

引用格式:余灏哲,李丽娟,李九一.基于量-质-域-流的京津冀水资源承载力综合评价[J].资源科学,2020,42(2):358-371.[Yu H Z, Li L J, Li J Y. Evaluation of water resources carrying capacity in the Beijing-Tianjin-Hebei Region based on quantity-quality-water bodies-flow[J]. Resources Science, 2020, 42(2): 358-371.] DOI: 10.18402/resci.2020.02.14

基于量-质-域-流的京津冀水资源承载力综合评价

余灏哲^{1,2},李丽娟¹,李九一¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室,北京 100101;

2. 中国科学院大学 资源与环境学院,北京 100049)

摘要:京津冀地区人均水资源占有量低,用水压力大,水资源问题突出,因此亟需对该地区进行水资源承载力综合评价研究,以期水资源综合规划与高效利用、区域可持续发展等提供一定的理论基础与实践经验。为此,首先对京津冀水资源利用情况进行分析,提出了京津冀水资源所面临的问题,以问题为导向;其次对水资源承载系统进行解析,构建基于量-质-域-流内涵的京津冀水资源承载力综合评价指标体系;最后利用AHP、熵权法对评价指标进行主客观组合赋权,借助TOPSIS评价模型对水资源承载力进行综合得分计算。结果表明:①京津冀地区水资源总量匮乏,水资源过度开发利用,地下水持续超采等已经导致该地区水生态功能退化,形成了集中连片的地下水漏斗区等;②通过对研究区水资源承载力评价计算,2006—2016年京津冀水资源承载力综合评价得分总体上呈现波动式增长态势,表明水资源承载力有所增强,但整体分值不高,水资源压力形势依然严峻。基于此,京津冀亟需构建区域、流域水资源联动机制,以京津冀协同发展为契机,针对不同地区的发展基础与城市定位,遵循“以水量城”的城镇化政策和“以水定产”的产业政策,深入贯彻最严格的水资源管理条例,实现整个区域水资源承载力的提升。

关键词:水资源承载系统;水资源承载力;量-质-域-流;综合评价;京津冀

DOI :10.18402/resci.2020.02.14

1 引言

水资源作为基础性自然资源与战略性经济资源,支撑着经济社会的协调发展,具有不可替代的重要作用^[1]。水资源承载力是衡量区域可持续发展程度的重要指标,反映了水资源在特定时空背景下对经济社会发展的支撑能力。因此,应该科学认识水资源承载力的研究价值与意义,厘清水资源与城市之间的作用关系,有效解决由城市发展对水资源造成的负效益,不断提升水资源承载能力,做到水资源与城市发展和谐共生。

国外学者针对水资源承载力通常使用“可持续利用水量”“水资源的生态限度”“水资源系统的极限”或者“水资源紧缺程度”等来近似表述,主要将

水资源承载力纳入可持续发展研究之中,将水资源与土地、大气等其他等因素作为可持续发展的因子研究^[2-4]。国内有关水资源承载力的研究最早可以追溯到1985年的“新疆水资源承载能力和开发战略对策”研究^[5]。国内学者围绕水资源承载力概念内涵等理论框架的搭建,水资源承载力表征指标的选择以及水资源承载力计算评价模型的构建等相关内容进行了探索与发展,并陆续开展了多层级、多尺度的应用研究,例如在水资源承载力理论探索方面,夏军等^[6]指出水资源承载力作为水资源安全的一个基本度量,重新定义了水资源承载力的概念;段春青等^[7]提出了“社会经济-水资源-生态环境”水资源承载力理论框架,不断丰富发展了水资源承载

收稿日期:2019-07-10 修订日期:2019-12-05

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0401307;2016YFC0401402-04)。

作者简介:余灏哲,男,陕西汉中,博士研究生,研究方向为水文水资源。E-mail: yuhaozhe1992@126.com

通讯作者:李丽娟,女,吉林省吉林市人,研究员,博士生导师,主要从事水文与水资源研究。E-mail: lilj@igsnrr.ac.cn

2020年2月

力的理论构建。在水资源承载力计算评价模型方面,阮本青等^[8]、李丽娟等^[9]基于系统动力学方法构建了水资源承载力的计算模型,预测了未来不同水平年的水资源承载规模;惠洪河等^[10]研究了二元模式下水资源承载力的机理,计算了关中地区水资源承载力的支撑规模;左其亭等^[11]提出了气候变化下PSO-COIM方法来预测未来不同情景下水平年水资源承载力。

目前关于水资源承载力的研究形成了以下特点:①从理论基础来看,已经比较完善,与可持续发展理论等紧密相连,在各项研究中,都将区域可持续发展作为目标,以实现水资源可持续利用为中心任务,以水资源承载力影响因素分析、变化趋势预测为主要内容,除了研究水资源对人类社会经济影响外,更加强调了人类活动对水资源的响应研究。②从研究内容与方法来看,考虑到量-质-能三位一体的综合研究,研究模型众多,算法与拟合精度更为逼真与合理。③注重时空动态分析,除了评价历史时期水资源承载力,更加注重环境变化下(特别是气候变化与人类活动影响下)水资源承载力的时空变异。但是现有的水资源承载力更多地关注水资源量、水资源质的承载力,然而伴随社会的快速发展,经济社会对水资源的影响不仅表现在对水量、水质层面,对水域空间、水体流动带来的水体更新、能量循环等也存在相互作用^[12]。因此,本文试图在总结分析前人对水资源承载力评价研究的基础上,从水资源的水量、水质、水域、水流等内涵出发,构建一种符合其内涵的水资源承载力综合评价指标体系,以期为研究区水资源的高效利用、优化配置等提供一定的理论基础。

京津冀地区是中国的“首都圈”,是经济最具活力、产业最为发达、人口最为密集的区域之一,具有举足轻重的战略地位,然而水资源成为发展的最大短板。京津冀属于资源型严重缺水地区,人均水资源量仅为220 m³,远低于国际公认的极度缺水标准。其次,相关研究^[13]指出北京市水资源人均需求量约345 m³,天津市人均约279 m³;以此推算,北京市当地水资源只能承载667万人,相当于现有规模的40%;天津市的当地水资源只能承载力431万人,相当于现有规模的38%;由此可见,京津

冀地区当地水资源量难以支撑现有规模和经济发展的用水需求。此外,北京和天津的现实供水量均高于当地水资源量;北京市多年平均用水缺口约12亿m³,主要依靠地下水超采和从周边省份调水来弥补。由于人口快速增长,生活用水已逼近用水总量的1/2。天津市多年用水缺口约11亿m³,主要依赖引滦工程和引黄工程的调水来弥补。河北省多年平均水资源可利用量约150亿m³,而全省生产生活多年平均用水量约200亿m³,用水缺口高达50亿m³。因此,亟需对京津冀地区进行水资源承载力的综合评价研究,以期水资源综合规划与高效利用、区域可持续发展等提供一定的理论基础与实践经验。

2 研究区水资源概况

2.1 京津冀水资源利用时空演变特征

2.1.1 用水结构时空分析

图1反映的是京津冀各城市用水结构时空变化,可以看出京津冀地区用水总量呈现下降的态势。2006年京津冀用水总量为261.3×10⁸ m³,北京市、天津市、河北省分别占13:9:78;2016年为248.5×10⁸ m³,占比分别为16:11:73,用水总量下降了4.9%,其中北京市由34.3×10⁸ m³增长到38.8×10⁸ m³,天津市由22.9×10⁸ m³增长到27.2×10⁸ m³,北京市与天津市呈现逐年增加态势,而河北省则由204.1×10⁸ m³下降为182.5×10⁸ m³,河北省用水总量呈现下降趋势。具体分析各城市用水结构变化特征:京津冀地区农业用水总量呈现下降态势,2016年较2006年下降了18.0%,2006年京津冀农业用水比例为68.2%,而2016年为58.8%,下降了9.4%;在空间分布上,河北省农业用水比例依旧较高,虽然农业用水量逐年下降,但所有地市的农业用水比例均高于60%,其中,石家庄、邯郸、邢台、衡水、保定等市用水比例超过70%。京津冀工业用水量总体上呈现递减趋势,2016年工业用水比例为12.6%,较2006年的14.1%下降了1.5个百分点。其中,北京市下降比例最大,2016年较2006年下降了43.5%,天津市工业用水量则呈现增加趋势,2016年工业用水量为5.5×10⁸ m³,较2006年增加了19.5%,衡水、廊坊、沧州、承德等市工业用水比例呈现上升趋势,邯郸、保定等市用水比例呈现下降趋势。从生活用水



图1 京津冀用水结构时空变化

Figure 1 Temporal and spatial changes of water use structure in the Beijing-Tianjin-Hebei region

量来分析,2005年京津冀地区生活用水量比例反超工业用水量并呈现逐年增加趋势,2016年京津冀生活用水总量高达 $49.3 \times 10^8 \text{ m}^3$,生活用水量占比为19.8%,而2006年仅为5.5%,各城市生活用水量均呈现增加的趋势。生态环境用水量明显呈递增的态势,2006年京津冀生态环境用水量仅为 $1.62 \times 10^8 \text{ m}^3$,而2016年京津冀生态环境用水量为 $21.9 \times 10^8 \text{ m}^3$,其中北京市生态环境用水量为 $11.1 \times 10^8 \text{ m}^3$,河北省次之,天津市最少。

2.1.2 用水效率时空分析

从万元GDP用水量(图2)分析,京津冀地区13个城市的曲线均呈现指数函数变化,即在前期有一个较快的下降阶段,后期下降速率逐渐趋缓,表明在城市发展前期,随着经济的增长,各个城市不断通过调整产业结构,优化产业类型、发展节水产业、

提高水资源的利用效率等途径使得用水效率有一个较大幅度的降低,但随着发展进入后期,各方面

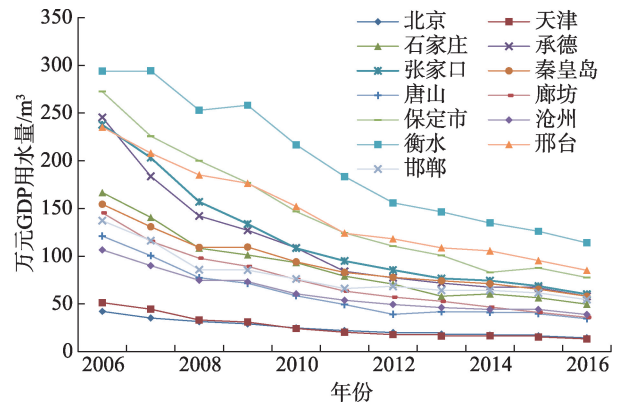


图2 京津冀万元GDP用水量变化

Figure 2 Water consumption changes of per ten thousand yuan GDP in the Beijing-Tianjin-Hebei region

2020年2月

举措都已经达到极值状态;用水量基本处于零增长阶段,下降率逐渐趋缓。万元GDP用水量曲线有比较明显的分层,其中北京、天津历年万元GDP用水量较其他城市均为最低,显示其用水效率最高,处于第一层;石家庄、秦皇岛、承德、廊坊、沧州、唐山等城市位于第二层,由2006年的100~160 m³下降到2016年100 m³以下;其余城市位于第三层,值得注意的是衡水市,其用水效率最低,变化曲线一直处于最上层。从万元工业增加值用水量来分析(图3),整体上呈现递降的态势,2010年前后是一个比较明显的转折点,2010年之前各城市用水量曲线并不规则,2010年后用水量变化率不大,用水量维持在较低水平,曲线明显趋缓。万元农业用水量的变化趋势也比较明显(图4),各城市均呈现下降趋势。

2.2 京津冀水资源存在的主要问题

京津冀在城市化进程、一体化建设中得到了快

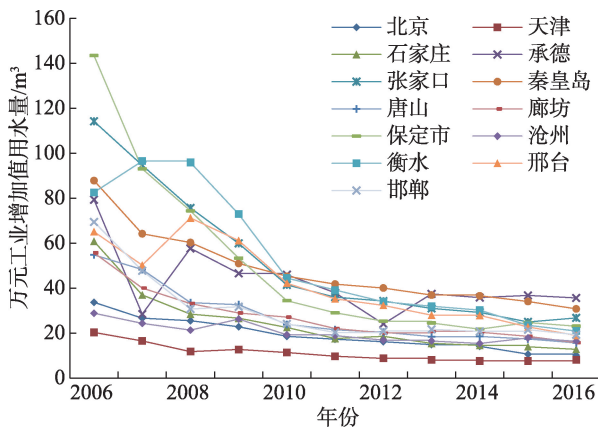


图3 京津冀万元工业增加值用水量变化

Figure 3 Water consumption changes of per ten thousand yuan industrial value added in the Beijing-Tianjin-Hebei region

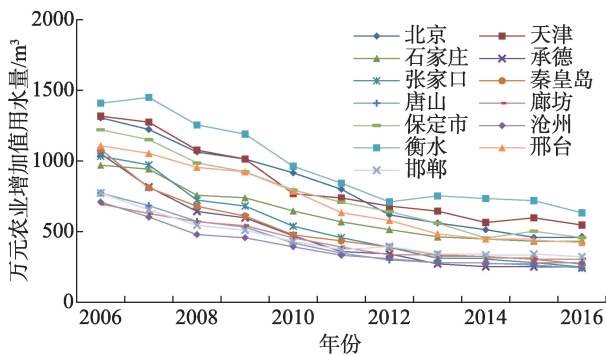


图4 京津冀万元农业增加值用水量变化

Figure 4 Water consumption changes of per ten thousand yuan agricultural value added in the Beijing-Tianjin-Hebei region

速的发展,但势必会对资源环境造成较大的影响,京津冀地区水资源短缺矛盾日益凸显,缺水范围逐步扩大、程度持续加剧。从现状来看,在气候变化与人类活动的双重影响下,京津冀地区可利用水资源量明显呈现递减趋势,水资源与城市经济发展存在较多的矛盾与问题^[4]:

(1) 水资源短缺矛盾突出

京津冀地区水资源呈现递减趋势,多年平均水资源总量由1956—1979年的 291×10^8 m³减少到1980—2000年的 219×10^8 m³,2001—2016年年均总量进一步减少到 184×10^8 m³。1956—2016年多年平均水资源量仅为 240×10^8 m³,其中河北省 191×10^8 m³,北京市 34×10^8 m³,天津市 15×10^8 m³,水资源量的日益衰减进一步加剧了区域水资源供需矛盾,水资源短缺给京津冀地区经济社会发展带来诸多不利影响,为了满足需求不得不过度开发利用水资源,但势必会引发一系列相关水生态问题。2018年京津冀地区与各水资源一级区水资源量横向比较见表1。

由表1可以看出,在横向比较中,海河流域在中国水资源一级区中水资源蕴藏量为最少,而作为海

表1 2018年京津冀地区与各水资源一级区水资源量

Table 1 Water resources of the Beijing-Tianjin-Hebei region and water resources Level I area, 2018

区域	降水量/mm	地表水资源量/亿m ³	地下水资源量/mm	水资源总量/亿m ³
北京	590.4	14.3	28.9	35.5
天津	581.8	11.8	7.3	17.6
河北	507.6	85.3	124.4	164.1
京津冀	559.9	111.4	160.6	217.2
松花江区	569.9	1441.7	553.0	1688.6
辽河区	511.3	307.8	161.6	387.1
海河区	540.7	173.9	257.1	338.4
黄河区	551.6	755.3	449.8	869.1
淮河区	925.2	769.9	431.8	1028.7
长江区	1086.3	9238.1	2383.6	9373.7
东南诸河区	1607.2	1505.5	420.1	1517.7
珠江区	1599.7	4762.9	1163.0	4777.5
西南诸河区	1147.9	5986.5	1537.1	5986.5
西北诸河区	203.9	1381.5	889.4	1495.3
全国	682.5	26323.2	8246.5	27462.5

河流域主体部分的京津冀地区其水资源总量匮乏,京津冀地区所面临的水资源整体形势比较严峻。

(2)水资源过度开发利用,导致流域水生态功能退化丧失

2000—2016年,京津冀年均地表水开发利用程度为63%,浅层地下水开发利用程度为130%。综合地表水与地下水,区域水资源开发利用程度高达109%。

水资源的过度开发利用导致河道断流、湿地萎缩、入海水量锐减。永定河、大清河、滹沱河等长期断流,1980年以来海河南系几乎无水入海或仅有少量的污水入海,1980—2010年北京、天津以南平原区17条主要河流年均断流336天。白洋淀、千顷洼等湿地面积较20世纪50年代萎缩了75%。

(3)持续超采形成了集中连片的地下水漏斗区

由于地下水的过度开采,河北、北京等地近30年来浅层地下水位普遍下降了20~40 m;20世纪70年代以来,平原地下水降落漏斗不断扩大和加深,形成了山前平原串珠状地下水降落漏斗和深层地下水复合漏斗。京津冀地下水超采区域漏斗已有20多个,面积达 $7 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。

2.3 未来发展趋势

京津冀一体化是党中央2014年提出的一项以加强环渤海地区经济协作的方案,实现京津冀协同发展是国家的重大战略^[4]。京津冀一体化除了有利于经济发展以外,对解决已暴露出的资源环境问题也大有裨益。以京津冀为统一体,通过顶层设计,加强跨界污染防治等措施,构建京津冀水污染齐防共治格局;根据整体水资源分布情况、总量等进行统一配置,合理确定水资源开发强度。北京、天津发达地区在得益于水资源统一配置的同时,水资源保护经费等也应在京津冀地区统筹安排使用,以此不断提升水资源承载力。

从未来发展看,京津冀地区经济和社会仍然将保持快速发展态势,城市建设规模依然快速扩大。但是水资源能否承载经济新常态背景下的发展需要,成为迫切需要研究的问题。在京津冀一体化协同发展过程中,及时开展水资源承载力综合评价研究对实现地区产业合理布局与优化升级、科学规划城市规模等提供前期的科学依据与理论指导。

3 研究方法 with 数据来源

3.1 研究方法

3.1.1 基于量-质-域-流的水资源承载力系统概念

(1)水资源承载系统

水资源承载系统由3部分构成:承载体、承载对象及利用方式(图5)。承载体,即自然水文循环系统,包括水资源、水环境、水生态等要素;承载对象,即人类经济社会生产,包括人口规模、产业、城镇发展等;利用方式,即承载体支撑承载对象在发展过程中的支撑、保障过程,主要包括水利工程建设、水资源利用水平、水资源管理水平等。由于利用方式的不确定性,水资源承载力研究难以直接回答承载对象的最大可承载规模。在水资源承载系统中,水循环系统作为承载体向人类生活生产提供水资源、水环境、生态等支撑与保障,此外,人类经济社会在发展过程中也会对水循环系统产生影响,二者相互作用,具有反馈联系。其中,水循环系统中水资源主要包含水量要素,水环境主要包含水质要素,水生态主要包含水域空间、水流动力要素。

(2)基于量-质-域-流的水资源承载力内涵

传统的水资源承载力更多地关注水资源量的承载力,从水的资源利用属性来讲,它主要是水量的取用与消耗过程,不仅如此,经济社会对水资源

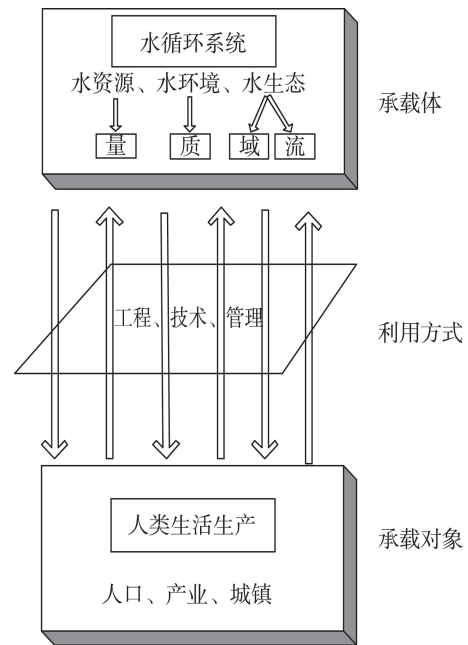


图5 水资源承载系统

Figure 5 Water resources system

2020年2月

开发利用的方式还包括:向水环境排放过量污染物、不合理地侵占水域空间、过度开发利用水能资源等,这些反映了水资源数量、水环境容量、水域空间、水流动力属性,简称为量、质、域、流^[14,15]。由此引发的水资源承载力问题也包括4个方面:①过量取用水。即取用水量超过了水资源可利用量的上限,导致地下水位下降、地面沉降、生态用水不足等问题;②超量排污。即排入河湖的污染物超过了水体纳污能力,使得水环境无容量,导致水域水质下降,严重时出现重金属水污染等;③过度占用、开发水域空间。即过度开发、占用湖泊等水域,引起自然水生态空间不足,导致水域生态系统退化等;④过度开发水能资源。即人为过度干扰河流自然水文状态导致河流连通性受阻,引发河流生态系统退化等。

因此,基于上述水资源开发利用过程及由此引发的主要生态环境问题类型,本文对水资源承载力内涵的界定主要从量(水资源数量)-质(水环境质量)-域(水域空间)-流(水动力过程)4个维度展开(图6)。

3.1.2 基于量-质-域-流的水资源承载力评价指标构建

水资源承载力评价指标的选取对评价结果起到至关重要的作用。本文首先分析了现有相关论文中所构建的评价指标体系^[16-20],发现大多数指标体系都考虑到了水资源量、水资源质的承载力,然而水域空间、水体流动带来的水体更新、能量循环等也是水资源承载力的关键内涵,应该成为评价指标的重要内容,但在相关研究中往往欠缺了这一部分。为此,在总结分析前人对水资源承载力评价研究

的基础上,从水资源承载系统着眼,将水资源承载力评价分为对承载体、承载对象、利用方式的评价,其中针对承载体的评价,从水资源的水量、水质、水域、水流等内涵出发,构建一种符合其内涵的水资源承载力综合评价指标体系,弥补前人的不足。

其次,本文基于文献统计方法,初步筛选出使用频率较高的指标,最后依据水资源承载力内涵与研究区特点,遵循指标选择的科学与准确性、整体性与层次性、独立性与代表性、区域性与易得性等原则,最终构建了京津冀水资源承载力综合评价指标体系。基于以上的分析,将指标体系划分为5个层级:

第一层级为目标层,本文的评价目标为京津冀水资源承载力综合评价。

第二层级为子系统层,包括水资源承载体、水资源承载对象、利用方式3个子系统。

第三层级为维度层,主要从量-质-域-流4个维度方面考虑。其中,水量维度:区域水资源自然禀赋是影响水资源承载力最为重要的因子,起到了“量”的保障。在水量维度因子选取中重点考虑水资源自然禀赋与水资源用水状况等。水质维度:区域生态环境本底条件、水环境质量状况也是一个重要的因子,优质的水环境质量能够为水经济社会系统提供水质优良的水源,起到“质”的保障。水域维度:足够的水域空间、森林覆盖面积、湿地面积等不仅为水资源的涵养、生态的保育提供自然空间,而且为水体的纳污自净提供物理、化学基础与场所,是水生态系统健康运行的基本要素。水流维度:修建大坝等水利工程会对河流起到分割、切断、阻隔作用,影响了河流正常的上下游物质能量传递,例如阻碍了河道中物种洄游繁衍等;河道的渠道化工程等改变了天然河道结构多样化的格局,致使河流生境的异质性降低,进而引起河流生态系统的退化^[21]。

第四层级为能力层,其中将能力层又划分为承载能力与负荷能力2类。承载能力反映了区域水资源对经济社会发展、环境生态系统良性运行的支撑能力,起到增强承载能力的作用。负荷能力是对水资源的可持续利用所带来的压力以及对水资源承载系统引起的扰动,起到的是削弱承载能力的作用。

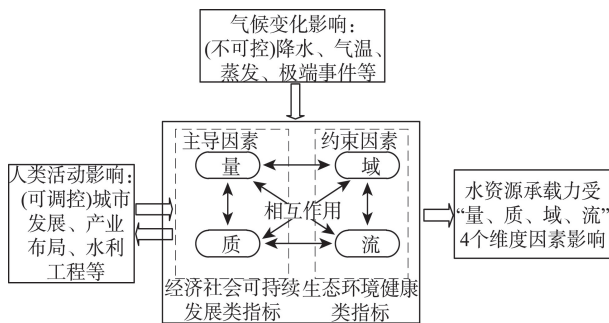


图6 基于“量-质-域-流”的水资源承载力概念内涵

Figure 6 A conceptual model of water resources carrying capacity based on “quantity-quality-water bodies-flow”

第五层级为指标层,指标层是逐级遵循每一层级的要求所遴选出来的具体指标。在充分考虑到上述影响因素的基础上,遵循指标的科学性、代表性、可获得性等原则,构建了以下指标体系(图7)。

在量维度选取人均水资源占有量、产水模数、干旱指数、水资源开发利用程度4项指标,其中:人均水资源占有量是指当地降水所形成的地表和地下的产水量与区域人口数量的比值,反映了水资源的丰裕程度,是表征水资源承载力量维度最为重要的一个指标,属于正向型指标;产水模数反映了区域单位面积的产水能力,为正向型指标;干旱指数为年蒸发量与年降水量比值,反映了气候的干旱程度,是水资源自然禀赋状况的重要表征,属于逆向型指标;水资源开发利用程度是用水总量与水资源总量的比率,体现了区域水资源开发利用的程度,国际上一般认为,对一条河流的开发利用不能超过其水资源量的40%的警戒线,该指标属于逆向性指标。

在质维度选取水功能区水质达标率、Ⅲ类及以上河长比例、单位面积废水排放量、万元工业产值COD排放量4项指标,其中:水功能区水质达标率表征了重要的江河湖泊水体质量状况;Ⅲ类及以上河长比例反映了优质河长比例,表征了河流水体的水质状况,属于正向型指标;单位面积废水排放量、万元工业产值COD排放量反映了区域废水与污染物的排放状况,属于逆向性指标。

在域维度选取水域面积比例、地下水开采率两项指标,水域面积比例是区域河流湖泊等水域面积与区域面积的比值,是表征域维度最贴切的指标,合理的水域面积具备重要的社会经济和生态服务功能,在合理范围内水域面积具有航运交通、调洪拦蓄、水源供给、净化污水等重要作用,属于正向型指标;地下水开采率为地下水开采量与地下水资源量之比,反映了地下水资源的开采程度,当地下水开采率超过1.2时为严重超采区,表明区域地下水资源得不到有效回补,处于严重失衡状态,间接反映了水域数量的特征。

在流维度选取库径比,库径比是区域水库的总库容量与地表径流量的比值,该指标能够表征水利工程对河流径流的调控能力,库径比越大表明水利工程对河流自然径流的干扰性越强,引起河流形态的不连续化和均一化,即水利工程对河流的分割作用切断或者损伤了河流廊道本身的连续性,改变了河流生态系统正常的上下游物质能量传递,影响物种洄游繁衍;天然河道的渠道化、截弯取直等工程,改变了天然河道结构多样化的格局,生境的异质性降低,进而导致河流生态系统的退化。

利用方式子系统选取万元GDP用水量、万元工业增加值用水量、亩均农田灌溉用水量、水利投入占GDP比重4项指标,其中:万元GDP用水量从宏观角度反映了区域整体水资源利用水平;万元工业

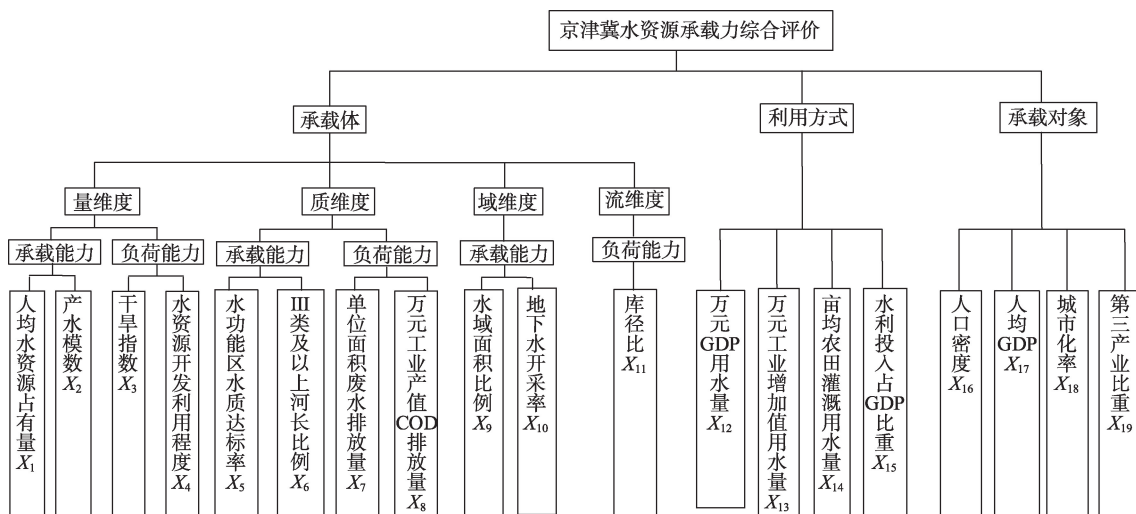


图7 水资源承载力评价指标体系

Figure 7 Evaluation index system for water resources carrying capacity

2020年2月

增加值用水量、亩均农田灌溉用水量是从工业用水、农业用水两个方面对用水水平的衡量;水利投入占GDP比重反映了区域当前水利投资情况,从侧面表征了不同区域水利发展的差异,一般认为当区域水利投入较多时,表明区域水利行业发展受到较大重视,因此在水利设施投入,水资源利用方式等方面比较完备与先进。

承载对象子系统选取人口密度,人均GDP、城市化率、第三产业比重4项指标,它们分别反映了水资源承载系统中水资源对人口数量、经济发展、城市规模、产业结构等支撑与影响,故作为表征承载对象的指标。

3.1.3 水资源承载力评价模型

(1) 评价指标赋权

为避免单一赋权而造成的误差,提高赋权的精度,采用主客观综合赋权法。其中客观赋权采用熵权法,主观赋权法采用AHP法。熵原本是信息论中的一个概念,是对不确定性系统的一种度量。熵权法就是根据各指标的变异程度,利用信息熵计算出各指标的熵权,当信息量越大,不确定性就越小,熵也就越小,反之同理。采用层次分析法(AHP)计算主观权重 W_2 ,由于篇幅限制,计算流程可参考文献[31]。

经计算得到的客观权重 W_1 与主观权重 W_2 进行线性叠合得到组合权重 W :

$$W = \alpha W_1 + (1 - \alpha) W_2 \quad (1)$$

式中: W 表示组合权重; W_1 表示客观权重; W_2 表示主观权重; α 为组合系数,一般情况 α 取0.5。

(2) TOPSIS 模型简介

1981年,Hwang教授提出了TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to an Ideal Solution)评价模型。TOPSIS模型属于多目标决策的一种方法,其原理是通过计算评价对象与最优、最劣理想解之间距离,从而对评价对象进行优劣排序。首先,该模型根据各待评对象数据计算出正理想解(最优)与负理想解(最劣);其次,分别计算各待评对象与正、负理想解之间的距离;最后,对所有对象进行排序,从而反映出评价结果的优劣。由于TOPSIS评价模型计算方法简洁,已广泛应用于资源环境评价等领域,详细计算过程见文献[32]。

3.2 数据来源

本文所构建的指标可以分为2类,第1类可从统计年鉴等途径直接获得,例如GDP、人口数量等;第2类则需要将各基本数据通过数学运算复合而成,例如万元工业增加值用水量是工业用水量与工业增加值之比,其中工业增加值来源于统计年鉴,工业用水量来源于水资源公报等。本文各评价指标所利用的基本数据分别为:水域面积、农田灌溉面积、城市行政区面积、水利投入、GDP总量、工业产值、工业增加值、城市人口数量、年末人口总量、人口密度、第三产业比重等数据主要来源于2006—2016年《北京统计年鉴》^[22]、《天津统计年鉴》^[23]、《河北经济年鉴》^[24];水功能区水质达标率,Ⅲ类及以上河长比例、废水排放量、COD排放量等数据主要来源于北京市、天津市、河北省《环境质量状况公报》^[25-27];水资源总量、蒸发量、降水量、水库库容量、地表径流量、水资源利用量、地下水开采率等数据主要来源于北京市、天津市、河北省《水资源公报》^[28-30]。

4 结果与分析

4.1 权重计算结果

利用2006—2016年京津冀3省市数据构建水资源承载力综合评价指标体系,依据AHP法、熵权法计算公式依次计算出主客观权重,最终计算结果见图8。

从系统层分析,熵权法和AHP法求得权重在数值上有所差异,但在整体趋势上基本是一致的,两

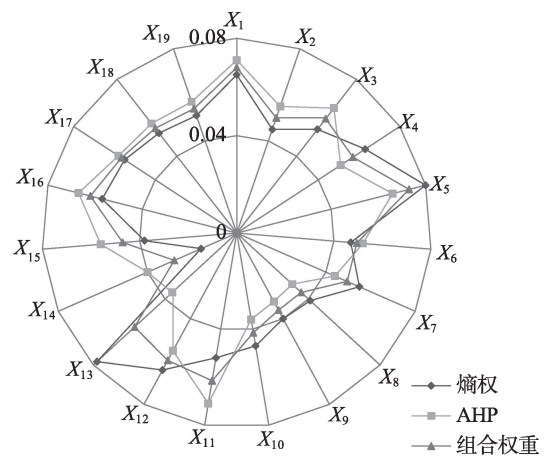


图8 评价指标主客观权重雷达图

Figure 8 Subjective and objective weight radar chart of evaluation index

种方法均得到承载对象>载体>利用方式;从维度层分析,熵权法为量>质>域>流,AHP法为量>质>流>域,两种权重计算方法得到量维度权重最大,质维度次之,而熵权法计算得到域维度较流维度更重要,AHP法计算得到流维度权重较域维度更大,因此本文取两种赋权方法的平均值作为最终权重值。

4.2 京津冀水资源承载力综合评价分析

(1) 承载体子系统评价

将京津冀地区2006—2016年数据代入TOPSIS评价模型,可以得到水资源承载体子系统综合评价得分,计算结果见表2。

总体来看,京津冀得分呈现增长态势,个别年份或阶段存在起伏,反映了不同维度下指标数据的波动变化。分值越大表明该维度水平越优,现结合部分年份的实际数据对评价结果解释说明,以证明评价结果的正确性。从量维度变化来看,京津冀3省市得分总体呈现波动式增长态势,其中存在2个明显的阶段变化,2006—2012年为第1个增长阶段,这一阶段中2008年的得分为极大值,2012—2016年为第2个增长阶段,2012年的得分为最大值。如2008年北京、天津、河北省三省市降水量分别为626.3 mm、640.7 mm、557.7 mm,京津冀地区年平均降水量达567.5 mm,降水量充沛,水资源总量为

220.48×10⁸ m³,其中河北省、北京市、天津市产水模数分别为184.9万、20.8万、15.4万m³/km²;2012年3省市人均水资源量为323.2、190.9、229.8 m³/人,其值均高于其他年份,因此2008年和2012年量维度得分较高。质维度得分变化与量维度相似,2012年质维度得分最大,2012—2016年平均得分高于2006—2011年,表明京津冀地区水环境质量在逐步提升,如京津冀地区万元工业增加值COD排放量已由2011年最高峰值的14.4 kg/万元下降到2016年的4.5 kg/万元;2016年河北省优质河长比例为42.5%,是2006年1.4倍。河北省与天津市域维度得分变化总体呈现增加态势,北京市得分波动较大,如2006年河北省地下水开采率高达174%,2012年下降为91%;2012年天津市地下水开采率为67%,因此天津市2012年得分较高,而2015年地下水开采率为101%,分值较低。从流维度得分来看,河北省优于天津市、天津市优于北京市,北京市得分呈现下降的趋势,如2013—2016年北京市库径比为1.92、2.16、1.46、1.73,均高于比值1,因此得分最低。

通过以上分析发现2012年各维度得分波动变化较大,经过分析得出这与相应的水资源保护、水环境保护等措施相关,2011年中央1号文件《中共中央国务院关于加快水利改革发展的决定》明确要求

表2 京津冀水资源量-质-域-流-维度层及承载体子系统评价得分

Table 2 Evaluation scores of water resources quantity-quality-water bodies-flow dimensions and water resources subsystems in the Beijing-Tianjin-Hebei region

		2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
量维度	河北	0.25	0.28	0.48	0.39	0.41	0.49	0.74	0.59	0.39	0.56	0.59
	北京	0.18	0.22	0.49	0.34	0.42	0.37	0.63	0.41	0.37	0.68	0.68
	天津	0.13	0.14	0.37	0.35	0.29	0.32	0.76	0.44	0.38	0.53	0.66
质维度	河北	0.25	0.28	0.48	0.39	0.41	0.49	0.74	0.59	0.39	0.56	0.59
	北京	0.18	0.22	0.49	0.34	0.42	0.37	0.63	0.41	0.37	0.68	0.68
	天津	0.13	0.14	0.37	0.35	0.29	0.32	0.76	0.44	0.38	0.53	0.66
域维度	河北	0.11	0.11	0.44	0.32	0.20	0.36	0.74	0.60	0.27	0.58	0.66
	北京	0.16	0.21	0.71	0.24	0.26	0.46	0.88	0.35	0.26	0.65	0.70
	天津	0.01	0.07	0.50	0.49	0.13	0.51	0.82	0.40	0.25	0.62	0.71
流维度	河北	0.41	0.46	0.62	0.50	0.65	0.69	0.73	0.57	0.39	0.57	0.78
	北京	0.72	0.22	0.43	0.07	0.08	0.24	0.57	0.10	0.01	0.30	0.19
	天津	0.54	0.60	0.78	0.70	0.45	0.64	0.80	0.65	0.60	0.69	0.77
承载体	河北	0.36	0.38	0.51	0.49	0.41	0.34	0.46	0.43	0.33	0.38	0.43
	北京	0.16	0.19	0.24	0.29	0.34	0.33	0.47	0.38	0.62	0.53	0.59
	天津	0.26	0.20	0.31	0.35	0.38	0.40	0.65	0.26	0.45	0.39	0.61

2020年2月

实行最严格的水资源管理制度,2012年国务院针对《最严格水资源管理制度》^[33]进行了全面部署和具体安排,建立覆盖省、市、县三级行政区域的用水总量、用水效率和水功能区限制纳污控制指标体系,实行最严格水资源管理的“三条红线”和“四项制度”。因此,京津冀3省市在硬性监督与考核下,使得各地区水环境与水生生态状况等得到有效治理与改善。

(2) 利用方式子系统评价

由图9可得,京津冀3省市水资源利用方式子系统评价得分均呈现逐年递增态势,从横向来看,其中北京市优于天津市,天津市优于河北省。在2006—2016年间,北京市万元GDP用水量最少,综合用水效率最高,并且万元工业增加值用水量也处于较优水平,水利投入占GDP比重仅次于河北省,因此其计算结果分值最高。天津市万元GDP用水量仅次于北京市,万元工业增加值用水量较其他城市最少,但水利投入比重最低,因此天津市得分处于第二位。河北省综合用水效率较低,以最优评价年份2016年为例,河北省万元GDP用水量高达 56.9 m^3 ,是北京市与天津市的3.9和4.2倍;万元工业增加值用水量是北京市与天津市的1.6和2.1倍;但河北省水利投入比重指标高于北京市与天津市。从整体来看,北京市与天津市分值较高,表明在水资源的管理、分配、利用等环节较优,但河北省得分增长速率较快,表明河北省也在逐步提高其用水效率,提升水资源管理水平。

(3) 承载对象子系统评价

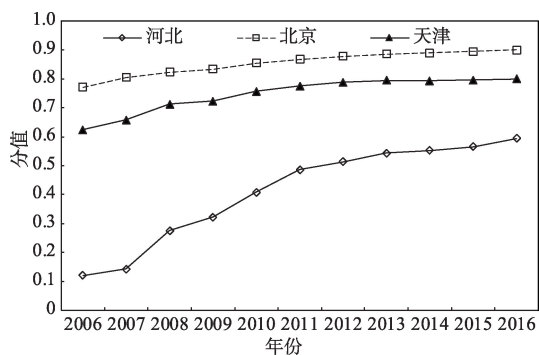


图9 京津冀水资源利用方式子系统评价得分

Figure 9 Comprehensive evaluation scores of water resources utilization mode in the Beijing-Tianjin-Hebei region

从图10可以看出,京津冀水资源承载对象子系统得分差异明显,其中北京市与天津市分值明显高于河北省。表明北京市与天津市水资源承载的人口、经济等规模多于河北省,如2016年北京市人均GDP高达11.8万元,天津市为11.5万元,而河北省仅为4.3万元;河北省2016年第三产业比重为41.7%,而北京市与天津市则在2006年就已经高于42%;北京市、天津市城市化率也高于河北省,2016年河北省为53.3%,而北京市与天津市为86.5%与82.9%,因此综合以上因素,北京市与天津市得分较高,河北省最低。

(4) 水资源承载力综合评价

同理,对2016年京津冀13城市进行评价分析,然后利用K-means空间聚类法对各计算结果划分成3类,分值 ≥ 0.5 的为优, $0.3 \leq \text{分值} < 0.5$ 为中,分值 < 0.3 的为劣,其综合评价空间分布见图11所示:张家口市、承德市水资源承载力综合评价得分均高于0.50,评价等级为优;秦皇岛市、唐山市得分为0.48、0.46,评价等级为中;其他城市得分低于0.30,评价等级为劣。

京津冀地区各城市因其自身水资源-水环境-水生态基础、经济基础、发展发向等不同,导致水资源承载力各有差异,其中张家口、承德综合评价得分较高,这是因为这两个城市生态环境状况较优,为重要的水源涵养地,生态环境本底质量较好。石家庄、沧州、邢台、廊坊、衡水和邢台这6座城市评价得分较低,其工业结构偏重,工业用水量大,水资源利用效率较低。此外,北京、天津得分也较低,北京

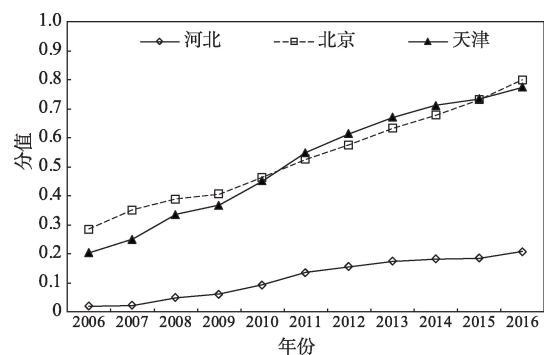


图10 京津冀水资源承载对象子系统评价得分

Figure 10 Comprehensive evaluation scores of water resources carrying objects in the Beijing-Tianjin-Hebei region

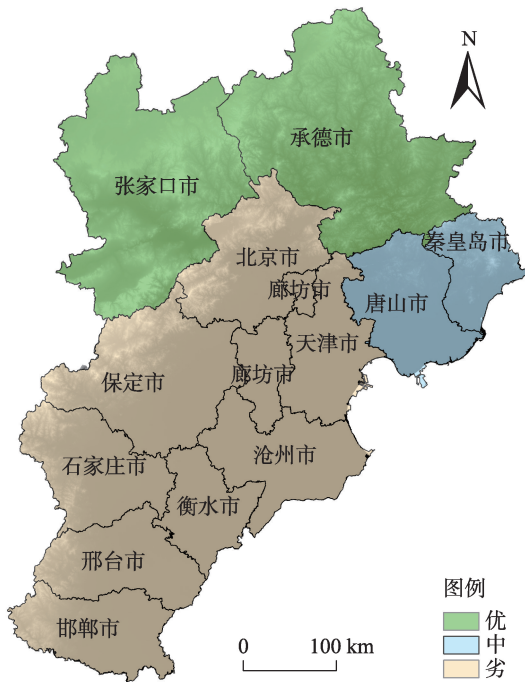


图 11 2016 年京津冀水资源承载力综合评价空间分布

Figure 11 Spatial distribution of water resources carrying capacity in the Beijing-Tianjin-Hebei Region, 2016

和天津市经济发达,人口密集,生活用水量大,如 2016 年北京、天津两市人口占京津冀的 33.36%,生活用水量高达 $22.50 \times 10^8 \text{ m}^3$,占京津冀生活用水量的 50.11%,水资源压力大。

从整体上来看,河北省各城市生产生活用水挤占生态用水问题比较突出,水生态损害情况严重。2016 年河北省废污水排放量为 $31.11 \times 10^8 \text{ t}$,全省入河排污口监测废污水入河总量为 $22.64 \times 10^4 \text{ t}$,COD 入河总量为 $8.73 \times 10^4 \text{ t}$,氨氮入河总量为 $1.27 \times 10^4 \text{ t}$ 。部分河流和湖泊的污染物入河湖量超出纳污能力,加之部分地区面源污染,特别是畜禽养殖污染较为严重,综合导致水质较差。河北省整体农业用水比例高,其中冬小麦种植面积大,2016 年冬小麦播种面积占耕地总面积的 26.5%,冬小麦的灌溉水源主要依靠地下水,而京津冀地区降水主要集中在汛期,因此,区域内地下水超采面积和超采水量事态严重,这也是加剧京津冀地区水资源超载的一个重要影响因素。与此同时,农业用水效率还有待提高,现状灌溉水有效利用系数仅为 0.65。因此,综合以上等因素,京津冀水资源承载力综合评价空间分布如图 11 所示。

5 结论与建议

5.1 结论

本文以京津冀行政单元为研究区域,首先对京津冀水资源所面临的形势进行了分析,在探讨水资源承载力概念及其内涵的基础上,基于水资源量-质-域-流内涵构建水资源承载力综合评价指标体系,最后利用主客观赋权法、TOPSIS 评价模型等对评价指标体系各个层级进行评价分析,结论如下:

(1)分析了京津冀地区水资源利用时空特征,得到京津冀地区水资源整体匮乏,水资源短缺矛盾突出,水资源利用效率不高,时空差异显著,尤其河北省在农业水资源高效利用等方面仍有较大提升空间。

(2)基于量-质-域-流的水资源承载力综合评价结果显示,2006—2016 年京津冀水资源承载力呈现波动式增加,表明水资源承载力有所增强,但得分偏低。从空间分布来看,除张家口市、承德市等级为优以外,其他 11 个城市水资源承载力得分等级均处于中或劣的等级,这表明京津冀地区水资源承载力整体情况较差,区域内部水资源-水环境-经济社会之间不平衡状况比较明显,其主要原因主要是由于伴随经济社会的发展,现有的承载体、利用方式不能满足承载对象的生长变化,尤其在受水资源短缺、水环境污染的影响,水资源超载情况更为窘迫。

(3)本文从水资源承载系统角度出发,剖析了水资源承载系统的要素构成,在此基础上考虑到水资源承载体的量-质-域-流内涵,构建了水资源承载力综合评价指标体系,并以此作为评价分析的框架。评价指标的科学、准确选择是水资源承载力评价研究的关键,本文在理论框架搭建、指标选择等方面有一定的新颖,但是未来需要更深入地挖掘其内涵,筛选更加具有代表性的指标,当现有指标不能满足更优的表征其内涵时,需要借助“3S”、大数据等手段,能够从其他参量中“反演”出相关代用指标,这样的指标构建过程及方法也是对水资源承载力评价研究的创新与突破,这也是本研究后续的工作重点与方向。

5.2 建议

京津冀地区想要提升水资源承载力,需从以下两方面着手。首先,就要打破“一亩三分地”的固定

2020年2月

思维定式,要以京津冀协同发展为契机,区域内加强生态环境保护协作,形成一条水资源保护—水环境治理—水资源管理等多领域的合作协作机制。第二,由于各城市经济基础不同,城市类型不同,功能定位不同,水资源禀赋、生态环境本底等不同,京津冀地区各地市不能“各扫门前雪”,应该共同面对风险与挑战,加强流域与区域间统筹管理,实现水源共建、环境共治、资源共享、风险共御,以实现区域水资源承载力的提升。

参考文献(References):

- [1] 左其亭,赵衡,马军霞.水资源与经济社会和谐平衡研究[J].水利学报,2014,45(7):785-792. [Zuo Q T, Zhao H, Ma J X. Study on harmony equilibrium between water resources and economic society development[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(7): 785-792.]
- [2] 党丽娟,徐勇.水资源承载力研究进展及启示[J].水土保持研究,2015,22(3):341-348. [Dang L J, Xu Y. Review of research progress in carrying capacity of water resources[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(3): 341-348.]
- [3] Yu H Z, Li L J, Liu Y, et al. Construction of comprehensive drought monitoring model in Jing-Jin-Ji Region based on multi-source remote sensing data[J]. Water, 2019, 11(5): 1077-1093.
- [4] 赵勇,翟家齐.京津冀水资源安全保障技术研发集成与示范应用[J].中国环境管理,2017,9(4):113-114. [Zhao Y, Zhai J Q. Beijing-Tianjin-Hebei water resources security technology R&D integration and demonstration application[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2017, 9(4): 113-114.]
- [5] 新疆水资源软科学课题组.新疆水资源及其承载能力和开发战略对策[J].水利水电技术,1989,(6):2-9. [Research Team of Water Resource in Xinjiang. Water resources in Xinjiang and its carrying capacity and corresponding development strategy[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1989, (6): 2-9.]
- [6] 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.]
- [7] 段春青,刘昌明,陈晓楠,等.区域水资源承载力概念及研究方法的探讨[J].地理学报,2010,65(1):82-90. [Duan Q C, Liu C M, Chen X N, et al. Preliminary research on regional water resources carrying capacity conception and method[J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(1): 82-90.]
- [8] 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 B Q, Shen J. Calculating model for moderately bearing capacity of regional water resources[J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1998, 4(3): 57-61.]
- [9] 李丽娟,郭怀成,陈冰,等.柴达木盆地水资源承载力研究[J].环境科学,2000,21(2):20-23. [Li L J, Guo H C, Chen B, et al. Water resource supporting capacity of Chaidamu basin[J]. Environmental Science, 2000, 21(2): 20-23.]
- [10] 惠洪河,蒋晓辉,黄强,等.二元模式下水资源承载力系统动态仿真模型研究[J].地理研究,2001,20(2):191-198. [Hui Y H, Jiang X H, Huang Q, et al. On system dynamic simulation model of water resources bearing capacity in duality mode[J]. Geographical Research, 2001, 20(2): 191-198.]
- [11] 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. [Zuo Q T, Zhang X Y. Dynamic carrying capacity of water resources under climate change[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2015, 46(4): 387-395.]
- [12] 吕一河,傅微,李婷,等.区域资源环境综合承载力研究进展与展望[J].地理科学进展,2018,37(1):130-138. [Lv Y H, Fu W, Li T, et al. Progress and prospects of research on integrated carrying capacity of regional resources and environment[J]. Progress in Geography, 2018, 37(1): 130-138.]
- [13] 祝合良,叶堂林,张贵祥,等.京津冀蓝皮书:京津冀发展报告(2013)[M].北京:社会科学文献出版社,2013. [Zhu H L, Ye T L, Zhang G X, et al. Beijing Tianjin Hebei Blue Book: Beijing Tianjin Hebei Development Report (2013)[M]. Beijing: Social Sciences Academic Press, 2013.]
- [14] 王建华,姜大川,肖伟华,等.水资源承载力理论基础探析:定义内涵与科学问题[J].水利学报,2017,48(12):1399-1409. [Wang J H, Jiang D C, Xiao W H, et al. Study on theoretical analysis of water resources carrying capacity: Definition and scientific topics [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(12): 1399-1409.]
- [15] 王建华,翟正丽,桑学锋,等.水资源承载力指标体系及评判准则研究[J].水利学报,2017,48(9):1023-1029. [Wang J H, Zhai Z L, Sang X F, et al. Study on index system and judgment criterion of water resources carrying capacity[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(9): 1023-1029.]
- [16] 胡启玲,董增川,杨雁飞,等.基于联系数的水资源承载力状态评价模型[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(5):425-432. [Hu Q L, Dong Z C, Yang Y F, et al. State evaluation model of water resources carrying capacity based on connection number [J]. Journal of Hohai University (Natural Science), 2019, 47(5): 425-432.]
- [17] 许杨,陈菁,夏欢,等.基于DPSIR-改进TOPSIS模型的淮南市水资源承载力评价[J].水资源与水工程学报,2019,30(4):47-52. [Xu Y, Chen J, Xia H, et al. Evaluation of water resource carrying capacity in Huai'an City based on DPSIR-improved TOPSIS model

- [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2019, 30 (4): 47-52.]
- [18] 刘雁慧, 李阳兵, 梁鑫源, 等. 中国水资源承载力评价及变化研究[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(5): 1080-1091. [Liu Y H, Li Y B, Liang X Y, et al. Study on water resource carrying capacity evaluation and change in China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(5): 1080-1091.]
- [19] 王红瑞, 巩书鑫, 邓彩云, 等. 基于五元联系数的水资源承载力评价[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2019, 49(2): 211-218. [Wang H R, Gong S X, Deng C Y, et al. Research on water resources carrying capacity based on Five-Element Connection Number [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2019, 49(2): 211-218.]
- [20] 伍文琪, 罗贤, 黄玮, 等. 云南省水资源承载力评价与时空分布特征研究[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(7): 1517-1524. [Wu W Q, Luo X, Huang W, et al. Research on the water resources carrying capacity and its temporal-spatial distribution characteristics in Yunnan Province, China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(7): 1517-1524.]
- [21] 董哲仁. 水利工程对生态系统的胁迫[J]. 水利水电技术, 2003, 34(7): 1-5. [Dong Z R. Stress of water projects on ecosystem[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2003, 34(7): 1-5.]
- [22] 北京市统计局, 国家统计局北京调查总队. 北京市统计年鉴(2007-2017)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007-2017. [Beijing Municipal Bureau of statistics, Beijing Survey Team of National Bureau of Statistics. Beijing Statistical Yearbook (2007-2017)[M]. Beijing: China Statistics Press, 2007-2017.]
- [23] 天津市统计局, 国家统计局天津调查总队. 天津市统计年鉴(2007-2017)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007-2017. [Tianjin Municipal Bureau of Statistics, Tianjin Survey Team of National Bureau of Statistics. Tianjin Statistical Yearbook (2007-2017)[M]. Beijing: China Statistics Press, 2007-2017.]
- [24] 河北省统计局, 国家统计局河北调查总队. 河北省经济年鉴(2007-2017)[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007-2017. [Hebei Provincial Bureau of Statistics, Hebei Survey Team of National Bureau of Statistics. Hebei Economic Yearbook (2007-2017) [M]. Beijing: China Statistics Press, 2007-2017.]
- [25] 北京市生态环境局. 北京市环境状况公报(2006-2016)[EB/OL]. (2017-05) [2018-04-12]. <http://sthjj.beijing.gov.cn>. [Beijing Municipal Bureau of Ecological Environment. Beijing Environmental Quality Bulletin(2006-2016)[EB/OL]. (2017-05) [2018-04-12]. <http://sthjj.beijing.gov.cn>.]
- [26] 天津市生态环境局. 天津市环境状况公报(2006-2016)[EB/OL]. (2017-06-05) [2018-04-12]. http://sthj.tj.gov.cn/env/env_quality/the_state_of_the_environment_bulletin/tianjin. [Tianjin Ecology and Environment Bureau. Tianjin Environmental Quality Bulletin(2006-2016)[EB/OL]. (2017-06-05) [2018-04-12]. http://sthj.tj.gov.cn/env/env_quality/the_state_of_the_environment_bulletin/tianjin.]
- [27] 河北省生态环境厅. 河北省环境状况公报(2006-2016)[EB/OL]. (2017-05) [2018-04-12]. <http://hbepb.hebei.gov.cn/hjzlzkgb>. [Department of Ecology and Environment of Hebei Province. Bulletin of Environmental Quality of Hebei Province(2006-2016)[EB/OL]. (2017-05) [2018-04-12]. <http://hbepb.hebei.gov.cn/hjzlzkgb>.]
- [28] 北京市水务局. 北京市水资源公报(2006-2016)[EB/OL]. (2017-10-13) [2018-04-12]. <http://www.beijing.gov.cn/so/s?qt=%E5%8C%97%E4%BA%AC%E5%B8%82%E6%B0%B4%E8%B5%84%E6%BA%90%E5%85%AC%E6%8A%A5&siteCode=1100000088&tab=all&toolsStatus=1>. [Beijing Water Authority. Beijing Water Resources Bulletin (2006-2016)[EB/OL]. (2017-10-13) [2018-04-12]. <http://www.beijing.gov.cn/so/s?qt=%E5%8C%97%E4%BA%AC%E5%B8%82%E6%B0%B4%E8%B5%84%E6%BA%90%E5%85%AC%E6%8A%A5&siteCode=1100000088&tab=all&toolsStatus=1>.]
- [29] 天津市水务局. 天津市水资源公报(2006-2016)[EB/OL]. (2016-09-28) [2018-04-12]. <http://swj.tj.gov.cn/Lonwin/viewBiao.do?type=bt&query=%E6%B0%B4%E8%B5%84%E6%BA%90%E5%85%AC%E6%8A%A5>. [Tianjin Water Authority. Tianjin Water Resources Bulletin (2006-2016)[EB/OL]. (2016-09-28) [2018-04-12]. <http://swj.tj.gov.cn/Lonwin/viewBiao.do?type=bt&query=%E6%B0%B4%E8%B5%84%E6%BA%90%E5%85%AC%E6%8A%A5>.]
- [30] 河北省水利厅. 河北省水资源公报(2006-2016)[EB/OL]. (2019-02-28) [2018-04-12]. <http://slt.hebei.gov.cn/dynamic/search.jsp>. [Department of Water Resources of Hebei Province. Hebei Water Resources Bulletin (2006-2016)[EB/OL]. (2020-01-16) [2018-04-12]. <http://slt.hebei.gov.cn/dynamic/search.jsp>.]
- [31] 廖冰, 张智光. 生态文明指标优化和权重计量的实证研究-基于PSIR与SEM相结合方法[J]. 长江流域资源与环境, 2018, 27(4): 779-791. [Liao B, Zhang Z G. Empirical research on optimizing indicators for ecological civilization and calculating indicators' weightings with the method of PSIR and SEM[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2018, 27(4): 779-791.]
- [32] 孙涵, 聂飞飞, 胡雪原. 基于熵权TOPSIS法的中国区域能源安全评价及差异分析[J]. 资源科学, 2018, 40(3): 477-485. [Sun H, Nie F F, Hu X Y. Evaluation and difference analysis of regional energy security in China based on entropy-weight TOPSIS modeling[J]. Resource Science, 2018, 40(3): 477-485.]
- [33] 朱永彬, 史雅娟. 中国主要城市水资源价值评价与定价研究[J]. 资源科学, 2018, 40(5): 1040-1050. [Zhu Y B, Shi Y J. Value evaluation and pricing of water resources in major cities in China [J]. Resource Science, 2018, 40(5): 1040-1050.]

Evaluation of water resources carrying capacity in the Beijing–Tianjin–Hebei Region based on quantity–quality–water bodies–flow

YU Haozhe^{1,2}, LI Lijuan¹, LI Jiuyi¹

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The Beijing-Tianjin-Hebei Region has low per capita water resources, high water use pressure, and prominent water resources problems. Therefore, it is urgent to carry out a comprehensive evaluation of water resources carrying capacity in this area in order to provide some theoretical basis and practical experience for the comprehensive planning and efficient utilization of water resources, regional sustainable development, and so on. This study first analyzed the background of water resources utilization in the Beijing-Tianjin-Hebei Region and the water resources problems faced by the region; second, based on the analysis of water resources system, a comprehensive evaluation index system of water resources carrying capacity in the region based on quantity-quality-water bodies-flow was established; finally, the analytic hierarchy process (AHP) and entropy weight methods were used to combine subjective and objective weights of evaluation indices, and the TOPSIS evaluation model was used to calculate the comprehensive score of water resources carrying capacity. The results show that: (1) The overall lack of water resources, the over-exploitation and utilization of water resources, and the continuous overexploitation of groundwater in the Beijing-Tianjin-Hebei Region have resulted in the loss of water ecological functions and the formation of concentrated and connected groundwater funnel areas; (2) The comprehensive evaluation scores of water resources carrying capacity in 2006-2016 show a fluctuating growth trend, indicating that the carrying capacity of water resources has been strengthened, but the total score is generally low and the pressure on water resources is grim. Based on this situation, the Beijing-Tianjin-Hebei Region urgently needs to build regional and watershed water resources linkage mechanisms, and take the Beijing-Tianjin-Hebei collaborative development policy as an opportunity. According to the conditions and position in the regional development plan of different cities, urban development and industrial production should consider water resources endowments, implement the most stringent regulations on water resources management, and finally achieve the improvement of regional water resources carrying capacity.

Key words: water resources system; water resources carrying capacity; quantity-quality-water bodies-flow; comprehensive evaluation; Beijing-Tianjin-Hebei Region