涵

地下水资源既有自然属性也有社会属性。其自然属性表现在两个方面:其一是地下水资源量的大小取决于地下水系统获得补给的能力,必然受到气象水文、地形地貌、水文地质条件等因素的控制和影响,在这些自然条件的影响和控制下,从多年平均的意义上讲地下水系统从外界获得补给的能力是相对稳定的,即为地下水天然资源量;其二是作为自然环境的构成要素,地下水在形成、运移过程中与周围自然环境发生诸多的相互作用,对自然环境的维持与演变具有重要的甚至是不可替代的作用,因此,人类取用地下水要充分考虑到这部分用于维持自然环境的水量,以不引起严重环境问题为前提,即为地下水可利用量。然而,仅从自然属性角度考察地下水资源的承载力还不够,地下水在人类社会经济发展的各个领域都有举足轻重的作用,具有广泛的社会属性,不同的利用途径会产生不同的用水效率,且各行各业的用水效率均有上限,因而其对社会经济发展的支撑能力必然存在上限,即为地下水资源的承载力。显然地下水资源承载力一方面取决于自然环境约束下地下水系统的最大供水能力,另一方面又受社会经济发展阶段和地下水利用结构影响。

基于以上讨论,针对本研究目的给出地下水资源承载力的定义:地下水资源承载力是指在一定发展阶段下,以可预见的技术、经济和社会水平为依据,以可持续发展为原则,以地下水最大可利用量为前提,地下水资源对区域社会经济发展的最大支撑能力。以可支撑的社会经济发展规模(人口、GDP)表示。

1.2 地下水资源承载力评价方法

1.2.1 地下水资源承载力计算方法

为了定量评价地下水对经济发展的承载能力,必须考察地下水利用与社会经济发展之间的定量关系,简单的说,二者之间的关系可用下式表达:

$$G = \alpha \cdot Q \quad (1)$$

式中: G 为地下水支撑的社会经济发展规模(GDP),为一泛函数; $\alpha = \alpha(x_1, x_2, x_3, \dots)$,为用水效率,可以视为是不同用水行业节水水平、经济结构、经济技术水平、水资源管理政策、人口规模等诸多社会因素的函数; $Q = Q(y_1, y_2, y_3, \dots)$,为地下水可利用量,可以视为是地形地貌、气象水文、地质、水文地质条件、环境约束条件、地下水开采技术条件等诸多自然

和社会因素的函数。

由式(1)可知,地下水承载力是地下水可利用量和用水效率的函数。在相同的用水效率下,可利用量愈大,则承载力愈大;在相同的可利用量条件下,用水效率愈高,则承载力愈大。对于一个地区而言,如果已知其地下水系统最大供水能力(Q_{\max}),就可利用式(1)求出不同用水效率下该区地下水对社会经济的理论承载力(G_{\max})。

1.2.2 地下水资源承载力相对评价方法

由于不同城市地区的自然条件和社会经济结构等条件不同,导致不同地区的地下水可利用量和用水效率不同,为了比较不同地区地下水资源承载力状况,需要选择一个统一的衡量标准,为此,选取评价区域中综合用水效率最高地市的用水效率值(α_m)作为参考值(期望值),根据各地市的地下水最大可利用量,即可求出各地市的理论地下水资源承载力(G_m),然后以各地实际地下水资源支撑的 GDP(G_a)除以理论地下水资源承载力即可得到经济发展程度(以 R_c 表示),同时可用地下水资源开采量比地下水可利用量求出各地的地下水开采程度(R_Q)(式(2)–(5)),则可做出 R_c – R_Q 关系图(图 1)。

$$R_Q(\%) = 100\% \times W_e / W_a \quad (2)$$

$$R_c(\%) = 100\% \times G_a / G_i \quad (3)$$

$$G_{aj} = \sum_{j=1}^3 \alpha_{ij} \cdot Q_j \quad (4)$$

$$G_{ii} = \alpha_{\max} \cdot Q_i \quad (5)$$

式中: W_e 为地下水资源开采量; W_a 为地下水资源可利用量; G_a 为地下水实际支撑的 GDP 规模; G_i 为地下水理论可支撑的 GDP 规模; α_i 为第 i 个市第 j 产业的用水效率,由该市该产业总产值和该市该产业总用水量得出; Q_j 为用于第 i 市第 j 产业的地下水开采量。

由于用水效率的参考值(期望值)大于或等于评价区域内的最高值,因此,投影点只可能落在效率线上或其下方,这样就可以将不同地区的地下水耗用量和地下水支撑的 GDP 投影到一张图上进行对比分析。我们将斜率线下方划分为三个区(图 1),如果投影点落到Ⅲ区,则表明该区域经济发展对地下水资源依赖程度较低,经济发展基本不受水资源制约,但用水效率低,还有节水空间,未来发展空间大;若投影点落到Ⅱ区,则表明该地已发生地下水超采,但用水效率低,经济发展实际并未超载,现状经济发展受到水资源制约,但通过提高用水效率,在维持现状经济发展规模的条件地下水可由超采状态回归不超采状态,未来经济仍有发展空间,如通过提高用

水效率至区域参考用水效率,点 $P_1(R_{Q1}, R_{C1})$ (图 1(b)的横坐标值 R_Q 由 R_{Q1} 变成 R'_{Q1} ;若投影点落到Ⅰ区,则表明该地不仅发生了地下水超采,而且也出现了经济超载现象,尽管用水效率仍有提高的空间,但在没有增加地下水可利用量的情况下地下水资源很难达到采补平衡,未来经济发展将受到水资源的严重制约,如,即使用水效率提高至区域最高用水效率,点 $P_2(R_{Q2}, R_{C2})$ (图 1(b)的横坐标值 R_Q 由 R_{Q2} 变成 R'_{Q2} ,但 R'_{Q2} 仍大于 100%,地下水资源仍处于超采状态。

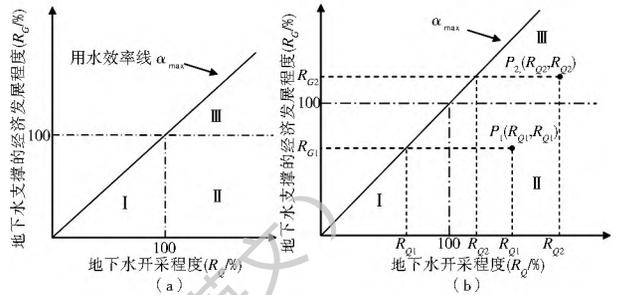


图 1 地下水开采程度(R_Q)及其支撑的经济发展程度(R_c)关系图

Fig. 1 The diagram of groundwater exploitation rate(R_Q) and the economic development degree(R_c) supported groundwater

2 研究区概况与数据来源

华北平原位于中国东部,东临渤海、西抵太行山,北到燕山、南抵黄河,总面积 13.9 万 km^2 。2011 年末总人口约 1.2 亿人,包括 21 个大中型城市。华北平原是中国的政治、经济、文化中心,也是重要的粮食生产基地。然而,华北平原是我国水资源最为紧缺的地区之一。年平均降水量为 558.6 $\text{mm}^{[4]}$,多年平均水资源量为 372 亿 $\text{m}^3^{[25]}$,其中地下水资源量占 60%左右^[26]。据统计,2011 年,华北平原所涉及的各县区总用水量为 353.86 亿 m^3/a ,占全国总用水量的 7.14%,其中,地下水开采量为 212.9 亿 m^3/a ,从行政分区看,地下水是河北平原的主要供水水源,地下水供水量占总供水量的 80.21%。本研究涉及到的地下水资源开采量数据来自河北省各市地质环境监测报告,地下水资源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^[4],供用水数据和经济数据均来自河北、山东、河南各省 2011 年水利统计年鉴和各省统计年鉴和经济统计年鉴。

3 结果与讨论

3.1 华北平原各地市地下水供水能力

根据最新地下水资源评价结果^[4],地下水资源

的最大供水能力由大到小依次为:保定、北京、新乡、石家庄、邯郸、唐山、聊城、德州、邢台、濮阳、廊坊、天津、安阳、衡水、沧州、焦作、秦皇岛、滨州、济南、鹤壁和东营(图 2),保定市最大,为 25.8 亿 m^3 ,鹤壁和东营最小,分别为 1.6 和 0.1 亿 m^3 。

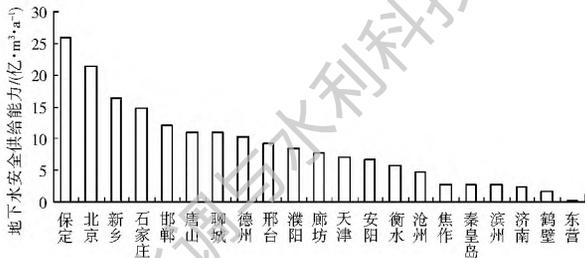


图 2 华北平原各地市地下水最大供给能力

Fig. 2 Groundwater supplying capabilities of different cities in North China Plain

3.2 地下水资源实际承载的经济规模

地下水资源对经济的支撑能力以地下水资源最大供给量为前提,但更取决于各用水行业和部门的用水效率。华北平原用水效率略高于中国平均用水效率,同样远低于国际先进水平。本研究统计了 2003 年和 2011 年华北平原各地市不同行业的平均用水效率,并折算成综合用水效率,即每方水平均可产生的 GDP 价值。华北平原平均用水效率在近 10 年间显著提高,从 2003 年的 51.3 元/ m^3 到 179.5 元/ m^3 (图 3),提高了 3 倍多。2011 年各城市用水效率从高到低见图 4,其中天津和北京遥遥领先,分别为 489.5 元/ m^3 和 451.4 元/ m^3 ,最低为衡水,仅为 54.5 元/ m^3 。

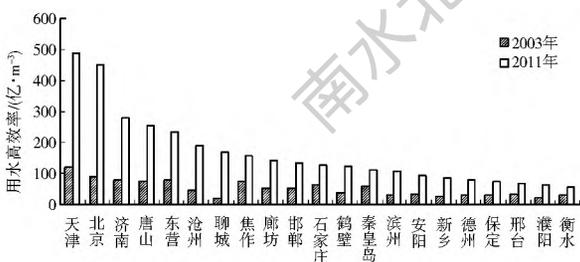


图 3 华北平原各地市用水效率

Fig. 3 Water use efficiency of different cities in North China Plain

用水效率提高的同时,华北平原各城市社会经济也迅速发展,地下水支撑的总 GDP 从 2003 年的 15 608.18 亿元迅速提高到 2011 年的 37 584.9 亿元,近 10 年间增长了 2 倍之多。其中,北京遥遥领先,地下水实际承载的 GDP 达到 9 435.1 亿元,东营和滨州最小,仅为 252 亿元。地下水实际支撑的 GDP 从大到小依次为北京、唐山、石家庄、天津、沧州、保定、邯郸、济南、聊城、廊坊、邢台、安阳、焦作、衡水、新乡、秦皇岛、德州、濮阳、鹤壁、东营、滨州。

然而,大多数地区地下水实际承载的 GDP 已超过了地下水的实际承载能力,其中有 14 个城市都已超载(图 4),总体而言,华北平原地下水资源实际承载的 GDP 也超过了当前用水效率下可安全承载的 GDP (31 325.9 亿元),超载率为 20%。

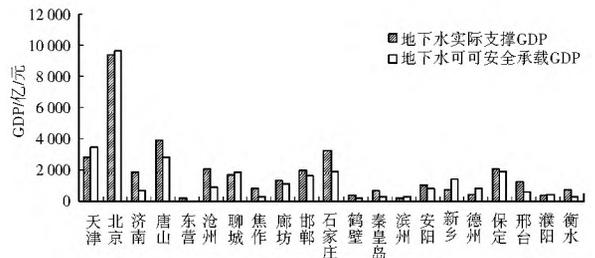


图 4 现状条件下华北平原各地市地下水对 GDP 承载能力

Fig. 4 GDP supported by groundwater of different cities in North China Plain

3.3 华北平原各地市地下水承载力比较

基于第二部分介绍的相对评价方法,我们取区内最大用水效率值 489.5 元/ m^3 (天津市)为参考用水效率计算各地市地下水理论可支撑 GDP 规模,并将各地市地下水开采程度和地下水支撑的经济发展程度投影到 $Rc-G_0$ 关系图上(图 5)。

如图 5 所示,华北平原作为一个整体的投影点落在 II 区,意味着华北平原虽然已发生地下水超采,但用水效率远低于区内最高用水效率,现状经济发展受到水资源制约,但通过提高用水效率,仍有较大的发展空间。新乡、德州、濮阳、滨州、聊城、北京等 7 市位于 I 区(占 33.3%),说明这 6 个地区经济发展对地下水资源依赖程度低,且用水效率有待提高,其中新乡、德州地下水资源开采程度较低,北京、聊城虽尚未超采,但已接近 100%,除北京外,其它五个城市用水效率较低,节水空间很大;这与刘敏等^[20]得出的新乡、濮阳、滨州和聊城位于尚具一定开发潜力的第一组的结论较为一致。保定、邯郸、廊坊、安阳、唐山、石家庄、鹤壁、邢台、秦皇岛、衡水、焦作、沧州等 12 个地区位于 0 区,占 57.2%,表明这 12 个地区经济发展对地下水资源依赖程度高,且已发生地下水超采,但用水效率低,经济发展实际并未超载,现状经济发展受到水资源制约,但节水空间很大,通过提高用水效率、减少地下水开采量,地下水资源仍可回归采补平衡状态,未来社会经济规模仍有发展空间;济南市位于 0 区,表明在目前用水水平下的用水效率下,该区已发生地下水超采和经济超载,若没有地下水可利用量增加的情况下,地下水将构成未来发展的重要制约因素。总的来说,华北平原地区大多数地市地下水已严重超采,地下水资源

承载力的可持续性面临严峻挑战,整体用水效率较低,现状经济发展受到水资源制约,这与刘敏等^[20]得出的“多数城市地下水资源开发利用潜力已接近其极限,部分出现严重超采”和钱永等^[27]得出的“华北平原浅层地下水已基本无开发潜力”的结论较为相似,但也有不同,本研究认为,通过提高用水效率、节水和压采,华北平原地下水资源仍可回归采补平衡状态,地下水对社会经济发展的承载力仍由提升空间。这与汪彦博等^[28]开源节流、不扩大开采但提高供水率、利用率(用水效率)、提倡节水以缓解水资源缺乏方案的理念一致;与华北平原地下水主要用于农业灌溉^[29]、而农业用水效率很低、亟待提高^[30-31]的结论也较为一致。

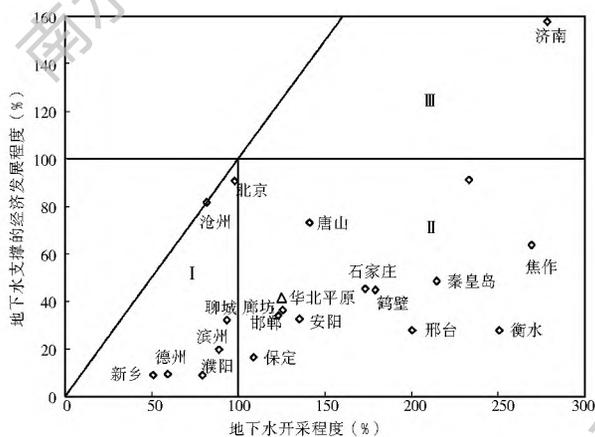


图5 华北平原地下水资源承载力 R_c - R_q 关系图

Fig. 5 Groundwater resources carrying capacity evaluation diagram of R_c and R_q in North China Plain.

3.4 地下水资源承载力的提高对策和调控途径

地下水承载力既具有自然属性又具有社会属性。影响区域地下水承载力的主要因素包括四个方面:自然因素(包括气候、水文条件和地质、水文地质条件)、环境因素(地质环境、生态环境)、社会因素(人口、科技进步、管理政策、宣传教育等)、经济因素(工业、农业、第三产业)。它们之间相互影响、相互制约,构成一个复杂的动力学系统。由地下水资源承载力的定义可知,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可从两个方面考虑。

(1) 增加地下水可利用量的途径。由地下水资源承载力的内涵可知,地下水可利用量又是水文地质条件、经济技术条件、环境条件等的函数。因而,结合不同地区的自身条件,可采用以下途径增加其地下水可利用量: 1 利用山前冲洪积扇的调蓄能力,通过人工雨洪调蓄,增加地下水的可循环利用量,如实施山前梯级水坝的地下水“回灌”工程^[26]; 0 在

中东部平原,发展浅层弱渗透含水层淡水开采技术,增加地下水可利用量; » 在中东部平原,发展微咸水改造利用技术,增加地下水可利用量。

(2) 提高的用水效率的途径。用水效率与经济技术水平、产业结构、管理政策、公众认识水平等息息相关。因而对不同用水部门和行业可采用以下途径提高用水效率: 1 发展农业节水技术,提高农业用水效率; 0 提高工业用水重复利用率,提高工业用水效率; » 调整产业结构,改变经济增长模式,提高总体用水效率; ¼ 依托科技进步,制定管理政策,加强宣传教育,提高公众节水意识,提高全社会用水效率。

4 结论

本研究主要结论包括几下四点: 1 地下水资源承载力是指在一定发展阶段下,以可预见的技术、经济和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,地下水资源对区域社会经济发展的最大支撑能力。 0 对区域地下水资源承载力评价建立地下水资源开采程度和社会经济发展程度关系图,将地下水资源承载力分为未超采未超载、超采未超载、超采超载三个区。 » 华北平原地区地下水支撑的总 GDP 从 2003 年的 15 608. 18 亿元迅速提高到 2011 年的 37 584. 9 亿元,近 10 年间增长了 2 倍之多。 R_c - R_q 关系图结果显示,仅有 33. 3% 的地市位于未超采未超载区;华北平原整体及 57. 2% 的地市均位于超采未超载区; 9. 5% 的地市位于超采超载区。 ¼ 可以通过增加地下水资源可利用量和提高用水效率两方面来改善目前的超采超载状态,其中,提高用水效率效果更显著。然而,地下水系统是个错综复杂、受各种天然因素和人为因素影响和制约的系统,本研究还未能把浅层水和深层水分开考虑且由于数据所限未考虑城市间的借调水问题,尚需进一步完善。

参考文献: (References)

- [1] 左其亭,张修宇. 气候变化下水资源动态承载力研究[J]. 水利学报, 2015, 46(4): 387-395. (ZU O Qiting, ZHANG Xiuyu. Dynamic carrying capacity of water resources under climate change[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(4): 387-395. (in Chinese))
- [2] Liu M, Shen Y, Zeng Y, et al. Trend in pan evaporation and its attribution over the past 50 years in China[J]. Journal of Geographical Sciences. 2010, 20(4): 557-568.
- [3] 刘敏,沈彦俊. 海河流域近 50 年水文要素变化分析[J]. 水文, 2010, 30(6): 74-77. (LIU Min, SHEN Yanjun. Change trend of hydrological elements in Haihe River Basin over the last 50 years[J]. Journal of China Hydrology, 2010, 30(6): 74-77. (in Chinese))

- Chinese)
- [4] 张兆吉, 费宇红, 陈宗宇, 等. 华北平原地下水可持续利用调查评价[M]. 北京: 地质出版社, 2009. (ZHANG Zhaoji, FEI Yuhong, CHEN Zongyu, et al. Investigation and assessment of sustainable utilization of groundwater resources in the North China Plain. [M], Beijing: Geology publishing House, 2009. (in Chinese))
- [5] F Villarroya, C R Aldwell. Sustainable management of groundwater resources[J]. Environmental Geology, 1998, 34(2/3): 111-115.
- [6] Walter Leal Filho et al. Climate Change and the Sustainable Use of Water Resources[M]. Germany: Springer-Verlag Berlin and Heidelberg GmbH & Co. K, 2012.
- [7] Olli Varis, Pertti Vakkilainen. China's challenges to water resources management in the first quarter of the 21st Century[J]. Geomorphology, 2001, (4): 115-129.
- [8] Prakash Chandra Tiwari, Bhagwati Joshi, Environmental Charges and Sustainable Development of Water Resources in the Himalayan Headwaters of India[J]. Water Resources Manage, 2012(26): 883-907.
- [9] Brian F. Thomas, James S. Famiglietti. Sustainable groundwater management in the Arid Southwestern US: Coachella Valley, California[J]. Water Resources Manage, 2015. DOI: 10.1007/s11269-015-1067-y
- [10] 朱一中, 夏军, 谈戈. 关于水资源承载力理论与方法的研究[J]. 地理科学进展, 2002, 21(2): 180-188. (ZHU Yizhong, XIA Jun, TAN Ge. A primary study on the theories and process of water resources carrying capacity[J]. Progress in Geography, 2002, 21(2): 180-188. (in Chinese))
- [11] 袁鹰, 甘泓, 王忠静, 等. 浅谈水资源承载能力研究进展与发展方向[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2006, 4(1): 62-67. (YUAN Ying, GAN Hong, WANG Zhongjing. Discussion on progress and development trend of the research on water resources carrying capacity[J]. Journal of China Institute Water Resource and Hydropower Research, 2006, 4(1): 62-67. (in Chinese))
- [12] 陈守煜, 胡吉敏. 可变模糊评价法及在水资源承载能力评价中的应用[J]. 水利学报, 2006, 37(3): 264-277. (CHEN Shouyu, HU Jimin. Variable fuzzy assessment method and its application in assessing water resources carrying capacity[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37(3): 264-277. (in Chinese))
- [13] 张宝成, 孙林岩. 国内外水资源承载力的研究综述[J]. 当代经济科学, 2006, 28(6): 97-101, 126. (ZHANG Baicheng, SUN Linyan, Literature review on water carrying capacity[J]. Modern Economic Science, 2006, 28(6): 97-101, 126. (in Chinese))
- [14] 袁伟, 楼章华, 田娟. 富阳市水资源承载能力综合评价[J]. 水利学报, 2008, 39(1): 103-108. (YUAN Wei, LOU Zhanghua, TIAN Juan. Comprehensive evaluation of Water resources carrying capacity in Fuyang city[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(1): 103-108. (in Chinese))
- [15] 宰松梅, 温季, 仵峰, 等. 河南省新乡市水资源承载力评价研究[J]. 水利学报, 2011, 42(7): 783-788. (ZAI Songmei, WEN Ji, WU Feng, et al. Evaluation of water resources carrying capacity in Xinxiang City[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(7): 783-788. (in Chinese))
- [16] 高彦春, 刘昌明. 区域水资源开发利用的阈限分析[J]. 水利学报, 1997(8): 73-79. (GAO Yanchun, LIU Changming. Limit analysis on the development and utilization of regional water resources[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997(8): 73-79. (in Chinese))
- [17] 阮本青, 沈晋. 区域水资源适度承载能力计算模型研究[J]. 土壤侵蚀与水土保持学报, 1998, 4(3): 57-61. (RUAN Benqing, SHEN Jin. Calculation model for moderately bearing capacity of regional water resources[J]. Journal of water and soil conservation, 1998, 4(3): 57-61. (in Chinese))
- [18] 惠泱河, 蒋晓辉, 黄强, 等. 水资源承载力评价指标体系研究[J]. 水土保持通报, 2000, 21(1): 30-34. (HUI Yanghe, JIANG Xiaohui, HUANG Qiang, et al. Research on evaluation index system of water resources bearing capacity[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2000, 21(1): 30-34. (in Chinese))
- [19] 龙腾锐, 姜文超, 何强. 水资源承载力内涵的新认识[J]. 水利学报, 2004(1): 38-45. (LONG Tengrui, JIANG Wenchao, HE Qiang. Water resources carrying capacity: new perspectives based on economic analysis and sustainable development[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004(1): 38-45. (in Chinese))
- [20] 刘敏, 聂振龙, 王金哲, 等. 华北平原地下水资源承载力模糊综合评价[J]. 水土保持通报, 2014, 34(6): 311-315. (LIU Min, NIE Zhenglong, WANG Jinzhe, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of groundwater resources carrying capacity in North China Plain[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(6): 311-315. (in Chinese))
- [21] 王荣晶, 张运凤, 张永华, 等. 大型灌区地下水资源承载力评价指标体系及评价方法研究[J]. 华北水利水电学院学报, 2009, 30(3): 4-8. (WANG Rongjing, ZHANG Yunfeng, ZHANG Yonghua, et al. Study on the theory and evaluation method of Large scale irrigation district groundwater resources carrying capacity[J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power, 2009, 30(3): 4-8. (in Chinese))
- [22] 韩晓军, 肖琳, 邱林. 基于突变理论的灌区地下水资源承载力评价方法[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(1): 113-116. (HAN Xiaojun, XIAO Lin, QIU Lin. The evaluation method of irrigation district groundwater resources carrying capacity based on catastrophe theory[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2011, 30(1): 113-116. (in Chinese))
- [23] 王海宁, 薛惠锋. 基于系统动力学的地下水资源承载力仿真研究[J]. 计算机仿真, 2012, 29(10): 240-244. (WANG Haining, XUE Hui feng. Simulation of groundwater resources reserve capacity based on system dynamics[J]. Computer Simulation, 2012, 29(10): 240-244. (in Chinese))
- [24] 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 Xuguang, SHI Weiruan, ZHANG Yidan, 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 (in Chinese))

- [25] 张光辉,连英立,刘春华,等.华北平原水资源紧缺情势与因源[J].地球科学与环境学报.2011,33(2):172-176.(ZHANG Guang hui, LIAN Ying li, LIU Chun hua, et al. Situation and origin of water resources in short supply in North China Plain[J]. Journal of Earth Sciences & Environment. 2011, 33(2): 172-176. (in Chinese))
- [26] 刘少玉,刘鹏飞,周晓妮,等.华北平原水资源合理开发利用的思路与举措[J].地球科学与环境学报.2012,34(3):57-61.(LIU Shao yu, LIU Peng fei, ZHOU Xiao ni, et al. Idea and action for the rational development and utilization of water resource in North China Plain[J]. Journal of Earth Sciences & Environment. 2012, 34(3): 57-61. (in Chinese))
- [27] 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 Yong, ZHANG Zhao ji, FEI Yu hong et al. Sustainable exploitable potential of shallow groundwater in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco Agriculture, 2014, 22(8): 890-897 (in Chinese))
- [28] 汪彦博,王嵩峰,周培疆.石家庄市水环境承载力的系统动力学研究[J].环境科学与技术.2006,29(3):26-28.(WANG Yar bo, WANG Song feng, ZHOU Pei jiang. Estimating water environmental carrying capacity in Shijiazhuang City using system dynamics[J]. Environmental Science & Technology. 2006, 29(3): 26-28 (in Chinese))
- [29] Weng S, Huang G, Li Y. An integrated scenario based multi criteria decision support system for water resources management and planning A case study in the Haihe River Basin[J]. Expert Syst Appl, 2010, 37: 8242-8254 DOI: 10. 1016/j. esw a. 2010. 05. 061
- [30] 李振声.控制华北平原深层地下水超采大力推广节水农业[J].中国科学院院刊,2006,21(5):367-368.(LI Zhen sheng. Controlling deep groundwater overexploitation and popularizing water saving agriculture in the North China Plain[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2006, 21(5): 367-368. (in Chinese))
- [31] 姚治君,林耀明,高迎春,等.华北平原分区适宜性农业节水技术与潜力[J].自然资源学报,2000,15(3):259-264.(YAO Zhi jun, LIN Yao ming, GAO Ying chun, et al. The water saving technologies and potentials for regional suitable agriculture in North China Plain[J]. Journal of Natural Resources, 2000, 15(3): 259-264. (in Chinese))