

引用格式: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, Lv 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.] DOI :10.18402/resci.2018.11.10

# 外调水对京津冀水资源承载力影响研究

韩雁<sup>1,2</sup>,张士锋<sup>1,2</sup>,吕爱锋<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所,北京 100101;

2. 中国科学院陆地水循环及地表过程重点实验室,北京 100101)

**摘要:**水资源短缺与水环境恶化已成为京津冀经济社会可持续发展的主要制约因素,水资源承载力评价是区域水资源合理配置的关键。本文从水资源系统对经济、社会系统的支撑角度出发,选取11个主要影响水资源承载力系统的因素作为评价指标,建立了基于水量、水质、水域、水流的水资源承载力评估方法,研究外调水对京津冀水资源承载力的影响。结果表明京津冀地区水资源承载力都属超载,天津、北京尤为严重。京津冀地区水资源承载的压力主要来自于水资源系统,水资源短缺是京津冀水资源承载力超载的主要因素,人均水资源量是影响区域水资源承载力的关键因子。外调水对改善京津冀水资源承载力具有一定贡献,尤其是对北京、天津的影响较为显著。在水资源短缺时期外调水的影响更为明显,在2000年特枯年,天津市引滦与引黄入津使得水资源承载力提高了13%。南水北调使得2015年北京、天津两地水资源承载力分别提高了5%。外调水对水资源承载力影响研究为京津冀水资源的合理利用提供了依据,对于实现水资源与经济社会的协调发展具有重要意义。

**关键词:**水资源承载力;京津冀;外调水;指标体系

DOI :10.18402/resci.2018.11.10

## 1 引言

当前人口、经济规模持续增长,区域水资源短缺问题日益突出,如何实现水资源与经济社会的协调发展成为当前水科学研究领域最为关注的热点问题之一<sup>[1,2]</sup>。科学评估区域水资源承载力是实现区域水资源可持续利用,解决水资源短缺问题的重要课题。自20世纪80年代末施雅凤先生等<sup>[3]</sup>提出了水资源承载力概念,水资源承载力在水资源科学领域得到广泛关注,但迄今为止仍然没有形成一个系统的、科学的理论体系。目前,水资源承载力研究主要集中于区域水量与水质对区域人口、经济社会规模的支撑,缺乏考虑水资源的水域、水流方面对经济社会的支撑作用。传统的压力-状态-响应(PSR)水资源承载力评价模型也很少涉及水域与水

流方面的因素。当前经济社会快速发展带来的水生态环境恶化问题日益突出,水资源对经济社会的支撑,不仅是水量方面的支撑,同时需要有良好的水生态环境,包括水质、水域面积、水流等。王建华等<sup>[4]</sup>从水量、水质、水域、水流四个维度提出了一个水资源承载力指标体系。从发展趋势来看,水资源承载力的研究需要全面分析水资源的各种功能属性对经济社会的支撑。

此外,随着经济社会发展对水资源需求的增加,流域与区域间的水资源调配成为经济社会发展的迫切需求。调水可以增加受水区的水资源可利用量,促进了区域经济社会发展,并增加生态环境用水<sup>[5,6]</sup>,关于外调水对区域水资源承载力的影响研究成果较少。研究外调水对区域水资源承载力的

收稿日期:2018-01-11,修订日期:2018-09-19

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0401307);“十三五”国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07101001);中国科学院特色研究所培育建设服务项目(TSYJS02)。

作者简介:韩雁,男,山西大同人,助理研究员,研究方向为水文水资源。E-mail: hanyan78@163.com

通讯作者:张士锋, E-mail: zhangsf@igsrr.ac.cn

2018年11月

影响将是水资源承载力研究的一个发展趋势<sup>[7]</sup>。冯耀龙等<sup>[8]</sup>从水资源承载力分析的角度,提出了跨流域调水应遵循的几方面原则,通过模糊数学方法建立了相应评价函数,给出了跨流域调水合理性的定量评价方法。严军等<sup>[9]</sup>分析了南水北调对长江流域水资源承载力的影响,认为调水后长江流域的水资源承载力会减弱,并提出了减小负面影响的对策。刘晓等<sup>[10]</sup>分析了南水北调对北京市水资源短缺风险的影响,研究表明越是缺水时期,南水北调对降低北京市水资源短缺风险效果越明显。水资源承载力研究不仅是水量的问题,还涉及到经济、社会与环境等方面。严景军<sup>[11]</sup>从协调水资源与经济、社会、环境关系出发,分析了“引江济太”工程对杭嘉湖地区各产业发展的影响。目前,关于外调水对区域水资源承载力研究不够深入,只是对调出、调入区的水量与用水的经济效益进行了分析,缺乏分析调水对区域水质、水域和社会的影响,以及水资源系统与经济社会系统间的相互制约关系。本文在水资源量、质、域、流水资源承载力概念的基础上,以京津冀作为典型区进行水资源承载力评估,分析外调水(南水北调、引滦入津等)对京津冀水资源承载力提升的影响,旨在为京津冀水资源综合管理提供支撑,对于促进水资源与经济社会协调发展具有重要意义。

## 2 研究方法

关于水资源承载力评价方法比较多,主要有常规趋势法<sup>[3]</sup>、模糊综合评价法<sup>[12]</sup>、系统动力学法<sup>[13]</sup>、多目标决策分析法<sup>[14]</sup>等。常规趋势法直观、简便,但由于忽略了水资源承载力指标间的相互关系,不能全面反映评价结果;系统动力学法是计算机实验仿真方法,但结构较为复杂,数据的需求量大;多目标分析法在目标的选定上有一定困难,在刻画水资源-经济-社会组成的复杂系统上有一定局限性;模糊综合评价法是通过建立指标体系、确定权重、选择评价模型对水资源承载力综合评价的方法,该方法的难点是如何建立切实反映水资源承载力的指标体系。通过综合分析上述4种方法的优劣和特点,本文采用模糊综合评价法研究外调水对区域水资源承载力的影响。

### 2.1 评价指标体系

指标体系的建立是研究水资源承载力的一个

关键问题,指标的选取不宜过多,但要具有代表性,能够反映水资源系统对经济社会系统的支撑体系。本文参照全国水资源供需分析中的指标体系和其它水资源评价指标体系及其标准<sup>[15,16]</sup>,结合外调水的影响,选取了11个主要影响水资源承载力系统的因素作为评价指标,以水资源承载力作为目标层,包含有水资源系统、经济系统、社会系统三个准则层,其中水资源系统涵盖水量、水质、水域、水流四个方面共6个指标,水量方面的指标为人均水资源量、产水模数、水资源开发利用率,水质方面为水体水质,水域方面为水域面积率,水流方面为库径比指数;经济系统反映承载系统的适应能力,包括人均GDP和第三产业比重2个指标;社会系统反映承载系统的压力状况,包括人口密度、城市化率以及建成区面积比重3个指标,见图1。

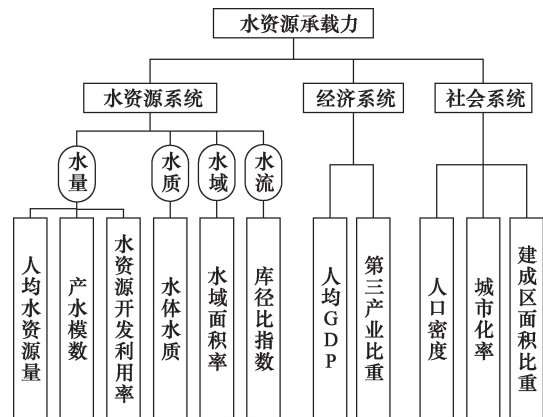


图1 基于量-质-域-流水资源承载力评价指标体系

Figure 1 The index system of water resources carrying capacity based on water quantity, water quality, water area and water flow

水资源承载力具体的11个指标含义如下:

(1)人均水资源量:区域水资源量与人口数比值,反映水资源人均占有情况,是最重要的水资源参数,人均水资源量越大,区域的水资源承载力越大。为了研究外调水对区域水资源承载力的影响,本文分为考虑外调水和不考虑外调水两种情景计算人均水资源量。

(2)产水模数:本地区水资源总量除以区域土地面积,反映区域水量特征。产水模数越大,反映了单位面积水资源量越多,区域的水资源承载力越大。

(3)水资源开发利用率:水资源利用总量与水资源总量之比,反映水资源供需特征,水资源开发

利用率越大,水资源开发强度越高,区域水资源系统承载压力越大。为了研究外调水对区域水资源承载力的影响,本文分考虑外调水和不考虑外调水两种情景计算水资源开发利用情况。

(4)水体水质:水资源系统指标,反映区域的水质与水生态环境特征,由统计河流的水质类别比例决定,直接给出隶属度。其中I、II类水质为优,III、IV类水质为临界超载,V类水质超载,劣V类为严重超载。2015年北京市河流II类、III类、劣V类的水质比例为45.9%、35.6%和18.5%。无外调水情景下的水体水质可根据调入水量及其水质类别,通过加权平均估算得到,经估算2015年无外调水情景下北京市河流II类、III类、劣V类的水质比例为41.0%、38.8%和20.2%。

(5)水域面积率:区域内河流湖泊等水域面积与区域总面积之比,可通过全国土地利用影像解译获得,反映了水域的特征,水域面积率越大,水生态环境越好,区域水资源承载力越大。为了研究外调水对区域水资源承载力的影响,本文分为有外调水和无外调水两种情景,有外调水情形可以通过实际遥感影像数据获得,无外调水情景的水域率是通过调水量与本地地表水资源量折算得到。折算公式如下:

$$\text{无外调水水域率} = \frac{\text{有调水的水域面积}}{1 + \frac{\text{外调水量}}{\text{外调水量} + \text{本地地表水量}}}$$

(6)库径比指数:指区域内已建水库的总库容量与地表径流量之比,表示水利工程对河流径流的调控能力,库径比指数越大,对河流自然径流的干扰性越强,河流的水流流速越小,造成水生生物的生存环境越差,区域水资源承载能力越低。

(7)人均GDP:承载系统的适应性指标,反映经济水平,人均GDP值越高,经济发展水平越高。根据有关产业用水的库兹涅兹曲线<sup>[17]</sup>,当经济发展到一定程度以后,GDP的增加不再导致用水总量的增加。北京在1999年人均GDP达到2.1万元/人后,用水总量呈下降趋势,天津人均GDP逐步增加而用水总量并未明显增加,河北省在2000年人均GDP达到0.8万元/人后,总用水量也呈下降趋势。因此人均GDP越大,经济发展对水资源的调节与适应能力越强,区域水资源承载力越大。

(8)第三产业比重:承载系统的适应性指标,反映区域产业的经济结构,第三产业所占的比重越大,单位经济产出的耗水强度越小,水资源的承载力越大。

(9)人口密度:水承载系统压力指标,人口密度越大,往往造成人口经济社会与水资源的空间匹配程度越低,区域水资源系统所承载的压力也越大。

(10)城市化率:承载系统的压力指标,城镇人口与总人口数之比。根据文献<sup>[18]</sup>研究表明,城市化率越高,对水资源、水环境的影响越大,水资源系统承载的压力也越大。

(11)建成区面积比重:承载系统的压力指标,城市建成区面积与区域总面积之比,建成区面积比重越大,所负载的社会规模越大,水资源系统承载的压力越大。

## 2.2 模糊综合评价

模糊综合评价法是通过考虑多种因素的影响,运用模糊数学工具对事物做出综合评价,对蕴藏的信息呈现模糊性的资源做出比较科学、合理的量化评价。

模糊评价矩阵如下:

$$\mathbf{B} = \mathbf{A} \times \mathbf{R} = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m)$$

$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{m1} & r_{m2} & \vdots & r_{mn} \end{bmatrix} = (b_1, b_2, \dots, b_n) \quad (1)$$

式中 $\mathbf{B}$ 表示综合评价矩阵; $\mathbf{A}$ 表示权重向量; $\mathbf{R}$ 表示隶属度矩阵; $\lambda_i$ 表示第 $i$ 项指标的权重,可通过层次分析法得到; $r_{ij}$ 表示某因素对应等级的隶属度。选取“加权平均型”的 $M(\cdot, \oplus)$ 模型,即 $b_j = \min$

$\left\{ 1, \sum_{i=1}^m \lambda_i \times r_{ij} \right\}$ , ( $i=1, 2, \dots, m$ ;  $j=1, 2, \dots, n$ ), 由于

$\sum_{i=1}^m \lambda_i \times r_{ij} \leq 1$ , 该模型蜕化为一般的实数加法, 即:

$$b_j = \sum_{i=1}^m \lambda_i \times r_{ij} \quad (2)$$

选取最大隶属度 $\mathbf{C} = \max\{b_j\}$ 作为区域水资源承载力的评价指数,其值越大,水资源超载程度越严重。根据水资源超载的严重程度,本文将水资源承载力指数分为严重超载、超载、承载、低载四个等级,评价指数在[0.45,1]范围内属于严重超载状态,



2018年11月

在 $[0.30, 0.45)$ 范围属于超载状态,在 $[0.20, 0.30)$ 范围属于承载状态,在 $[0, 0.20)$ 范围属于低载状态。

### 2.3 权重确定

水资源承载力的评价需要对各个指标的重要性进行分析,包括准则层的权重和指标层的权重。从准则层分析,水资源系统相对较重要,本研究以水资源承载力分析为目标,社会系统和经济系统准则也发挥相应作用。重要程度为:水资源系统>社会系统>经济系统。

从指标层分析,在水资源系统中,人均水资源十分重要,其次为水质指标,相应重要程度排序为:人均水资源量>水体水质>水资源开发利用>库径比指数>水域面积率>产水模数。社会系统中各指标重要程度排序为:人口密度>城市化率>建成区面积比重。经济系统中,人均经济量为先,经济结构为次,因此重要性为:人均GDP>第三产业比重。

按照上述权重分析,根据专家打分,并进行一致性检验,在满足一致性要求的前提下,得到准则层和指标层的权重值,见表1。

## 3 研究区概况与数据来源

### 3.1 区域概况

京津冀地处中国水资源最为短缺的海河流域,多年平均降水量528mm,多年平均水资源量241亿 $\text{m}^3$ ,以不足全国的1%水资源承载着全国约2.3%的土地,8%的人口和11%的经济总量<sup>[19]</sup>。京津冀地区属于资源型缺水地区,2015年北京、天津与河北省人均水资源量分别仅为123 $\text{m}^3$ /人、83 $\text{m}^3$ /人和182 $\text{m}^3$ /

人,京津冀地区人均水资源量157 $\text{m}^3$ /人,都远低于国际公认的1000 $\text{m}^3$ /人的严重缺水标准。《京津冀发展报告2016》<sup>[20]</sup>指出水资源承载力已成为制约京津冀地区发展的最大短板。随着社会经济的发展,京津冀地区水资源过度开发利用引起了一系列的生态环境问题,如河道断流、地下水位下降、水体严重污染等<sup>[21]</sup>。为了缓解北方地区水资源短缺问题,中国实施了南水北调水资源调配战略性工程。东线一期、中线工程分别于2013年11月和2014年12月正式通水,并逐渐成为北京、天津城市用水的主要水源。南水北调对缓解京津冀的水资源短缺起到了重要作用,2015—2016年北京市共接纳南水北调11.04亿 $\text{m}^3$ ,人均水资源量增加近一半,2016年地下水位有了明显回升。

### 3.2 数据来源及评价等级划分

(1)数据来源。本文数据来源于历年中国统计年鉴<sup>[22]</sup>,北京市、天津市和河北省的统计年鉴<sup>[23-25]</sup>、水资源公报<sup>[26-28]</sup>等。通过对京津冀各地区的人口、GDP、三产结构、国土面积、建成区面积、降水量、水资源量、用水总量、水库总库容、外调水量、出入境水量、入海水量、功能区水质等数据进行统计,计算得到2000年、2010年和2015年水平年各省市的水资源承载力指标值。

(2)评价阈值划分。水资源承载力是在水资源系统与经济社会系统之间寻求“平衡”状态<sup>[29]</sup>,当水资源系统无法支撑经济社会发展规模时,属于“超载”状态;当可以支撑时,属于“承载”状态;处于二

表1 指标体系权重系数

Table 1 The coefficient of index system weight

准则层权重	指标层	指标相对准则层权重	指标相对目标层权重
水资源系统 0.647	人均水资源量	0.508	0.329
	产水模数	0.027	0.018
	水资源开发利用	0.130	0.084
	水体水质(功能区各类水质比例)	0.150	0.097
	水域面积率	0.060	0.039
	库径比指数	0.125	0.081
经济系统 0.099	人均GDP	0.833	0.082
	第三产业比重	0.167	0.016
社会系统 0.254	人口密度	0.595	0.151
	城市化率	0.347	0.088
	建成区面积比重	0.058	0.015

者的临界,可以认为处于“平衡”状态。本文按照水资源系统对经济社会系统的支撑状态,将水资源承载力分为严重超载、超载、承载、低载四个等级。根据全国各地区的水资源承载指标的历史数据,对各

指标数据进行快速聚类分析(其中水体水质根据公报中水质类别分级),按照严重超载、超载、承载、低载四类划分指标的阈值,同时结合未来发展的趋势,综合给出评价指标阈值划分,见表2。

表2 水资源承载力评价指标阈值划分

Table 2 The threshold value of evaluation of water resources carrying capacity

指标/单位	严重超载	超载	承载	低载
人均水资源量/(m <sup>3</sup> /人)	101	499	1 033	2 112
产水模数/(万 m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> )	5	11	23	51
水资源开发利用率/%	119	100	78	39
水体水质(功能区各类水质比例)/%	劣五类	五类	三类、四类	一类、二类
水域面积率/%	0	2	3	5
库径比指数	3	2	1.5	0.5
人均GDP/(万元/人)	2	5	8	10
第三产业比重/%	31	45	60	75
人口密度/(人/km <sup>2</sup> )	1 012	791	360	189
城市化率/%	81	69	51	27
建成区面积比重/%	10	7	4	1

4 结果分析

根据水资源承载力评估模型及其阈值划分,计算得到不同水平年京津冀及各省、市水资源承载力。不同水平年考虑调水与不考虑调水两种情景下,京津冀地区水资源承载力指数评价结果,见图2。

图2结果表明京津冀地区水资源承载力基本都属于超载阶段,其中天津、北京的水资源承载力超载尤为严重,与文献<sup>[4,19,30]</sup>研究结果相似,认为京津冀地区水资源承载力超载,且在空间分布上也具有一致性。在考虑外调水情景下,2015水平年南水北调对北京、天津进行了供水,使得北京、天津的水资源

承载力得到了一定改善,但仍属于严重超载阶段。

(1)北京市水资源承载力评价。由图2知,北京市水资源承载力总体上呈严重超载的形式,而且随着经济社会的发展逐渐增加。2000年北京市降水量偏少25%,为特枯年,水资源承载力指数为0.656。2010年降水量为偏枯年,水资源承载力指数为0.734,较2000年有所增加。这主要是因为城市人口数、人口密度的增加,以及建成区面积的扩大,进一步加剧了区域水资源承载力的超载。2014年12月,南水北调中线一期正式通水,至此北京市的供水源格局发生了变化。2015年为平水年,水资源量较2000年和2010年都丰富。为了研究外调水的影响,这里分为考虑外调水和不考虑外调水两种情景对水资源承载力变化进行分析。在没有南水北调供水的情景下,水资源承载力指数为0.741。2015年北京市外调水总计8.81亿m<sup>3</sup>,占供水总量的23%。计算得到2015年水资源承载力指数为0.707,较不考虑外调水的承载力指数减小了5%。可见,外调水对缓解地区的水资源承载力超载具有一定作用。同时,应该注意到供水增加只是在水量、水域、水流方面对水资源承载力有提高效果,而在水质类别上没有那么显著,此外社会系统所带来的压力,

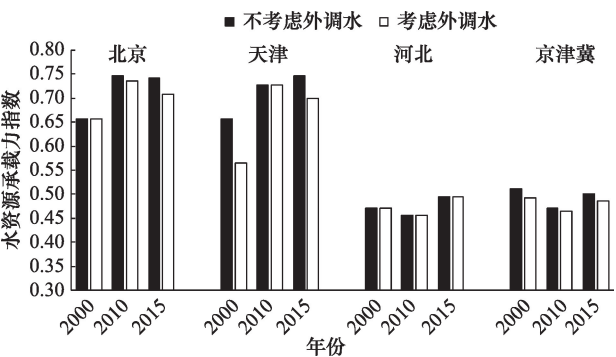


图2 外调水对京津冀水资源承载力的影响

Figure 2 The effect on water resources carrying capacity in Beijing-Tianjin-Hebei region by transfer water

2018年11月

降低了水资源的承载能力,部分抵消了由于调水而提高的水承载力,所以水资源承载力的提高与供水增加比例并不完全相同。

不同水平年北京市水资源承载力子系统评价结果见表3。从系统组成来看,水资源承载压力由水资源子系统逐步转向社会子系统,随着南水北调供水的实施,水资源子系统的承载力指数逐渐降低,社会子系统的承载力指数逐渐增加。经济子系统承载力指数在降低,经济子系统由2000年严重超载转变为2015年低载。这也表明北京市人口增加,城市化率提高,建成区面积扩大使得地区水资源承载力超载逐渐增加。综合有关城市、环境、交通等规划,北京市需要控制人口规模,减小对水资源承载的压力,实现水资源承载安全的可持续性。

表3 北京市水资源承载力评价

Table 3 The evaluation of water resources carrying capacity in Beijing City

子系统	水平年	严重超载	超载	承载	低载
水资源	2000	0.761	0.053	0.116	0.070
	2010	0.755	0.063	0.092	0.090
	2015	0.711	0.095	0.125	0.069
经济	2000	0.745	0.089	0.113	0.053
	2010	0.000	0.224	0.609	0.167
	2015	0.000	0.000	0.000	1.000
社会	2000	0.354	0.588	0.038	0.020
	2010	0.966	0.034	0.000	0.000
	2015	0.972	0.028	0.000	0.000

(2)天津市水资源承载力评价。由图2知,天津市的水资源承载力超载较北京市更为突出,这主要是由于天津市的人均水资源量较北京低,2000年降水为特枯年份,人均水资源量仅为31m<sup>3</sup>/人。水资源严重短缺,降低了地区的水资源承载力。不考虑引滦入津调水影响,天津市水资源承载力指数为0.656,如考虑到引滦、引黄入津调水,2000年天津市水资源承载力指数为0.565,较不考虑外调水承载力指数降低了13%。可见,外调水对天津市的水资源承载力影响比较显著。随着时间变化,人口数量增加,经济社会的用水量逐步增加,对水资源的压力也逐步增加。2015年天津市水资源承载力的指数较不考虑外调水降低了5%。

不同水平年天津市水资源承载力子系统评价

结果,见表4。从系统组成来看,随着时间变化,天津市水资源子系统和经济社会子系统的承载力指数都在增加,经济子系统承载力指数在降低。这也表明人口增加,城市化率提高,以及对水资源的过度开发使得水资源承载压力逐步增加。为此,天津市需要实施节约用水,提高水的利用率,同时需开辟新的水源,如海水淡化,以提高水资源的承载力。

表4 天津市水资源承载力评价

Table 4 The evaluation of water resources carrying capacity in Tianjin city

子系统	水平年	严重超载	超载	承载	低载
水资源	2000	0.662	0.061	0.217	0.060
	2010	0.759	0.022	0.096	0.123
	2015	0.705	0.081	0.120	0.094
经济	2000	0.835	0.165	0.000	0.000
	2010	0.000	0.405	0.595	0.000
	2015	0.000	0.087	0.080	0.833
社会	2000	0.213	0.729	0.043	0.015
	2010	0.902	0.074	0.024	0.000
	2015	0.950	0.050	0.000	0.000

(3)河北省水资源承载力评价。由图2知,河北省水资源承载力超载情况总体上较北京市和天津市要好,但仍属于超载范围。随着经济社会发展,水资源承载力的超载也呈逐渐增加的趋势,主要是由于社会发展所带来的人口增加、建成区面积扩张,给水资源系统带来了压力。

由表5可见,从系统组成方面,河北省承载压力主要来自于水资源系统,水资源系统的承载力指数由2000年的0.578增加到2015年的0.709;其次来自

表5 河北省水资源承载力评价

Table 5 The evaluation of water resources carrying capacity in Hebei Province

子系统	水平年	严重超载	超载	承载	低载
水资源	2000	0.578	0.256	0.136	0.030
	2010	0.590	0.323	0.046	0.041
	2015	0.709	0.209	0.035	0.047
经济	2000	0.967	0.033	0.000	0.000
	2010	0.722	0.278	0.000	0.000
	2015	0.331	0.669	0.000	0.000
社会	2000	0.000	0.000	0.573	0.427
	2010	0.000	0.029	0.819	0.152
	2015	0.000	0.052	0.891	0.057



于经济子系统,经济子系统承载力指数由2000年的0.967降低到2015年的0.331。社会子系统基本都属于承载状态,承载的压力很小。为此,河北省需通过调整优化产业结构,实施农业节水可实现水资源承载安全。

(4)京津冀水资源承载力评价。由图2知,京津冀地区的水资源承载力总体上也是呈超载的状态,但随着京津冀一体化实施,水资源承载力超载略呈好转趋势。随着经济快速发展,产业结构的优化与调整,京津冀水资源承载力超载逐渐减低。在不考虑南水北调水源供水情景下,2015年京津冀水资源承载力指数为0.501。2015年京津冀总外调水为18亿 $\text{m}^3$ ,占供水总量的7.2%,水资源承载力指数为0.487,较不考虑外调水承载力指数大约降低了3%。这表明外调水对提高京津冀水资源承载力具有一定贡献作用。除此之外,京津冀水资源承载力的提高,需要协调水资源开发利用与经济社会发展之间的关系,达到水资源与经济社会、生态环境的协调可持续。

由表6可见,从系统组成方面京津冀水资源承载力超载主要来自于水资源子系统,且随着社会发展,对水资源需求量的增加,承载力指数在逐渐增加。京津冀地区的社会子系统承载压力较小,主要是由于其中所占面积比最大的河北省地域广阔,人口密度、城市化率相对较低。随着时间变化,京津冀一体化建设,经济子系统的承载力指数也呈降低趋势。为此,京津冀水资源承载力提高主要以通过调整产业结构,实施节水,加强水资源的优化配置,可实现水资源承载安全。

表6 京津冀水资源承载力评价

Table 6 The evaluation of water resources carrying capacity in Beijing-Tianjin-Hebei region

子系统	水平年	严重超载	超载	承载	低载
水资源	2000	0.630	0.243	0.096	0.031
	2010	0.676	0.198	0.088	0.038
	2015	0.750	0.129	0.080	0.041
经济	2000	0.833	0.160	0.007	0.000
	2010	0.227	0.715	0.058	0.000
	2015	0.000	0.536	0.464	0.000
社会	2000	0.000	0.078	0.621	0.301
	2010	0.000	0.277	0.675	0.048
	2015	0.000	0.433	0.527	0.040

## 5 讨论

(1)基于量-质-域-流水资源承载力评价体系。当前,京津冀地区水资源短缺与水生态环境恶化问题突出,水资源承载力属于超载。水资源系统中水量、水质、水域、水流任何一个方面超载,都会引发水资源短缺、水生态环境恶化等问题,进而导致整个水承载系统的可持续发展。本文所建立的基于量、质、域、流的水资源承载力指标体系更加注重水生态的良性循环与水资源的可持续利用,将水量、水质作为水资源承载力大小的主导因素,水域面积、水流作为区域水资源承载力的约束因素,如此在水资源的承载理论体系方面更具完备性。在应用方面,本文以京津冀地区为例,研究外调水对京津冀水资源承载力的影响,分析了调水后对水量、水质、水域、水流方面的影响。2015是南水北调中线调水的第一年,调水后北京市的人均水资源量由123  $\text{m}^3$ /人提高到164  $\text{m}^3$ /人,河流水质II类、III类、劣V类的比例由41.0%、38.8%和20.2%改善为45.9%、35.6%和18.5%,水域面积率由2%提高到了3%,库径比指数由18.8降低到6.79;天津的人均水资源量由83  $\text{m}^3$ /人提高到142  $\text{m}^3$ /人,河流水质III类、IV类、V类、劣V类的比例由7.4%、9.9%、2.1%和80.6%改善为9.1%、9.7%、2.1%和79.1%,水域面积率由10%提高到14%,库径比由2.18降低到1.23,调水后北京和天津的水资源承载力指数都降低了5%左右。由于水资源对地区经济社会发展支撑作用具有滞后性与累积性,所以外调水对水资源承载力的影响也具有滞后与累积效应。受南水北调调水影响,未来京津冀地区水资源承载力的改善作用会更加显著。作为研究工作的深化与推广,本研究未来还将要结合中国不同区域的特点,进一步对全国水资源承载力评价指标进行分析,如在中国北方地区因水量短缺造成水资源承载力超载,而在南方地区因水质污染使得水资源承载力超载,西南地区因水电过度开发影响河流生态流量使得水资源承载力降低,最终要建立一个适合于全国的基于量-质-域-流的水资源承载力评估体系。

(2)外调水对区域水资源承载力影响。外调水对缓解地区水资源短缺,改善水生态环境能够起到重要作用。北京市通过南水北调,2015年人均水资

2018年11月

源量增加近一半,在2016年地下水位有了明显回升。研究结果也表明了外调水对提高地区水资源承载力具有一定作用,如2015年北京、天津的水资源承载力都得到了一定改善。外调水对地区水资源承载力影响程度取决于外调水占当地地表水的比重,天津市2000年地表水仅为0.62亿 $\text{m}^3$ ,较多年平均少25%,引滦入津与引黄入津水量达到8.15亿 $\text{m}^3$ 。较不考虑外调水承载力指数降低了13%。这也表明在水资源短缺时期,更需要通过流域外调水来改善本地区的水资源承载力。此外,外调水对区域水资源承载力影响也与区域范围有关,如外调水仅对北京、天津作用明显,而对整个京津冀地区的水资源承载力改善作用有限。这与调水目的有关,调水往往是调入到水资源短缺、水环境问题突出的经济发达地区,如南水北调、引滦入津、引黄入津主要是为了解决北京、天津的水资源短缺与水生态恶化问题。未来南水北调水将给河北省石家庄与保定,以及规划中雄安新区供水,河北省的水资源承载力也将会有所改善。

外调水使区域水量、水质、水域面积、水流等方面得到改善,但对经济、社会的影响难以度量,未来还需进一步分析外调水对区域经济与社会的影响。通过跨流域调水可以改善区域的水资源承载力,但往往需要投入大量的人力、物力和财力,同时,也会降低调出去的水资源承载力。跨流域调水除了考虑经济效益外,往往是具有政治意义和战略意义,对区域水资源承载力的影响也是具有长期性。本文只分析了2015年外调水对京津冀地区的影响,未来还需要从长期性和战略性方面分析外调水对区域水资源承载力的影响。

(3)关键指标对水资源承载力的影响。区域水资源禀赋状况在客观上决定了水资源承载力的大小,所建立的基于量、质、域、流水资源承载力指标体系中水量是最为关键的指标之一,人均水资源量多少直接影响水资源承载力状态。如不考虑调水情景下2000年天津市人均水资源量仅为31 $\text{m}^3$ ,通过引滦入津、引黄入津调水使得天津人均水资源量提高到113 $\text{m}^3$ ,较不考虑外调水情景水资源承载力指数降低了13%。所以,人类活动的主观干预可以提高地区的水资源承载力。社会发展过程中,社会子

系统也给区域水资源承载力带来了负面压力,如2000年北京市人口密度仅为831人/ $\text{km}^2$ ,2015年达到了1323人/ $\text{km}^2$ ,水资源承载力指数由0.656增加到2015年0.707。相反,社会子系统中建成区面积变化对水资源承载力影响不是很大。如北京市建成区面积比重由2000年0.030增加到2015年的0.085,增加了1.83倍,水资源承载力指数仅增加了0.07倍。

(4)不同水文情景下水资源承载力。由于降水事件的随机性,不同水文情景下的水资源承载力是不同的。本文以京津冀作为典型区进行水资源承载力分析,选择了2000年、2010年和2015年三个典型水平年,其中2000年为特枯年,2010年为偏枯年,2015年为平水年。研究发现,在水资源短缺的特枯年,外调水对区域水资源承载力影响更为显著。本研究仅以典型水平年作为一种水文情景,并未对同一水平年下不同水文情景下的水资源承载力进行研究。对于未来水资源承载力评价,需要分析各种水文情景下水资源承载力。此外,对于水资源滞后效应也需进行考虑,如遇到连续干旱或连续丰水年,区域水资源承载力同样也会受到影响。

## 6 结论

本文针对新时期京津冀地区水资源短缺与水质恶化等问题突出的特点,并结合水资源-社会-经济复合系统,构建了基于量、质、域、流水资源承载力评估方法,分析外调水对京津冀水资源承载力影响,主要结论有:

(1)建立基于量、质、域、流区域水资源承载力评价方法,以京津冀地区为典型区进行水资源承载力评价,结果表明京津冀地区水资源承载力都属超载范围,其中天津、北京尤为严重。随着经济社会发展,京津冀水资源承载力超载略有降低,主要由于产业结构的优化与调整,节水灌溉,水资源的优化与调配。北京、天津的水资源承载力超载仍然较高,且呈上升趋势。京津冀地区水资源承载力超载主要来自于水资源子系统,属于超载阶段,水资源短缺是造成水资源承载力超载的主要原因。

(2)分析了外调水对京津冀水资源承载力的影响。研究结果表明外调水对京津冀区域水资源承载力改善具有一定的贡献,对北京、天津的水资源承载力改善作用较显著,尤其是在水资源短缺时期



影响更为明显,如特枯年2000年天津市引滦与引黄入津,外调水使得水资源承载力提高了13%。平水年2015年南水北调使得北京、天津水资源承载力都提高了5%左右。

(3)本文对现状不同典型年(特枯年2000年,偏枯年2010年,平水年2015年)进行了水资源承载力的分析与研究,并给出了缓解京津冀水资源承载力超载的对策,下一步还需要对未来水平年不同频率下的水资源承载力进行分析,研究京津冀水资源承载力的变化趋势。

### 参考文献(References):

- [1] 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 Jun, Zhu Yizhong. 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.]
- [2] 王煜,杨立彬,张海新,等. 西北地区水资源可利用量及承载能力分析[J]. 人民黄河, 2002, 24(6): 10-12. [Wang Yu, Yang Libin, Zhang Haixin, et al. Analysis of water resources availability and carrying capacity in Northwest of China [J]. *Yellow River*, 2002, 24(6): 10-12.]
- [3] 施雅风,曲耀光. 乌鲁木齐河流域水资源承载力及其合理利用[M]. 北京: 科学出版社, 1992. [Shi Yafeng, QU Yaoguang. The Carrying Capacity of Water Resources and Its Reasonable Use of Urumqi River [M]. Beijing: Science Press, 1992.]
- [4] 王建华,翟正丽,桑学锋,等. 水资源承载力评价指标体系及评判准则研究[J]. 水利学报, 2017, 48(s): 1-7. [Wang Jianhua, Zhai Zhengli, Sang Xuefeng, et al. Study on index system and judgment criterion of water resources carrying capacity [J]. *Shuili Xuebao*, 2017, 48(s): 1-7.]
- [5] Ballesterio, E. Inter-basin water transfer public agreement: a decision approach to quantity and price [J]. *Water Resour. Manage*, 2004, 18(1) 75-88.
- [6] Gupta, J., Van der Zaag, P. Interbasin water transfers and integrated water resources management: where engineering, science and politics interlock [J]. *Phys. Chem. Earth*, 2008, 33(1-2): 28-40.
- [7] 封志明,杨艳昭,闫慧敏,等. 百年来的资源环境承载力研究: 从理论到实践[J]. 资源科学, 2017, 39(3): 379-395. [Feng Zhiming, Yang Yanzhao, Yan Huimin, et al. A review of resources and environment carrying capacity research since the 20<sup>th</sup> Century: from theory to practice [J]. *Resources Science*, 2017, 39(3): 379-395.]
- [8] 冯耀龙,练继建,王宏江,等. 用水承载力分析跨流域调水的合理性[J]. 天津大学学报, 2004, 37(7): 595-599. [Feng Yaolong, Li an Jijian, Wang Longjiang, et al. An analysis of interbasin water transfer by water resources carrying capability [J]. *Journal of Tianjin University*, 2004, 37(7): 595-599.]
- [9] 严军,胡建兰,苗卉,等. 南水北调对长江流域水资源承载力的影响及水资源优化配置方法[J]. 水利发电学报, 2007, 26(3): 105-109. [Yan Jun, Hu Jianlan, Miao Hui, et al. The influence of south-to-north water transfer project on the water resources load capacity of the Yangtze River basin and the methods to optimize the allocation of water resources [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2007, 26(3): 105-109.]
- [10] 刘晓,王红瑞,俞淞,等. 南水北调进京后的北京市水资源短缺风险研究[J]. 水文, 2015, 35(4): 55-61. [Liu Xiao, Wang Hongrui, Yu Song, et al. Study on water resources risk in Beijing after "South-North water transfer" Project [J]. *Journal of China Hydrology*, 2015, 35(4): 55-61.]
- [11] 严景军. 流域调水工程项目对区域产业结构与经济影响研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2008. [Yan Jingjun. Impact on Regional Industrial Structure and Economy by the Project of Basin Water Transfer [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2008.]
- [12] 闵庆文,余卫东,张建新. 区域水资源承载力的模糊综合评价分析方法及应用[J]. 水土保持研究, 2004, 11(3): 14-16. [Min Qingwen, Yu Weidong, Zhang Jianxin. Fuzzy-based evaluation of water resources carrying capacity and its application [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2004, 11(3): 14-16.]
- [13] 薛冰,宋新山,严登华. 基于系统动力学的天津市水资源模拟及预测[J]. 南水北调与水利科技, 2011, 9(6): 43-47. [Xue bing, Song Xinshan, Yan Denghua. Simulation and prediction of water resources carrying capacity based on a system dynamic model in Tianjin [J]. *South-to-North Water Diversion and Water Science & Technology*, 2011, 9(6): 43-47.]
- [14] 张欣,范明元,陈华伟,等. 黄河三角洲水资源承载力多目标优化计算[J]. 人民黄河, 2013, 35(12): 47-49. [Zhang Xin, Fan Mingyuan, Chen Huawei, et al. Multi-objective optimization model of water resources carrying capacity in Yellow River Delta [J]. *Yellow River*, 2013, 35(12): 47-49.]
- [15] 水利部水利水电规划设计总院. 中国水资源及其开发利用调查评价[M]. 北京: 水利电力出版社, 2014. [China Renewable Energy Engineering Institute. Evaluation of Exploitation and Utilization of Water Resources in China [M]. Beijing: Water Resources and Electric Power Press, 2014.]
- [16] 贾绍凤,吕爱锋,韩雁,等. 中国水资源安全报告[M]. 北京: 科学出版社, 2014. [Jia Shaofeng, Lv Aifeng, Han Yan, et al. Report of Water Security in China [M]. Beijing: Science Press, 2014.]
- [17] 贾绍凤,张士锋. 工业用水与经济发展的关系-用水库兹涅茨曲线[J]. 自然资源学报, 2004, 19(3): 279-284. [Jia Shaofeng, Zhang Shifeng. Relation of industrial water use and economic development: water use Kuznets curve [J]. *Journal of Natural Re-*

2018年11月

- sources, 2004, 19(3): 279–284. ]
- [18] 靳晓莉, 高俊峰, 赵广举. 太湖流域近20年社会经济发展对水环境影响及发展趋势[J]. 长江流域资源与环境, 2006, 15(3): 298–302. [Jin Xiaoli, Gao Junfeng, Zhao Guangju. Impacts of 20 year socio-economic development on the trend of aquatic environment of the TAIHU basin [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2006, 15(3):298–302. ]
- [19] 刘瑜洁, 刘俊国, 赵旭, 等. 京津冀水资源脆弱性评价[J]. 水土保持通报, 2016, 36(3): 211–218. [Liu Yujie, Liu Junguo, Zhao Xu, et al. Assessment of vulnerability of water resources in Beijing–Tianjin–Hebei Region [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2016, 36(3): 211–218. ]
- [20] 叶堂林, 张贵祥, 祝尔娟, 等. 京津冀发展报告(2016)[R]. 北京: 中国科学文献出版社, 2016. [Ye tanglin, Zhang guixiang, Zhu erjuan, et al. Annual Report on Beijing–Tianjin–Hebei Metropolitan Region (2016) [R]. Beijing: China Science Literature Publishing House. ]
- [21] 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 Li. Study on resources exploitation and environment protection in Beijing–Tianjin–Hebei Region [J]. *Review of Economic Research*, 2015(2): 47–71. ]
- [22] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴(2001–2016)[M], 中国统计出版社. [National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. China Statistical Yearbook (2001–2016) [M], Beijing: China Statistics Press. ]
- [23] 北京市统计局, 国家统计局北京调查总队. 北京市统计年鉴(2001–2016)[M], 中国统计出版社. [Beijing Bureau of Statistics, Beijing Survey office of National Bureau of Statistics. Beijing Statistical Yearbook (2001–2016) [M], Beijing: China Statistics Press. ]
- [24] 天津市统计局, 国家统计局天津调查总队. 天津市统计年鉴(2001–2016)[M], 中国统计出版社. [Tianjin Bureau of Statistics, Tianjin Survey office of National Bureau of Statistics. Tianjin Statistical Yearbook (2001–2016) [M], Beijing: China Statistics Press. ]
- [25] 河北省统计局, 国家统计局河北调查总队. 河北省统计年鉴(2001–2016)[M]. 中国统计出版社. [Hebei Bureau of Statistics, Hebei Survey office of National Bureau of Statistics. Hebei Statistical Yearbook (2001–2016) [M]. Beijing: China Statistics Press. ]
- [26] 北京市水务局. 北京市水资源公报(2000–2015)[EB/OL]. (2017–11–20) [2018–09–19] <http://www.bjwater.gov.cn/search/pcRender?pageId=f5261418ddc74f03b27e3590c531102b>. [Beijing Water Authority. Beijing water resources bulletin (2000–2015) [EB/OL]. (2017–11–20) [2018–09–19] <http://www.bjwater.gov.cn/search/pcRender?pageId=f5261418ddc74f03b27e3590c531102b>. ]
- [27] 天津市水务局. 天津市水资源公报(2000–2015) [EB/OL]. (2018–01–01) [2018–09–19] <http://swj.tj.gov.cn/pub/tjwcb/index.html> [Tianjin Water Authority. Tianjin water resources bulletin (2000–2015) [EB/OL]. (2018–01–01)[2018–09–19] <http://swj.tj.gov.cn/pub/tjwcb/index.html>] ]
- [28] 河北省水利厅. 河北省水资源公报(2000–2015) [EB/OL]. (2018–03–02)[2018–09–19] <http://www.hebwater.gov.cn/dynamic/search.jsp>. [Hebei Water Resources Department. Hebei water resources bulletin (2000–2015) [EB/OL]. (2018–03–02)[2018–09–19] <http://www.hebwater.gov.cn/dynamic/search.jsp>. ]
- [29] 左其亭. 水资源承载力研究方法总结与再思考[J]. 水利水电科技进展. 2017, 37(3): 1–6. [Zuo Qiting. Review of research methods of water resources carrying capacity [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2017, 37(3): 1–6. ]
- [30] 席丹墀, 许新宜, 韩冬梅, 等. 京津冀地区水资源承载力评价[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2017, 53(5): 575–581. [Xi Danchi, Xu Xinyi, Han Dongmei, et al. Evaluating water resources-carrying capacity in Beijing–Tianjin–Hebei region [J]. *Journal of Beijing Normal University Natural Sciences*, 2017, 53(5): 575–581. ]

## Research of effect on water resources carrying capacity in Beijing–Tianjin–Hebei region by water transfer

HAN Yan<sup>1,2</sup>, ZHANG Shifeng<sup>1,2</sup>, LV Aifeng<sup>1,2</sup>

(1. *Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*

2. *Key Laboratory of Water Cycle & Related Land Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)*

**Abstract:** The water resources shortage and water environment worsen have been becoming primary restraining factors to development of economy and society in Beijing- Tianjin- Hebei region. The evaluation of water resources carrying capacity is the key to regional water reasonable utilization. In this paper, according to the view of development of economy and society is supported by water resources, the eleven factors which mainly effect water resources carrying capacity have been selected as assessment indexes. An evaluation approach of research the effect on water resources carrying capacity by water transfer based on water quantity, water quality, water area and water flow has been established. The results indicate that the water carrying capacity are belong overloaded in Beijing-Tianjin-Hebei region, especially in Tianjin and Beijing. The carrying press is mostly from water resources system, the water shortage is the major reason of water carrying capacity overloading in Beijing-Tianjin-Hebei region, and the per capita water resources is the key factor to regional water carrying capacity. The water transfer is certainly important to improve water carrying capacity in Beijing- Tianjin- Hebei region, especially for Beijing and Tianjin. In drought period, the results of improve water carrying capacity by water transfer is more evident, for example the water resources carrying capacity had been improved 13% in Tianjin through water transfer from Luan River and Yellow River to Tianjin in 2000, when is very dry year. The south water to north make water carrying capacity improve 5% in Beijing and Tianjin, respectively. It supply an foundation for water resources reasonable utilization in Beijing-Tianjin-Hebei to research of effect on water resources carrying capacity by water transfer, and it is also important to realize the harmony among water resources, economy and society in region.

**Key words:** water resources carrying capacity; Beijing-Tianjin-Hebei region; water transfer; index system