

DOI: 10.5846/stxb201802260387

鲍超, 邹建军. 基于人水关系的京津冀城市群水资源安全格局评价. 生态学报, 2018, 38(12): - .

Bao C, Zou J J. Evaluation of water resource security patterns in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration based on human-water relationships. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): - .

基于人水关系的京津冀城市群水资源安全格局评价

鲍超^{1,2,3,*}, 邹建军^{1,2,3}

1 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

2 中国科学院区域可持续发展分析与模拟重点实验室, 北京 100101

3 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

摘要: 京津冀城市群是我国乃至全世界人类活动对水循环扰动强度最大的地区之一, 水资源过度开发利用不仅严重影响生态环境安全, 而且制约着经济社会的可持续发展。基于人水关系协调视角, 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等 3 个方面建立了水资源安全综合评价指标体系, 并根据国内外发展经验和相关标准确定了评价标准阈值, 使得评价结果在不同的时空尺度上均具有可比性。然后通过熵技术支持下的层次分析法和多目标模糊隶属度函数, 对 2000—2014 年京津冀城市群水资源安全的时空格局进行了定量评价。结果表明: ①整个京津冀城市群的水资源安全指数多在 0.2—0.4 之间, 属于不安全类型, 但总体向临界安全类型转变; ②各城市的水资源安全指数在时空尺度上表现出较大差异, 总体表现为南低北高且随着时间的推移普遍提高的格局; ③整个京津冀城市群及各城市水资源安全指数的次级指标在时空尺度上也表现出一定的差异性和地域一致性, 它们交互作用, 最终综合决定着水资源安全指数的时空变化。

关键词: 人水关系; 资源与生态安全; 生态阈值; 多目标模糊隶属度函数; 时空格局; 京津冀城市群

Evaluation of water resource security patterns in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration based on human-water relationships

BAO Chao^{1,2,3,*}, ZOU Jianjun^{1,2,3}

1 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences Beijing 100101, China

2 Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, Chinese Academy of Sciences Beijing 100101, China

3 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration is one of the most water-deficient regions in China and globally owing to intense human activities. Overexploitation of water resources has greatly affected the eco-environmental security, and restricted the sustainable development of the socio-economic system. Regarding the coordinated development of human-water relationships, a comprehensive evaluation index system for water resources security was constructed, which was composed of three criterion layers, i.e., natural endowment of water resources, exploitation and utilization degree of water resources, and exploitation and utilization efficiency of water resources. The thresholds and grading standards for each specific indicator and their integrated indexes were set according to the experience of developed countries and regions, so that the evaluation results could be compared spatially and temporally. Subsequently, we used an Analytic Hierarchy Process (AHP) model reformed by entropy technology to calculate their weights, and establish a multi-objective fuzzy membership function to calculate the normalized values. We used the statistical data of 13 urban regions in the Beijing-

基金项目: 国家自然科学基金重大项目 (41590844); 国家重点研发计划 (2016YFC0503006); 中国科学院特色研究所培育建设服务项目 (TSYJS02)

收稿日期: 2018-02-26; 修订日期: 2018-05-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: baoc@igsrr.ac.cn

Tianjin-Hebei urban agglomeration during 2000—2014 to analyze the spatiotemporal pattern of water resources security. The results showed that: (1) for the whole region of the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration, most of the water resources security indexes were between 0.2 and 0.4, which were regarded as unsafe type during the period. However, they tended to become larger and the security type became critically safe; (2) various cities in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration had different water resources security indexes. Generally, they were smaller in the South and larger in the North; most became larger during the period; (3) the integrated indexes of the three criterion layers also had a high degree of regional consistency and disparity. They interacted with each other spatially and temporally, and impacted the spatiotemporal pattern of water resources security in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration.

Key Words: human-water relationship; resources and ecological security; ecological threshold; multi objective fuzzy membership function; spatiotemporal pattern; Beijing-Tianjin-Hebei; urban agglomeration

水资源是基础性的自然资源和关键性的生态环境要素,不仅关系着经济社会的稳定发展,也关系着一个国家和地区的生态环境安全^[1-3]。国内外学者对水资源安全的内涵进行了大量研究,虽然目前没有统一的定义,但除了基于生态系统的水资源安全视角外,普遍认为水资源安全更多的表现为水资源的社会属性,特别是与人和自然的关系,即包含了自然水循环与社会经济系统水循环两方面的健康运行状态^[2-4]。许多学者从水资源安全的影响因素、评价体系、安全机理、预警及保障方面进行了深入研究^[4-6]。其中水资源安全评价是水资源安全研究的关键问题之一,具体就是筛选科学合理的水资源安全度量指标并构建综合测度模型,来评价水资源安全保障程度。

近年来,许多学者采用各种单项指标、综合指标、综合评价模型对不同区域水资源安全进行评价。在单项评价指标中,常用的有区域人均水资源量和水资源开发利用程度^[7-8],而且对其安全阈值逐渐进行了修正和细化^[9-10]。虽然单项指标简明易用,但由于水资源安全是一个综合的概念,仅用一两个指标难以反映其全部内容,而且这两个单项指标在部分地区反映的水资源安全状况可能完全相反,因此有必要构建水资源安全评价的综合指标。常用的综合指标有水安全指数(Water Security Index)^[11]、水贫乏指数(Water Poverty Index)^[12-13]、水压力综合指数(Integrated Water Stress Index)^[14]、水短缺指数(Water Scarcity or Shortage Index)^[15]、水资源承载力指数(Water Resources Carrying Capacity Index)^[16]等,虽然综合考虑了社会、经济、资源、环境等各方面内容,能够较为全面地反映出不同区域的水资源状况及水安全程度,但大部分指标体系比较复杂,数据可获得性及评价结果的时空可比性较难保障。常用的综合评价模型和方法有层次分析法、综合指数法、集对分析法、物元模型法、逻辑斯蒂曲线法等^[17-23]。这些评价模型和方法各有优缺点,总体上需要根据指标体系的特点和决策者的偏好进行选择^[24-25]。为此,本文提出了一种既能较为全面反映水资源安全状况,又在不同时空尺度上均具有数据可获得性、结果可比性的水资源安全评价方法,并以我国乃至全世界人类活动对水循环扰动强度最大地区之一的京津冀城市群为研究区域,对其水资源安全的时空格局进行了定量评价。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区域概况

京津冀城市群位于 116°43'—119°50' E, 36°05'—42°40' N 之间,属温带季风气候、半湿润地区和海河流域,年平均降水量为 400—800 mm,在行政区划上包括北京市、天津市以及河北省下辖的全部 11 个地级市。它是我国经济最具活力、开放程度最高、创新能力最强、吸纳人口最多的地区之一,也是水资源极为短缺和用水效率较高的地区之一^[26]。据统计,2014 年京津冀城市群土地总面积约 $21.68 \times 10^4 \text{ km}^2$,占全国的 2.26%;常住人口为 1.12×10^8 人,占全国的 8.18%;地区生产总值为 6.66×10^{12} 元,占全国的 10.46%;人均 GDP 为 5.95 万元,为全国平均水平的 1.26 倍;水资源总量为 $203.69 \times 10^8 \text{ m}^3$,占全国的 0.75%;人均水资源量为 182 m^3 ,仅为

全国平均水平的 9.14%;水资源总量折合地表径流深为 95 mm,为全国平均水平的 33.57%;用水总量为 $250.03 \times 10^8 \text{ m}^3$,占全国的 4.10%;人均综合用水量为 224 m^3 ,为全国平均水平的 50%;万元 GDP 用水量为 38 m^3 ,为全国平均水平的 40%。长期以来,京津冀城市群水资源过度开发利用引起了一系列生态环境问题,如河道断流、湿地萎缩、地下水位下降、水体严重污染、地下水漏斗成片、土地退化等,在强人类活动干扰及脆弱生态环境约束下,水资源已成为制约京津冀城市群经济社会发展的关键要素^[26-27]。

1.2 指标体系与数据获取

遵循科学性与可比性、综合性与主导性、系统性与层次性、动态性与稳定性、针对性与可行性等相结合的原则,重点考虑水资源的自然属性及社会属性之间的交互影响,尤其是水资源对人类生态、生产、生活需求的保障程度以及人类对水资源利用的积极能动作用和适应性,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 3 个方面选取 9 个指标构成水资源安全的综合评价指标体系(表 1)。其中,所有层级的指标都能体现水资源对人类活动的供需满足程度以及人水关系协调或矛盾状况。水资源本底条件越好、水资源开发利用程度越低、水资源开发利用效率越高,最终会使水资源安全程度越高。本文以京津冀城市群 13 个地级以上城市为研究单元,并将主要研究时段定为 2000—2014 年。所需的社会经济数据主要来源于历年《北京统计年鉴》、《天津统计年鉴》、《河北经济年鉴》,而且为使经济数据在时间序列上具有可比性,地区生产总值及分产业增加值均以 2000 年为基准换算为可比价格;所需的水资源和用水数据主要来源于历年《北京市水资源公报》、《天津市水资源公报》、《河北省水资源公报》。

表 1 水资源安全的综合评价指标体系及权重

Table 1 Integrated indicator system of water resources security index and the weights

准则层 Criterion layer	指标层 Index layer	指标计算方法 Description or calculation
水资源本底条件(0.4830) Natural endowment of water resources (0.4830)	人均水资源量(0.5000) 水资源总量折合地表径流深(0.5000)	水资源总量/总人口/($\text{m}^3/\text{人}$) 水资源总量/国土面积/mm
水资源开发利用程度(0.3011) Exploitation and utilization degree of water resources (0.3011)	水资源开发利用度(0.4481) 地表水开采率(0.2595) 地下水开采率(0.2924)	用水总量/水资源总量/% 地表水供水量/地表水资源量/% 地下水开采量/地下水资源量/%
水资源开发利用效率(0.2160) Exploitation and utilization efficiency of water resources (0.2160)	万元 GDP 用水量(0.3697) 万元农业增加值用水量(0.2058) 万元工业增加值用水量(0.2163) 人均生活用水量(0.2081)	用水总量/GDP/($\text{m}^3/\text{万元}$) 农业用水量/第一产业增加值/($\text{m}^3/\text{万元}$) 工业用水量/工业增加值/($\text{m}^3/\text{万元}$) 生活用水量/总人口/($\text{m}^3/\text{人}$)

1.3 评价标准与阈值判断

为了能够对水资源安全综合指数及准则层的综合指数进行合理分级,以 0.2 为极差将各类综合指数分为极不安全、不安全、临界安全、较安全、非常安全 5 级(表 2)。为了使评价结果在时间、空间尺度上均具有可比性并且更具有现实指导意义,通过参考国内外相关文献、国内外发达国家和地区的发展经验、全国平均水平,同时根据样本数据分布特点及经验值,最终确定了 9 个具体指标对应水资源安全综合指数分级标准的阈值(表 2)。

例如,某研究单元的具体指标人均水资源量在 $500\text{—}1000 \text{ m}^3$ 之间,则其对应的准则层水资源本底条件综合指数在 0.2—0.4 之间,其对应的目标层水资源安全综合指数也在 0.2—0.4 之间,其对应的水资源安全类型为不安全。当然,由于该研究单元的其他指标如水资源总量折合地表径流深不一定在 $40\text{—}70 \text{ mm}$ 之间,因而会提升或降低最终的水资源安全综合指数。而该研究单元最终属于哪一类型,需要构建数学模型进行综合评价。其他具体指标的情况类似。

1.4 熵技术支持下的层次分析法

层次分析法是一种常用的定性与定量相结合的确定指标权重的方法^[30]。其主要步骤是将要解析的复杂问题分解为若干层次,由专家和决策者对同一层次各指标两两比较重要程度构造判断矩阵,利用各判断矩阵

的特征向量来确定该层指标对上层指标的贡献度,最终得到基层指标对总目标而言的赋权结果^[30]。采用层次分析法识别问题的系统性强,但在专家咨询时容易产生循环而不满足传递性原理,导致部分信息丢失,因此采用熵技术法对权重系数进行修正^[31-32]。具体方法为:

表 2 水资源安全指标的分级标准及阈值

Table 2 Grading standards and threshold values of the evaluation indicators for water resources security

指标排序 Index sorting	具体指标 Specific indicator	安全类型 Security type					
		极不安全 Very unsafe	不安全 Critical safe	临界安全 Critical safe	较安全 Less safe	非常安全 Very safe	
1	水资源安全综合指数	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
2	水资源本底条件	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
3	水资源开发利用程度	1	0.8	0.6	0.4	0.2	0
4	水资源开发利用效率	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
5	人均水资源量 ^①	0	500	1000	1700	2200	3000
6	水资源总量折合地表径流深 ^②	0	40	70	100	150	200
7	水资源开发利用效率 ^③	150	100	70	40	20	0
8	地表水开采率 ^③	100	80	60	40	20	0
9	地下水开采率 ^③	100	80	60	40	20	0
10	万元 GDP 用水量 ^④	2000	1500	1000	500	250	0
11	万元农业增加值用水量 ^④	10000	5000	2000	1000	500	0
12	万元工业增加值用水量 ^④	1000	500	200	100	50	0
13	人均生活用水量 ^④	100	80	60	40	20	0

参考文献:[5, 7, 9]; ②参考文献:[26, 28]; ③参考文献:[5, 8—9, 29]; ④根据发达国家和地区经验

首先,对判断矩阵 A 按列做归一化处理得矩阵 $B = \{b_{ij}\}_{n \times n}$

$$b_{ij} = a_{ij} / \sum_{i=1}^n a_{ij} \quad (1)$$

式中, $A = \{a_{ij}\}_{n \times n}$ 为根据同层次两两元素相对重要性构造的判断矩阵。

其次,计算第 j 项指标的熵值 e_j ,

$$e_j = - \frac{1}{\ln(n)} \sum_{i=1}^n b_{ij} \times \ln(b_{ij}) \quad (2)$$

计算第 j 项指标的冗余度 g_j ,

$$g_j = 1 - e_j \quad (3)$$

计算第 j 项指标的信息权重 v_j ,

$$v_j = g_j / \sum_{j=1}^n g_j \quad (4)$$

则第 j 项指标的熵化权重 r_j 为:

$$r_j = v_j p_j / \left(\sum_{j=1}^n v_j p_j \right) \quad (5)$$

式中, p_j 为层次分析法得出的 j 项指标权重。

1.5 多目标模糊隶属度函数标准化法

为了解决各具体指标量纲不同而难以加权综合的问题,需要对各具体指标的属性值进行标准化。常用的标准化方法有离差标准化(Max-min normalization)、标准差标准化(Z-score normalization)、比例标准化(Ratio normalization),且各有优劣^[33]。在应用上述方法时,由于只考虑到样本数据,使得标准化后的数值仅在样本数据所在的时空范围内具有相对可比性;而且当样本数据中某项指标的差异较大时,标准化结果可能与定性认识相差较远。例如,若对京津冀城市群历年分地级行政单元人均水资源量进行离差标准化,则标准化值为

0 和 1 仅能说明在京津冀城市群该时段范围内人均水资源量相对最低和最高,而不能说明其实际人均水资源量究竟是高是低。而且,当某一行政单元的人均水资源量相对很大时,其他行政单元的标准化值都会接近于 0,而实际上其他行政单元的人均水资源量也存在明显差异。为此,本文构建了多目标模糊隶属度函数标准化方法。

设指标集为 $W = \{w_1, w_2, \dots, w_j\}$, 评语集为 $H = \{h_1, h_2, h_3, h_4, h_5\}$, 结合表 2 中水资源安全指数分级标准,令 h_1 :极不安全, h_2 :不安全, h_3 :临界安全, h_4 :较安全, h_5 :非常安全,评语 h_1, h_2, h_3, h_4, h_5 所对应的水资源安全综合指数区间分别为 $[k_1, k_2)$ 、 $[k_2, k_3)$ 、 $[k_3, k_4)$ 、 $[k_4, k_5)$ 、 $[k_5, k_6]$ 。显然, $k_1 = 0, k_2 = 0.2, k_3 = 0.4, k_4 = 0.6, k_5 = 0.8, k_6 = 1$ 。对于任意指标 j , 假设水资源安全综合指数阈值 $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$ 对应指标的标准值分别为 $u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6$ 。

对于正向指标,其隶属度公式为:

$$s_{\lambda ij} = \begin{cases} k_1 & x_{\lambda ij} < u_1 \\ \frac{k_{n+1} - k_n}{u_{n+1} - u_n} \times (x_{\lambda ij} - u_n) + k_n & u_n \leq x_{\lambda ij} \leq u_{n+1} (1 \leq n \leq 5) \\ k_6 & x_{\lambda ij} > u_6 \end{cases} \quad (6)$$

对于逆向指标,其隶属度公式为:

$$s_{\lambda ij} = \begin{cases} k_1 & x_{\lambda ij} > u_1 \\ \frac{k_{n+1} - k_n}{u_n - u_{n+1}} \times (u_n - x_{\lambda ij}) + k_n & u_{n+1} \leq x_{\lambda ij} \leq u_n (1 \leq n \leq 5) \\ k_6 & x_{\lambda ij} < u_6 \end{cases} \quad (7)$$

式中, $s_{\lambda ij}$ 为第 λ 年 i 研究区域第 j 项指标的标准化值或隶属度, $x_{\lambda ij}$ 为第 λ 年 i 研究区域第 j 项指标的实际值。

1.6 综合指数集成

根据各具体指标的熵化权重和标准化值,利用加权法可分别计算准则层、目标层的综合指数。限于篇幅,仅列出目标层的计算公式。

$$F_{\lambda i} = \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n (s_k^l \times s_j^k \times s_{\lambda ij}) \quad (8)$$

式中, $F_{\lambda i}$ 为第 λ 年 i 研究区域的水资源安全综合指数, s_j^k 为指标相对于准则层的熵化权重, s_k^l 为准则层对目标层的熵化权重, m, n 分别为准则层和指标层里相应的评价指标个数。

2 结果分析

2.1 京津冀城市群水资源安全的总体变化特征

(1) 水资源安全综合指数。由 2000 年的 0.2324 波动上升至 2014 年的 0.3690, 除 2012 年达 0.4919 外, 始终介于 0.2—0.4 之间, 总体属于不安全水平(图 1)。其中, 水资源开发利用程度(负向指标)和水资源开发利用效率(正向指标)表征的水资源安全状况形成了较大的反差, 二者在产生一定的互相抵消之后, 最终综合导致水资源本底条件与水资源安全综合指数的变化趋势基本类似。

(2) 水资源本底条件。由 2000 年的 0.2050 波动上升至 2014 年的 0.3196, 除 2001 年和 2002 年稍低于 0.2、2012 年稍高于 0.4 外, 其他年份都介于 0.2—0.4 之间, 属于不安全类型。其中, 人均水资源量的标准化值在 0.0462—0.1145 之间, 属于极不安全类型; 水资源总量折合地表径流深的标准化值除 2012 年达到 0.7735 外, 其他年份均在 0.2622—0.5983 之间, 属于不安全和临界安全类型。具体来看, 由于近年来水资源总量的提高, 导致上述指标提升, 从而使水资源本底条件略有改善。

(3) 水资源开发利用程度。由 2000 年的 1 波动下降至 2014 年的 0.8819, 除 2012 年降至 0.6660 外, 始终介于 0.8—1 之间, 属于极不安全类型。其中, 水资源开发利用程度由于多数年份超过 100% 甚至 150%, 其标准

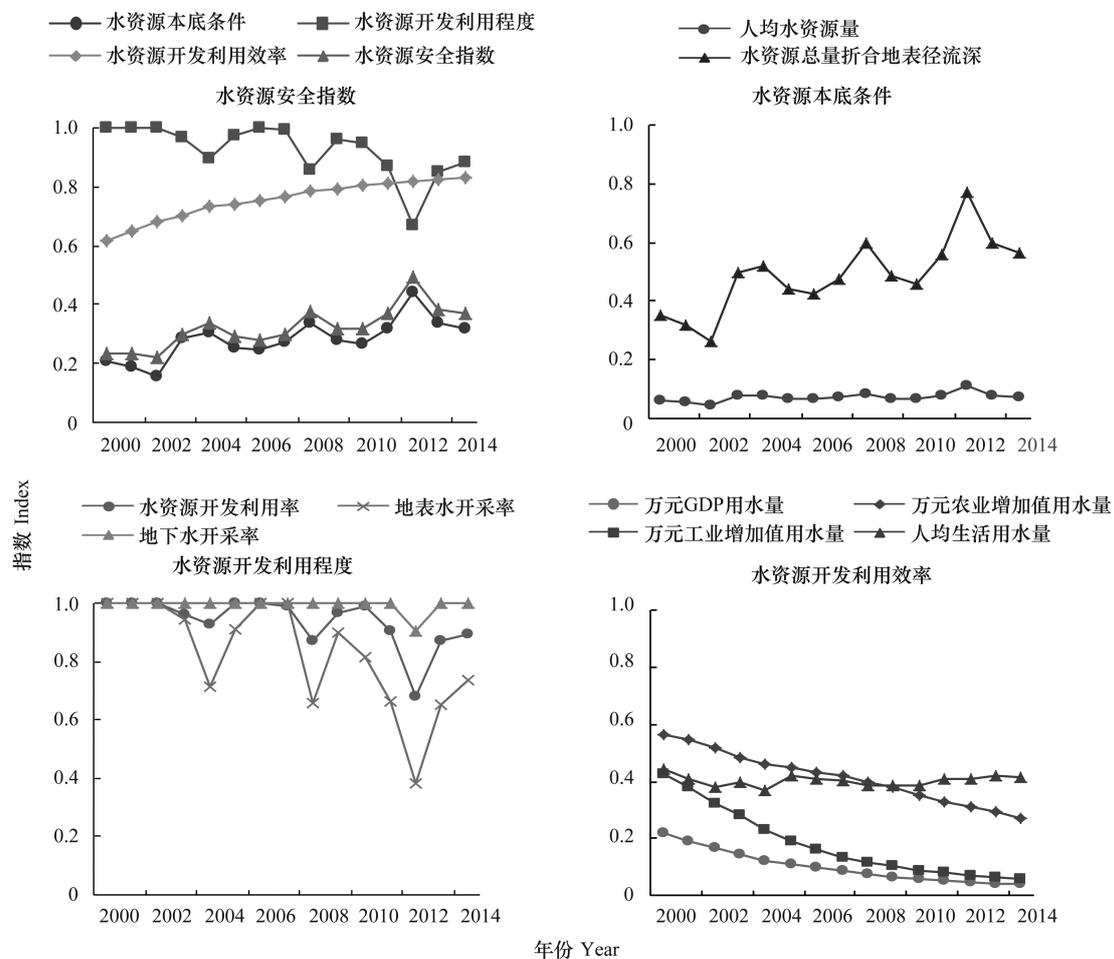


图1 2000—2014年京津冀城市群水资源安全指数各指标的时间变化

Fig.1 Temporal variation of the specific indicators of water resources security index in the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration in 2000—2014

化值除2012年为0.6775外,其他年份均在0.8—1之间,属于极不安全类型;地表水开采率除2012年外,其他年份均超过60%,多数年份均超过80%,其标准化值也多在0.8—1之间,属于极不安全类型;地下水超采十分严重,除2012年外,浅层地下水均100%被开采,其标准化值均为1,属于极不安全类型。具体来看,由于近年来水资源总量提高、用水总量被控制,导致水资源开发利用程度有所减小,但并未改变水资源严重超采的现实。

(4) 水资源开发利用效率。由2000年的0.6176逐步上升至2014年的0.8293,由较安全过渡到非常安全类型。其中,万元GDP用水量由0.2211逐步下降至0.0407(其对应的用水效率由0.7789上升至0.9593),逐步达到国际先进水平;万元农业增加值用水量由0.5648逐步下降至0.2715(其对应的用水效率由0.4352上升至0.7285),由国际较低水平上升到较高水平;万元工业增加值用水量由0.4277逐步下降至0.0608(其对应的用水效率由0.5723上升至0.9392),由国际较低水平上升到先进水平;人均生活用水量在0.4左右波动(其对应的用水效率在0.6左右波动),总体属于中等水平。

2.2 京津冀城市群水资源安全的空间格局变化

(1) 水资源本底条件。2000—2014年各城市绝大部分属于不安全或极不安全类型,少数属于临界安全类型,个别出现较安全类型,并且水资源本底条件由北向南逐渐趋好(图2)。从2000—2014年各城市水资源本底条件的多年平均值来看,在0—0.2之间的城市仅承德市1个,占7.69%,人均水资源量较少且水资源总量折合地表径流深更小,为极不安全类型;在0.4—0.6之间的有北京市、唐山市、秦皇岛市3个,占23.08%,为临界安全类型;其他9个城市均在0.2—0.4之间,占69.23%,为不安全类型。

(2)水资源开发利用程度。2000—2014年各城市绝大部分属于极不安全类型,少数属于不安全类型,个别出现临界安全和较安全类型,总体上水资源超采严重,南部地区更甚(图3)。从2000—2014年各城市水资源开发利用程度的多年平均值来看,在0.4—0.6之间的有张家口市、承德市2个,占15.38%,为临界安全类型;在0.6—0.8之间的城市仅有秦皇岛市1个,占7.69%,为不安全类型;其他10个城市均在0.8—1之间,占76.92%,为极不安全类型。

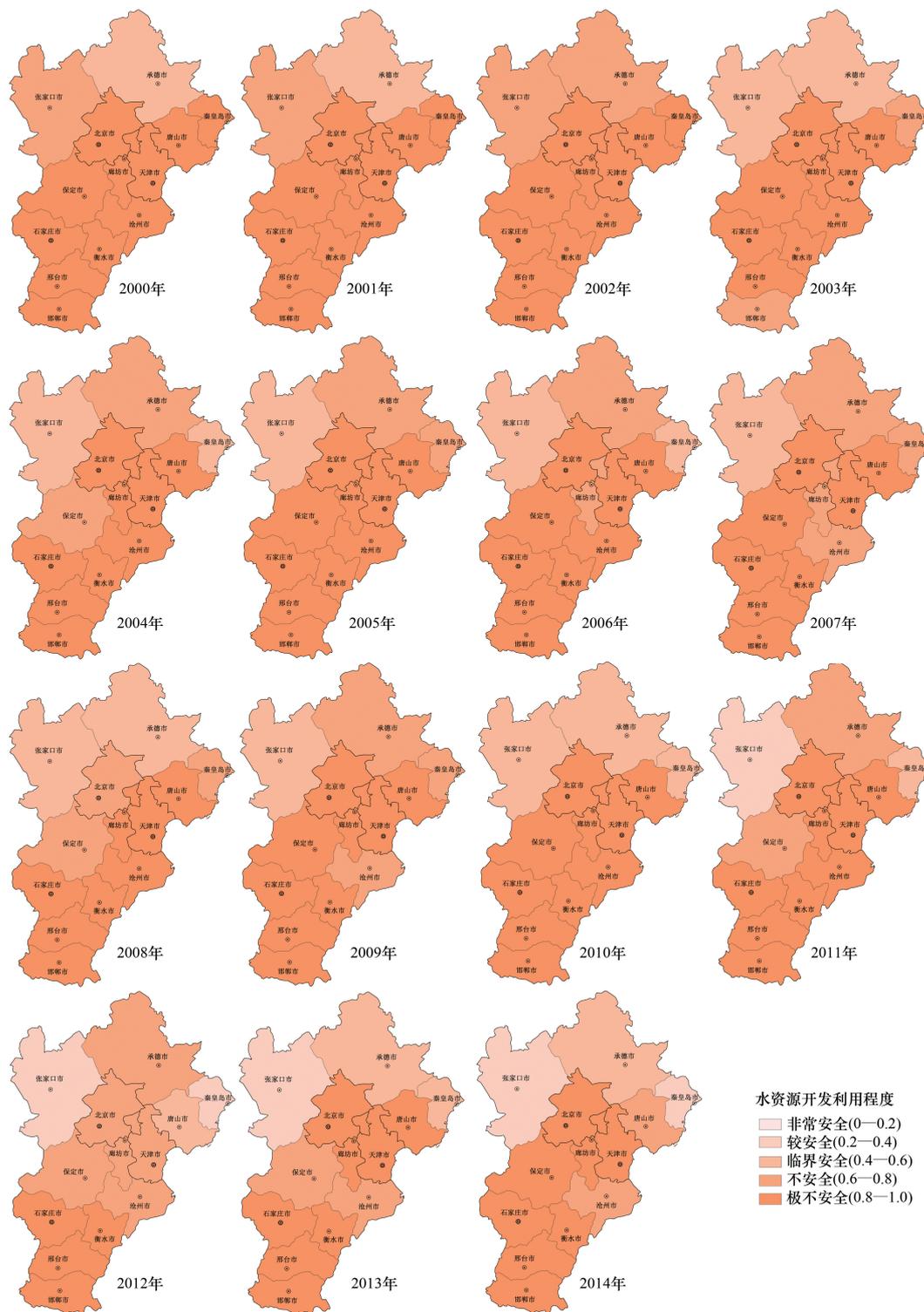


图3 2000—2014年京津冀城市群分城市水资源开发利用程度的时空变化

Fig.3 Spatiotemporal variation of exploitation and utilization degree of water resources by prefecture in the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration in 2000—2014

(3)水资源开发利用效率。2000—2014 年各城市绝大部分属于较安全或非常安全类型,少数属于临界安全类型,个别出现不安全类型,并且水资源开发利用效率由北向南逐渐趋好(图 4)。从 2000—2014 年各城市水资源开发利用效率的多年平均值来看,在 0.4—0.6 之间的城市仅有保定市 1 个,占 7.69%,为临界安全类型;在 0.8—1 之间的有承德市、廊坊市、秦皇岛市 3 个,占 23.08%,为非常安全类型;其他 9 个城市均在 0.6—0.8 之间,占 69.23%,为较安全类型。

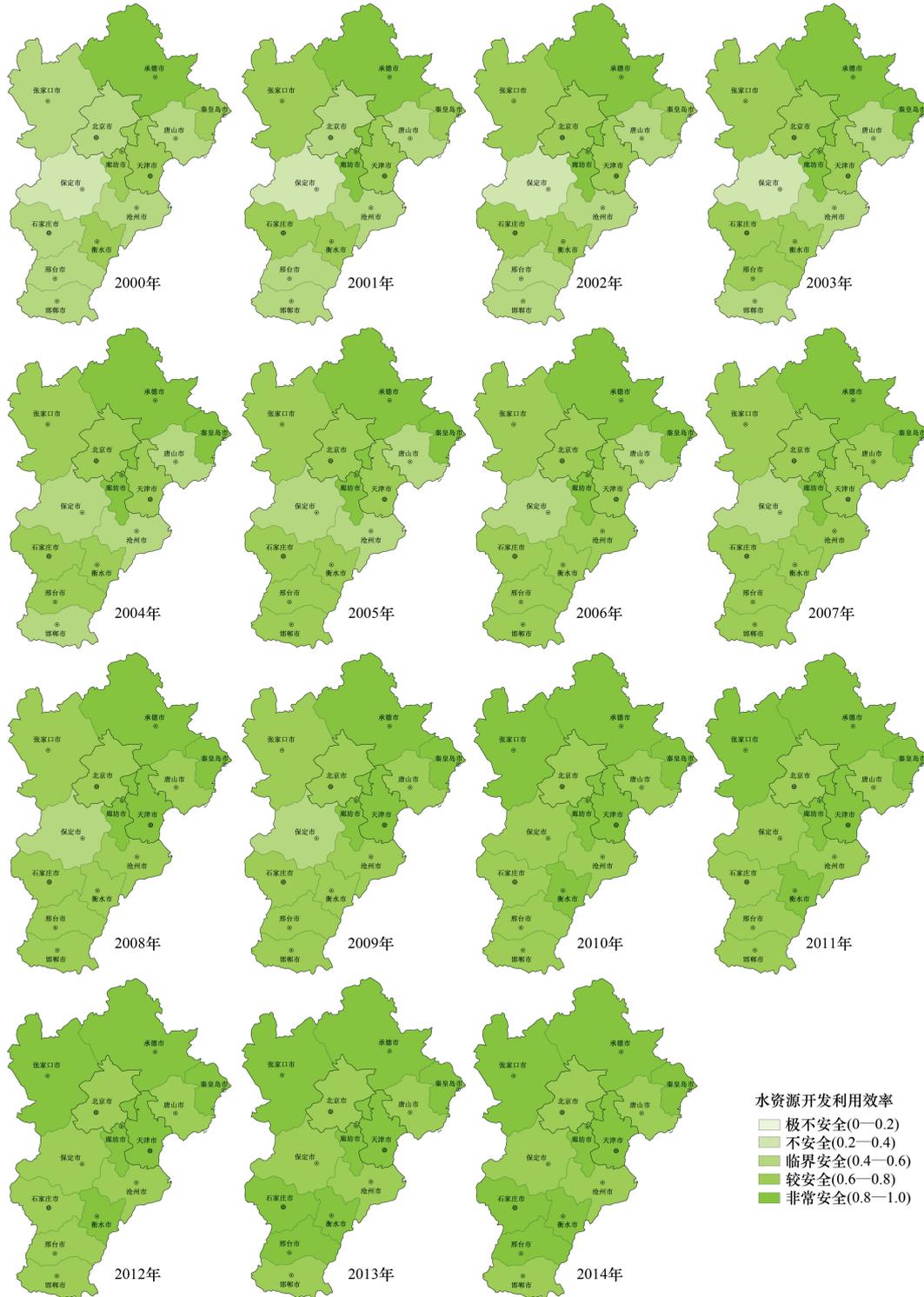


图 4 2000—2014 年京津冀城市群分城市水资源开发利用效率的时空变化

Fig.4 Spatiotemporal variation of exploitation and utilization efficiency of water resources by prefecture in the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration in 2000—2014

(4)水资源安全综合指数。2000—2014年各城市绝大部分属于不安全或临界安全类型,少数属于极不安全类型,个别出现较安全类型,并且水资源安全状况总体上由北向南逐渐趋好(图5)。从2000—2014年各城市水资源安全指数的多年平均值来看,仅有秦皇岛市和张家口市在0.4—0.6之间,占15.38%,为临界安全类型;其他11个城市均在0.2—0.4之间,占84.62%,为不安全类型。

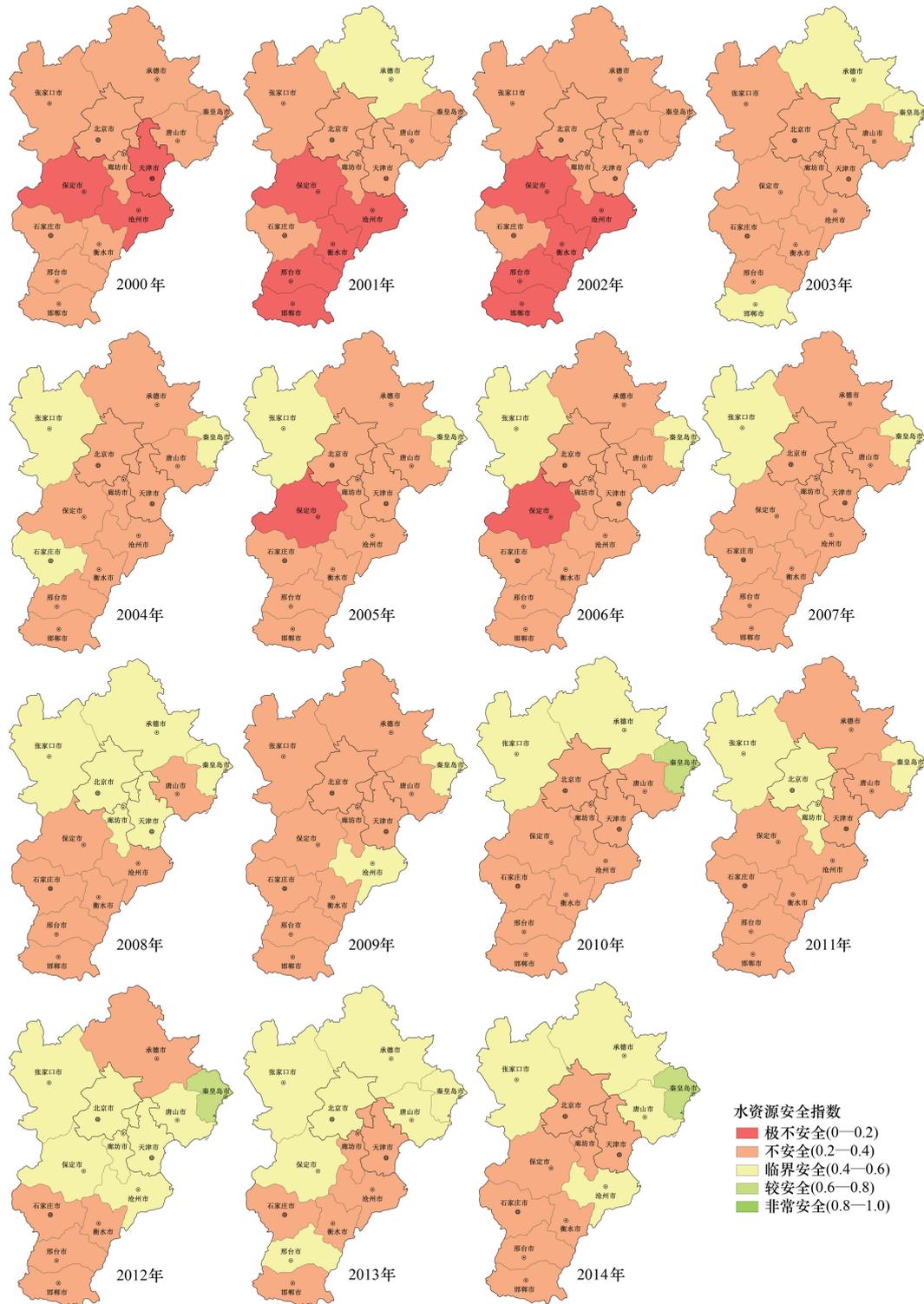


图5 2000—2014年京津冀城市群分城市水资源安全指数的时空变化

Fig.5 Spatiotemporal variation of water resources security index by prefecture in the Beijing-Tianjin-Hebei Urban Agglomeration in 2000—2014

3 结论与讨论

基于体现水资源对人类生态、生产、生活的供需满足程度以及人水关系协调或矛盾状况的视角,构建了水资源安全的综合评价指标体系与评价标准,采用熵技术支持下的层次分析法和多目标模糊隶属度函数,对2000—2014年京津冀城市群水资源安全的时空变化特征进行了评价。研究得出以下主要结论:

(1)整个京津冀城市群的水资源本底条件绝大多数年份均属于不安全类型,水资源开发利用程度属于极不安全类型,水资源开发利用效率由较安全过渡到非常安全类型,最终综合导致水资源安全指数绝大多数年份在0.2—0.4之间,总体属于不安全类型。同时,由于水资源略有增加、用水受到总量控制、用水效率也逐步提高,京津冀城市群虽然人口和经济增长较快,但水资源总体向临界安全类型转变。

(2)京津冀城市群各城市的水资源本底条件北差南好,水资源开发利用程度北低南高,水资源开发利用效率北高南低,三者空间上的关系出现错位,最终导致水资源安全指数在时空尺度上表现出一定的差异,总体表现为南低北高且随着时间的推移普遍提高的格局。这与人类逐水而居并导致水资源富集地区人水关系紧张的局面基本类似。同时,通过人类的主动性和适应性调整,发展到一定阶段后也可以逐步缓解人水之间的矛盾。但是,由于整体受水资源的限制,京津冀城市群各城市水资源安全指数及次级指标在时空尺度上虽有差异,但地域一致性特点也较突出,如69.23%的城市水资源本底条件为不安全类型,76.92%的城市水资源开发利用程度为极不安全类型,69.23%的城市水资源开发利用效率为较安全类型,84.62%的城市为水资源不安全综合类型。

此外,本文虽提出了一种既能较为全面反映水资源安全状况,又在不同时空尺度上均具有数据可获得性、结果可比性的水资源安全评价方法,但仍有一些不足之处:一是由于国内外对水资源安全没有统一认识及数据资料限制,在指标体系的设计和评价标准的判断上还有待完善,如水资源安全仅考虑了供水数量安全,未考虑供水质量安全;二是受篇幅限制,未能对京津冀城市群水资源安全格局的变化机理、城市间的互动功能、应对策略进行详细剖析。在京津冀协同发展的国家战略背景下,今后如能在上述方面取得重点突破,无疑具有重要的理论创新和实践价值。

参考文献(References):

- [1] Bao C, Fang C L. Water resources flows related to urbanization in China: Challenges and perspectives for water management and urban development. *Water Resources Management*, 2012, 26(2): 531-552.
- [2] Cook C, Bakker K. Water security: Debating an emerging paradigm. *Global Environmental Change*, 2012, 22(1): 94-102.
- [3] Shao D G, Yang F S, Xiao C, Tan X Z. Evaluation of water security: an integrated approach applied in Wuhan urban agglomeration, China. *Water Science & Technology*, 2012, 66(1): 79-87.
- [4] 邵骏, 欧应钧, 陈金凤, 郭卫. 基于水贫乏指数的长江流域水资源安全评价. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(6): 889-894.
- [5] 贾绍凤, 张军岩, 张士锋. 区域水资源压力指数与水资源安全评价指标体系. *地理科学进展*, 2002, 21(6): 538-545.
- [6] 郑通汉. 论水资源安全与水资源安全预警. *中国水利*, 2003, (11): 19-22.
- [7] Falkenmark M, Lundqvist J, Widstrand C. Macro-scale water scarcity requires micro-scale approaches. *Natural Resources Forum*, 1989, 13(4): 258-267.
- [8] Vörösmarty C J, Douglas E M, Green P A, Revenga C. Geospatial indicators of emerging water stress: An application to Africa. *Ambio*, 2005, 34(3): 230-236.
- [9] Pedro-Monzónis M, Solera A, Ferrer J, Estrela T, Paredes-Arquiola J. A review of water scarcity and drought indexes in water resources planning and management. *Journal of Hydrology*, 2015, 527: 482-493.
- [10] Simha P, Mutiara Z Z, Gaganis P. Vulnerability assessment of water resources and adaptive management approach for Lesvos Island, Greece. *Sustainable Water Resources Management*, 2017, 3(3): 283-295.
- [11] Jia X L, Li C H, Cai Y P, Wang X, Sun L. An improved method for integrated water security assessment in the Yellow River basin, China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2015, 29(8): 2213-2227.
- [12] Sullivan C A, Meigh J R, Giacomello A M. The water poverty index: development and application at the community scale. *Natural Resources*

- Forum, 2003, 27(3): 189-199.
- [13] Sullivan C. Calculating a water poverty index. *World Development*, 2002, 30(7): 1195-1210.
- [14] Liu M, Wei J H, Wang G Q, Wang F. Water resources stress assessment and risk early warning-a case of Hebei Province China. *Ecological Indicators*, 2017, 73: 358-368.
- [15] Zeng Z, Liu J G, Savenije H H G. A simple approach to assess water scarcity integrating water quantity and quality. *Ecological Indicators*, 2013, 34: 441-449.
- [16] Gong L, Jin C L. Fuzzy comprehensive evaluation for carrying capacity of regional water resources. *Water Resources Management*, 2009, 23(12): 2505-2513.
- [17] 刘斌涛, 陶和平, 孔博, 何兵. 云南省水资源时空分布格局及综合评价. *自然资源学报*, 2014, 29(3): 454-465.
- [18] 高媛媛, 王红瑞, 许新宜, 高雄, 史秋阳. 水资源安全评价模型构建与应用——以福建省泉州市为例. *自然资源学报*, 2012, 27(2): 204-214.
- [19] 陆建忠, 崔肖林, 陈晓玲. 基于综合指数法的鄱阳湖流域水资源安全评价研究. *长江流域资源与环境*, 2015, 24(2): 212-218.
- [20] 卢敏, 张展羽, 石月珍. 集对分析法在水安全评价中的应用研究. *河海大学学报: 自然科学版*, 2006, 34(5): 505-508.
- [21] 刘邦贵, 刘永强, 王浩, 姚悦铃. 基于物元分析法的区域水资源安全评价. *南水北调与水利科技*, 2014, 12(5): 100-103.
- [22] 黄乾, 彭世彰, 田守岗, 李玉国, 徐俊增. 模糊物元模型在区域水安全评价中的应用. *河海大学学报: 自然科学版*, 2007, 35(4): 379-383.
- [23] 宋培争, 汪嘉杨, 刘伟, 余静, 张碧. 基于 PSO 优化逻辑斯蒂曲线的水资源安全评价模型. *自然资源学报*, 2016, 31(5): 886-893.
- [24] Gain A K, Giupponi C. A dynamic assessment of water scarcity risk in the Lower Brahmaputra River Basin: an integrated approach. *Ecological Indicators*, 2015, 48: 120-131.
- [25] Pires A, Morato J, Peixoto H, Botero V, Zuluaga L, Figueroa A. Sustainability assessment of indicators for integrated water resources management. *Science of the Total Environment*, 2017, 578: 139-147.
- [26] 鲍超, 贺东梅. 京津冀城市群水资源开发利用的时空特征与政策启示. *地理科学进展*, 2017, 36(1): 58-67.
- [27] 刘登伟. 京津冀大都市圈水资源短缺风险评价. *水利发展研究*, 2010, 10(1): 20-24.
- [28] 吴佩林. 我国区域发展的水资源压力分析. *西北农林科技大学学报: 自然科学版*, 2005, 33(10): 143-149.
- [29] European Environment Agency. *The European Environment-State and Outlook 2005*. Copenhagen: European Environmental Agency, 2005.
- [30] Ho W. Integrated analytic hierarchy process and its applications-A literature review. *European Journal of Operational Research*, 2008, 186(1): 211-228.
- [31] 方创琳, 毛汉英. 区域发展规划指标体系建立方法探讨. *地理学报*, 1999, 54(5): 410-419.
- [32] 鲍超, 方创琳. 干旱区水资源对城市化约束强度的时空变化分析. *地理学报*, 2008, 63(11): 1140-1150.
- [33] Pollesch N L, Dale V H. Normalization in sustainability assessment: methods and implications. *Ecological Economics*, 2016, 130: 195-208.