

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2025.03.004; CSTR:32311.14.rswc.2025.03.004.

张睿玺, 查小春, 尚丽君. 汉江上游安康市2010—2021年人水关系协调发展研究[J]. 水土保持研究, 2025, 32(3): 384-393.

Zhang Ruixi, Zha Xiaochun, Shang Lijun. Study on coordinated development of human-water relationship in Ankang City, Upper Hanjiang River, from 2010 to 2021[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(3): 384-393.

汉江上游安康市2010—2021年人水关系协调发展研究

张睿玺, 查小春, 尚丽君

(陕西师范大学地理科学与旅游学院, 西安 710062)

摘要: [目的] 揭示汉江上游安康市2010—2021年人水关系协调发展变化趋势和阶段, 为安康市经济社会和水资源的协调发展, 制定城市发展规划提供科学依据与参考。[方法] 遵循科学性、系统性、代表性和可操作性等原则, 构建安康市人水关系评价指标体系; 采用熵权法确定各指标的权重, 基于耦合协调度模型分析2010—2021年安康市人水关系耦合协调的发展状态, 并采用障碍度模型识别人水关系协调发展障碍因子。[结果] (1) 安康市人水关系评价指标体系由水系统和人文系统构成, 其中水系统由水的资源禀赋、生态环境、灾害风险和水监督管理4个子系统组成, 人文系统包括社会发展、经济发展和科学技术发展3个子系统。(2) 安康市人水关系耦合度从2010年的0.198发展至2021年的0.996; 协调度由2010年的0.196发展至2021年的0.892。(3) 社会发展子系统是制约人水协调发展的主要障碍因素。其中水系统中的障碍度因子由高到低依次是水生态环境、水资源禀赋、水灾害风险和水监控管理; 人文系统中的障碍度因子由高到低依次是科学技术发展、社会发展和经济发展; 而且工业万元产值用水量、万元GDP用水量、人口密度和科研投入占比是主要的障碍因子。[结论] 安康市的人水关系发展过程具有明显的阶段变化特征, 2010—2014年为安康市人水关系初级协调阶段; 2014—2019年为安康市人水关系中级协调阶段; 2019—2021年为安康市人水关系高度协调阶段。

关键词: 人水关系; 协调度; 障碍因子; 安康市

中图分类号: TV213.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2025)03-0384-10

Study on coordinated development of human-water relationship in Ankang City, Upper Hanjiang River, from 2010 to 2021

Zhang Ruixi, Zha Xiaochun, Shang Lijun

(School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710062, China)

Abstract: [Objective] This study aims to reveal the trends and stages of the coordinated development of human-water relationship in Ankang City, located in the Upper Han River, from 2010 to 2021, providing a scientific basis and reference for the coordinated development of Ankang City's economy, society and water resources, as well as for urban development planning. [Methods] Following the principles of scientific rigor, systematic approach, representativeness and practicality, an evaluation index system of human-water relationship in Ankang City was constructed. The entropy weighting method was used to determine the weights of the indicators. Based on the coupling coordination model, the development status of the human-water relationship in Ankang City was analyzed from 2010 to 2021. Additionally, the obstacle degree model was used to identify factors hindering the coordinated development of the human-water relationship. [Results] (1) The human-water relationship evaluation index system for Ankang City consisted of two major systems: the water system and the human system. The water system comprised four sub-systems: water resource endowment, ecological environment, disaster risk and water supervision and management. The human system included three sub-systems, namely, social

收稿日期: 2023-09-18

修回日期: 2024-08-05

接受日期: 2024-08-25

资助项目: 国家科技基础资源调查专项“中国南北过渡带综合科学考察”(2017FY100905)

第一作者: 张睿玺(1998—), 男, 山东青岛人, 硕士, 主要从事资源开发与环境演变研究。E-mail: ZRXgeography@163.com

通信作者: 查小春(1972—), 男, 陕西汉中, 教授, 博士研究生导师, 主要从事资源开发与环境演变研究。E-mail: zhaxch@snnu.edu.cn

<http://stbcjy.paperonice.org>

development, economic development, and scientific and technological development. (2) The coupling degree of the human-water relationship in Ankang City developed from 0.198 in 2010 to 0.996 in 2021, while the coordination degree rose from 0.196 in 2010 to 0.892 in 2021. (3) The social development subsystem was the main obstacle to the coordinated development of human-water relationship. Among the obstacle factors in the water system, the ranking from high to low was: water ecological environment, water resource endowment, water disaster risk and water supervision and management. In the human system, the obstacle factors ranked from high to low was scientific and technological development, social development, and economic development. Key obstacles included water consumption per ten thousand yuan of industrial output, water consumption per ten thousand GDP, population density, and the proportion of research and development investment. [Conclusion] The development process of human-water relationship in Ankang City exhibits clear stages. From 2010 to 2014, Ankang's human-water relationship was in the primary coordination stage; from 2014 to 2019, it was in the intermediate coordination stage; and from 2019 to 2021, it reached the highly coordinated stage.

Keywords: human-water relationship; coordination degree; obstacle factors; Ankang City

水资源是人类生存发展中不可或缺的基础性自然资源。但是全球气候变化导致极端水文事件发生的频率和强度增加,社会经济的快速发展致使缺水、水质恶化等与水有关的问题不断涌现,加剧着人水之间矛盾^[1]。寻求人水共同发展之路,实现人水关系协调,走可持续发展道路^[2],已成为全球的焦点问题之一。早期学者主要关注人水之间单向影响的研究,例如人类各种的活动(如城市化、工程建设、土地利用、调水等)影响着水系统(如水量、水质)^[3-4]。随着人类活动增强,一些学者提出了“生态承载力”“生态足迹”“虚拟水”等概念,来评价宏观经济发展对水资源利用的驱动作用^[5-6];而在水对人的作用研究方面,主要体现在流域河流水位、水量与水质的变化等限制了经济社会、生态环境发展^[7-8]。随着系统动力学模型、组合模型、CW-SPA-VFS耦合模型被逐渐构建和提出,一些学者模拟了气候变化和人类活动对河川径流的影响,以及揭示人水关系作用机制和演变规律^[9-10];一些学者还利用模型评估未来气候情景和人口变化下,面临的水资源压力,并提出综合应对策略^[11-12]。但是,学者们关注度较多是当前存在的水污染如何协同治理、水资源如何协同管理、水资源与经济如何协同发展,以及经济发展与资源环境复合系统如何协同演化、人水环境与新型城镇化如何耦合等方面^[13-15],偏重研究社会不合理发展对水系统造成的不利影响、人类对水的保护与修复等,难以充分表达人与水之间的互动关系,也较少从人文系统、水系统的综合系统角度来研究人水关系协调发展状态和变化。

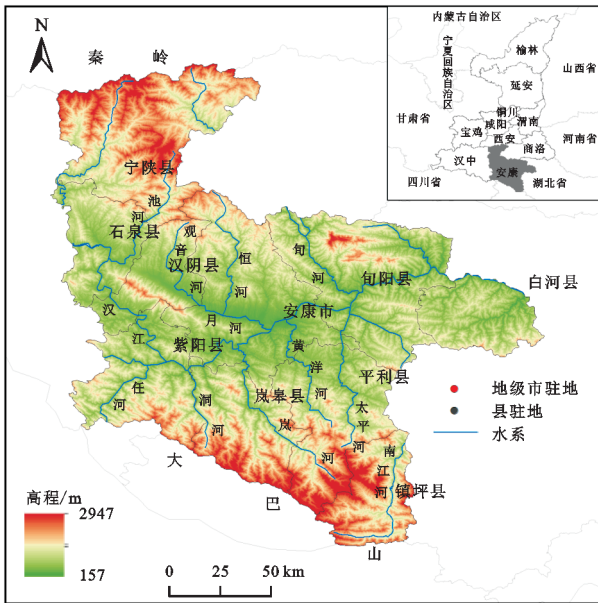
汉江上游呈东西走向穿行于秦岭和大巴山之间,是我国南水北调中线工程和“引汉济渭”跨流域调水工程的核心水源涵养地。位于汉江上游的安康市,面临水源保护和社会发展的双重压力,人水关系的协调

发展面临巨大挑战。有学者研究了气候变化和土地利用对河川径流的影响^[16],以及对未来径流的趋势预测^[17]、洪水灾害评价^[18]和水资源现状评估等^[19],但对安康市人水关系发展状态和变化趋势的研究相对缺乏。为此,本文选取汉江上游的安康市作为研究对象,采用熵权法和耦合协调度模型,研究2010—2021年安康市人水关系协调发展状态和阶段变化,并利用障碍度模型,识别安康市人水关系协调发展的障碍因子。该研究结果可为安康市经济社会和水资源协调发展、制定城市发展规划提供科学依据与参考。

1 研究区概况

汉江发源于秦岭南麓蟠冢山,流经陕西、湖北,于武汉市汇入长江,全长1 577 km,流域面积约为 $1.59 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。湖北省丹江口以上为汉江上游,干流长约925 km,占汉江干流全长的58.66%,呈东西走向穿行于秦岭和大巴山之间,是我国南水北调中线工程和“引汉济渭”跨流域调水工程的核心水源涵养地^[20]。位于陕西省南部、汉江上游的安康市(图1),面积23 500 km^2 ,北邻秦岭主脊,南靠大巴山,形成南北高山夹峙、河谷平地居中的地貌格局^[21]。受秦岭和巴山的制约,安康市属北亚热带湿润、半湿润大陆性季风气候区,多年平均气温 $15 \sim 17 \text{ }^\circ\text{C}$,年平均降水量1 050 mm;受季风气候的影响,安康市降水的季节分布不均,年际变化大,空间分布不均,导致安康市洪水灾害频繁发生,给本市的经济和社会发展带来巨大的危害。安康市河流纵横,其中汉江干流自西向东横贯安康全境,境内长1 532 km。2021年,安康市人口247.84万人,城镇化率达到51.60%。2000—2021年,安康市经济发展速迅速,国民生产总值从78.78亿元跃升至1 209.49亿元;全市的用水量也持

续增长,从2014年的7.218亿 m^3 增长至2020年的7.77亿 m^3 。随着全球气候的变化,以及安康市经济发展和城市化进程加快,全市用水、排污总量逐年增加,人水关系日趋复杂。



注:基于自然资源部标准地图服务系统审图号为GS(2020)4630号的标准地图绘制,底图未做修改。

图1 汉江上游安康市位置

Fig. 1 Location map of Ankang City in the Upper Hanjiang River

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

安康市的社会经济统计数据主要来源于2010—2021年的《安康市统计年鉴》;科研投入占比来源于2010—2021年《陕西省研发经费投入统计公报》;居民基尼系数通过地理空间数据云(www.gscloud.cn)获取的灯光数据计算获得;水文相关统计数据主要来源于2010—2021年的《陕西省水资源公报》《陕西省统计年鉴》和《安康市统计年鉴》;森林覆盖率来源于2010—2021年的《安康市国民经济和社会发展统计公报》,城市污水处理率来源于2010—2021年的《中国城市建设统计年鉴》。

2.2 研究方法

2.2.1 熵权法 熵权法是一种客观赋权重的方法^[22],通过判断某个指标的离散程度测出其对于系统变化的影响程度,进而确定它的重要程度,即权重。某项评价指标内差异程度越大,则其携带的信息越多,表示该指标对决策越重要,则权重也越大。计算过程如下:

(1)构建 m 个评价样本, n 个评价指标的判断矩阵 $R=(x_{ij})_{mn}$ 。

矩阵中的 x_{ij} 表示第 m 个评价序列当中第 n 个指标。

(2)对判断矩阵 R 进行归一化处理:

由于不同的指标具有不同的量纲和数量级,在整体测评分析过程中不具有可比性,为了确保数据的同趋化,改变产生负面效益的逆向指标,需要对原始的数据进行归一化处理,公式如下:

正向指标:

$$b_{ij}=(r_{ij}-r_{j\min})/(r_{j\max}-r_{j\min}) \quad (1)$$

负向指标:

$$b_{ij}=(r_{j\max}-r_{ij})/(r_{j\max}-r_{j\min}) \quad (2)$$

式中: b_{ij} 为第 i 个评价序列中第 j 项指标的经过归一化处理后的值; r_{ij} 为第 i 个评价序列中第 j 项指标的实际值; $r_{j\max}$ 、 $r_{j\min}$ 分别为第 j 项指标的在序列中的最大值和最小值。

(3)计算评价指标熵值,公式如下:

$$H_j=-\left(\sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij}\right)/\ln m \quad (3)$$

式中: H_j 为第 j 项评价指标的熵值,熵值越大表示指标信息的不确定性越高,其权重越小; f_{ij} 表示第 i 个序列中的第 j 项指标在第 i 个序列所有指标中的占比。

为了避免出现 $f_{ij}=0$ 的情况,对 f_{ij} 进行修正后公式如下:

$$f_{ij}=(1+b_{ij})/\left(\sum_{i=1}^m 1+b_{ij}\right) \quad (4)$$

式中: b_{ij} 为经过归一化处理后第 i 年第 j 项指标的值。

(4)计算评价指标权重以及子系统权重,公式如下:

$$\omega_j=(1-H_j)/\left(n-\sum_{j=1}^n H_j\right) \quad (5)$$

$$y_j=\frac{(\omega_j-\omega_j H_j)}{\sum_{i=1}^m \omega_j (1-H_j)} \quad (6)$$

式中: ω_j 和 y_j 分别为单项指标 j 和子系统 j 的权重。

(5)根据系统内指标的归一化值和对应权重,计算子系统的综合发展指数,公式如下:

$$K_i=\sum_{j=1}^a b_{ij} \omega_j \quad (7)$$

式中: $K_i(i=1,2)$ 分别为水系统和人文系统的综合发展指数; a 为水系统和人文系统中所包含指标的数量。

2.2.2 耦合协调度模型 耦合最早是衡量两个或两个以上实体间相互作用程度的物理学概念,Richard在1990年首次提出了耦合协调度的发展理论模型,后来被引入社会科学,特别是在城市经济学^[23]和区

域发展研究^[24]中得到广泛应用。该模型用于分析各子系统间或系统内要素之间交互胁迫相互依赖、相互影响的动态关联关系,它刻画了某一时点特定系统的演进态势或变化趋向^[25],适用于不同尺度和不同区域的实证研究,具有全面性和直观性。据此,本文采用耦合协调度模型对人水关系间的耦合协调发展状态进行测算,其中,耦合度是指两个或两个以上系统之间的相互作用影响,可以反映系统之间的相互依赖相互制约程度,是耦合协调度模型的核心部分^[26]。计算公式如下:

$$C = \sqrt{\frac{K_1 K_2}{(K_1 + K_2)(K_1 + K_2)}} \quad (8)$$

式中: K_1 、 K_2 分别表示水系统和人文系统的综合发展指数; C 为耦合度, $C \in [0, 1]$, C 越大表示两个系统之间互相耦合的程度越高。当 $C \in (0, 0.3]$ 时为低水平耦合时期,经济社会与水系统的相互作用与联系处在低水平状态, $C \in (0.3, 0.5]$ 时为拮抗时期, $C \in (0.5, 0.8]$ 时为磨合时期,系统间开始相互适应产生良性耦合, $C \in (0.8, 0.1]$ 时,处于高水平耦合状态,这一阶段系统之间或内部要素之间呈现出良性耦合的状态,经济社会与水系统相互促进,共同发展。

协调度指耦合相互作用关系中良性耦合程度的大小,能够有效量化两个系统间的均衡状态和协调发展水平,反映出系统间互动的良性程度。模型的表达式为:

$$T = \alpha K_1 + \beta K_2 \quad (9)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (10)$$

式中: T 为两个系统的综合协调指数; α 和 β 分别为水系统和社会系统的贡献度。基于当前时代发展背景,参考前人研究^[25-26],认为人文系统与水系统具有相同的重要性,取 $\alpha = \beta = 0.5$; D 为协调度, $D \in [0, 1]$, D 值越大说明人水关系发展水平越协调,反之则说明协同程度低。参考陈端吕等^[25]研究成果,当 $D \in (0, 0.4]$ 时为初级协调, $D \in (0.4, 0.8]$ 时为中级协调, $D \in (0.8, 0.9]$ 时为高级协调,当 $D \in (0.9, 1]$ 时为优质协调。

2.2.3 障碍度模型 障碍度模型是统计决策学科中比较重要的评价模型,可以计算综合评价中各评价指标的障碍度^[27],找出限制事物进一步发展的关键因素,这有助于理清对评价结果产生主要影响的因子,明晰关键制约因素的影响程度,为制定科学、合理的政策提供科学依据。计算公式如下:

$$F_{ij} = \omega_j \times y_j \quad (11)$$

$$S_{ij} = 1 - b_{ij} \quad (12)$$

$$A_j = \frac{S_{ij} \times F_{ij}}{\sum_{j=1}^n S_{ij} \times F_{ij}} \quad (13)$$

式中: A_j 为第 j 个指标的障碍度; S_{ij} 为指标偏离度,是指标标准化值和最优值之间的差值; F_{ij} 为指标 j 对总目标的贡献程度,用所求指标权重与子系统权重的乘积来表示; b_{ij} 为指标标准化值; ω_j 和 y_j 分别为单项指标 j 和子系统 j 的权重。每个指标的障碍度取值范围在 $[0, 1]$,数值越大,则说明该指标对于系统的发展的阻碍作用越强烈。

3 结果与分析

3.1 安康市人水关系评价指标体系的构建

从协调发展理念出发,借鉴水生态文明评价^[28]、水资源安全评价^[29]、水资源开发利用评价^[30]相关研究,结合区域实际状况,兼顾自然与社会,遵循科学性、系统性、代表性和可操作性等原则,遴选出控制系统的的关键变量,构建了安康市人水关系评价指标体系(表1)。

安康市人水关系评价指标体系由水系统和人文系统两部分构成。人文系统的发展表现为经济社会的繁荣进步以及在科技推动下的资源高效利用。据此,将人文系统评价指标体系分为社会发展、经济发展和科学技术发展3个子系统。社会发展子系统用人口密度和人口自然增长率来表征城市的人口特征和社会压力状态,用城市化率、人均综合用水量、人均粮食产量和人均可支配收入衡量社会的发展状况和人民的生活水平;经济发展子系统用人均GDP、经济增长率来衡量地方政府的经济发展水平,用居民基尼系数和居民恩格尔系数来衡量居民的生活质量;科学技术发展子系统用科研投入占比衡量政府的科技投入强度,用万元GDP用水量、单位农田灌溉面积用水量、工业万元产值用水量分别衡量水资源的节水降耗效率、农业生产和工业发展的用水效率。

水系统是支撑人文系统发展的重要物质基础,因此,水系统评价指标体系包括水资源禀赋、水生态环境、水灾害风险和水监督管理4个子系统。水资源禀赋子系统用人均水资源占有量、产水模数、年径流深和降水量反映流域水资源基本状况,用地表水水资源的开发利用率和地下水开发利用率衡量流域水资源的开发利用情况;水生态环境子系统主要用植被覆盖率、人均湿地面积、生态用水比例、人均COD排放量和城市污水处理率来衡量水系统的环境容量及生态平衡状态。水灾害是最难以控制的自然灾害之一,在人水关系评价研究中,水灾害风险是必须考虑在内的重要子系统,因此用人均受灾频次、受堤防保护人口占比和防洪达标率3个指标来表征。水监控管理子系统则采用水利工程投资占GDP比例和万人拥有水利、环境和公共设施管理业从业人数2个指标来表征。

表 1 安康市人水关系评价指标体系
Table 1 Human-water relationship evaluation index system of Ankang City

目标层	准则层	权重	评价指标	指标解释与方向	权重		
水系统	水资源禀赋	0.140	人均水资源占有量(m ³ /人)	衡量城市可利用水资源(+)	0.033		
			产水模数(万 m ³ /km ²)	衡量城市水资源量(+)	0.034		
			年径流深(mm)	衡量城市水资源的丰富程度(+)	0.013		
			降水量(mm)	衡量系统自然条件(+)	0.023		
			地表水控制利用率(%)	衡量地表水的开发利用程度(-)	0.019		
			地下水控制利用率(%)	衡量地下水的开发利用程度(-)	0.018		
			森林覆盖率(%)	衡量城市森林资源和林地占有的实际水平(+)	0.039		
	水生态环境	0.155	生态用水比例(%)	衡量系统生态需水的满足程度(+)	0.034		
			城市污水处理率(%)	衡量城市污水处理能力(+)	0.011		
			人均COD排放量(t/人)	衡量水体污染程度(-)	0.038		
			人均湿地面积(hm ² /人)	衡量城市自然环境质量(+)	0.033		
			防洪达标率(%)	衡量城市防洪能力(+)	0.027		
			水灾害风险	0.100	人均受灾频次(次/人)	衡量城市水旱灾害受灾情况(-)	0.054
					受堤防保护人口占比(%)	衡量洪涝灾害损失程度(+)	0.019
人文系统	水监控管理	0.081	水利工程投资占GDP比例(%)	衡量水利事业发展水平(+)	0.016		
			万人拥有水利、环境和公共设施管理业从业人数(人)	衡量城市水利实际投入情况(+)	0.065		
	社会发展	0.186	人口密度(人/km ²)	衡量系统人口压力(+)	0.041		
			人口自然增长率(%)	衡量人口自然增长的趋势和速度(+)	0.011		
			城市化率(%)	衡量城市城镇化水平(+)	0.027		
			人均综合用水量(m ³ /人)	衡量水资源的运用情况与可持续使用能力(-)	0.053		
			人均粮食产量(kg/人)	衡量第一产业发展水平(+)	0.025		
			人均可支配收入(元/人)	衡量人民生活水平(+)	0.029		
			人均GDP(元/人)	衡量人均经济水平(+)	0.029		
			经济增长率(%)	衡量城市经济发展水平的变化程度(+)	0.011		
经济发展	0.101	居民基尼系数	衡量城市居民收入差距(-)	0.041			
		居民恩格尔系数	衡量城市居民的消费结构(-)	0.020			
		万元GDP用水量(m ³ /万元)	衡量水资源节水降耗状况(-)	0.061			
		单位农田灌溉面积用水量(m ³ /hm ²)	衡量城市农业用水效率效益水平(-)	0.038			
		工业万元产值用水量(m ³ /万元)	衡量城市工业用水效率效益水平(-)	0.068			
科学技术发展	0.237	科研投入占比(%)	衡量城市科技投入强度(+)	0.070			

3.2 安康市 2010—2021 年人水关系发展指数变化趋势分析

采用熵权法、耦合协调度模型计算安康市 2010—2021 年人文系统和水系统发展指数(图 2)。安康市的水系统发展指数变化趋势呈现一种“台阶式”的增长,由 2010 年的 0.118 增长至 2021 年的 0.284,年均增长率为 9.14%,在 2020 年达到最高值,为 0.319。人文系统发展指数在 2010—2021 年内呈现先减后增的发展趋势,从 2010 年的 0.238 下降至 2012 年的最低值 0.167,后持续增长,在 2021 年发展至 0.293。人水关系的发展指数从整体来看呈现明显的阶段化发展特征,以 2014 年和 2019 年为时间拐点,人水关系发展指数变化在 2014 年前整体发展处于较低水平,在

2014 年后系统的发展速度明显加快,从 2019 年开始逐渐转变为平稳发展的状态。

从子系统的发展指数变化来看,水系统中水生态环境子系统与水系统的发展指数变化趋势基本一致,从 2010 年的 0.006 增长至 2021 年的 0.135,是支持水系统发展的主要动力;水资源禀赋子系统的发展指数变化整体保持稳定,由于 2011 年引汉济渭工的全面施工,从 2011 年开始略有下降;水监控管理子系统的发展指数缓慢提高,水灾害风险子系统的发展指数呈现出明显波动性。在人文系统中,社会发展子系统与人文系统的发展指数变化趋势接近,是支持人文系统发展的主要动力;经济发展子系统的发展指数在 2016 年前呈现稳定增长趋势,2016 年后,经

济发展子系统开始呈现出波动下降的趋势,可能的原因是 2016 年安康市基尼系数达到峰值 0.861,居民收入差距达到最大,政府为了缩小收入差距,对经济

结构的调整制约了经济的平稳发展。科学技术发展子系统在整体上偏低,对于人文系统的发展指数变化表现出较大制约性。

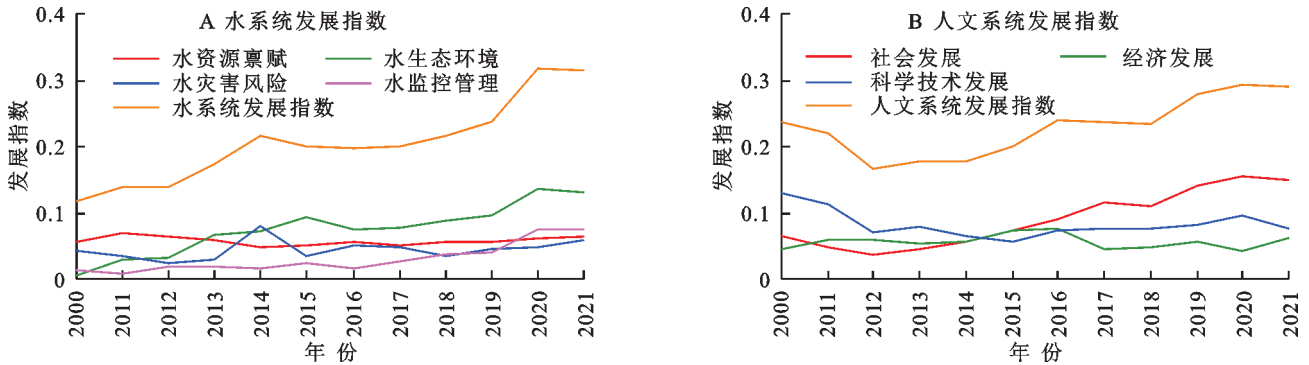


图 2 安康市 2010—2021 年人文系统与水系统发展指数变化趋势

Fig. 2 Trend of development indices of human and water systems in Ankang City from 2010 to 2021

3.3 安康市 2010—2021 年人水关系耦合协调发展趋势分析

依据构建的协调发展综合评价指标体系,采用耦合协调模型计算出了安康市人水关系耦合协调度(图 3)。2010—2021 年,安康市人水关系耦合度从 2010 年的 0.198 增长至 2021 年的 0.996,由无序的低水平耦合状态发展为有序的高水平耦合状态,说明人水关系耦合度持续增强。协调度由 2010 年的 0.196 增长至 2021 年的 0.892,从 2010 年低级协调状态向 2021 年高级协调状态的实现了转变。而且,安康市人水关系的耦合度的发展速度较快,协调度的发展在时间上滞后于耦合度的发展。

在 2019 年耦合度达至高位;协调度持续改善,由 2014 年以前的初级协调阶段,发展至 2014—2019 年的中级协调阶段,人水关系之间逐渐开始良性互动,说明安康市在经济社会发展的同时兼顾水资源保护,促使人水关系持续向好。在 2019 年后耦合度与协调度的发展均保持高位发展,协调度在 2019—2021 年进入了高级协调阶段。

3.4 安康市 2010—2021 年人水关系障碍度分析

采用障碍度模型分别计算了安康市水系统和人文系统以及各子系统的障碍度。由图 4 可知,2010—2021 年安康市人文系统的障碍度一直高于水系统,说明人文系统是制约人水关系协调发展的重要因素。而且,安康市水系统和人文系统的障碍度变化趋势的两个拐点分别发生在 2014 年和 2019 年,其中人文系统障碍度在 2010—2014 年持续增长,在 2014—2019 年波动下降,在 2019—2021 年波动上升,而水系统的障碍度则呈现相反趋势,这与安康市人水关系协调程度的发展具有一致的阶段化特征。

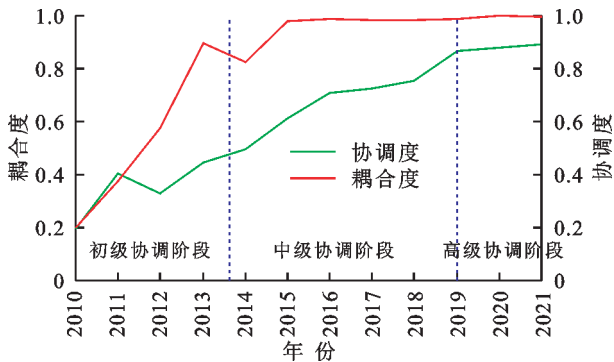


图 3 安康市 2010—2021 年人水关系耦合协调度变化趋势

Fig. 3 Trend of coupling coordination degree of human-water relationship in Ankang City from 2010 to 2021

将出现频率最多的障碍因子作为安康市水系统和人文系统的主要障碍因子。由图 5 可知,在水系统

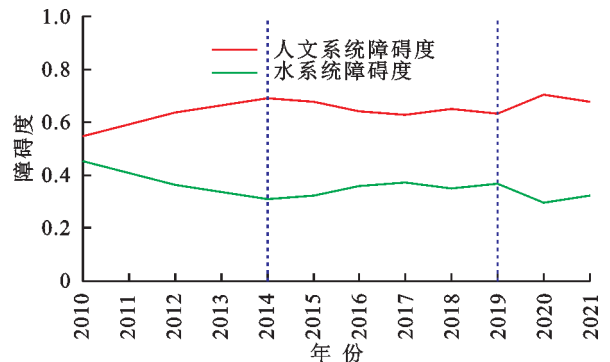
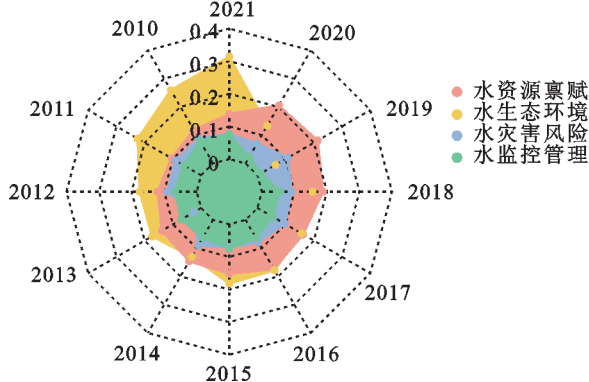


图 4 安康市 2010—2021 年人水关系障碍度变化趋势

Fig. 4 Trend of obstacle degree of human-water relationship in Ankang City from 2010 to 2021

中,子系统障碍度由高到低依次是水生态环境、水资源禀赋、水灾害风险和水监控管理等因子;在人文系

统中,子系统障碍度由高到低依次是科学技术发展、社会发展和经济发展等因子,其中在2019年之后,生水系统各子系统障碍度发展情况



态环境子系统的障碍度持续减小,水资源禀赋成为最大的障碍因子。

人文系统各子系统障碍度发展情况

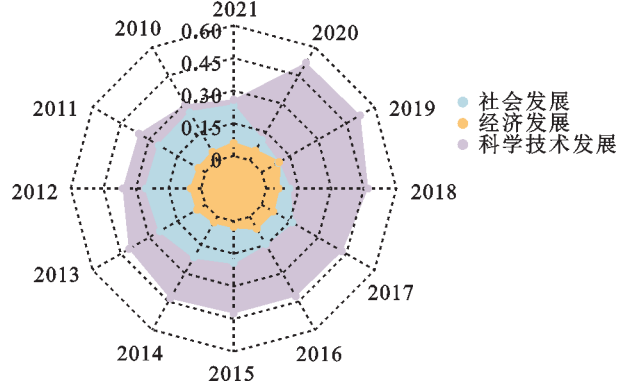


图 5 安康市 2010—2021 年水系统和人文系统各子系统障碍度变化情况汇总

Fig. 5 Summary of obstacle degree changes in each subsystem of water and human systems in Ankang City from 2010 to 2021

但是在不同时段安康市的水系统和人文系统的主要障碍因子存在一定的差异。由表 2 可知,2010—2014 年出现频率最高的障碍因子是科研投入占比、人均综合用水量、人口密度,三者出现的频率均为 1,其次是单位农田灌溉面积用水量和工业万元产值用水量,二者的出现频率均为 60%,说明该时期对于科学技术发展的投入不足,对于水资源的开发和利用缺乏效率,较大的人口密度和低效的用水方式,使人水关系处于初级协调阶段。2014—2019 年出现频率最高的障碍因子是工业万元产值用水量和万元 GDP 用水量,二者出现的频率均为 1,其次分别是人均 COD 排放量、科研投

入占比、人均受灾频次,其出现频率分别为 80%,60%,60%,说明此阶段安康市已加大科研投入占比,促进水资源的高效节约和合理开发利用,人水关系的协调度得到有效改善。2019—2021 年出现频率最高的障碍因子是工业万元产值用水量、万元 GDP 用水量、单位农田灌溉面积用水量、人均受灾频次,其出现的频率均为 1,其次是人均 COD 排放量,其出现频率为 50%,科研投入占比已不是主要障碍因子,说明推动科学技术的发展,促进水资源的高效节约利用和合理开发,切实保护水资源禀赋,加强对于水灾害风险的预测和处理能力,对于人水关系的协调发展是至关重要的。

表 2 2010—2021 年安康市人水关系主要障碍因子出现频率

Table 2 Frequency table of main obstacle factors of human-water relationship in Ankang City from 2010 to 2021

年代	障碍因子 1	频率/%	障碍因子 2	频率/%	障碍因子 3	频率/%	障碍因子 4	频率/%	障碍因子 5	频率/%
2010—2014	科研投入占比 (%)	100	人均综合用水量(m ³ /人)	100	人口密度(人/km ²)	100	单位农田灌溉面积用水量(m ³ /hm ²)	60	工业万元产值用水量(m ³ /万元)	60
2014—2019	工业万元产值用水量(m ³ /万元)	100	万元 GDP 用水量(m ³ /万元)	100	人均 COD 排放量(t/人)	80	科研投入占比 (%)	60	人均受灾频次(次/人)	60
2019—2021	工业万元产值用水量(m ³ /万元)	100	万元 GDP 用水量(m ³ /万元)	100	位农田灌溉面积用水量(m ³ /hm ²)	100	人均受灾频次(次/人)	100	人均 COD 排放量(t/人)	50

4 讨论

随着时间的变化,安康市 2010—2021 年人水关系发展指数、协调度和障碍度变化趋势在 2014 年和 2019 年均出现时间拐点。据此,将安康市人水关系的协调发展分为以下 3 个阶段:

(1) 2010—2014 年安康市人水关系初级协调阶段。2010 年安康市人水关系耦合度处于较低水平且较为不稳定,随后耦合度发展速度较快,由 2010 年的 0.198 发展 2013 年的 0.896,在 2014 年缓慢回落至 0.826。协调度在 2010—2011 年由 0.196 发展至

0.404,2011—2012 年出现小幅回落后持续增长,在 2014 年发展至 0.462。结合障碍度因子分析表明,该阶段科研投入占比是这一时期居于首位的障碍因子,出现频率达到 100%,说明科技投入不足导致工业的发展的效率提升缓慢;而且工业万元产值用水量出现频率为 60%,也是重要的障碍因子;以服务业为主的第三产业还未完全释放活力,水系统的承载力虽然足以支撑经济社会的发展,但已经滞后于人文系统的发展,由此导致此阶段人水关系的协调度处于初级协调阶段。为此,为了改善安康市人水关系的协调度,保证南水北调中线工程的供水稳定,

2012年9月30日,国务院印发《关于丹江口库区及上游地区经济社会发展规划的批复》,用于支持水源区生态保护和经济社会发展。安康市也结合自身发展特点,坚持“生态立市,绿色崛起”的发展战略,颁布一系列环境友好型政策,开始大力发展涉水产业,加强对于洪涝灾害的检测和预警,强力推进污水处理厂和垃圾无害化处理场的建设,水生态环境开始逐步改善,人水关系在2012年之后开始持续向好。

(2) 2014—2019年安康市人水关系中级协调阶段。安康市人水关系耦合度从2015年的0.826发展至2019年的0.987,协调度的发展速度也较快,整体呈现出阶梯式增长的状态。协调度的发展速度较快,由2014年的0.462发展至2016年的0.707;协调度在2016—2018年发展速度放缓,之后又快速发展,从2018年的0.756发展至2019年的0.865,这一阶段也是安康市经济快速发展的阶段。在此阶段,虽然万元GDP用水量是居于首位的障碍因子,出现频率为100%,工业的快速发展使得工业用水量和废水排放量持续增加,工业万元产值用水量和人均COD排放量也是重要的障碍因子,二者出现的频率分别为100%和80%,但是陕西省已在2012年之后提出《关于丹江口库区及上游地区经济社会发展规划的批复》,安康市在这一阶段进一步加强了对于汉江水质的保护,确定水资源管理中“三条红线”的控制目标,并在2014年率先实行“四长治河”的河长制加强水资源保护。在磨合适应注重生态保护的社会经济发展方式下,安康市人文系统与水资源系统均得到快速发展,人水关系协调程度也不断提高。在2016年,安康市以调整经济结构,优化要素配置为目标的“去产能、去库存、去杠杆、降成本、补短板”的供给侧结构性改革开始实施,安康市产业结构和资源配置方式也得到有效转变,社会经济发展模式也发生了改善。

(3) 2019年后,安康市人水关系高级协调阶段。此时安康市耦合度与协调度均处于高位,耦合度由2019年的0.987发展至2021年的0.996,协调度在高度协调状态下持续缓慢发展,由2019年的0.865发展至2021年的0.892,人水关系处于高级协调的良性发展状态中。在这一阶段,安康市已逐步适应绿色可持续发展方式,在2020年又颁布了《安康市人民政府关于印发安康市节约用水办法和安康市地下水管理办法的通知》,持续加强污水处理和地下水资源的保护工作,累计关停高污染、高能耗企业300余家,建成了8个水质自动监测站,并结合汉江上游水域水质良好的特殊自然条件,积极开展旅游业,逐渐实现了

经济发展模式的绿色转型,科学技术仍然是制约人水关系协调发展的重要因素,需要增加科技投入,科学用水、治水,不断提高用水效率,促进人水关系的进一步发展。

5 结论

(1) 依据安康市的地域特点,兼顾自然与社会,遵循科学性、系统性、代表性和可操作性等原则,从安康市的水系统与人文系统两个部分,构建出安康市人水关系评价指标体系。水系统指标由水的资源禀赋、生态环境、灾害风险和监督管理4个维度组成,人文系统指标包括社会发展、经济发展和科学技术发展3个子系统,共包含30个评价指标。

(2) 安康市耦合度从2010年的0.198发展至2021年的0.996,协调度由2010年0.196的低级协调状态发展至2021年0.892的高级协调状态,人水关系持续向好,并不断向优质协调演化。结合安康市的障碍度来看,社会发展子系统是制约人水协调发展的主要障碍因素,在水系统中,障碍度由高到低依次是水生态环境、水资源禀赋、水灾害风险和水监控管理;在人文系统中,障碍度由高到低依次是科学技术发展、社会发展和经济发展,工业万元产值用水量、万元GDP用水量、人口密度和科研投入占比是主要的障碍因子。

(3) 安康市的人水关系发展过程具有明显的阶段化特征,依据2014年、2019年两个重要的时间节点,将安康市人水关系的发展可以划分为3个阶段:2010—2014年为安康市人水关系初级协调阶段;2014—2019年为安康市人水关系中级协调阶段;2019—2021年为安康市人水关系高度协调阶段。

参考文献(References):

- [1] Blair P, Buytaert W. Socio-hydrological modelling: a review asking “why, what and how?”[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2016, 20(1): 443-478.
- [2] 金贵,郭柏枢,成金华,等.基于资源效率的国土空间布局及支撑体系框架[J]. *地理学报*, 2022, 77(3): 534-546. Jin G, Guo B S, Cheng J H, et al. Layout optimization and support system of territorial space: an analysis framework based on resource efficiency[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(3): 534-546.
- [3] Arrigoni A S, Greenwood M C, Moore J N. Relative impact of anthropogenic modifications versus climate change on the natural flow regimes of rivers in the Northern Rocky Mountains, United States [J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(12): W12542.
- [4] 张琳,马敬旭,张倩,等.近60多年洞庭湖水沙演变特征

- 及其与人类活动的关系[J].长江科学院院报,2021,38(9):14-20.
- Zhang L, Ma J X, Zhang Q, et al. Characteristics of runoff-sediment variation of Dongting Lake in recent six decades and its relationship with human activities [J]. Journal of Changjiangriver Scientific Research Institute, 2021,38(9):14-20.
- [5] Konar M, Marston L. The water footprint of the United States[J]. Water, 2020,12(11):3286.
- [6] 左其亭.人水关系学的基本原理及理论体系架构[J].水资源保护,2022,38(1):1-6,25.
- Zuo Q T. Basic principles and theoretical system of human-water relationship discipline[J]. Water Resources Protection, 2022,38(1):1-6,25.
- [7] Li B, Sivapalan M, Xu X Y. An urban sociohydrologic model for exploration of Beijing' s water sustainability challenges and solution spaces [J]. Water Resources Research, 2019,55(7):5918-5940.
- [8] Falkenmark M. Water management and ecosystems: living with change[M]. Stockholm: Global Water Partnership, 2003.
- [9] Zare F, Elsayah S, Bagheri A, et al. Improved integrated water resource modelling by combining DPSIR and system dynamics conceptual modelling techniques [J]. Journal of Environmental Management, 2019,246:27-41.
- [10] 刘绿柳,王秀杰,张鹏飞.基于SWAT模型的气候变化和人类活动对伊洛河径流影响分析[J].人民珠江, 2020,41(1):1-6,75.
- Liu L L, Wang X J, Zhang P F. Research on impacts of climate change and human activities on runoff in the Yiluo River based on SWAT model[J]. Pearl River, 2020,41(1):1-6,75.
- [11] 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 C Q, 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.
- [12] 孔锋,王品,吕丽莉.全球气候变化背景下雄安新区建设水资源安全风险与治理对策[J].水利发展研究, 2018,18(2):12-14,39.
- Kong F, Wang P, Lv L L. Risks and Countermeasures of Water Resources Security in xiong' an new area Construction under the Background of Global Climate Change [J]. Water Resources Development Research, 2018,18(2):12-14,39.
- [13] 余敏江,邹丰.让社会活力激发出来:长三角水环境协同治理中的行动者网络建构[J].江苏社会科学,2022(1):43-51.
- Yu M J, Zou F. Stimulating social vitality: the construction of an activist network in the coordinated governance of water environment in the Yangtze River Delta [J]. Jiangsu Social Sciences, 2022(1):43-51.
- [14] 左其亭,李倩文,赵维岭,等.流域水资源协同管理模式及体系[J].水资源与水工程学报,2022,33(1):1-7.
- Zuo Q T, Li Q W, Zhao W L, et al. Synergetic management pattern and system for watershed water resources [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2022,33(1):1-7.
- [15] 罗巍,杨玄酯,杨永芳,等.黄河流域水-能源-粮食纽带关系协同演化及预测[J].资源科学,2022,44(3):608-619.
- Luo W, Yang X Z, Yang Y F, et al. Co-evolution of water-energy-food nexus in the Yellow River Basin and forecast of future development [J]. Resources Science, 2022,44(3):608-619.
- [16] 田晶,郭生练,刘德地,等.气候与土地利用变化对汉江流域径流的影响[J].地理学报,2020,75(11):2307-2318.
- Tian J, Guo S L, Liu D D, et al. Impacts of climate and land use/cover changes on runoff in the Hanjiang River Basin [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(11):2307-2318.
- [17] 叶加俊,卢健涛,银星黎,等.基于SDSM-SWAT模型的汉江上游径流变化模拟[J].水电能源科学,2019,37(4):1-4,12.
- Ye J J, Lu J T, Yin X L, et al. Simulation of runoff change in the upper reaches of the Hanjiang River based on SDSM-SWAT model [J]. Water Resources and Power, 2019,37(4):1-4,12.
- [18] 查小春,黄春长,庞奖励,等.汉江上游郧西段全新世古洪水事件研究[J].地理学报,2012,67(5):671-680.
- Zha X C, Huang C C, Pang J L, et al. The Holocene palaeoflood events in the Yunxi reach in the upper reaches of Hanjiang River[J]. Acta Geographica Sinica, 2012,67(5):671-680.
- [19] 刘玉邦,梁川.基于模糊物元分析的长江上游水资源承载力综合评价[J].水资源与水工程学报,2009,20(3):39-42.
- Liu Y B, Liang C. Comprehensive evaluation of the water resources carrying capacity in upstream of Yangtze River based on the fuzzy matter-element analysis[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2009,20(3):39-42.
- [20] 王鹏涛,张立伟,李英杰,等.汉江上游生态系统服务权衡与协同关系时空特征[J].地理学报,2017,72(11):2064-2078.
- Wang P T, Zhang L W, Li Y J, et al. Spatio-temporal characteristics of the trade-off and synergy relationships

- among multiple ecosystem services in the Upper Reaches of Hanjiang River Basin[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(11):2064-2078.
- [21] 刘彦随,倪绍祥,查勇. 农业资源与环境系统优化模式研究:以汉江上游安康地区为例[J]. *长江流域资源与环境*, 1997(1):40-45.
- Liu Y S, Ni S X, Zha Y. A study of the optimal patterns of agricultural resources in relation with environmental features: taking Ankang Region as an example [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 1997(1):40-45.
- [22] 黄楚珩,蒋志云,杨志广,等. 基于熵值法和层次分析法的广东省水资源安全评价及影响因素分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(5):140-147.
- Huang C H, Jiang Z Y, Yang Z G, et al. Evaluation and factors of water resource security of Guangdong Province using entropy value and analytic hierarchy process methods[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2019, 30(5):140-147.
- [23] 黄寰,郭义盟. 自然契约、生态经济系统与城市群协调发展[J]. *社会科学研究*, 2017(4):106-112.
- Huang H, Guo Y M. Natural contract, ecological economic system and coordinated development of urban agglomeration[J]. *Social Science Research*, 2017(4):106-112.
- [24] 刘洁,栗志慧,周行. 双碳目标下京津冀城市群经济—人口—资源—环境耦合协调发展研究[J]. *中国软科学*, 2022(S1):150-158.
- LIU Jie, LI Zhihui, ZHOU Xing. Study on the coordinated development of Beijing Tianjin Hebei urban agglomeration under the "Dual Carbon" goal[J]. *China Soft Science*, 2022(S1):150-158.
- [25] 陈端吕,彭保发,熊建新. 环洞庭湖区生态经济系统的耦合特征研究[J]. *地理科学*, 2013, 33(11):1338-1346.
- Chen D L, Peng B F, Xiong J X. The coupling characteristics of eco-economic system in Dongting Lake Area[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(11):1338-1346.
- [26] 姜晓艳,吴相利. 林业资源型城市生态-经济-社会协调发展的定量测度:以黑龙江省伊春市为例[J]. *生态学报*, 2021, 41(21):8396-8407.
- Jiang X Y, Wu X L. Quantitative investigation of the coordinated development of ecology-economy-society in forest resource-based city: a case study of Yichun, Heilongjiang Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(21):8396-8407.
- [27] 石若晗,陈佳,唐红林,等. 石羊河流域农户生计脆弱性测度及致脆机理[J]. *水土保持研究*, 2023, 30(6):386-395, 405.
- Shi R H, Chen J, Tang H L, et al. Assessment of Farmers' Livelihood vulnerability and its mechanism in Shiyang River Basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(6):386-395, 405.
- [28] 严子奇,周祖昊,温天福. 大湖流域水生态文明特征与评价体系研究:以鄱阳湖流域为例[J]. *水利水电技术*, 2018, 49(3):97-105.
- Yan Z Q, Zhou Z H, Wen T F. Study on aquatic ecivilization characteristics of great lake-basin and assessment system: a case study of Poyanghu Lake Basin[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2018, 49(3):97-105.
- [29] 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[J]. *生态学报*, 2018, 38(12):4180-4191.
- Bao C, Zou J J. Evaluation of water resource security patterns in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration based on human-water relationships [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(12):4180-4191.
- [30] 徐留兴,梁川,王上辅,等. 水资源紧缺程度的模糊综合评判:以云南省楚雄市为例[J]. *水资源保护*, 2006(4):40-43.
- Xu L X, Liang C, Wang S F, et al. Fuzzy synthetic evaluation on shortage of water resources: a case study on Chuxiong City of Yunnan Province [J]. *Water Resources Protection*, 2006(4):40-43.