

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.01.019

长江经济带产业绿色发展等级评估

郑鹏鑫¹, 杨 博¹, 王红瑞^{1,2}, 刘艺欣¹

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875;

2. 北京师范大学城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875)

摘要:为贯彻落实长江经济带“十六字”治水方针,在发展中处理好资源利用与环境保护的问题,利用压力-状态-响应(PSR)模型构建评价指标体系,结合熵权法、可变集法和偏联系数方法分析长江经济带各省市在 2008—2017 年产业绿色发展指标、发展等级和分布规律,构建长江经济带产业绿色发展评估体系。结果表明,长江经济带产业绿色发展水平整体向好,不同流域范围内部发展水平存在差异,上、中、下游的产业绿色发展水平依次向好。

关键词:绿色发展;PSR 模型;熵权法;可变集法;偏联系数法;长江经济带

中图分类号:TV21 **文献标识码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)01-0142-08

Evaluation of industrial green development level in Yangtze River Economic Belt // JIA Pengxin¹; YANG Bo¹, WANG Hongrui^{1,2}, LIU Yixin¹ (1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: In order to implement the "sixteen character" water control policy of the Yangtze River Economic Belt, and properly handle the issues of resource utilization and environmental protection during development, the PSR model was used to construct an index evaluation system. Combined with the entropy weight method, variable set method and partial connection coefficient method, the index evaluation system was used to analyze the industrial green development indicators, development level and distribution laws of the provinces and cities in the Yangtze River Economic Belt from 2008 to 2017, and construct an industrial green development evaluation system in the Yangtze River Economic Belt. The results show that the overall green development level of the Yangtze River Economic Belt is improving, and there are differences in the development levels within different river basins. The green development level of the upper, middle and lower reaches is improving in turn.

Key words: green development; PSR model; entropy weight method; variable set method; partial connection coefficient method; Yangtze River Economic Belt

党的十八大将生态文明建设纳入“五位一体”的总体布局中,绿色发展体现了“以人为本”的基本理念,是适应资源环境、促进人与自然和谐相处的发展模式,也成了国家发展战略之一^[1-5]。我国的长江经济带包括上海、江苏、浙江、安徽等 11 个省和直辖市,面积约 205.23 万 km²,占全国总面积的 21.4%,集聚了全国 40% 左右的人口,并创造了超过 40% 的 GDP,是我国国民经济的重要支撑力量,在我国经济社会发展与生态环境保护方面都占有举足

轻重的地位^[6-7]。推动长江经济带发展的前提是坚持生态优先^[8],然而多年来,长江经济带将经济建设摆在首位,在本质上还是以传统的经济发展方式为主,使生态环境愈发严峻,环境状况不容乐观^[9-11]。

20 世纪 90 年代以后,我国开始有计划地对长江流域进行综合规划,《长江经济带发展规划纲要》提出长江经济带发展要坚持生态优先、绿色发展,共抓大保护,不搞大开发,经济社会的发展过程中更要

基金项目:国家重点研发计划(2019YFC0408902);国家自然科学基金(52279005,51879010)

作者简介:郑鹏鑫(1997—),女,硕士研究生,主要从事水资源系统分析研究。E-mail:Jia_px@163.com

通信作者:王红瑞(1963—),男,教授,博士,主要从事水资源系统分析和环境规划与评价研究。E-mail:henrywang@bnu.edu.cn

力求绿色、低碳和循环的发展理念^[12-14]。习近平总书记在中央财经领导小组第九次会议提出了“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”十六字治水方针,其中“空间均衡、系统治理”对实现资源区域均衡具有重要的意义^[15]。国内众多学者对长江流域进行了一系列研究,陈进^[16]从长江的演变发展进程、水系特点、水资源开发利用现状等方面进行了分析,对长江的战略地位进行了详细阐述;伍新木^[17]从不同角度分析后认为长江经济带是中国极具发展潜力的区域,有必要也必须上升为国家战略。由于工业化进程的差异,西方国家早期快速的工业发展具有资源高消耗、高污染的特点,使得环境问题日益严重,所以西方国家较早意识到了绿色发展的理念^[18]。我国由于长期粗放的发展方式,导致了长江的资源环境承载能力被透支,长江流域带各区域之间发展不均衡^[19]。因此,长江经济带的长远发展需要根据实际情况因地制宜,形成自己的发展特色。近年来,随着长江经济带发展战略及相关配套政策的逐渐落地,我国生态文明建设的不断推进,长江经济带的发展有了更高的要求,为了更好地落实科学发展观,改变旧理念,亟须实施绿色发展战略^[20]。

本文将熵权法、可变集法和偏系数法相结合,构建长江经济带的产业绿色发展评估模型,对长江经济带产业绿色发展等级进行研究,以期对长江经济带的建设和发展提供参考。

1 研究区概况及数据来源

由于长江黄金水道的存在,长江经济带已经成为全球开发规模潜力最大、影响范围最广的内河经济带,也是生态文明建设的先行示范带^[21]。长江经济带分为上游、中游和下游 3 个部分,上游包括重庆、贵州、四川、云南,中游包括湖南、湖北、江西,下游包括上海、浙江、江苏、安徽^[22]。选取 2008—2017 年为研究时段,所用数据主要来源于《中国统计年鉴》《中国环境统计年鉴》《全国第六次人口普查》《中国城市统计年鉴》《中国水利统计年鉴》以及各省市统计年鉴。

2 研究方法

利用压力-状态-响应 (pressure-state-response, PSR) 模型,结合长江经济带产业绿色发展特点,构建出适合长江经济带产业绿色发展的评价指标体系。通过将获取的数据进行标准化处理,利用熵权法评估指标权重,可变集方法计算相对隶属度,利用偏系数方法计算等级支持度,确定产业绿色发展等级,等级评估流程见图 1。

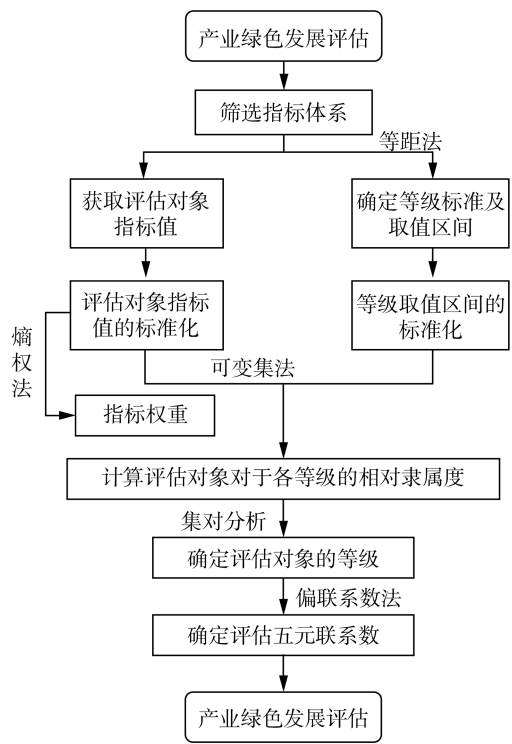


图 1 产业绿色发展等级评估流程

Fig. 1 Green industry development level evaluation process

2.1 PSR 模型

PSR 模型的概念为环境压力多由人类活动造成,通过改变资源的数量和质量即模型中的状态以及政治、经济、环境等行动对策即模型中的响应来应对这些变化^[23-24]。图 2 为 PSR 模型的框架。压力指标是指人类的生产活动对自然界施加的压力,常见指标有资源的使用量、人口数量、污染物的排放量等^[25],与生产和消费方式密切相关,反映排放量或资源使用强度以及给定时期内的相关趋势和变化。状态指标旨在概述与环境有关的状况或在某段特定的时间段内的变化情况,涵盖了生态系统和自然环境条件以及生活质量等方面,反映了环境政策最终目标,与环境质量及其相关影响以及自然资源的质量和数量有关^[26]。响应指标为社会在环境发生变化时,人类有意识对变化环境做出应对,以减轻对环境的影响,实现可持续发展也是产业绿色发展理

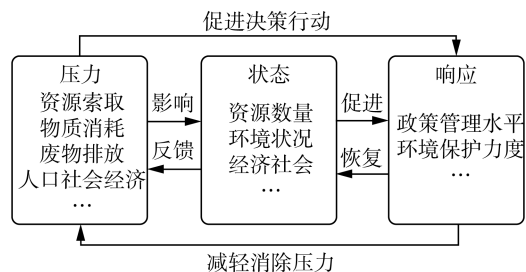


图 2 PSR 模型框架

Fig. 2 Frame diagram of PSR model

念内涵之一。PSR 模型借助研究人类活动与生态环境系统具体指标之间的联系,帮助政府等决策部门做出科学合理的决策^[27]。

2.2 熵权法

信息熵可用于判断指标的离散程度,熵值越小,说明指标的差异程度越大,该指标在评价过程中起到的作用就越大,即所占权重越大。熵权法消除了计算权重的过程中主观因素所带来的影响,使指标评价结果与实际更为接近,因此学者们常将熵权法与其他算法相结合,以提高评价结果的准确性^[28-29]。

为消除量纲差异的影响,保持计算的一致性,将长江经济带 11 个省市 2008—2017 年各指标值进行标准化:

$$x'_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{ij\max} - x_{ij}}{x_{ij\max} - x_{ij\min}} \\ \frac{x_{ij} - x_{ij\min}}{x_{ij\max} - x_{ij\min}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: x'_{ij} 为标准化结果数值; x_{ij} 为指标值; $x_{ij\max}$ 、 $x_{ij\min}$ 分别为指标最大值和最小值。

经过标准化后的数据取值区间为 $[0, 1]$, 且越大越优。将 $[0, 1]$ 区间投射到 $[0.001, 0.999]$, 利用熵权法计算指标的权重, 信息熵的计算公式为

$$E_j = -\ln n^{-1} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad (2)$$

其中 $p_{ij} = x'_{ij} / \sum_{i=1}^n x'_{ij}$

式中 E_j 为信息熵。当 $p_{ij} = 0$ 时, $\ln p_{ij}$ 无限接近于 0。

2.3 可变集法

陈守煜^[30]于 20 世纪 90 年代提出了动态相对隶属度概念,定义了可变集合,进一步建立了可变集工程模糊集理论。可变集法针对研究对象的对立清晰属性进行研究^[31-33],在向对立面转化过程中,其隶属程度可用对立测度值来衡量。对立测度值随时空条件的变化而变化,其和恒定为 1。集对是具有两个集合所组成的对子,从同、异、反 3 个角度对两个集合的特性进行定量分析,得到两个集合的联系度。集对分析理论和联系数方法常应用于风险评估、成绩预测、工程安全等评价,通过建立与规则或理想方案之间的联系数来评价所研究的系统,对不确定问题进行客观的定性、定量评价^[34-37]。

设方案集为 $U = \{u_j\} (j = 1, 2, \dots, n)$, X_{ij} 为第 j 个方案指标 i 的取值。指标 i 分为 c 个等级,则 c 个等级的指标值区间矩阵为 $[a_{ih}, b_{ih}] (h = 1, 2, \dots, c)$ 。根据可变集对立统一定理,在级别 h 值区间中必定存在指标 i 的级别 h 与级别 $h + 1$ 的渐变式质

变点 k_{ih}, k_{ih} 两侧对应两级别相对对立^[38],进而可得到:

$$k_{ih} = \frac{c-h}{c-1} a_{ih} + \frac{h-1}{c-1} b_{ih} \quad (3)$$

式中 a_{ih}, b_{ih} 分别为指标 i 在 h 级别标准值区间的上下限。

由式(3)与 $[a_{ih}, b_{ih}]$ 得 $[k_{ih}, b_{ih}]$,若指标值 X_{ij} 在矩阵区间 $[k_{ih}, b_{ih}]$ 相邻两级 h 与 $h + 1$ 区间,则 X_{ij} 对 h 级相对隶属度计算公式为

$$\mu_{ih}(u_j) = \begin{cases} 0.5(1 + \frac{b_{ih} - x_{ij}}{b_{ih} - k_{ih}}) & k_{ih} \leq x_{ij} \leq b_{ih} \\ 0.5(1 - \frac{b_{ih} - x_{ij}}{b_{ih} - k_{i(h+1)}}) & b_{ih} < x_{ij} \leq k_{i(h+1)} \end{cases} \quad (4)$$

式中 μ_{ih} 为指标 i 在 h 级别标准下所对应的方案构成的函数关系。对于小于 h 级、大于 $h + 1$ 级的指标的相对隶属度均为 0。

2.4 偏联系数法

联系数是集对分析中的重要概念,用于统一处理模糊、随机、中介和信息不完全所导致的不确定性的系统理论和方法^[39-40]。联系数的一般表达式为 $u = a + bi + cj$ 。联系数 u 中,可对 bi 部分进行剖析和展开,增加联系数的元数,一般形式为 $u = a + b_1i_1 + b_2i_2 + \dots + b_ni_n + cj$ 。结合产业绿色发展评估的实际,本文选取 $n = 3$,即用五元联系数 $u = a + bi + cj + dk + el$ 表示产业绿色联系度。将产业绿色发展水平等级与五元联系数进行结合, a 表示等级 I 的决策信息分量, b 表示等级 II 的决策信息分量, c 表示等级 III 的决策信息分量, d 表示等级 IV 的决策信息分量, e 表示等级 V 的决策信息分量。决策分量的大小直接决定了系统所处的等级,即最大分量所对应的等级。偏联系数是联系数的伴随函数,反映了不确定状态下的系统发展趋势,实现了对内在演化程度的量化描述,可为融合动态信息的等级确定提供支持^[41]。对于五元联系数 $u = a + bi + cj + dk + el$,其一阶偏正联系数 $\partial^+ u$ 为

$$\partial^+ u = \partial^+ a + i \partial^+ b + j \partial^+ c + k \partial^+ d \quad (5)$$

其中 $\partial^+ a = \frac{a}{a+b} \quad \partial^+ b = \frac{b}{b+c}$

$$\partial^+ c = \frac{c}{c+d} \quad \partial^+ d = \frac{d}{d+e}$$

其一阶偏负联系数 $\partial^- u$ 为

$$\partial^- u = i \partial^- b + j \partial^- c + k \partial^- d + l \partial^- e \quad (6)$$

其中 $\partial^- b = \frac{b}{a+b} \quad \partial^- c = \frac{c}{b+c} \quad \partial^- d = \frac{d}{c+d} \quad \partial^- e =$

$$\frac{e}{d+e}$$

以等级 I 为例,分量 a 对等级 I 的支持率为 1;分量 b 存在着向层次 a 的演化,且演化率为 $\partial^+ a$,因此分量 b 对等级 I 的支持率为 $\partial^+ a$,支持度为 $b \cdot \partial^+ a$;分量 c 、 d 、 e 对等级 I 的支持率记为 0。计算等级 I、II、III、IV、V 的支持度 S_I 、 S_{II} 、 S_{III} 、 S_{IV} 、 S_V ,根据支持度最大原则确定等级,进而对系统所处等级及其演化态势进行综合评估。 S_I 、 S_{II} 、 S_{III} 、 S_{IV} 、 S_V 的计算公式为

$$S_I = a + b \frac{a}{a+b} \quad (7)$$

$$S_{II} = a \frac{b}{a+b} + b + c \frac{b}{b+c} \quad (8)$$

$$S_{III} = b \frac{c}{b+c} + c + d \frac{c}{c+d} \quad (9)$$

$$S_{IV} = c \frac{d}{c+d} + d + e \frac{d}{d+e} \quad (10)$$

$$S_V = d \frac{e}{d+e} + e \quad (11)$$

3 结果与分析

3.1 长江经济带产业绿色发展整体情况

表 1 为 2008—2017 年长江经济带 11 个省市产业绿色发展等级。2008 年长江经济带整体级别范围为 II ~ V 级,2017 年为 I ~ III 级,且 II 级及以上省市超过了长江经济带总体的 70%。可见,2008—2017 年长江经济带产业绿色发展情况呈现整体好转, I 级、II 级水平城市逐渐增多。其中,作为国务院批复确定的中国国际经济、金融、贸易、航运、科技创新中心,上海市的产业绿色发展等级一直处于良好的状态;江苏和浙江的发展水平紧跟上海的步伐;云南贵州的产业绿色发展水平取得了一定的进步;安徽省作为长江下游的城市整体发展水平长期处于较低的水平。

由表 1 可见,整个长江经济带的产业呈现出明显的由点到面发展的特点。2008 年,只有上海发展

等级为 II 级,安徽、江西、重庆、云南、贵州发展等级都为 V 级,湖北、湖南、四川发展等级为 IV 级。2012 年,共有 9 个地区发生了转型,其中,江苏和浙江加入了 II 级行列;安徽、江西、重庆、云南、贵州 5 省除了贵州依旧停留在 V 级外,其余 4 个地区已经升级为 IV 级;湖北、湖南、四川升级到 III 级。2013 年,3 个地区完成升级,其中上海和江苏从 II 级升级为 I 级,贵州首次从 V 级升级为 IV 级。2014 年,共有 4 个地区转型成功,其中安徽、江西、重庆从 IV 级升级为 III 级,四川从 III 级升级为 II 级。2017 年,所有 11 个地区的发展等级范围均为 I ~ III 级,可见长江经济带产业绿色发展总体出现了较大的飞跃。

3.2 发展节点的长江经济带产业绿色发展水平

选择 2008 年、2012 年和 2017 年作为研究时段内的发展节点进行分析。2008 年,整个长江经济带没有产业绿色发展水平处于最优级别(I 级)的省市,只有上海为 II 级,浙江处于适中级别(III 级)。而江苏、湖北、湖南、四川处于发展较差的级别(IV 级),其余 5 省都处在最差级别(V 级);说明在 2008 年整个长江经济带产业绿色发展水平整体偏低,具有较大的提升空间。2012 年,长江经济带大部分省市的产业绿色发展水平都有了一定的提升,除上海处于高水平,贵州处于低水平没有变化,江苏由 2008 年的较低水平提升至较高水平外,长江经济带的产业绿色发展水平均提升了 1 个等级;说明 2012 年上海、江苏和浙江的产业绿色发展处于较高水平,湖北、湖南和四川处于一般水平,安徽、江西、重庆、云南处于较低水平,贵州处于低水平。2017 年,长江经济带各省产业绿色发展水平均有了显著提升,长江经济带产业绿色发展已经没有了 IV 级和 V 级两个等级,上海、江苏、浙江均由 2012 年的产业绿色发展较高水平提升至高水平,安徽和重庆连续提高 2 个等级至较高水平,湖北、湖南、四川也提升至较高水平,江西、云南提升了 1 个等级,贵州提升 2 个等

表 1 2008—2017 年长江经济带 11 个省市产业绿色发展等级

Table 1 2008—2017 green development level of 11 provinces and cities in Yangtze River Economic Belt

年份	上海	江苏	浙江	安徽	江西	湖北	湖南	重庆	四川	云南	贵州
2008	II	IV	III	V	V	IV	IV	V	IV	V	V
2009	II	II	III	V	V	IV	IV	V	IV	V	V
2010	II	II	II	IV	V	IV	IV	IV	IV	IV	V
2011	II	II	II	IV	IV	IV	IV	IV	III	IV	V
2012	II	II	II	IV	IV	III	III	IV	III	IV	V
2013	I	I	II	IV	IV	III	III	IV	III	IV	IV
2014	I	I	II	III	III	III	III	III	II	IV	IV
2015	I	I	II	III	III	III	II	III	II	III	IV
2016	I	I	II	III	III	II	II	III	II	III	III
2017	I	I	I	II	III	II	II	II	II	III	III

级后3省均处于发展的一般水平。

总体来看,上海、江苏、浙江产业绿色发展位于前列,其中,江苏发展速度最快且幅度最大,5年内,从2008年的Ⅳ级发展到2012年的Ⅰ级,并且一直持续Ⅰ级水平。江西、云南、贵州的发展水平较为缓慢,其中,贵州在2012年的发展节点依旧停留在2008年的Ⅴ级发展水平,成了2012年唯一1个Ⅴ级地区,直到2017年才升级至Ⅲ级水平。

3.3 长江经济带上、中、下游省市产业绿色发展水平

长江经济带上、中、下游呈现出明显的由点及面的发展特征,2008年上中下游分别以四川、湖北、湖南和上海为发展先锋,2013年可以看出整个长江经济带呈现出了较为均衡的发展水平,到了2016年,四川、湖北、湖南的发展水平再次提高。

长江经济带上游地区在2008年产业绿色发展水平较低,除四川省处于为Ⅳ级外,重庆、云南、贵州均为Ⅴ级,2017年重庆的产业绿色发展水平提高了3级,其余3个省均提高了2个等级,分别处于Ⅱ级和Ⅲ级。贵州发展最为落后,2008到2012年产业绿色发展水平处于Ⅴ级无变化,重庆和云南次之,分别于1年后提升1个等级,但处于Ⅳ级4年左右没有改善。可见上游地区每次产业绿色发展水平提升后均会有3~5a的保持蓄力期,为下一次发展水平的提升做准备。

长江经济带中游地区各省产业绿色发展水平近似,且时空变化较为同步。江西、湖北、湖南产业绿色发展水平提升较为缓慢。2008—2014年,湖北和湖南变化过程一致,此后湖南先于湖北1年提升为Ⅱ级;江西省稍落后于湖北省和湖南省,从2008年的Ⅴ级提升至2013年的Ⅲ级,并一直保持到2017年。由此可见中游地区产业绿色发展水平每次提升后,会有3~4a的平台期,略短于上游地区。

长江经济带下游地区产业绿色发展水平较高。一方面,下游地区从研究时段开始时产业绿色发展水平就较高;另一方面,下游地区产业绿色发展水平提升速度较快,如2008—2009年江苏省由Ⅳ级升至Ⅱ级。至2017年,除安徽省的发展水平为Ⅱ级外,上海市、江苏省和浙江省均提升至Ⅰ级。但下游地区的平台期相较于上游和中游地区来说更长,平均为3~7a,可见产业绿色发展水平越高,提升就越困难。

从动态发展进程来看,长江经济带各省市的产业绿色发展水平并不是一蹴而就,也不是完全同步的,而是各个省市逐渐提升的过程。在研究时段,变化幅度最小的为贵州。贵州位于我国西南地区,资源丰富,但工业发展不发达,教育发展较为滞后,科

技与人力资源水平普遍不高,第一、第二产业占比较高,发展需要消耗大量的劳动力,相对应的技术密集型产业发展较为缓慢,工业大多数为重工业,仅为简单的粗加工,并未进行深度开发。可以看出,贵州第一产业占比过高,第二产业发展滞后,第三产业发展不充分。

2017年,国家发布实施了一系列与长江经济带发展密切相关的政策,使各省长江经济带产业绿色发展水平均有显著提升。《关于依托黄金水道推动长江经济带发展的指导意见》指出了包括提升黄金水道通航能力、建设绿色生态走廊等7项重点任务,由此创建我国绿色发展、生态建设的示范先行区域;《长江经济带发展规划纲要》绘制了长江经济带长期发展的蓝图,将环境保护摆在了极其重要的位置。

4 结 论

a. 从时空变化角度而言,长江经济带产业绿色发展水平呈现向好趋势。2008年,上海、浙江分别处于Ⅱ、Ⅲ级,江苏、湖北、湖南、四川处于Ⅳ级,其余5省都处于Ⅴ级;2017年,上海、江苏、浙江提升至Ⅰ级,安徽、湖北、湖南、重庆、四川提升至Ⅱ级,江西、云南、贵州也提升至Ⅲ级,无处于Ⅳ、Ⅴ级的省市。

b. 从各省发展的空间动态过程看,在不同的流域范围内部也存在着较为明显的差异。如上游的四川、中游的湖北、湖南发展水平一直处于同地区前列,下游安徽省的产业绿色发展水平与同地区其他省市仍存在明显差距。

c. 从地区划分来看,长江上游的产业绿色发展水平整体较低,长江中游处于中间状态,长江下游的产业绿色发展水平最好,这也与长江经济带的整体发展相匹配。

参考文献:

- [1] 李悦昭,陈海洋,王红瑞,等. 绿色发展与生态优先的组织技术与理论模式[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2020,50(5):771-778. (LI Yuezhao, CHEN Haiyang, WANG Hongrui, et al. Organizational technology and theoretical model of green development and ecology first [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2020, 50(5): 771-778. (in Chinese))
- [2] 蒋南平, 向仁康. 中国经济绿色发展的若干问题[J]. 当代经济研究, 2013(2): 50-54. (JIANG Nanping, XIANG Renkang. Some problems in China's economic green development [J]. Contemporary Economic Research, 2013(2): 50-54. (in Chinese))
- [3] 姜文来, LIU Lei. 构建“利水型社会”促进长江水利绿色发展[J]. 生态文明新时代, 2018(6): 28-33. (JIANG Wenlai, LIU Lei. Building a “benefit-water society” to

- promote the green development of Yangtze River water conservancy[J]. The New Era of Ecological Civilization, 2018(6):28-33. (in Chinese))
- [4] 孙才志,马奇飞,赵良仕. 基于 GWR 模型的中国水资源绿色效率驱动机理[J]. 地理学报, 2020, 75(5): 1022-1035. (SUN Caizhi, MA Qifei, ZHAO Liangshi. Analysis of driving mechanism based on a GWR model of green efficiency of water resources in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(5): 1022-1035. (in Chinese))
- [5] 陈进. 长江经济带发展中的水利支撑作用[J]. 中国水利, 2015(23):1-3. (CHEN Jin. Supportive role of water to Yangtze Economic Belt development[J]. China Water Resources, 2015(23):1-3. (in Chinese))
- [6] 陈进,王永强,张晓琦. 长江经济带供水安全保障战略研究[J]. 水利学报, 2021, 52(11):1369-1378. (CHEN Jin, WANG Yongqiang, ZHANG Xiaoqi. Study on water supply security strategy of Yangtze River economic belt [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(11): 1369-1378. (in Chinese))
- [7] 左其亭,王鑫. 长江经济带保护与开发的和谐平衡发展途径探讨[J]. 人民长江, 2017, 48(13): 1-6. (ZUO Qiting, WANG Xin. Harmony equilibrium development approach of protection and exploration in Yangtze River Economic Belt[J]. Yangtze River, 2017, 48(13):1-6. (in Chinese))
- [8] 姜文来,冯欣,栗欣如,等. 习近平治水理念研究[J]. 中国农业资源与区划, 2020, 41(4): 1-10. (JIANG Wenlai, FENG Xin, Li Xinru, et al. Research on Xi Jinping's thoughts on water [J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2020, 41(4):1-10. (in Chinese))
- [9] 吴传清,宋子逸. 长江经济带创新发展研究进展(2014—2018)[J]. 长江大学学报(社会科学版), 2019(4): 45-51. (WU Chuangqing, SONG Ziyi. The research progress of the innovative development of the Yangtze River economic belt (2014-2018) [J]. Journal of Yangtze University (Social Sciences Edition), 2019(4): 45-51. (in Chinese))
- [10] 杨倩,胡锋,赵自阳,等. 长江经济带水资源水环境指标评估及对策[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019, 55(6):731-740. (YANG Qian, HU Feng, ZHAO Ziyang, et al. Evaluation of water resource and water environment in the Yangtze River economic belt and relevant policy strategy [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2019, 55(6): 731-740. (in Chinese))
- [11] RUEFF H, RAHIM U I, KOHLER T, et al. Can the green economy enhance sustainable mountain development? The potential role of awareness building[J]. Environmental Science & Policy, 2015, 49: 85-94.
- [12] 左其亭. “共抓大保护,不搞大开发”:破解长江经济带发展困局的必由之路[N]. 中国水利报, 2018-06-14 (005).
- [13] 左其亭. 水资源适应性利用理论及其在治水实践中的应用前景[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(1): 18-24. (ZUO Qiting. Theory of adaptive utilization of water resources and its application prospect in water management practices [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(1): 18-24.)
- [14] 周建军,张曼. 当前长江生态环境修复重点[J]. 水资源保护, 2016, 32(6): 163-165. (ZHOU Jianjun, ZHANG man. Key points of ecological environment restoration of the Yangtze River [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(6):163-165. (in Chinese))
- [15] 杨博,闫佳伟,王红瑞,等. 规划水资源论证现状问题探讨及对策研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2019, 49(6): 881-887. (YANG Bo, YAN Jiawei, WANG Hongrui, et al. Discussion on the status questions of planning water resources argumentation and counter measures[J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2019, 49(6): 881-887. (in Chinese))
- [16] 陈进. 把脉长江水资源:一谈长江特点及战略地位[J]. 中国水利, 2016(12): 61-64. (CHEN Jing. Taking the pulse of the water resources of the Yangtze River: a discussion on the characteristics and strategic position of the Yangtze River [J]. China Water Resources, 2016(12):61-64. (in Chinese))
- [17] 伍新木. 应将长江经济带的发展上升为国家战略[J]. 长江流域资源与环境, 2010, 19(10):1157-1158. (WU Xinmu. The Yangtze River economic belt should be developed into national strategy [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2010, 19(10):1157-1158. (in Chinese))
- [18] 李维维. 联合国环境规划署:迈向“绿色经济”,共赢全球未来[J]. 低碳世界, 2012(4):23-29. (LI Weiwei. United nations environment programme: towards a "green economy" and win the global future [J]. Low Carbon World, 2012(4): 23-29. (in Chinese))
- [19] 卢纯. “共抓长江大保护”若干重大关键问题的思考[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(4):283-295. (LU Chun. Reflection on several key issues regarding the “Making efforts to protect the Yangtze River together” project [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(4): 283-295. (in Chinese))
- [20] KUSHWAHA G S, SHARMA N K. Green initiatives: a step towards sustainable development and firm's performance in the automobile industry [J]. Journal of Cleaner Production, 2016, 121:116-129.
- [21] 吴宸晖,鞠茂森. 河流生态修复的国际经验及对长江大保护的启示[J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 136-144. (WU Chenhui, JU Maosen. International experience of river ecological restoration and its enlightenment to the

- Yangtze River protection [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3): 136-144. (in Chinese))
- [22] 黄玲丽. 长江经济带绿色竞争力研究: 测算、时空分异特征及优化路径[D]. 南昌: 江西师范大学, 2019.
- [23] 陈丹羽. 基于压力-状态-响应模型的城市韧性评估——以湖北省黄石市为例[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- [24] 薛联青, 王晶, 魏光辉. 基于 PSR 模型的塔里木河流域生态脆弱性评价[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2019, 47(1): 13-19. (XUE Lianqing, WANG Jing, WEI Guanghui. Dynamic evaluation of the ecological vulnerability based on PSR modeling for the Tarim River Basin in Xinjiang [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(1): 13-19. (in Chinese))
- [25] 曹琦, 陈兴鹏, 师满江. 基于 DPSIR 概念的城市水资源安全评价及调控[J]. 资源科学, 2012, 34(8): 1591-1599. (CAO Qi, CHEN Xingpeng, SHI Manjiang. Evaluation of water resources security in the urban area and regulating methods based on DPSIR [J]. Resources Science, 2012, 34(8): 1591-1599. (in Chinese))
- [26] 王国萍, 闵庆文, 丁陆彬, 等. 基于 PSR 模型的国家公园综合灾害风险评估指标体系构建[J]. 生态学报, 2019, 39(22): 8232-8244. (WANG Guoping, MIN Qinqwen, DING Lubin, et al. Comprehensive disaster risk assessment index system for national parks based on the PSR model [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(22): 8232-8244. (in Chinese))
- [27] 张琰瑞, 马金珠, 齐识. 人类活动和气候变化对石羊河流域水资源的影响: 基于主客观综合赋权分析法[J]. 资源科学, 2012, 34(10): 1922-1928. (ZHANG Yurui, MA Jinzhu, QI Shi. Human activities, climate change and water resources in the Shiyang Basin [J]. Resources Science, 2012, 34(10): 1922-1928. (in Chinese))
- [28] 艾亚迪, 魏传江, 马真臻. 基于 AHP-熵权法的西安市水资源开发利用程度评价[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(2): 11-16. (AI Yadi, WEI Chuanjiang, MA Zhenzhen. Evaluation on water resources development and utilization degree based on AHP-entropy weight method [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(2): 11-16. (in Chinese))
- [29] 孙才志, 吴永杰, 刘文新. 基于熵权 TOPSIS 法的大连市水贫困评价及障碍因子分析[J]. 水资源保护, 2017, 33(4): 1-8. (SUN Caizhi, WU Yongjie, LIU Wenxin. Application of TOPSIS method based on entropy weight to water poverty evaluation and obstacle indicator diagnoses for Dalian City [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(4): 1-8. (in Chinese))
- [30] 陈守煜. 工程可变模糊集理论与模型-模糊水文水资源学数学基础[J]. 大连理工大学学报, 2005, 45(2): 308-312. (CHEN Shouyu. Theory and model of engineering variable fuzzy set-mathematical basis for fuzzy hydrology and water resources [J]. Journal of Dalian University of Technology, 2005, 45(2): 308-312. (in Chinese))
- [31] 陈守煜. 可变集-可变模糊集的发展及其在水资源系统中的应用[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(1): 92-101. (CHEN Shouyu. Variable set-development of variable fuzzy set and its application in water resources system [J]. Journal of Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42(1): 92-101. (in Chinese))
- [32] 杨亚锋, 王红瑞, 赵伟静, 等. 水资源承载力的集对势-偏联系数评价模型[J]. 工程科学与技术, 2021, 53(3): 99-105. (YANG Yafeng, WANG Hongrui, ZHAO Weijing, et al. Evaluation model of water resources carrying capacity based on set pair potential and partial connection number [J]. Advanced Engineering Sciences, 2021, 53(3): 99-105. (in Chinese))
- [33] 金菊良, 刘东平, 周戎星, 等. 基于投影寻踪权重优化的水资源承载力评价模型[J]. 水资源保护, 2021, 37(3): 1-6. (JIN Juliang, LIU Dongping, ZHOU Rongxing, et al. Evaluation model of water resources carrying capacity based on projection pursuit weight optimization [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(3): 1-6. (in Chinese))
- [34] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[J]. 大自然探索, 1994(1): 67-72. (ZHAO Keqin. Set pair analysis and its preliminary application [J]. Discovery of Nature, 1994(1): 67-72. (in Chinese))
- [35] 赵克勤. 集对分析对不确定性的描述和处理[J]. 信息与控制, 1995, 24(3): 162-166. (ZHAO Keqin. Description and treatment of uncertainty in set pair analysis [J]. Information and Control, 1995, 24(3): 162-166. (in Chinese))
- [36] 杨亚锋, 王红瑞, 巩书鑫, 等. 可变勾股模糊 VIKOR 水资源系统韧性评价调控模型及应用[J]. 水利学报, 2021, 52(6): 633-646. (YANG Yafeng, WANG Hongrui, GONG Shuxin, et al. Variable pythagorean fuzzy VIKOR evaluation regulation model of water resources system resilience and its application [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(6): 633-646. (in Chinese))
- [37] 王红瑞, 巩书鑫, 邓彩云, 等. 基于五元联系数的水资源承载力评价[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2019, 49(2): 211-218. (WANG Hongrui, GONG Shuxin, DENG Caiyun, et al. Research on water resources carrying capacity based on five-element connection number [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2019, 49(2): 211-218. (in Chinese))
- [38] 陈守煜. 可变集及水资源系统优选决策可变集原理与方法[J]. 水利学报, 2012, 43(9): 1066-1074. (CHEN Shouyu. Variable sets and the theorem and method of optimal decision making for water resource system [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 43(9): 1066-1074. (in Chinese))
- [39] 白露. 基于联系数的区域水资源承载力综合评价与趋

势分析[D].合肥:合肥工业大学,2019.

- [40] 胡启玲,董增川,杨雁飞,等.基于联系数的水资源承载力状态评价模型[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(5):425-432. (HU Qiling, DONG Zengchuan, YANG Yanfei, et al. State evaluation model of water resources carrying capacity based on connection number [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019,47(5):425-432. (in Chinese))
- [41] 杨红梅,赵克勤.偏联系数的计算与应用研究[J].智能系统学报,2019,14(5):865-876. (YANG Hongmei, ZHAO Keqin. The calculation and application of partial connection numbers[J]. CAAI Transactions on Intelligent Systems, 2019, 14(5):865-876. (in Chinese))
- (收稿日期:2022-11-08 编辑:王芳)
-
- (上接第 118 页)
- [78] 占车生,宁理科,邹靖,等.陆面水文-气候耦合模拟研究进展[J].地理学报,2018,73(5):893-905. (ZHAN Chesheng, NING Like, ZHOU Jing, et al. A review on the fully coupled atmosphere-hydrology simulations [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73 (5): 893-905. (in Chinese))
- [79] XU Y P, GAO X, ZHU Q, et al. Coupling a regional climate model and a distributed hydrological model to assess future water resources in Jinhua River Basin, East China [J]. Journal of Hydrology Engineering, 2015, 20 (4): 04014054.
- [80] KRUK N S, VENDRAMÉ Í F, CHOU S C. Coupling a mesoscale atmospheric model with a distributed hydrological model applied to a watershed in southeast Brazil [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2013, 18 (1): 58-65.
- [81] SENATORE A, MENDICINO G, GOCHIS D J, et al. Fully coupled atmosphere-hydrology simulations for the central mediterranean: impact of enhanced hydrological parameterization for short and long time scales [J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2015, 7 (4): 1693-715.
- [82] WAGNER S, FERSCH B, YUAN F, et al. Fully coupled atmospheric-hydrological modeling at regional and long-term scales: development, application, and analysis of WRF-HMS [J]. Water Resources Research, 2016, 52 (4): 3187-3211.
- [83] KUNDZEWICZ Z W, KRYSANOVA V, BENESTAD R, et al. Uncertainty in climate change impacts on water resources [J]. Environmental Science & Policy, 2018, 79: 1-8.
- [84] 刘艳丽,张建云,王国庆,等.环境变化对流域水文水资源的影响评估及不确定性研究进展[J].气候变化研究进展,2015,11(2):102. (LIU Yanli, ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, et al. Review of impacts assessment of environmental change on hydrology and water resources and uncertainty in catchment scale [J]. Climate Change Research, 2015, 11 (2): 102. (in Chinese))
- [85] BAO Z, ZHANG J, LIU J, et al. Sensitivity of hydrological variables to climate change in the Haihe River Basin, China [J]. Hydrological Processes, 2012, 26(15): 2294-2306.
- [86] WU J, YU F, CHEN Z, et al. Global sensitivity analysis of growth simulation parameters of winter wheat based on EPIC model [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(7): 136-142.
- [87] 贺新月,曾献奎,王栋.融合 AR 模型和 MCMC 方法的水文模拟不确定性分析[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(2):116-122. (HE Xinyue, ZENG Xiankui, WANG Dong. Uncertainty analysis of hydrological simulation with auto regressive model and MCMC method[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48 (2): 116-122. (in Chinese))
- [88] BEVEN K, BINLEY A. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction [J]. Hydrological Processes, 1992, 6(3): 279-298.
- [89] N6BREGA M T, COLLISCHONN W, TUCCI C E M, et al. Uncertainty in climate change impacts on water resources in the Rio Grande Basin, Brazil [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15(2): 585-595.
- [90] GUO S, YING A. Uncertainty analysis of impact of climate change on hydrology and water resources [J]. IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports-Intern Assoc Hydrological Sciences, 1997, 240: 331-338.
- [91] NGUYEN D H, KIM S H, KWON H H, et al. Uncertainty quantification of water level predictions from radar: based areal rainfall using an adaptive MCMC algorithm [J]. Water Resources Management, 2021, 35 (7): 2197-2213.
- [92] YIP S, FERRO C A, STEPHENSON D B, et al. A simple, coherent framework for partitioning uncertainty in climate predictions [J]. Journal of Climate, 2011, 24 (17): 4634-4643.
- [93] BOSSHARD T, CARAMBIA M, GOERGEN K, et al. Quantifying uncertainty sources in an ensemble of hydrological climate-impact projections [J]. Water Resources Research, 2013, 49(3): 1523-1536.
- [94] 田焯.气候变化对极端径流影响评估中的不确定性研究[D].杭州:浙江大学,2013.
- [95] JUNG I W, CHANG H, MORADKHANI H. Quantifying uncertainty in urban flooding analysis considering hydro-climatic projection and urban development effects [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011, 15(2): 617-633.

(收稿日期:2021-11-03 编辑:王芳)