

DOI:10.13476/j.cnki.nsbddqk.2022.0050

李千珣,郭生练,邓乐乐,等.汉江流域水生态文明建设评价[J].南水北调与水利科技(中英文),2022,20(3):498-505. LI Q X, GUO S L, DENG L L, et al. Evaluation of water ecological civilization construction of Han River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(3):498-505. (in Chinese)

汉江流域水生态文明建设评价

李千珣,郭生练,邓乐乐,田晶,王何予

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室,武汉 430072)

摘要:根据汉江流域水生态文明特征,以行政单元为评价分区,建立汉江流域水生态文明评价指标体系,包括自然和社会 2 个系统,山区、平原和水域 3 种流域地貌单元,水安全、水生态、水环境、水节约、水监管和水文化 6 类人水关系子系统以及 25 项指标。引入基于 AHP 法和熵值法的融合权重,采用模糊综合评价法和灰色关联分析,评价 2017 年汉江流域水生态文明建设水平。结果表明汉江流域水生态文明建设具有较强的社会属性,二者关联度达 0.844,因而呈中下游相对领先、上游略有滞后的空间格局,其中水安全、水环境和水节约是影响水生态文明建设的要因。评价结果可为汉江生态经济带建设发展规划提供参考与依据。

关键词:水生态文明;模糊综合评价法;水资源管理;汉江流域

中图分类号:TV213 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标志码(OSID):



随着水生态环境保护工作的推进,通过单个治理项目以点到面催流域整体治理效果已成为流域管理工作新常态^[1-3]。局限于水生态文明概念之新,目前多以试点城市为对象开展研究,因此城镇(县)和省域尺度的研究成果较丰富^[4-7];反之,流域尺度的研究则较少。曲富国等^[8]采用 PSR 模型评价了辽河流域在辽宁省内的生态文明建设水平;汪义杰等^[9]采用熵值法与灰色关联分析法,通过 ArcGIS 重点探讨了流域生态文明建设分区的方法,并以桂江流域为例进行说明;严子奇等^[10]以鄱阳湖流域为例,从自然、社会和入水关系三大系统出发,构建了包括 25 项指标的大湖流域水生态文明评价指标体系。目前,我国多以省、市、县等行政单元为水生态文明建设的重点区域,以流域为出发点的水生态文明建设评价研究尚待加强。

汉江发源于秦岭南麓,襄阳以上河流总体流向东,襄阳以下转向东南,于武汉注入长江,干流全长 1 577 km,流域面积约 15.9 万 km²。汉江上游黄金

峡和丹江口水库等是我国重要的水源地,南水北调中线和“引汉济渭”跨流域调水工程,承担着我国北方河南、河北、陕西和北京、天津的供水任务。2018 年 10 月,国务院批复《汉江生态经济带发展规划》^[11],为汉江流域及沿江省市的高质量发展带来历史性机遇。

以行政分区为评价单元,构建汉江流域水生态文明评价指标体系,结合 AHP 法和熵值法计算融合权重,采用模糊综合评价法和灰色关联度分析,评价 2017 年汉江流域水生态文明建设水平,旨在通过分析汉江流域现有水生态文明建设空间格局,探究流域内部水生态文明建设程度的空间差异性,识别重点建设地区及其重点建设方向,为汉江生态经济带建设发展规划提供技术支撑。

1 流域水生态文明特征的指标表征

以流域为载体,自然与社会的交互作用渗透在

收稿日期:2021-10-15 修回日期:2022-01-28 网络出版时间:2022-03-09

网络出版地址:<https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20220307.1524.002.html>

基金项目:国家自然科学基金地区联合基金项目(U20A20317)

作者简介:李千珣(1995—),女,湖北鄂州人,主要从事水资源评价研究。E-mail:qianxunli@whu.edu.cn

通信作者:郭生练(1957—),男,福建龙岩人,教授,主要从事水文学及水资源研究。E-mail:slguo@whu.edu.cn

产流、汇流、取水和用水的方方面面,水生态文明各项指标表征方式亦不尽相同。流域水生态文明既凸显了整体的概念,又反映了内部诸环节乃至时空的差异化特征。因此,流域水生态文明特征可以归纳为如下三方面。

1.1 多系统特征

多系统可以基本概括为自然系统和社会系统。自然系统反映以水资源为主的自然禀赋,具体指标应向陆面产水过程及水循环等方面有所侧重;社会系统既要反映流域内部经济社会发展与水资源开发利用的制约关系及二者的现状水平,又要评估水资源的可持续利用前景,同时还应对人水关系有充分体现。

1.2 多地貌特征

由于多系统的综合性,流域水生态文明研究不应局限于水体,应上溯到产水区(山区)、汇水区(丘陵),后演进至耗水区(平原),需涵盖产汇流等一系列陆面水循环过程所涉及的相关地貌单元。流域水生态文明建设既要把握河流水体的特点,又要体现流域内不同地貌类型(以山区、平原、水域为主)的水生态文明程度。

1.3 多尺度特征

汉江流域所占国土面积较大,上、中、下游区域地理气候特征及经济社会发展水平差异明显,考虑到多系统的综合性和多地貌的复杂性,流域内部应划分微、中、宏观3种评价尺度。微观尺度以指标为要素,反映评价单元的空间差异;中观尺度从自然和社会两方面反映水生态文明基本格局;宏观尺度则从整体出发反映汉江流域水生态文明建设程度。

2 评价指标体系

2.1 评价分区

根据所收集统计资料的细化程度,基于《全国水资源调查评价技术细则》^[12],以汉江主要流经地陕西、河南和湖北3省的地级行政区为评价单元,并对行政区内流域面积占比小于5%的行政区进行合并处理,其中,洛阳与三门峡合并,西安与宝鸡合并。此外,为统筹规划和简化计算,结合各行政区的实际情况,将神农架与十堰合并,将天门、潜江和仙桃合并为天潜沔地区,得到14个评价单元。具体分区见图1。



图1 汉江流域水生态文明建设评价分区

Fig. 1 Evaluation partitions of water ecological civilization construction of Han River basin

2.2 评价指标体系

对于汉江流域水生态文明评价指标的选取,须以水资源为重点评价对象,立足《汉江生态经济带发展规划》,考虑流域内不同区域间的差异性。从局部到整体,从流域的上、中、下游到流域全境,从单一地貌到多种地貌,既体现分区特色,又能够把握全局。此外,由于以行政区为评价单元,现行

《水生态文明城市建设评价导则》^[13]依然适用,应结合上述导则,吸纳汉江流域内4个国家水生态文明城市建设试点的技术和成果,在保证指标可靠性的同时,又具有一定创新性。经综合考虑,构建了包含1个目标层、2个系统层、9个准则层共计25项指标的汉江流域水生态文明评价指标体系,详见表1。

表 1 汉江流域水生态文明建设评价指标体系

Tab. 1 The evaluation index system of water ecological civilization construction of Han River basin

目标层 A	系统层 B	准则层 C	指标层 D
评价体系	自然系统 B ₁	山区 C ₁	D ₁ 森林覆盖率/%; D ₂ 地质灾害次数/次
		平原 C ₂	D ₃ 人均水资源量/m ³ ; D ₄ 农业用水量占比/%
		水域 C ₃	D ₅ 产水模数/(万 m ³ · km ⁻²); D ₆ 水质优良度/%
	社会系统 B ₂	水安全 C ₄	D ₇ 防洪堤达标率/%; D ₈ 排水管道长度/km; D ₉ 集中饮用水水源地安全保障达标率/%; D ₁₀ 供水普及率/%
		水生态 C ₅	D ₁₁ 生态用水量占比/%; D ₁₂ 水土流失治理程度/%; D ₁₃ 生态环境质量指数/%
		水环境 C ₆	D ₁₄ 水功能区水质达标率/%; D ₁₅ 污水处理率/%; D ₁₆ 湖库富营养化指数/%
社会系统 B ₂	水节约 C ₇	D ₁₇ 工业用水重复利用率/%; D ₁₈ 万元 GDP 用水量相对值/%; D ₁₉ 农田灌溉亩均用水量相对值/%; D ₂₀ 公共供水管网漏损率/%	
	水监管 C ₈	D ₂₁ 水资源监测指数/%; D ₂₂ 水生态文明建设重视度/%	
	水文化 C ₉	D ₂₃ 涉水公园数量/个; D ₂₄ 广播人口覆盖率/%; D ₂₅ 生态环境公众满意度/%	

3 评价方法

3.1 基于 AHP 法和熵值法的融合权重

现行赋权方法:或考虑主观赋权的一个侧面,如层次分析法(analytic hierarchy process, AHP);或考虑客观赋权的一个侧面,如熵值法。为规避单一赋权法的片面性,结合余建星等^[14-15]的研究,计算基于 AHP 法和熵值法的融合权重。

3.1.1 基于 AHP 法的指标主观权重

层次分析法是一种系统化、多准则分析决策方法,原理简单、结构清晰,具有将主观问题客观量化的优势^[16-18]。根据 AHP 法基本原理,对汉江流域水生态文明建设评价指标集归一化,引入“1~9 标度法”逐层比较元素间的重要性,构造判断矩阵,计算判断矩阵的最大特征根所对应的特征向量,若计算结果通过一致性检验,则所求即为该层元素相对于上层元素的权重。

3.1.2 基于熵值法的专家客观权重

在信息论中,熵值是信息无序化程度的表达和度量^[19-20]。设想存在一名理想专家,其构建的判断矩阵最公正,则与理想专家给定结果差距越大的评判专家所给结果的可信度就越低。若用熵表示该差距,可建立如下模型:

设有 m 个评判专家, n 个评价指标, a_{ij} ($i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n$) 是第 i 个专家对第 j 个指标的评价值, 向量 $\mathbf{a}_i = (a_{i1}, a_{i2}, \dots, a_{in})^T \subset \mathbf{E}^n$ 和矩阵 $\mathbf{A} = (a_{ij})_{m \times n}$ 是各专家和专家组在一次评估中提供的结论, 可视为在状态空间 $\mathbf{a} \subset \mathbf{E}^n$ 上的决策信息 D 。记 i^* 为理想专家, 其评分向量为 $\mathbf{a}^* = (a_1^*, a_2^*, \dots, a_n^*)^T$ 。

根据顾昌耀等^[21]对传递熵的定义, 这里用各专家的评分结果与 \mathbf{a}^* 的差异度大小 e_{ij} 来度量评判专家的准确性, 则各专家的评价水平向量为 $\mathbf{E}_i = (e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{in})$, 其中

$$e_{ij} = 1 - |x_{ij} - \bar{x}_{ij}| / \max x_{ij} \quad (1)$$

式中:评价水平向量元素 e_{ij} 表示第 i 个专家对第 j 个指标的评分与全体专家评分均值的差异, 并作标准化处理。 e_{ij} 反映了状态发生时信息 D 的平均准确度, 故可视评价水平向量 $\mathbf{E}_i = (e_{i1}, e_{i2}, \dots, e_{in})$ 为信息 D 的传递向量。

当状态发生时信息 D 的熵值 h_j 为

$$h_j = \begin{cases} -e_j \ln e_j & (1/e \leq e_j \leq 1) \\ 2/e - e_j |\ln e_j| & (-1/(n-1) \leq e_j < 1/e) \end{cases} \quad (2)$$

由此可得信息 D 的传递熵为

$$H(D) = \sum_{j=1}^n h_j \quad (3)$$

式中: $H(D)$ 表示信息 D 状态传递的不确定度, 或称决策信息 D 的平均信息量。

该模型以专家所给评价结果的不确定性度量专家自身的评价能力, 计算各专家的权重

$$w_i'' = \frac{1/H_i}{\sum_i 1/H_i} \quad (4)$$

式中: w_i'' 表示第 i 个专家的自身权重。

3.1.3 指标的加权融合权重

基于上述步骤计算可得, $\mathbf{W}' = (w_{ij}'')_{m \times n}$ 为 m 个专家所给 n 个指标的权重矩阵, $\mathbf{W}'' = [w_1'', w_2'', \dots, w_m'']^T$ 为专家自身权重向量。因此, 融合权重为

$$\mathbf{W} = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T = \mathbf{W}' \times \mathbf{W}'' \quad (5)$$

式中 w_j 满足 $0 \leq w_j \leq 1$, $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ ($j=1, 2, \dots, n$)。

基于 AHP 法的指标主观权重由专家个人经验判断所得;基于熵值法的专家客观权重是以专家所给结果为依据对相对重要性的评判;融合权重则是以上两种权重的组合,结合了主客赋权法的优点,并回避了二者的不足。

3.2 模糊综合评价

陈守煜等^[22-23]建立的模糊综合评价中,设系统有 l 个评价分区组成区域集,有 n 个指标组成对区域集进行评判的指标集,对其规格化得到对应的隶属度矩阵 $\mathbf{R}=(r_{kj})_{l \times n}$,简称优隶属度矩阵。

若 $\mathbf{g}=(g_1, g_2, \dots, g_n)^T$,其中 $g_j = \bigvee_{k=1}^l r_{kj} = r_{1j} \vee r_{2j} \vee \dots \vee r_{lj} (j=1, 2, \dots, n)$,则称 \mathbf{g} 为相对最大优隶属度,也称为最优指标,则分区 k 的权距优距离为

$$d(r_k, \mathbf{g}) = u_k \left(\sum_{j=1}^n (w_j |r_{kj} - g_j|)^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad (6)$$

式中: u_k 表示第 k 个分区隶属于最优指标的隶属度; w_j 表示第 j 个指标的权重; p 表示距离参数,当 $p=1$ 时为海明距离,当 $p=2$ 时为欧氏距离。

若 $\mathbf{b}=(b_1, b_2, \dots, b_n)^T$,其中 $b_j = \bigwedge_{k=1}^l r_{kj} = r_{1j} \wedge r_{2j} \wedge \dots \wedge r_{lj} (j=1, 2, \dots, n)$,则称 \mathbf{b} 为相对最小优隶属度,也称为最劣分区。同理可得分区 k 的权距劣距离为

$$d(r_k, \mathbf{b}) = (1 - u_k) \left(\sum_{j=1}^n (w_j |r_{kj} - b_j|)^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad (7)$$

求解目标函数,使分区 k 的权距优距离平方与权距劣距离平方和最小,得第 k 个分区的隶属于最优分区的隶属度为

$$u_k = \frac{1}{1 + \left\{ \frac{\sum_{j=1}^n [w_j (r_{kj} - g_j)]^p}{\sum_{j=1}^n [w_j (r_{kj} - b_j)]^p} \right\}^{\frac{2}{p}}} \quad (8)$$

计算各分区与最优分区之间的欧氏距离,故取

距离参数 $p=2$,并以此为基准比较各分区的水生态文明建设水平。

3.3 灰色关联度分析

灰色关联度分析(gray relational analysis)也是一种常见的非确定性评价方法。该法通过比较数据序列曲线几何形状的相似程度,判断序列间的关联性大小,从而实现系统态势的量化分析^[24]。设有参考序列 X_o 和比较序列 X_s ,两序列都包含 l 个时刻点,则在第 k 分区($k=1, 2, \dots, l$)两者关联系数和关联度的计算公式为

$$\xi_{os}(k) = \frac{\min_s \min_k |x_o(k) - x_s(k)| + \rho \max_s \max_k |x_o(k) - x_s(k)|}{|x_o(k) - x_s(k)| + \rho \max_s \max_k |x_o(k) - x_s(k)|} \quad (9)$$

$$\gamma_{os} = \frac{1}{l} \sum_{k=1}^l \xi_{os}(k) \quad (10)$$

式中: $\xi_{os}(k)$ 表示参考序列 X_o 与比较序列 X_s 在 k 分区的关联系数; $\min_s \min_k |x_o(k) - x_s(k)|$ 表示两序列两极最小绝对值; $\max_s \max_k |x_o(k) - x_s(k)|$ 表示两序列两极最大绝对值; ρ 为分辨系数, $\rho \in [0, 1]$,一般取 0.5。

4 评价结果

研究数据主要来自于 2017 年 3 个省份及所涉及各行政单元的水资源公报、环境质量状况公报、国民经济和社会发展统计公报、国土资源公报、统计年鉴、部门报告等政府官方渠道。由于指标 D_{25} “生态环境公众满意度”2017 年统计数据不可得,按照可比性原则采用 2016 年数据。

结合 5 位专家所确定的判断矩阵,基于 AHP 法和熵值法计算得汉江流域水生态文明评价指标的融合权重见表 2。将所得结果代入公式(9),根据模糊综合评价计算步骤,求得各分区隶属于最优分区的隶属度 U_k 及排序见表 3。

表 2 基于 AHP 法和熵值法的融合权重

Tab. 2 The fusion weights based on AHP method and entropy method

层次	权重向量	层次	权重向量
A	(0.333 3, 0.666 7)	C ₄	(0.244 1, 0.168 3, 0.386 7, 0.201 0)
B ₁	(0.259 9, 0.327 5, 0.412 6)	C ₅	(0.309 0, 0.371 8, 0.318 9)
B ₂	(0.322 1, 0.254 8, 0.165 6, 0.117 6, 0.085 5, 0.054 3)	C ₆	(0.326 1, 0.348 8, 0.325 1)
C ₁	(0.198 1, 0.801 9)	C ₇	(0.163 4, 0.335 2, 0.299 1, 0.202 3)
C ₂	(0.784 1, 0.215 9)	C ₈	(0.672 3, 0.327 7)
C ₃	(0.333 9, 0.592 8)	C ₉	(0.194 8, 0.194 9, 0.610 2)

表 3 评价分区隶属度及排序

Tab. 3 Membership degree and ranking of evaluation partitions

排序	评价分区	隶属度 U_k	排序	评价分区	隶属度 U_k
1	商洛	0.981 6	8	荆门	0.650 0
2	十堰	0.966 5	9	南阳	0.604 9
3	安康	0.938 0	10	随州	0.530 1
4	襄阳	0.905 8	11	三门峡	0.478 8
5	武汉	0.876 5	12	驻马店	0.304 7
6	宝鸡	0.865 6	13	孝感	0.173 8
7	汉中	0.742 3	14	天潜沔	0.098 2

按隶属度越大越优原则,采用 Jenks 自然断裂分类法^[25]划分优、良、中、较差、差 5 个级别,对比各分区的水生态文明建设水平,具体结果见图 2。由图 2 可知:商洛、十堰和安康的评价等级均达到优;襄阳、武汉和宝鸡均达到良。通过灰色关联度的分析可知:在自然与社会 2 个系统中,汉江流域水生态文明建设与社会系统的关联度较高,达 0.844;在 3 种自然地貌单元中,其与水域单元的关联度最高,达 0.698,山区单元次之;在 6 类人水关系子系统中,其与水安全子系统的关联度最高,达 0.745,与水环境、水节约和水生态子系统的关联度次之;其与全体评价对象的灰色关联度均在 0.6 以上。结果表明汉江流域水生态文明建设具有较强的社会属性,并侧重于流域水资源的安全保障、环境治理和节约教育,

主要通过转变生产和生活方式,实现人与自然的和谐。



图 2 汉江流域水生态文明建设综合评价

Fig. 2 Comprehensive evaluation of water ecological civilization construction of Han River basin

在综合评价的基础上,分系统和单元逐层分析见图 3。对于自然系统,安康和汉中的评价等级达到优,商洛、十堰和襄阳均达到良。由图 3(a)~3(c)可知,山区、平原和水域子系统的评价结果与自然系统相近。其中,自然系统与水域子系统的灰色关联度最高,达 0.810 4,与平原和山区子系统的关联度次之。这说明:以汉江流域源头汉中、安康和商洛为代表,自然禀赋较好,水系发达,水量充沛,森林覆盖率高,自然系统建设水平也随之较高;与之相对以天潜沔、孝感、驻马店和随州为代表的汉江中下游地区,水污染严重,水质优良度低,自然系统建设水平也较为落后。

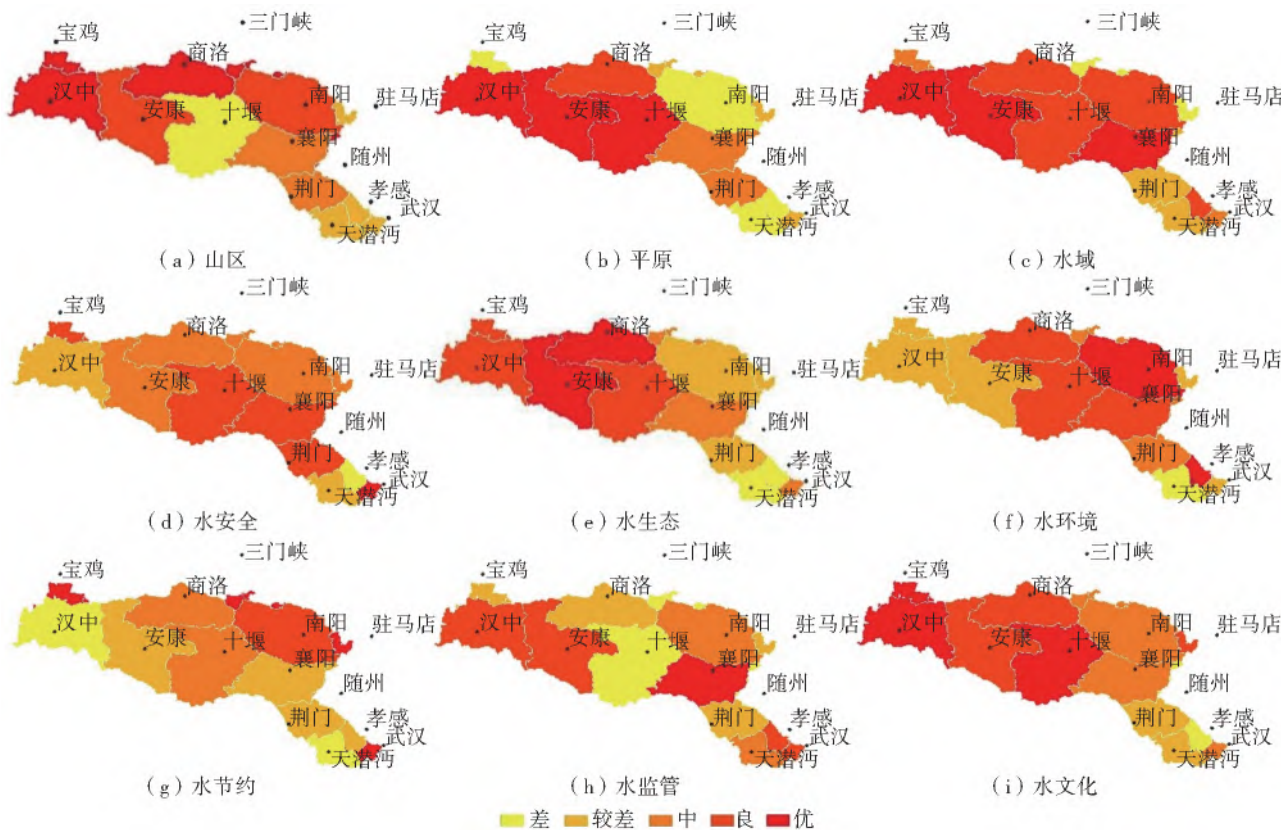


图 3 汉江流域水生态文明建设分层评价

Fig. 3 Hierarchy evaluation of water ecological civilization construction of Han River basin

对于社会系统:商洛和十堰的评级等级达到优;宝鸡、武汉、安康和襄阳均达到良。在其下设6类人水关系子系统中:社会系统与水安全子系统的灰色关联度最高,达0.734;水环境与水节约子系统次之。由图3(d)~3(i)可知,汉江流域经济社会发展的核心区域位于汉江中下游,以湖北省中南部的江汉平原为主,该区不仅工农业发达,在省内社会生产中占有重要地位,而且是汉江生态经济带发展规划的重中之重。然而,粗放型经济增长模式和结构性、布局性污染等问题在汉江中下游地区日渐凸显,已经达到了不容忽视的地步。

综上所述,目前汉江流域水生态文明建设呈中下游相对领先,上游略有滞后的空间格局,其中:以汉中、安康和商洛为代表的汉江水源地及上游地区,自身禀赋占据优势,水资源丰富,水生态保护较好,但人水互动较少,集中表现在水安全、水环境和水节约3个方面,具体到指标如“排水管道长度”“污水处理率”“公共供水管网漏损率”等与其他行政单元差距较大,较为落后;以十堰、武汉和襄阳为代表的汉江中下游地区,经济社会发展迅速,虽然在经济和人口的刺激下,水资源开发强度大,水污染严重,资源压力与日俱增,生态环境质量较差,“生态环境公众满意度”较低,但是治水、用水、爱水、护水宣传教育普遍,节水意识较强,水生态文明理念深入人心,人水互动频繁,水生态文明建设程度较高。

5 结论与展望

本文评价了2017年汉江流域水生态文明建设水平,评价结果与汉江流域现状基本一致,与2018年末所验收汉江流域内4个国家水生态文明城市建设试点情况相吻合,结果表明:

汉江流域水生态文明建设具有较强的社会属性,二者灰色关联度达0.844。由于汉江中下游地区社会系统建设水平高于上游地区,故汉江流域水生态文明建设呈中下游相对领先,上游略有滞后的空间格局。

导致汉江上下游地区水生态文明建设有所差距的主要因素在水安全、水环境和水节约3个方面。汉江水源地及上游地区应加强水资源安全保障,加大水环境整治资金投入和整改力度,并积极普及节水教育。

汉江水源地及上游地区自然禀赋占优,与之相比,中下游地区在水生态保护和水利文化弘扬两方面尚有较大发展空间。

值得说明,本文所提出的指标及分层方法仅是

初步探讨,尚待修改和完善。在指标的选择方面,具体到某个指标的代表性还有待斟酌,并且水生态文明建设程度只有相对优劣之分,不存在绝对文明与否的截然界限。研究旨在通过评价和分析汉江流域水生态文明建设现状水平,为汉江生态经济带建设发展规划提供技术支撑。

参考文献(References):

- [1] 苏聪文,邓宗兵,李莉萍,等.中国水生态文明发展水平的空间格局及收敛性[J].自然资源学报,2021,36(5):1282-1301. (SU C W, DENG Z B, LI L P, et al. Spatial pattern evolution and convergence of water eco-civilization development index in China[J]. Journal of Nature Resource, 2021, 36(5): 1282-1301. (in Chinese)) DOI: 10. 31497/zrzyxb. 20210515.
- [2] 邓宗兵,苏聪文,宗树伟,等.中国水生态文明建设水平测度与分析[J].中国软科学,2019(9):82-92. (DENG Z B, SU C W, ZONG S W, et al. Measurement and analysis of China's water ecological civilization construction index[J]. China Soft Science, 2019(9): 82-92. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN: ZGRK. 0. 2019-09-008.
- [3] 孔兰,陈俊贤,蒋任飞,等.水生态文明理念下流域综合规划探析[J].水利发展研究,2019,19(4):16-20,71. (KONG L, CHEN J X, JIANG R F. Analysis of comprehensive watershed planning under the concept of water ecological civilization[J]. Water Resources Development Research, 2019, 19(4): 16-20, 71. (in Chinese)) DOI: 10. 13928/j. cnki. wrdr. 2019. 04. 005.
- [4] 张雯婕,岳启蒙,温河青,等.水生态文明城市建设评价方法及其应用研究[J].北京师范大学学报(自然科学版),2020,56(2):315-323. (ZHANG W J, YUE Q M, WEN H Q, et al. Evaluation of water ecologically civilized city construction[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2020, 56(2): 315-323. (in Chinese)) DOI: 10. 12202/j. 0476-0301. 2020128.
- [5] 金菊良,汤睿,周戎星,等.基于联系数的城市水生态文明建设评价方法[J].水资源保护,2021,37(4):1-6,14. (JIN J L, TANG R, ZHOU R X, et al. Evaluation method for urban water eco-civilization construction based on connection number[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(4): 1-6, 14. (in Chinese)) DOI: 10. 3880 /j. issn. 1004-6933. 2021. 04. 001.
- [6] 王富强,王雷,魏怀斌,等.郑州市水生态文明城市建设现状评价[J].南水北调与水利科技,2015,13(4):639-642. (WANG F Q, WANG L, WEI H B, et al. Assessment of current construction situation of urban water ecological civilization in Zhengzhou[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology,

- 2015,13(4):639-642. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkqk.2015.04.008.
- [7] 方奕舟,陈志和,熊育久,等. 基于 AHP-模糊综合评价法的中山市水生态文明城市建设评估[J]. 中山大学学报(自然科学版),2021,60(3):88-98. (FANG Y Z, CHEN Z H, XIONG Y J, et al. Evaluation of water ecological civilization of Zhongshan City based on AHP-fuzzy comprehensive method[J]. ACTA Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2021, 60(3): 88-98. (in Chinese)) DOI:10.13471/j.cnki.acta.snus.2020.03.20.2020d005.
- [8] 曲富国,郑鹏. 基于 PSR 模型的辽河辽宁省内流域生态文明建设评价研究[J]. 环境保护,2014,42(8):36-40. (QU F G, ZHENG P. Evaluation of the eco-environmental quality of Liaohe River basin in Liaoning Province based on PSR model[J]. Environmental Protection, 2014, 42(8): 36-40. (in Chinese)) DOI:10.14026/j.cnki.0253-9705.2014.08.017.
- [9] 汪义杰,李丽,王建国. 流域水生态文明建设技术与方法探索:以桂江流域为例[J]. 人民珠江,2016,37(9):83-87. (WANG Y J, LI L, WANG J G. Research on technique and methods for water ecological civilization at watershed scale: A case of Guijiang River basin[J]. Pearl River, 2016, 37(9): 83-87. (in Chinese)) DOI:10.3969/j.issn.1001-9235.2016.09.018.
- [10] 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 eco-civilization characteristics of great lake-basin and assessment system[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(3):97-105. (in Chinese)) DOI:10.13928/j.cnki.wrahe.2018.03.015.
- [11] 国家发展改革委. 汉江生态经济带发展规划[Z]. 北京,2018. (Nation Development and Reform Commission. Development Planning of Hanjiang Ecological Economic Belt[Z]. Beijing, 2018. (in Chinese))
- [12] 水利部水利水电规划设计总院. 全国水资源调查评价技术细则[Z]. 北京,2017. (Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Technical rules for the investigation and evaluation of national water resources[Z]. Beijing, 2017. (in Chinese))
- [13] SL/Z 738—2016, 水生态文明城市建设评价导则[S]. 北京:中华人民共和国水利部. (SL/Z 738-2016, Evaluation guide of water ecological civilization construction. Beijing: Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2016. (in Chinese))
- [14] 余建星,李彦苍,吴海欣,等. 基于熵的海洋平台安全评价专家评定模型[J]. 海洋工程,2006,24(4):90-94. (YU J X, LI Y C, WU H X, et al. Specialists selection model for safety assessment of offshore platforms based on entropy[J]. The Ocean Engineering, 2006, 24(4): 90-94. (in Chinese)) DOI:10.16483/j.issn.1005-9865.2006.04.016.
- [15] 余建星,蒋旭光,练继建. 水资源优化配置方案综合评价的模糊熵模型[J]. 水利学报,2009,40(6):729-735. (YU J X, JIANG X G, LIAN J J. Comprehensive evaluation model for optimal deployment of water resources based on fussy theory and information entropy[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(6): 729-735. (in Chinese)) DOI:10.13243/j.cnki.slxb.2009.06.011.
- [16] SAATY T L. A scaling method for priorities in hierarchical structure[J]. Journal of Mathematical Psychology, 1977, 15(3): 234-281. DOI:10.1016/0377-2217(82)90022-4.
- [17] 苏为华. 多指标综合评价理论与方法问题研究[D]. 厦门:厦门大学,2000. (SU W H. Research on the theory and method of multi-index comprehensive evaluation[D]. Xiamen: Xiamen University, 2000. (in Chinese)) DOI:10.1006/031/j.cnki.slxb.2001.12.06.
- [18] 蒋耀. 基于层次分析法(AHP)的区域可持续发展综合评价:以青浦区为例[J]. 上海交通大学学报,2009,43(4):566-571. (JIANG Y. Evaluation of regional sustainable development based on analytical hierarchy process: Qingpu District as an example[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2009, 43(4): 566-571. (in Chinese)) DOI:1006-2467(2009)04-0566-06.
- [19] 郭显光. 熵值法及其在综合评价中的应用[J]. 财贸研究,1994(6):56-60. (GUO X G. Entropy evaluation method and its application in comprehensive evaluation[J]. Finance and Trade Research, 1994(6): 56-60. (in Chinese)) DOI:10.19337/j.cnki.34-1093/f.1994.06.014.
- [20] 杨丽,孙之淳. 基于熵值法的西部新型城镇化发展水平测评[J]. 经济问题,2015(3):115-119. (YANG L, SUN Z C. The development of western new-type urbanization level evaluation based on entropy method[J]. On Economic Problems, 2015(3): 115-119. (in Chinese)) DOI:10.16011/j.cnki.jjwjt.2015.03.023.
- [21] 顾昌耀,邱菀华. 复熵及其在 Bayes 决策中的应用[J]. 控制与决策,1991,6(4):253-259. (GU C Y, QIU W H. Complex entropy and its application in Bayes decision analysis[J]. Control and Decision, 1991, 6(4): 253-259. (in Chinese)) DOI:10.13195/j.cd.1991.04.15.guchy.003.
- [22] 陈守煜,赵瑛琪. 系统层次分析模糊优选模型[J]. 水利学报,1988(10):1-10. (CHEN S Y, ZHAO Y Q.

- The fuzzy optimum selecting model of system hierarchy analysis[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1988(10):1-10. (in Chinese) DOI:10.13243/j.cnki.slxb.1988.10.001.
- [23] 陈守煜,赵瑛琪. 模糊优选(优化)理论与模型[J]. *应用数学*, 1993, 6(1): 1-6. (CHEN S Y, ZHAO Y Q. Fuzzy optimum selecting theory and model[J]. *Mathematical Application*, 1993, 6(1): 1-6. (in Chinese)) DOI:CNKI;SUN;YISU. 0. 1993-01-000.
- [24] 王先庆,李博,郑建. 基于灰色关联-网络层次分析模型的水资源安全综合评价[J]. *南水北调与水利科技*, 2019, 17(4): 87-93. (WANG X Q, LI B, ZHENG J. Comprehensive evaluation of water resources security based on GRA-ANP model[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2019, 17(4): 87-93. (in Chinese)) DOI:10.13476/j.cnki.nsb-dqk.2019.0088.
- [25] SURHONE L M, TENNOE M T, HENSSONOW S F. *Jenks natural breaks optimization*[M]. Betascript Publishing, 2010. ISBN: 7-80155-160-5.

Evaluation of water ecological civilization construction of Han River basin

LI Qianxun, GUO Shenglian, DENG Lele, TIAN Jing, WANG Heyu

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Under climate warming and anthropogenic activities, the hydrological cycle and river flow regime have been significantly altered, challenging the traditional strategies of water resources management. Recently, water ecological environment protection on basin-scale has been paid great attention in China. Most of administrative regions are the key water ecological civilization construction regions, thus, it is urgent to evaluate the water ecological civilization construction at a river basin scale. Han River basin is the first pilot of the most stringent water resource management basin, and water source area of the Middle Route South-to-North Water Transfer Project in China. The basin governed by 14 administrative regions (or cities) is selected as evaluation units, and a multi-system, multi-landform and multi-scale indicator characterization method based on the characteristics of the water ecological civilization of the basin is developed.

The evaluation indexes for water ecological civilization basin is based on the evaluation guide of water ecological civilization construction. The selection guideline is based on upper, middle and lower reaches of the basin and single landform to multiple landforms, that can not only reflect the characteristics of regional features but also grasp the overall situation. After comprehensive consideration, the evaluation index system of water ecological civilization construction was established at an administrative region scale. This system is characterized by natural and social sub-systems, three basin geomorphologic units (mountains, plains, and water area), and six human-water interaction units (water security, water ecology, water environment, water saving, water supervision, and water culture) and 25 indicators.

To avoid the one-sidedness of the single weighting method, the merging weights were estimated by employing the Analytic Hierarchy Process (AHP) and entropy method. The main steps are as follows: calculate the subjective weights of indexes based on the AHP; calculate the objective weights of indexes based on the entropy method; calculate the merging weights of the indexes. The subjective weight of indexes based on the AHP was determined by the personal experience of experts, and the objective weight indexes by entropy method were determined by evaluating the relative importance with consideration of experts' experiences, and the merging weights were the combination of the above two weights. The synthesized method was proposed according to the advantage and disadvantages of subjective and objective ways of giving weight.

The degree of water ecological civilization construction in 2017 was evaluated by the fuzzy comprehensive evaluation and gray relational analysis methods. The research data were mainly collected from official government documents such as the water resources bulletin, environmental quality bulletin, statistical bulletin of national economic and social development, land and resources bulletin, statistical yearbook, and departmental reports of the three provinces (Shanxi, Henan, Hubei) and the administrative regions. Jenks natural fault classification method was adopted to divide the indexes into five levels that are excellent, good, medium, poor and worse to compare the degree of water ecological civilization construction in each unit. The results show that the water ecological civilization construction in Han River basin highly depends on social properties with a correlation coefficient of 0.844, thus exhibiting a spatial pattern that their developments in the middle and lower reaches are far superior to those in the upper reaches. Among the social elements, water security, water environment and water-saving are the key factors affecting water ecological civilization construction. These results are expected to provide rich information as references for the construction and planning of Han River ecological economic belt.

Key words: water ecological civilization construction; fuzzy comprehensive evaluation method; water resources management; Han River basin