

DOI: 10.19797/j.cnki.1000-0852.20230207

大清河流域城市化与水资源利用关系研究

胡启玲

(上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海 200092)

摘要:为探究城市化与水资源利用的相关关系,以雄安新区所在的大清河流域为研究对象,通过建立评价城市化水平和水资源利用水平的指标体系,运用环境与经济发展的协调发展度模型评价大清河流域2001—2021年城市化与水资源两个系统的协调发展度,分析两个系统的变化及其耦合关系的发展情况。结果表明:(1)大清河流域城市化水平呈现线性上升趋势,城市化子系统对整体城市化的重要性排序为:经济城市化>社会城市化>空间城市化>人口城市化;(2)水资源系统整体呈现波动上升趋势,但是受到水资源本底情况影响较大;(3)城市化与水资源两系统之间的协调发展关系从严重失调衰退类发展为优质协调发展类。本研究可为城市的可持续发展提供参考,为“四水四定”方针提供科学支撑。

关键词:城市化;水资源;耦合模型;雄安新区;大清河流域

中图分类号:TV213;P33

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2024)03-0105-07

0 引言

水资源是城市化发展的必要资源之一,城市化进程又对水资源利用具有重要影响,二者是一个复杂、相互影响、相互制约的耦合关系。城市化会剧烈改变流域内下垫面情况,导致地表的起伏性、热力动力的传导性和下渗率等发生改变,进而影响包括降雨、蒸发、下渗、产流、汇流等在内的整个水文循环过程^[1]。水资源具有自然、经济、社会属性,可以为城市化的发展提供直接或间接的服务,为城市健康发展提供保障^[2]。

城市化发展离不开水资源的支撑,也意味着当水资源的开发利用速率低于城市化发展时,水资源会成为制约城市化进一步发展的主要因素之一。当城市化进程加快、对水资源需求增多,城市化对水资源的开发利用已经接近甚至超过水资源承载能力时,会出现水资源短缺、水环境恶化等一系列问题^[3],这就是城市化对水资源的胁迫作用;同时水资源的问题导致其成为了限制城市规模和发展的主要因素之一,即水资源对城市化产生约束作用。另一方面,城市化带来的科技发展也会促进水资源利用效率的提升,对水资源开发

利用进行优化。城市化与水资源两个系统相互约束、相互促进、共同发展,研究两系统之间的相互关系可以为水资源的优化配置提供理论依据和指导,也可为城市的可持续发展提供思路。

目前研究主要集中于利用系统动力学理论构建水资源对城市化约束的系统仿真模型^[4],或基于回归模型分析城市化与用水量、用水效益、人均用水水平之间的定量关系^[5],或采用层次分析法和熵权法构建评价指标体系和响应关系模型来分析城镇化综合发展水平和水资源开发利用综合潜力的相关关系^[6]。城市化主要以行政区划为单位来衡量,因此以上研究主要以地级市为研究对象,部分以经济带和城市群为研究对象。然而,水资源分区主要以天然流域分水岭为界,现有研究对此考虑较少。

本研究以雄安新区所在的大清河流域为研究对象,从流域角度考虑水资源利用问题。利用频度分析法选取指标分别对城市化与水资源两个系统构建评价体系,采用变异系数法确定各指标权重;在对两个系统分别进行分析评价的基础上,利用协调发展度模型评价二者的耦合关系。

收稿日期:2023-06-11

网络首发日期:2024-01-12

网络首发地址:<https://kns.cnki.net/kcms2/detail/11.1814.P.20240111.1552.001.html>

基金项目:住房和城乡建设部软科学研究项目“城市水系统规划建设理论和方案研究”(R20200221)

作者简介:胡启玲(1993—),女,上海人,硕士研究生,工程师,主要从事水文水资源、海绵城市方面的工作。E-mail:huqiling@smedi.com

1 研究区概况

大清河流域(见图1)位于海河流域中部,西至太行山区,向东流入渤海湾,流经山西省、河北省、北京市和天津市,流域面积约43 060 km²。雄安新区位于流域腹地,随着雄安新区的建设和京津冀经济圈的进一步发展,大清河流域正在经历快速的城市化进程;但因所处的华北平原水资源相对匮乏,人、地、水的矛盾一直存在。探究大清河流域城市化与水资源利用的相关关系,对该区域城市化进程及水资源可持续利用具有重要意义。

本研究采用的各项数据主要来源于国家统计局官网、相关各省市统计年鉴和水资源公报,部分跨流域统计数据采用面积权重进行处理。

2 指标体系建立

2.1 指标选取

城市化系统和水资源系统都是复杂系统,要衡量两个系统各自的发展和利用程度需要选取适当的指标^[7]。利用频度分析法,统计近十年相关研究选取的衡量指标,同时依据主导性、层次性、动态性和可操作

性原则,从四个方面来衡量城市化进程——人口城市化、经济城市化、空间城市化和社会城市化^[8],再分别选取2至3个指标,构建城市化水平综合评价体系。水资源综合评价体系则是从水资源本底条件、水资源开发利用程度、水资源开发利用效率和水资源管理水平四个方面,选取了11个指标来构成,具体指标见表1。

2.2 数据标准化处理及权重计算

为消除各指标量纲不同带来的影响,将指标分为正向指标和负向指标,并采用极值处理法^[9]对原始数据进行标准化处理。

指标权重计算采用变异系数法,该方法利用指标本身数据信息,认为数据取值差异越大的指标对评价结果影响越大,越能很好地反映评价结果的差异性^[10]。根据式(1)~(4)计算得出各准则层权重和各指标权重,结果见表2。

(1)指标平均值和标准差:

$$\bar{X}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad (1)$$

$$S_i = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{X}_i)^2} \quad (2)$$

式中: x_{ij} 为第*i*个指标第*j*年的数据的实际值; \bar{X}_i 为第*i*

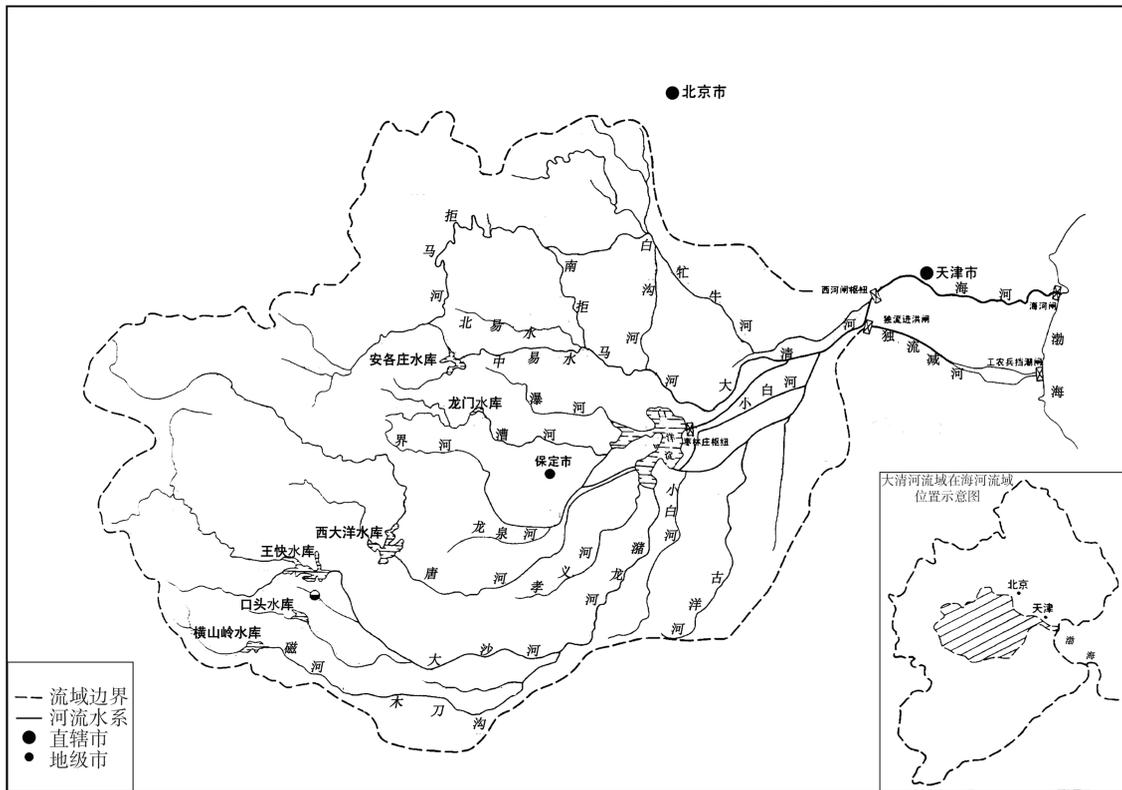


图1 大清河流域水系示意图

Fig.1 River system of Daqing River Basin

表1 城市化与水资源评价指标体系
Table 1 Evaluation index system of urbanization and water resources

目标层	准则层	指标层	单位	指标极性	指标符号
城市化	人口城市化	城镇人口比重	%	正向	X_1
		总人口	万人	正向	X_2
	经济城市化	人均GDP	元/人	正向	X_3
		第三产业增加值占GDP比重	%	正向	X_4
		人均消费零售额	元/人	正向	X_5
	空间城市化	人均城市拥有道路面积	km ² /人	正向	X_6
		绿化覆盖率	%	正向	X_7
	社会城市化	每千人拥有医院床位数	个/千人	正向	X_8
		万人拥有公共交通工具	辆/万人	正向	X_9
		万人在校大学生数	人/万人	正向	X_{10}
水资源	本底条件	人均水资源量	m ³ /人	正向	Y_1
		水资源总量折合地表径流深	mm	正向	Y_2
		干旱指数		负向	Y_3
	水资源开发利用程度	人均用水量	m ³ /人	负向	Y_4
		水资源开发利用率	%	负向	Y_5
	水资源开发利用效率	万元GDP用水量	m ³ /万元	负向	Y_6
		万元工业增加值用水量	m ³ /万元	负向	Y_7
		单位粮食产量用水量	m ³ /t	负向	Y_8
	水资源管理水平	非常规水源供水占比	%	正向	Y_9
		污水处理率	%	正向	Y_{10}
		生态环境用水率	%	正向	Y_{11}

注:表1干旱指数指年蒸发能力和年降水量的比值,即 $r=E/P$ 。

个指标全系列的平均值; S_i 为*i*个指标全系列标准差。

(2)变异系数:

$$Z_i = \frac{S_i}{\bar{X}_i} \quad (3)$$

式中: Z_i 为第*i*个指标全系列的变异系数。

(3)各指标权重:

$$W_i = \frac{Z_i}{\sum_i^m Z_i} \quad (4)$$

式中: W_i 为第*i*个指标的权重。

城市化方面,由各准则层权重可知,对城市化影响最大的是经济城市化和社会城市化。从具体指标权重计算结果可知,城市化的主要影响因素是第三产业增加值占GDP比重、万人拥有公共交通工具和每千人拥有医院床位数。由此可知,大清河流域产业结构和交通、医疗等基础设施建设对城市化综合水平影响较大。

水资源开发利用方面,影响最大的是水资源本底条件和水资源管理水平。大清河流域地处华北,天然降水量较少,水资源本底情况是水资源开发利用的显著限制条件,增加非常规水源供水占比有利于缓解本

底不足带来的影响。各指标权重排序从大到小为:生态环境用水率、非常规水源供水占比、人均水资源量、水资源总量折合地表径流深、干旱指数、人均用水量、污水处理率、单位粮食产量用水量、水资源开发利用率、万元GDP用水量、万元工业增加值用水量。

3 耦合协调度模型

城市化与生态资源开发利用之间复杂的耦合关系需要利用模型来进行定量的研究,对该类问题,很多学者已经进行了大量的研究和论证。部分学者借鉴了其他学科的方法理论,建立模型对二者之间的耦合关系进行研究,如经济环境协调度理论、协同学思想、系统科学理论、城市代谢理论等^[11-14]。在参考现有研究的基础上,本研究采用廖重斌提出的环境与经济发展的协调发展度模型^[15]。

协调度是度量系统或要素之间协调状况好坏程度的指标。根据实际需要,协调度可分为发展协调度和对比协调度两种,前者用于度量一个城市或区域在不同发展阶段环境与经济的协调状况,后者则用于度量

表2 准则层权重和各指标权重
Table 2 Criteria layer weights and weights of each indicator

目标层	准则层	准则层权重	指标层	指标权重
城市化	人口城市化	0.163 2	城镇人口比重	0.083 6
			总人口	0.079 7
			人均GDP	0.101 8
	经济城市化	0.316 2	第三产业增加值占GDP比重	0.116 2
			人均消费零售额	0.098 2
	空间城市化	0.206 0	人均城市拥有道路面积	0.096 1
			绿化覆盖率	0.109 9
	社会城市化	0.314 5	每千人拥有医院床位数	0.110 7
			万人拥有公共交通工具	0.114 4
万人在校大学生数			0.089 4	
水资源	本底条件	0.303 9	人均水资源量	0.107 8
			水资源总量折合地表径流深	0.103 9
			干旱指数	0.092 2
	水资源开发利用程度	0.161 5	人均用水量	0.090 6
			水资源开发利用率	0.070 9
	水资源开发利用效率	0.195 0	万元GDP用水量	0.065 7
			万元工业增加值用水量	0.055 9
			单位粮食产量用水量	0.073 5
	水资源管理水平	0.339 6	非常规水源供水占比	0.125 3
			污水处理率	0.079 3
			生态环境用水率	0.135 0

同一发展阶段或同一时期不同城市或区域之间环境与经济的协调状况。协调发展度模型就是基于协调发展的定义,将环境与经济协调发展水平高低定量化表示,即协调发展度或协调发展系数。廖重斌所提出的环境与经济发展协调发展度模型虽然计算简单,但却是基于协调概念的理论基础建立的,具有很高的稳定性和广泛的适用性,在城市化和水资源相关研究中,也被多次引用和论证^[10,16-17]。模型具体计算如下:

利用权重计算结果进行综合指数计算:

$$f(x) = \sum_i^m a_i \cdot x_i \quad (5)$$

$$g(y) = \sum_j^n b_j \cdot y_j \quad (6)$$

式中: $f(x)$ 为城市化综合指数, $g(y)$ 为水资源综合指数, a_i 、 b_j 分别为城市化第*i*个指标、水资源第*j*个指标的权重, x_i 和 y_j 分别为城市化和水资源各指标标准化后的值。

协调度计算公式:

$$C = \left\{ \frac{f(x) \cdot g(y)}{\left[\frac{f(x) + g(y)}{2} \right]^2} \right\}^K \quad (7)$$

式中: C 为协调度, K 是调节系数,一般令 $K \geq 2$,本文取 $K = 2$ 。其中,协调度取值为 $0 \leq C \leq 1$,越大则越协调。

根据协调度 C ,可计算协调发展度。协调发展度是用于度量城市化与水资源协调发展水平高低的定量指标,计算公式如下:

$$D = \sqrt{C \cdot T} \quad (8)$$

$$T = \alpha f(x) + \beta g(y) \quad (9)$$

式中: D 为协调发展度; C 为协调度; T 为城市化与水资源综合评价指数; α 和 β 为权重系数,分别代表城市化与水资源系统的权重。本研究认为城市化系统与水资源系统同样重要,故 α 和 β 均取0.5。

根据协调发展度的大小,可以将城市化与水资源的协调发展状况划分成三个层次10种类型,其中三个层次分别为协调发展类、过度类和失调衰退类,协调发展类协调发展度在0.6以上,代表两个系统之间发展关系稳中向好发展;失调衰退类协调发展度在0.4以下,两个系统之间存在抑制或者限制的关系;过度类介于二类之间,又分为勉强协调和濒临失调两类,详见表3。

表3 城市化与水资源协调发展状况的分类体系

Table 3 Classification system for coordinated development of urbanization and water resources

三大类	D	类型
协调发展类(可接受区间)	(0.90, 1.00]	优质协调发展类
	(0.80, 0.90]	良好协调发展类
	(0.70, 0.80]	中级协调发展类
	(0.60, 0.70]	初级协调发展类
过度类(过度区间)	(0.50, 0.60]	勉强协调发展类
	(0.40, 0.50]	濒临失调衰退类
失调衰退类(不可接受区间)	(0.30, 0.40]	轻度失调衰退类
	(0.20, 0.30]	中度失调衰退类
	(0.10, 0.20]	严重失调衰退类
	(0.00, 0.10]	极度失调衰退类

4 结果分析

根据上述城市化与水资源协调发展度模型,采用大清河流域2001—2021年的各指标数据,计算城市化综合发展指数和水资源综合指数及两者之间的协调发展度,结果见表4。

从表中可以看出,从2001—2021年城市化综合指

表4 城市化与水资源耦合模型计算结果

Table 4 Results of the coupled model between urbanization and water resources

年份	城市化综合指数	水资源综合指数	协调发展度
2001	0.018	0.052	0.144
2002	0.042	0.059	0.219
2003	0.067	0.179	0.278
2004	0.089	0.256	0.319
2005	0.127	0.197	0.383
2006	0.176	0.164	0.411
2007	0.207	0.312	0.488
2008	0.262	0.496	0.557
2009	0.390	0.384	0.622
2010	0.415	0.402	0.639
2011	0.458	0.540	0.702
2012	0.508	0.731	0.762
2013	0.583	0.555	0.754
2014	0.650	0.455	0.720
2015	0.763	0.586	0.807
2016	0.822	0.689	0.862
2017	0.819	0.638	0.841
2018	0.909	0.765	0.908
2019	0.917	0.675	0.872
2020	0.939	0.772	0.916
2021	0.977	0.895	0.966

数和水资源综合指数总体呈现上升趋势,协调发展度也逐年上升,城市化与水资源协调关系从2001年的严重失调衰退类变为2021年的优质协调发展类。

4.1 城市化水平分析

根据耦合模型计算结果,统计城市化各准则层的综合指数,绘制图2。

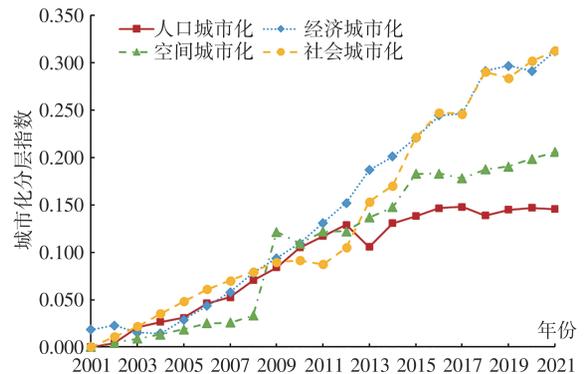


图2 城市化分层指数变化趋势

Fig.2 Trends of urbanization stratification index

从图2中可以看出,2001—2021年各类城市化指数上升趋势明显。其中人口城市化除2013和2018年出现小幅度回落,其余年份均稳步上升;经济城市化和社会城市化整体增速最快,但是经济城市化前期阶段存在波动,2004年开始直线增长;社会城市化在2010年出现增速变化,随后在线性趋势线上下跳动;空间城市化整体呈现明显的三级阶梯式增长。经济城市化和城市化的快速增长带动了整体城市化综合指数的上升,这也印证了经济城市化和城市化的快速增长对整体城市化影响较大的事实。

根据表4中城市化综合指数结果可知,大清河流域2001—2021年城市化水平稳步增长,总体呈现上升趋势。2014—2015年的上升速度最快,分析各指标具体数值得知,主要是由于该阶段第三产业增加值占比、人均拥有城市道路面积等指标较2014年有很大提升。2017年指数较2016年下降0.003,是由于人均消费零售额、城市人均拥有道路面积等指标数值有所下降。

4.2 水资源利用与发展分析

根据耦合模型计算结果,统计水资源各准则层的综合指数,变化过程见图3。

由图3可知:(1)水资源本底条件年际变化较大,这是受大清河流域天然降雨影响,丰、枯水年降雨量相差达6.4倍。(2)水资源开发利用程度的波动趋势和水资源本底条件相一致,但整体呈现上升趋势,这是因为

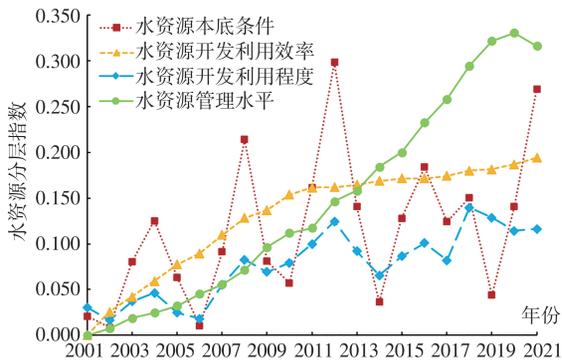


图3 水资源分层指数变化趋势

Fig.3 The changing trends of water resource stratification index

水资源开发利用程度除了受水资源本底情况影响,还受到社会用水情况的作用。(3)水资源开发利用效率稳定上升,但在2011年后上升速率逐渐减缓,这是随着节水技术和节水意识的提高,万元GDP用水量和万元工业增加值用水量降低,农业灌溉水有效利用系数提高,水资源利用效率得以提升,但是区域内整体产业结构变动不大,节水技术带来的水资源利用效率提升有限。只有从整体规划角度切入,调整产业结构和工业布局,淘汰或改造高耗水产业,引进高效节水工艺,才能大幅度提高水资源开发利用效率。(4)水资源管理水平有所波动,但是上升速率最快,这是因为中央及地方政府制定并出台了一系列的规划及方针政策,旨在改善京津冀地区水生态环境、修复生态问题,各地相关规划也在积极推进非常规水源利用、污水处理达标排放、生态修复等措施,这些对于水资源管理水平的提升有显著的推动作用。

根据表4中水资源综合指数计算结果可知,水资源综合指数从2001年以来总体上升,但是过程波动较大,基本以2年为一个转折波动上升。整体变化受水资源本底情况影响较大,变动趋势和本底情况较为一致;但总体趋势为上升状态,说明在水资源开发利用效率、水资源管理水平的有利影响下,水资源综合情况逐渐改善。

4.3 城市化与水资源耦合关系分析

将表4中协调发展度计算结果绘制成图4。可以看出,大清河流域从2001—2021年,城市化和水资源的协调发展度呈现稳步上升趋势,从2001年的严重失调衰退类转变为2021年优质协调发展类。其中2006年从失调衰退类改善为过度类、2009年从过度类转变为协调发展类。每个类型转折年份主要是2002、2004、2006、2008、2009、2011、2015、2018年,每



图4 协调发展度变化趋势

Fig.4 The trend of coordinated development degree

次逐级提升改善。2001—2021年协调发展度整体呈现上升趋势,但出现了三次小幅度下降。这三次下降主要原因是区域内降雨量和水资源总量较多年平均相对偏低。

大清河流域城市化与水资源耦合关系从不可接受区间的失调衰退类逐渐好转为可接受区间的协调发展类,从城市化发展滞后于水资源发展进程,到城市化发展与水资源发展交替追赶,再到城市化发展领先于水资源发展,两者之间的相互作用也在不停地转变。水资源对城市化的作用从支撑转变为约束,城市化对水资源的胁迫作用和优化作用也在不停地相互转换。总体而言,大清河流域城市化与水资源之间耦合关系是向好发展,但是在枯水年仍有不协调的情况发生,需要在后续的水资源配置中予以考虑,以实现水资源的优化利用。

5 结论与展望

以大清河流域为例,从机理上分析了城市化与水资源之间的相互影响机制,包括从水循环角度出发探讨城市化对其带来的影响、水资源对城市化的作用与制约、城市化对水资源的胁迫和优化。选取代表性指标,采用环境与经济发展协调发展度模型计算出2001—2021年期间大清河流域城市化水平的变化情况、水资源系统的变化情况和二者之间耦合关系的变化过程。得出以下结论:

(1)大清河流域城市化水平呈现线性上升趋势,经济城市化子系统对整体城市化的重要性最强,其次为社会城市化、空间城市化,人口城市化在大清河流域作用相对较弱。

(2)水资源系统整体呈现波动上升趋势,其中水资源管理水平占比最高,但是受到水资源本底情况年际变化的影响,波动情况较为明显。

(3) 大清河流域城市化与水资源关系协调度整体呈现上升趋势, 向着协调发展的方向发展, 从2001年的严重失调衰退类发展为优质协调发展类。其中偶有年份存在波动, 主要是受到水资源本底情况对于协调度的影响。

雄安新区作为国家级新区, 其建设与发展应是绿色、生态、可持续性的发展, 快速的城市化建设过程应与本地水资源条件及开发利用情况相协调。建议在后续的相关规划及政策上, 进一步优化水资源配置, 同时增加非常规水源利用占比, 以减少枯水年对于流域发展的限制与影响。

参考文献:

- [1] 张建云, 宋晓猛, 王国庆, 等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战——I. 城市水文效应[J]. 水科学进展, 2014, 25(4): 594-605.
- [2] 鲍超, 方创琳. 城市化与水资源开发利用的互动机理及调控模式[J]. 城市发展研究, 2010, 17(12): 19-23, 65.
- [3] 赵安周, 朱秀芳, 史培军, 等. 国内外城市化水文效应研究综述[J]. 水文, 2013, 33(5): 16-22.
- [4] 聂春霞, 刘晏良. 水资源约束下的新疆城市化过程预测[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(6): 193-197.
- [5] 李华, 师谦友, 高楠, 等. 西安城市化与水资源利用关系的量化研究[J]. 地域研究与开发, 2012, 31(5): 131-134, 139.
- [6] 李静芝, 朱翔, 李景保, 等. 洞庭湖区城镇化进程与水资源利用的关系[J]. 应用生态学报, 2013, 24(6): 1677-1685.
- [7] 左东启, 戴树声, 袁汝华, 等. 水资源评价指标体系研究[J]. 水科学进展, 1996(4): 367-374.
- [8] 钞锦龙, 李乐乐, 杨朔, 等. 汾河流域城市化与水资源耦合协调关系研究[J]. 地理科学, 2022, 42(3): 487-496.
- [9] 朱喜安, 魏国栋. 熵值法中无量纲化方法优良标准的探讨[J]. 统计与决策, 2015(2): 12-15.
- [10] 蒋元勇, 章茹, 丰镭斌. 南昌城市化与水资源环境交互耦合作用关系分析[J]. 人民长江, 2014, 45(14): 17-21.
- [11] 张晓东, 池天河. 90年代中国省级区域经济与环境协调度分析[J]. 地理研究, 2001(4): 506-515.
- [12] 刘耀彬, 李仁东, 宋学锋. 中国城市化与生态环境耦合度分析[J]. 自然资源学报, 2005(1): 105-112.
- [13] 乔标, 方创琳. 城市化与生态环境协调发展的动态耦合模型及其在干旱区的应用[J]. 生态学报, 2005(11): 211-217.
- [14] 彭思涵, 刘丙军, 林钟华. 基于代谢理论的城市化—水资源系统协同演化研究[J]. 水文, 2019, 39(4): 1-6.
- [15] 廖重斌. 环境与经济协调发展的定量评判及其分类体系——以珠江三角洲城市群为例[J]. 热带地理, 1999(2): 76-82.
- [16] 黄涛珍, 刘栋, 黄萍, 等. 基于耦合模型的城市化与水资源保护关系研究——以南京市为例[J]. 环境科学与管理, 2015, 40(12): 9-14.
- [17] 王博. 基于水足迹理论的吉林省辽河流域城市化进程中水资源可持续利用评价与优化配置研究[D]. 长春: 吉林大学, 2015.

Study on the Relationship between Urbanization and Water Resources Utilization in Daqing River Basin

HU Qiling

(Shanghai Municipal Engineering Design Institute (Group) Co.Ltd., Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to explore the correlation between urbanization and water resource utilization, the Daqing River Basin where Xiong'an New Area is located was taken as a case study. By establishing an indicator system for evaluating the process of urbanization and water resource utilization, the coordinated degree model of environment and economic development was used to evaluate the urbanization and water resource systems in the Daqing River Basin from 2001 to 2021. The process of two systems and their coupling relationship were analyzed. The results show that: (1) the urbanization level in the Daqing River Basin was increasing linearly. Economic urbanization contributed the most to overall urbanization, followed by social and spatial urbanization, while population urbanization was the least; (2) The overall water resources system was greatly affected by the background situation, but it was still increasing with fluctuations; (3) The coordinated development relationship between urbanization and water resources had evolved from severe imbalance and decline to high-quality coordinated development. This study could provide references for sustainable development of cities and scientific support for the "four water and four fixed" policy.

Keywords: urbanization; water resources; coupling model; Xiong'an New Area; Daqing River Basin