

DOI:10.13476/j.cnki.nsbddq.2022.0073

杨亚锋, 闫佳伟, 王红瑞, 等. 长江经济带水环境承载力时空变化特征[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2022, 20(4): 714-723. YANG Y F, YAN J W, WANG H R, et al. Spatial-temporal variation of water environment carrying capacity in the Yangtze River Economic Belt[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2022, 20(4): 714-723. (in Chinese)

长江经济带水环境承载力时空变化特征

杨亚锋^{1,2}, 闫佳伟¹, 王红瑞¹, 周利超³, 杨荣雪¹

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875; 2. 华北理工大学理学院, 河北 唐山 063210;

3. 临沂市自然资源和规划局, 山东 临沂 276001)

摘要: 聚焦自然本底和人类活动的双重影响, 从水资源、生态环境和经济社会 3 个子系统出发构建水环境承载力评价指标体系, 进而建立一种基于可变集方法的水环境承载力指数模型, 探讨长江经济带水环境承载力的时空变化特征。结果表明: 2009—2018 年, 长江经济带水环境承载力呈现逐年提升的基本发展态势, 承载力指数由 4.20 增至 6.08; 上、中、下游区域的水环境承载力日趋均衡。3 个子系统承载力则具有空间分异特征: 上游区域的生态环境子系统相对较弱, 但差距逐年缩小; 中游区域的水资源子系统恶化趋势明显; 下游区域的经济社会子系统常年显著占优, 而水资源子系统则严重滞后。2018 年, 长江经济带的水环境承载力具有明显的空间分布规律, 除浙江外, 表现为上游优于中游、中游优于下游, 但总体上呈现经济社会子系统绝对占优、生态环境子系统一般、水资源子系统相对滞后的基本特征。水资源子系统是当前长江经济带水环境承载力提升过程中需要重点关注的主要矛盾点之一。

关键词: 水环境承载力; 时空变化; 可变集方法; CRITIC 方法; 长江经济带

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



水环境承载力分析是研究水环境问题及其应对策略的重要途径之一^[1-5]。目前学者们对水环境承载力概念的理解基本一致, 即考虑与水资源、水环境相适配的人口和经济社会发展规模, 从而推动产业结构的优化与调整, 促进地区的可持续发展。在以往的水环境承载力评价研究中, 通常将水环境承载力划分为若干等级, 进而利用某种方法判定研究对象所属的等级, 如 BP 神经网络^[6-7]、云模型^[8]、集对分析^[9-10]、系统动力学方法^[11]、物元可拓模型^[12]等。门宝辉等^[8]基于驱动力-压力-状态-响应模型构建评价指标体系, 结合熵权法和云理论评价了北京市水环境承载力水平。赵传起等^[11]基于系统动力学和向量模法, 从水资源、社会经济和水环境 3 个方面对水环境承载力变化情况进行评估。王富强等^[13]基于广义水环境承载力概念, 从经济社会、水

资源、水环境和水生态 4 个方面构建了水环境承载力综合评价指标体系。以上研究成果从不同角度开展水环境承载力指标体系构建及评价策略研究, 丰富了水环境承载力理论体系和评价分析框架。然而水环境承载力相邻等级之间的模糊对立统一关系仍未得到充分考虑。事实上, 水环境承载力是一个模糊概念, 2 个相邻等级之间界限并不明确。陈守煜^[14]提出的可变集方法为该类问题提供了一种有效的解决途径, 目前已在水资源领域得到成功的应用^[15-18]。对于水环境承载力问题, 特定指标下评价对象只与其中两个相邻等级存在模糊隶属关系, 且满足归一性。利用可变集方法计算相对隶属度, 进而通过级别特征值表征水环境承载力状态, 既可对评价对象划分梯队, 亦可根据序关系研究其时空变化特征。长江经济带创造了超过全国 2/5 的国民经济生产总值, 同时也面

收稿日期: 2021-11-23 修回日期: 2022-06-22 网络出版时间: 2022-07-14

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1430.TV.20220713.1444.010.html>

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

作者简介: 杨亚锋(1985—), 男, 河南宝丰人, 副教授, 主要从事水资源系统分析研究。E-mail: hblgyyf@ncst.edu.cn

通信作者: 王红瑞(1963—), 男, 河南新乡人, 教授, 主要从事水资源分析与规划研究。E-mail: henrywang@bnu.edu.cn

面临着发展方式粗放、主要污染物排放强度大、水资源利用效率偏低等问题,使得经济发展与水环境保护之间存在着冲突,水环境状况不容乐观。伴随着经济社会的高速发展和城市化进程,人类活动对水环境的影响越来越大,因此有必要综合考虑人类活动和自然本底的双重影响,探索构建水环境承载力评价体系,分析水环境承载力发展态势,进而为长江经济带可持续发展提供支撑。鉴于此,选取长江经济带 11 个省(直辖市)为研究区域,结合前人研究基础,选取水资源、生态环境和经济社会等方面的 15 个指标构建水环境承载力评价体系,基于可变集方法研究 2009—2018 年长江经济带水环境承载力及其各个子系统的时空变化特征,进而探讨存在的问题及其主要制约因素,结果可为长江经济带的绿色可持续发展和高质量发展的政策制定提供支持。

1 研究方法

1.1 研究区与数据来源

长江经济带横跨我国东中西部,覆盖 11 个省(直辖市),西起四川省甘孜州,东至浙江省舟山市,最南端位于云南省西双版纳傣族自治州,最北端位于江苏省徐州市,总面积约为全国国土面积的 1/5。上游区域包括重庆、四川、贵州、云南;中游区域包括江西、湖北、湖南;下游区域包括上海、江苏、浙江、安徽。下游面积约为中游面积的 2.01 倍,约为上游地

区的 3.24 倍。长江经济带水资源量相对较为丰富,但存在的问题有:人均水资源量仍然相对较少,且存在用水效率偏低、水资源浪费严重的现象;重点湖泊富营养化、河湖连通性减弱等仍然存在;各省人口老龄化发展趋势明显,云贵等地第三产业超速发展引发产业结构合理化程度低;等等。因此,针对长江经济带开展水环境承载力时空变化特征研究,意义突出。

所使用的数据均来源于长江经济带 11 个省(直辖市)的地方统计年鉴(2010—2019)、水资源公报(2009—2018)以及中国统计年鉴(2010—2019)。

1.2 指标体系

区域水环境承载力的影响因素较多,相关学者^[4]普遍认为水环境承载力内部各子系统之间呈现出相互叠加、相互影响的作用。水资源是水环境承载力的直接影响因素,是一定区域内水环境“量”上的直接体现。当水资源需求增加时,对区域水环境“量”要求增加,即所面临的承载压力加大。水资源的供需、开发和利用,污染物的富集和排放等直接影响区域水量和水质的改变,导致生态环境的恶化,进而促使经济社会活动逆向反馈,采取一定的处理与调控措施来改善水环境状态^[5]。

基于以上分析,从自然本底和人类活动双重影响的视角出发,以水资源子系统、生态环境子系统、经济社会子系统作为准则层,构建水环境承载力的评价指标体系,见表 1。

表 1 水环境承载力评价指标体系

Tab. 1 Evaluation index system of water environment carrying capacity (WECC)

目标层	准则层	指标层	属性	权重	水环境承载力等级				
					1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
水资源子系统(S ₁)		人均水资源量/m ³	+	0.071 3	>2 600	1 700~2 600	1 000~1 700	500~1 000	<500
		生活用水占比/%	+	0.083 9	>20	15~20	10~15	5~10	<5
		人均库容量/m ³	+	0.085 2	>800	600~800	400~600	200~400	<200
		生态环境用水占比/%	+	0.064 1	>4	3~4	2~3	1~2	<1
		农业灌溉亩均用水量/m ³	-	0.080 3	<200	200~350	350~450	450~600	>600
生态环境子系统(S ₂)		城市污水处理率/%	+	0.047 5	>95	90~95	85~90	60~85	<60
		万元 GDP 化学需氧量排放量/kg	-	0.062 1	<1	1~2	2~3	3~4	>4
		万元 GDP 氨氮排放量/kg	-	0.060 7	<0.2	0.2~0.4	0.4~0.6	0.6~0.8	>0.8
		森林覆盖率/%	+	0.088 6	>60	45~60	35~45	20~35	<20
		湿地总面积占国土面积比重/%	+	0.063 6	>12	9~12	6~9	3~6	<3
经济社会子系统(S ₃)		建成区绿化覆盖率/%	+	0.058 2	>40	30~40	20~30	10~20	<10
		人均 GDP/万元	+	0.048 5	>7	5~7	3~5	1~3	<1
		第三产业占 GDP 比重/%	+	0.052 0	>60	50~60	40~50	30~40	<30
		万元 GDP 用水量/m ³	-	0.050 7	<50	50~150	150~250	250~300	>300
		节水灌溉面积占有效灌溉面积比例/%	+	0.083 4	>60	45~60	35~45	20~35	<20

水资源子系统与水资源量和水资源利用状况密切相关,包括人均水资源量和库容量、生活用水占比、生态用水占比和农业灌溉亩均用水量^[12]。生态环境子系统是水环境污染状况的直接体现,水环境污染越严重,水环境承载能力越弱。因此,水环境子系统的选取应与污染状况密切相关,包括城市污水处理率、万元 GDP 化学需氧量排放量和氨氮排放量、森林覆盖率和湿地总面积占国土面积比重^[8]。经济社会子系统与经济增长、产业结构和宏观调控政策等密切相关。当经济呈增长态势时,环境压力先增加后减小;在水环境不变的基础上,人均 GDP 的提高也会导致单位水环境承载活动的增多。因此,经济社会指标包括建成区绿化覆盖率、人均 GDP、第三产业占 GDP 比重、万元 GDP 用水量和节水灌溉面积占有效灌溉面积比例。

结合长江经济带平均水平及研究实际,参考相关研究成果^[4,7-8,11-12],将评价标准分为 5 个等级,其中:1 级代表承载能力很强,有巨大的可供开发和利用的潜力;2 级代表承载能力较强,有较大的可供开发和利用的潜力;3 级代表承载能力与经济社会发展相匹配;4 级代表承载能力较弱,有轻微的超载现象;5 级代表承载能力弱,超载现象严重。

1.3 可变集方法

将长江经济带 11 个省(直辖市)各年度的水环境承载力记为对象集 $U = \{u_j\} (j=1,2,3,\dots,n)$,将评价指标体系记为指标集 $V = \{v_i\} (i=1,2,3,\dots,m)$,则水环境承载力问题转化为多目标决策与评价问题。 $X = \{x_{ij}\}$,其中 x_{ij} 为对象 u_j 的指标 v_i 的取值。指标 v_i 分为 c 个等级,其中,1 级最优, c 级最差,对应的指标值区间分别记为 $I = [a_{ih}, b_{ih}] (h=1,2,\dots,c)$ 。其中 a_{ih}, b_{ih} 为指标 v_i 在 h 级别标准值区间的上下限。

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 v_i 的级别 h 与级别 $h+1$ 的渐变式质

变点 k_{ih} 表达式为

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

由式(1)与矩阵 I 得 $K = [k_{ih}, b_{ih}]$,若 x_{ij} 在相邻两级 h 与 $h+1$ 区间,则 x_{ij} 对 h 级的相对隶属度为

$$\mu_{ih}(u_j) = 0.5(1 + \frac{b_{ih} - x_{ij}}{b_{ih} - k_{ih}})x_{ij} \in [k_{ih}, b_{ih}] \quad (2)$$

$$\mu_{ih}(u_j) = 0.5(1 - \frac{b_{ih} - x_{ij}}{b_{ih} - k_{i(h+1)}})x_{ij} \in [b_{ih}, k_{i(h+1)}] \quad (3)$$

对于小于 h 级、大于 $h+1$ 级的指标的相对隶属度均为 0,即: $\mu_{i(<h)}(u_j) = 0, \mu_{i(>h+1)}(u_j) = 0$ 。计算 u_j 对于级别 h 的综合相对隶属度为

$$v_h(u_j) = \sum_{i=1}^m w_i \mu_{ih}(u_j) \quad (4)$$

式中: w_i 为指标 v_i 的权重,且 $\sum_{i=1}^m w_i = 1$ 。采用 CRITIC (criteria importance though intercriteria correlation)方法获取指标权重。CRITIC 方法是一种常用的赋权法,具体步骤参见文献[19]和[20],不再赘述。

对象 u_j 的级别特征值为

$$H(u_j) = \sum_{h=1}^c v_h^0(u_j) \times h, \text{ 其中, } v_h^0(u_j) \text{ 为 } v_h^0(u_j) \text{ 的归一化量。}$$

1.4 水环境承载力指数

为直观表示水环境承载力水平,构建对象 u_j 的水环境承载力指数 I_{WECC}

$$I_{WECC}(u_j) = \frac{10(c - H(u_j))}{c - 1} \quad (5)$$

I_{WECC} 在区间 $[0, 10]$ 上取值,其值越大,表示水环境承载力越高。为便于作图对比,综合考虑表 1 中 15 项指标的等级划分情况,按取值比例对级别特征值进行离散化处理,划分为 5 个等级,其中,1 级代表承载力很强,5 级代表承载力很弱。水环境承载力指数与等级的对应关系见表 2。

表 2 水环境承载力指数分级标准

Tab.2 Classification standard of I_{WECC} (water environment carrying capacity index, WECCI)

水环境承载力等级	1 级	2 级	3 级	4 级	5 级
水环境承载力指数 I_{WECC}	7.6~10.0	5.8~7.6	4.1~5.8	2.3~4.1	0~2.3
水环境承载力	强	较强	一般	较弱	弱

2 结果与讨论

2.1 总体时空变化特征

利用 CRITIC 方法计算指标权重,见表 1。基于式(1)~(5)计算长江经济带 11 个省(直辖市)2009—2018 年的水环境承载力指数,见图 1。

由图 1 可知,2009—2018 年长江经济带水环境承载力整体上呈现逐年提升的发展态势,水环境承载力平均指数由 4.20 提升至 6.08,增幅高达 44.76%,但仍存在较大差距。总体来看,2009—2018 年长江经济带的水环境承载力状况可分为 3 个阶段:临界超载期(2009—2012 年);蓄力沉淀期(2013—2015 年);

稳步提升期(2016—2018年)。具体来看,2009—2012年,长江经济带水环境承载力处在3级水平,但部分省(直辖市)相对落后,处在4级,如湖北和安徽等,其4年平均水环境承载力指数分别为3.54和3.78。2012年11月,“美丽中国”概念的提出在全国掀起了一场生态文明建设的热潮。作为全国生态文明建设的先行示范带,长江经济带各省区蓄力沉淀,水环境承载力从2013年开始出现较为明显的变化,全部进入3级及以上水平。至2015年,各省(直辖市)的水环境承载力均得到一定的提升,但除浙江省更进一步而迈入1级水平之外,其余省(直辖市)未能突破3级

范围。进入2016年,四川和重庆进入2级水平,开启了长江经济带水环境绿色发展的强劲潮流。上游的云南和贵州、中游的湖北随后分别在2016和2017年进入2级,长江经济带的水生态环境显现出盎然之势。截至2018年,长江经济带上游4个省(直辖市)全部进入较强的承载水平,而中下游地区,除浙江和湖北外,大部分区域仍处于3级一般临界水平。需要指出的是,浙江始终保持着较高的承载水平,成为长江经济带水环境承载力提升和绿色发展的排头兵。随着当前长江大保护战略的进一步实施,长江经济带的水生态环境状态正在迎接着下一个关键提升期。

	2009年	2010年	2011年	2012年	2013年	2014年	2015年	2016年	2017年	2018年
上海	4.69	4.58	4.85	5.00	5.15	5.42	5.65	5.74	5.74	5.54
江苏	4.01	4.26	4.40	4.49	4.59	4.85	5.25	5.54	5.43	5.59
浙江	6.57	7.02	6.29	6.81	7.08	7.31	7.73	7.90	7.91	7.99
安徽	3.42	4.06	3.69	3.96	4.16	4.57	4.70	5.33	5.32	5.34
江西	4.10	4.12	3.88	3.99	4.28	4.11	4.48	4.96	5.25	5.61
湖北	3.30	3.77	3.41	3.66	4.15	4.42	4.63	5.60	5.58	5.61
湖南	3.77	4.16	3.94	4.34	4.24	4.53	4.93	5.49	5.63	5.83
重庆	4.11	4.53	4.46	4.73	5.07	5.42	5.70	6.01	6.26	6.40
四川	4.40	4.61	4.31	4.04	4.78	5.32	5.61	6.19	6.47	6.69
贵州	3.69	4.21	3.88	4.28	4.50	5.11	5.67	5.33	5.40	6.00
云南	4.17	4.35	4.23	3.98	4.79	5.14	5.04	5.60	5.96	6.34
均值	4.20	4.51	4.30	4.48	4.80	5.11	5.40	5.79	5.91	6.08

■ 4级 ■ 3级 ■ 2级 ■ 1级

图1 长江经济带11省(直辖市)2009—2018年的水环境承载力指数

Fig. 1 WECCI of 11 provinces (cities) in Yangtze River Economic Belt from 2009 to 2018

从空间维度来看,长江经济带水环境承载力水平日趋均衡,见图2。上中下游水环境承载力指数的方差经2011至2015年一段高峰期后显著下降[图2(a)],从2015年的0.19降至2017年的0.06,降幅高达68.42%,但在2018年出现了小幅增加,主要扰动因子是水资源子系统的方差由2017年的0.91增加至2018年的0.99。2018年中下游水资源子系统承载力指数较2017年分别下降了0.65%和1.48%,而上游则提升了0.36%,表明中下游水资源子系统的滞后现象进一步加剧。11个省(直辖市)的水环境承载力指数的方差呈现略有波动、总体递减的基本态势[图2(b)],由2009年的0.78降至

2018年的0.58,降幅为25.64%。其中,经济社会子系统的省(直辖市)间差异一直较大,而生态环境子系统则较为均衡,且逐年变优,反映了长江经济带各省(直辖市)参差不齐的经济社会发展水平和日益凸显的长江流域协同治理的生态环境效益。水资源子系统承载力的省(直辖市)间差异同样较大,尤其是2014年之后,没有出现明显的好转迹象。不难发现,无论是区域尺度还是省(直辖市)尺度,长江经济带水环境承载力的空间差异均在逐步缩小,但在3个子系统上存在显著差异,因此有必要从子系统的角度对上中下游的水环境承载力情况进行剖析。

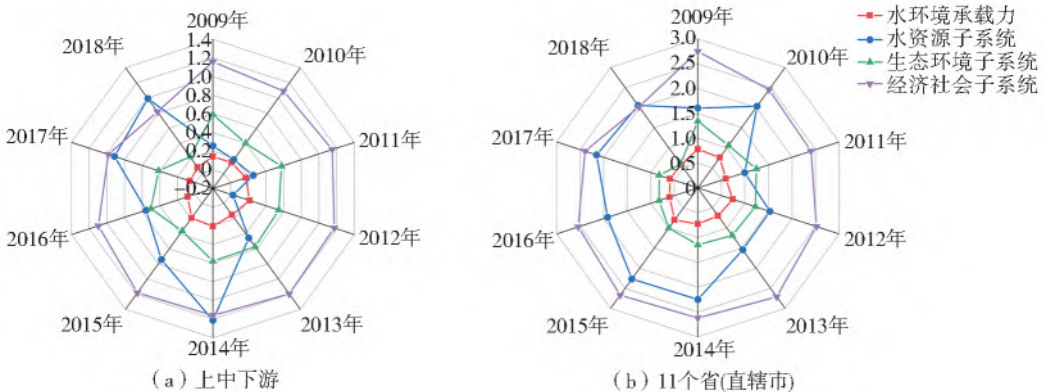


图2 2009—2018年长江经济带水环境承载力的方差演变

Fig. 2 Variance evolution of WECC grade from 2009 to 2018 in Yangtze River Economic Belt

2.2 上中下游及子系统分析

2009—2018 年,长江经济带的水环境承载力经过临界超载、蓄力沉淀和稳步提升 3 个阶段,得到一定的提升,向更好的方向发展,但也应注意到,这种好转并不显著,仍存在着较大的提升空间。长江经济带横跨我国西中东部,自然禀赋和经济社会发展的省际差异显著,而水资源、生态环境和经济社会 3 个子系统相互制约、相互促进,以一种复杂的结构关系影响着水环境承载力。因此,探讨上中下游的水环境承载力状况,从子系统的角度分析各区域的优势与短板,有助于精准施策,促进高质量发展。

由图 3 可知,长江经济带水环境承载力整体上逐年变优,呈现下游优于上游、上游优于中游的分布

特征。云南、贵州、四川和重庆的人均水资源量在长江经济带乃至全国都处于一个相对领先的水平,因此上游区域始终占据一定的优势,2014 年以后更为明显;相反,中下游的水资源子系统则较为滞后,且二者的相对劣势交替出现。上海和江苏水资源子系统一直处于较差的状态,这与其人均水资源量较少有着密切的联系。上海人口一直处于高度密集状态,江苏水资源总量常年偏少,在长江经济带各省(直辖市)中始终处于相对落后的位置。需要指出的是,浙江人均水资源量相对较高,以 2018 年为例,分别是江苏和上海的 3.23 倍和 9.51 倍,水资源系统常年保持在较高的水平。沿海江浙沪地区的水资源失衡问题亟待缓解。湖南、湖北、江西和安徽等地水资源系统中规中矩,且年际变化较小。

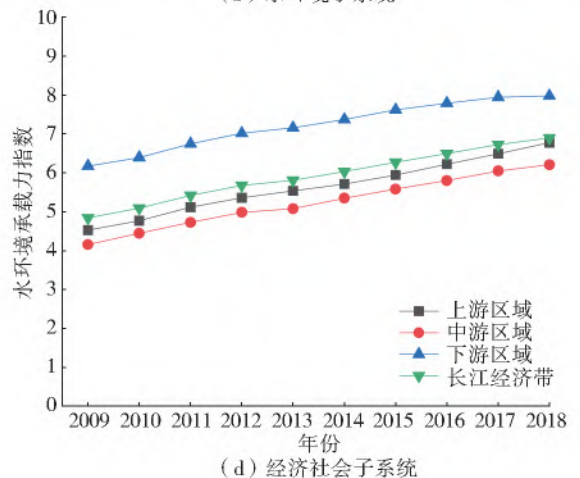
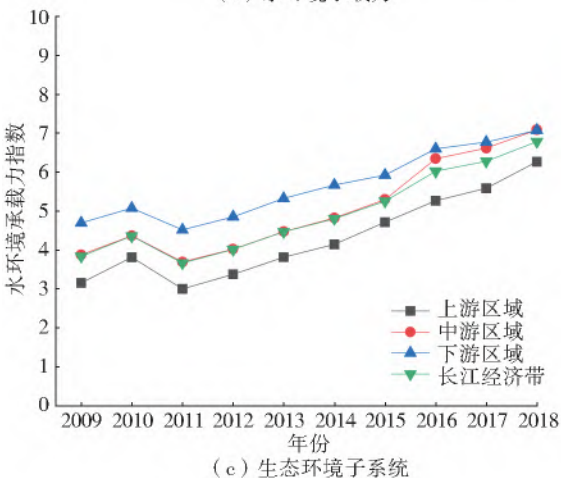
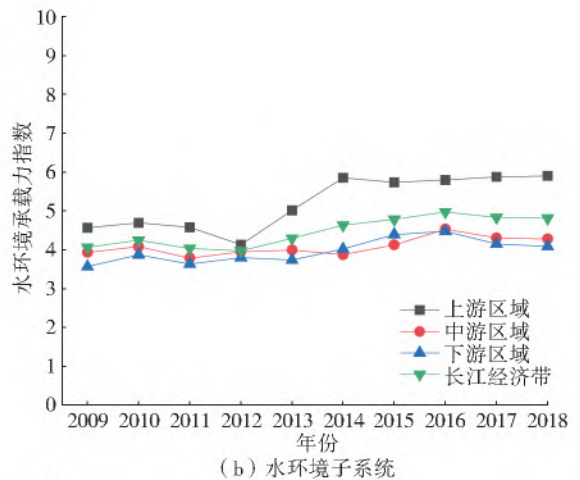
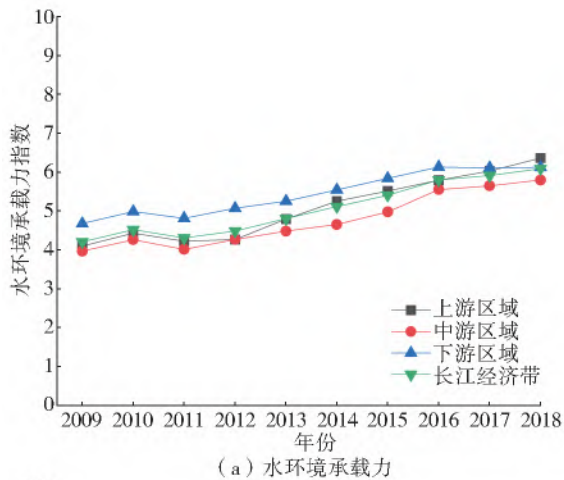


图 3 2009—2018 年长江经济带水环境承载力的上中下游区域对比

Fig. 3 Comparison between upper, middle and lower reaches of WECC of Yangtze River Economic Belt from 2009 to 2018

长江生态带的生态环境子系统十年来保持着稳定的增长态势,上中下游的承载水平依次递增。下游地区等级相对较高,这些地区在长江流域甚至全国水资源管理方面都处于领先地位,具体表现为污水处理率高、万元 GDP 化学需氧量排放量和万元 GDP 氨氮排放量低。《2017 年全国非常规水资源

利用分析报告》显示,江苏的中水回用率处于全国领先水平。上海的湿地面积占陆域面积高达一半以上,极大地提升了生态环境承载能力;江浙沪地区的经济社会发展水平处于长江经济带,乃至全国的领先地位,城市系统功能相对完善,主要污染物排放比例较低,且污水处理率较高,充分体现了人类活动对

水环境的重要影响。因此,发挥人类的主观应对和调控能力,积极提升城市系统和水资源系统的韧性,对于提升水环境承载力具有决定性的作用。中游区域在 2015 年以前与长江经济带平均水平高度一致,2016 年以后逐渐向下游区域靠拢。上游区域的生态环境子系统等级相对较低,这主要归因于其湿地面积占国土面积比重过低。湿地作为生态环境系统评价的重要指标,对生态环境的可持续发展有着重要的意义。

经济社会子系统方面:下游区域显著占优,这与江浙沪地区的经济发展水平与产业结构布局密不可分,可见经济社会发展可为提升水环境承载能力提供重要的基础支撑,但同时要关注经济社会高速发展可能带来的水环境恶化风险;中游区域经济社会

子系统承载能力相对较低,分析其主要制约因素可以发现:江西用水效率较低,2009—2018 年的万元 GDP 用水量均超过 100 m³,平均值为 184.35 m³/万元,湖北和湖南节水灌溉面积占有效灌溉面积比例较低,十年平均分别为 15.16% 和 11.71%;上游区域中,重庆和四川处于较高级别,而云南和贵州则相对落后,这主要归因于云贵地区相对较低的人均 GDP 和相对较高的万元 GDP 用水量,上游区域经济发展和用水效率的不均衡是当前需要重点关注的问题之一。

综上,2009—2018 年长江经济带水环境承载力呈现良好的发展态势,为该区域的高质量发展提供了必要的保障,但上中下游各子系统之间存在显著差异,见图 4。

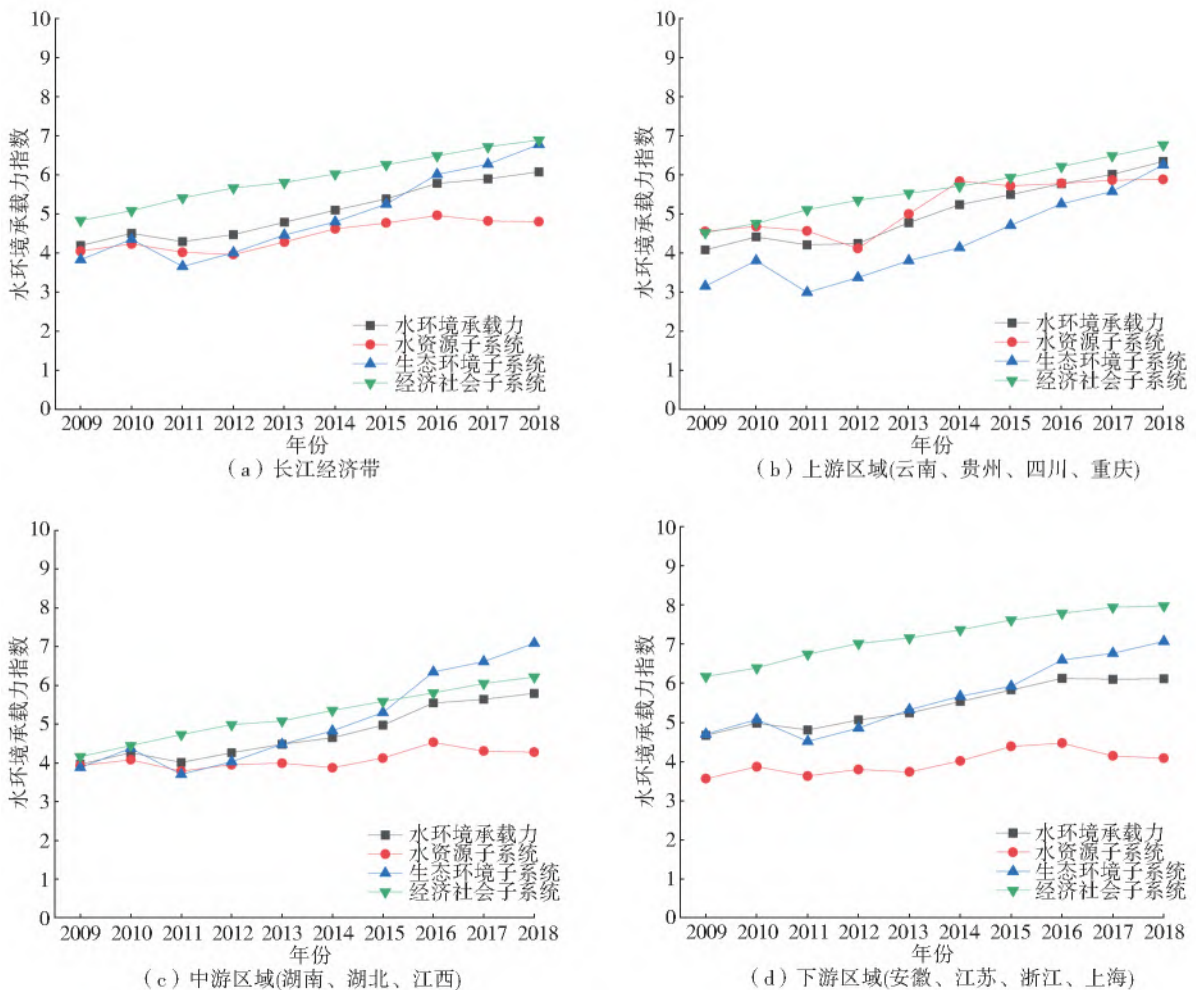


图 4 2009—2018 年长江经济带上中下游区域的水环境承载力子系统对比

Fig. 4 Comparison of WECC subsystems in the upper, middle and lower reaches of Yangtze River Economic Belt from 2009 to 2018

图 4 显示,长江经济带整体的经济社会子系统发展水平较高,生态环境子系统逐年变优,尤其是 2015 年以来发展迅猛,而水资源子系统则存在严重的滞后现象,2016 年以来出现明显下滑。上游区域经济社会子系统远优于生态环境子系统,但近年来

二者的协调和均衡程度越来越高。中游区域近年来生态环境子系统具有明显优势,而相反水资源子系统则严重滞后,且有进一步恶化的趋势。下游区域的经济社会子系统常年保持绝对领先的优优势,而水资源子系统则一直面临着巨大的压力和负载,供需

矛盾突出。

2.3 调控方向挖掘

根据以上分析发现,2009—2018 年长江经济带中下游区域的水环境承载力均有一定的提升,但

具有明显的区域分异特征,且部分省区存在子系统发展的不均衡问题。为发现现状问题,进而挖掘各省市水环境承载力的调控方向,以 2018 年为基础年进行短板分析,见图 5。

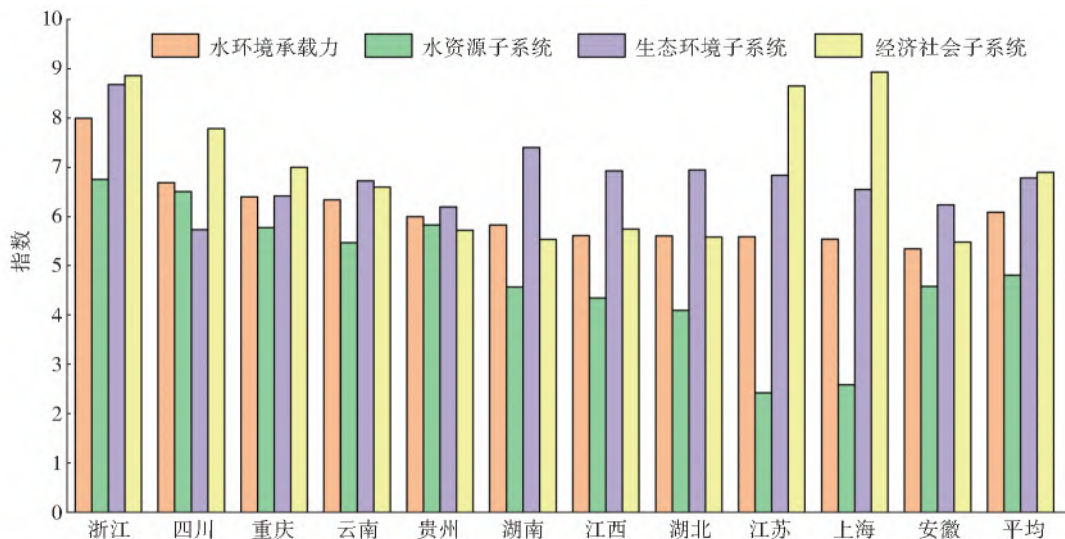


图 5 2018 年长江经济带 11 个省(直辖市)的 WECC 子系统分析

Fig. 5 WECC subsystem analysis of 11 provincial administrative regions of Yangtze River Economic Belt in 2018

图 5 显示,2018 年,长江经济带水环境承载力按省(直辖市)排序由高到低依次为浙江、四川、重庆、云南、贵州、湖南、江西、湖北、江苏、上海和安徽,除浙江外,表现为上游优于中游、中游优于下游,具有明显的空间分异特征。上游的四川、重庆、云南和贵州的 3 个子系统发展较为均衡,基本上处在较强的 2 级水平,相对较弱的是水资源子系统。四川和云南大力发展第三产业旅游经济,为水环境承载力的提升提供了坚实的保障。重庆作为我国西南地区唯一的直辖市,受地形地貌的影响,过境水多但利用量少,生态环境保护力度相对较低,这些因素间接限制了重庆市水环境承载力的提升。中游区域的生态环境子系统较为均衡,略低于长江经济带平均水平,相对较弱的也是水资源系统。湖北水资源和生态环境子系统承载力处于较高的水平,在国家区域中心城市的带动下,近年来县域经济发展较快,且占全省 GDP 比值越来越大,推动了其水环境承载力的提升。下游区域江浙沪地区的经济社会子系统占据绝对优势,而安徽则相对落后。上海和江苏的水资源系统极为滞后,是制约水环境承载力提升的关键因素。安徽省虽地处长三角地区,近十年间生态环境保护力度和经济社会发展不协调限制了水环境承载力的提升,3 个子系统的状态与中游区域的情况类似,中规中矩,优势不足。需要指出的是,浙江的 3 个子系统齐头并进,均处于领先水平,水资源子系统

和生态环境子系统排名第一,而经济社会子系统仅次于上海,排在第二位,使得浙江省打破空间分布规律,在长江经济带水环境承载力排名中占据第一。

综上,长江经济带的水环境承载力虽具有明显的空间分布规律,但总体上呈现经济社会子系统绝对占优、生态环境子系统一般、水资源子系统相对滞后的特征。可见,无论从水环境承载力的自然条件,还是人为调控来看,水资源子系统始终是需要重点关注的主要矛盾点之一,这涉及水资源的集约节约和安全利用。因此,关键是要做好水资源消耗总量和强度双控,同时保障水质和用水安全。大力发展水资源利用与节水技术,充分发挥上游地区自然资源优势,提高中下游地区的用水效率,优化产业结构,缓解供水用水矛盾是长江经济带水环境承载力进一步提升的主要方向与途径。

3 结 论

以自然本底和人类活动的双重影响为主要视角,从水资源、生态环境和经济社会子系统 3 个方面探索构建了一种新的水环境承载力评价指标体系,进而考虑等级之间的模糊对立统一关系,基于可变模糊集方法构建并计算了水环境承载力指数,开展了长江经济带 11 个省级行政区水环境承载力的时空变化特征及其制约因素分析研究,得到的主要结论有:2009—2018 年,长江经济带水环境承载力逐

年变好,但仍存在较大的提升空间;分区域来看,2009—2017年由强到弱依次为下游、上游和中游;2018年上游略超下游,中游仍居其次;长江经济带11个省级行政区的水环境承载力具有明显的空间分布规律,2018年除浙江外表现为上游优于中游、中游优于下游,按省(直辖市)排序由强到弱依次为浙江、四川、重庆、云南、贵州、湖南、江西、湖北、江苏、上海和安徽;水资源子系统对当前长江经济带水环境承载力提升的制约作用较为显著。长江经济带在后期研究中将考虑水灾害指标对水环境承载力的影响,进一步厘清水环境承载力的内涵,对相关指标及数据进行补充与更新,以得到更加准确全面的评价结果。

参考文献(References):

- [1] 张彦,李明然,李新德. GA-NN模型在保定市水环境承载力评价中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(5): 131-138. (ZHANG Y, LI M R, LI X D. Application of GA-NN model for evaluation of water environment carrying capacity in Baoding City[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(5): 131-138. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0119.
- [2] 杨钧婷,陈秋波,彭黎旭. 基于联合层次分析法和“模加和”法的海南水环境承载力评价[J]. 南水北调与水利科技, 2013, 11(3): 47-51. (YANG J T, CHEN Q B, PENG L X. Assessment of water environmental carrying capacity of Hainan Province using the combined method of analytic hierarchy process and 'mode and sum'[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2013, 11(3): 47-51. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2013.03047.
- [3] 刘圣,娄华君,贾绍凤,等. 内蒙古准格尔旗地下水环境承载力评价[J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(1): 45-50. (LIU S, LOU H J, JIA S F, et al. Assessment of groundwater environment carrying capacity in Zhungeer County of Inner Mongolia [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(1): 45-50. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2015.01.011.
- [4] 曾浩,申俊,江婧. 长江经济带资源环境承载力评价及时空格局演变研究[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(3): 89-96. (ZENG H, SHEN J, JIANG J. Evaluation of resource and environment carrying capacity and its spatiotemporal pattern in Yangtze River Economic Belt [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(3): 89-96. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2019.0063.
- [5] 汪嘉杨,翟庆伟,郭倩,等. 太湖流域水环境承载力评价研究[J]. 中国环境科学, 2017, 37(5): 1979-1987. (WANG J Y, ZHAI Q W, GUO Q, et al. Study on water environmental carrying capacity evaluation in Taihu Lake basin [J]. China Environmental Science, 2017, 37(5): 1979-1987. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN: ZGHJ.0.2017-05-047.
- [6] 曹若馨,张可欣,曾维华,等. 基于BP神经网络的水环境承载力预警研究:以北运河为例[J]. 环境科学学报, 2021, 41(5): 2005-2017. (CAO R X, ZHANG K X, ZENG W H, et al. Research on the early-warning method of water environment carrying capacity based on BP neural network: A case study of Beiyunhe River basin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(5): 2005-2017. (in Chinese)) DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2021.0077.
- [7] 杨延梅,向维,苏靖,等. 基于BP神经网络的白洋淀水环境承载力研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(7): 61-66. (YANG Y M, XIANG W, SU J, et al. Research on the water environmental carrying capacity of Baiyangdian watershed based on BP neural networks [J]. China Rural Water and Hydropower, 2021(7): 61-66. (in Chinese)) DOI: 1007-2284(2021)07-0061-06.
- [8] 门宝辉,丽娜·托库. 基于云理论的北京市水环境承载力综合评价[J]. 水力发电, 2019, 45(11): 4-8. (MEN B H, LINA T K. Comprehensive evaluation of Beijing water environment carrying capacity based on cloud theory [J]. Water Power, 2019, 45(11): 4-8. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2019.11.002.
- [9] 程扬,姚建. 基于改进集对分析模型的四川省水环境承载力评价[J]. 人民长江, 2021, 52(5): 24-29. (CHENG Y, YAO J. Assessment of regional water environment carrying capacity assessment in Sichuan Province based on improved set pair analysis model [J]. Yangtze River, 2021, 52(5): 24-29. (in Chinese)) DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2021.05.005.
- [10] 杨婷. 基于集对分析的流域水环境承载力评价研究[D]. 郑州:华北水利水电大学, 2019. (YANG T. The assessment of watershed water environmental carrying capacity based on set pair analysis [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2019. (in Chinese)).
- [11] 赵传起,朱悦,王留锁,等. 基于系统动力学和向量模法的亮子河流域水环境承载力评价[J]. 环境保护科学, 2021, 47(1): 136-142. (ZHAO C Q, ZHU Y, WANG L S, et al. Evaluation of water environment carrying capacity of Liangzihe River basin based on system dynamics and vector norm method [J]. Environmental Protection Science, 2021, 47(1): 136-142.

- (in Chinese)) DOI: 10. 16803/j. cnki. issn. 1004-6216. 2021. 01. 021.
- [12] 屈豪. 基于物元可拓模型的流域水环境承载力研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2017. (QU H. Study on water environment carrying capacity of watershed based on matter-element extension model[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2017. (in Chinese)).
- [13] 王富强, 李鑫, 赵衡, 等. 基于水环境容量和综合指标体系的区域水环境承载力评价[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2021, 42(2): 24-31. (WANG F Q, LI X, ZHAO H, et al. Evaluation of regional water environment carrying capacity based on water environment capacity and comprehensive index system [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition), 2021, 42(2): 24-31. (in Chinese)) DOI: 10. 19760/j. ncwu. zk. 2021018.
- [14] 陈守煜. 工程模糊集理论与应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998. (CHEN S Y. Theory and application in engineering fuzzy set[M]. Beijing: National Defense of Industry Press, 1998. (in Chinese)).
- [15] 曹永强, 朱明明, 张亮亮, 等. 基于可变模糊评价法的大连市水资源承载力分析[J]. 水利水运工程学报, 2016(4): 40-46. (CAO Y Q, ZHU M M, ZHANG L L, et al. Analysis of carrying capacity of water resources in Dalian based on variable fuzzy assessment method[J]. Hydro-Science and Engineering, 2016(4): 40-46. (in Chinese)) DOI: 10. 16198/j. cnki. 1009-640X. 2016. 04. 006.
- [16] 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 S Y. 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)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 2012. 09. 008.
- [17] 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 S Y. Variable sets—the development of variable fuzzy sets and the applications in assessment of water resource [J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42(1): 92-101. (in Chinese)) DOI: 10. 3969/j. issn. 1000-0984. 2012. 01. 013.
- [18] 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 Y F, WANG H R, GONG S X, 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)) DOI: 10. 13243/j. cnki. slxb. 20200455.
- [19] 魏子茹, 卢延辉, 王鹏宇, 等. 基于 CRITIC 法的灰色关联理论在无人驾驶车辆测试评价中的应用[J]. 机械工程学报, 2021, 57(12): 99-108. (WEI Z R, LU Y H, WANG P Y, et al. Application of grey correlation theory based on CRITIC method in autonomous vehicles test and evaluation[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(12): 99-108. (in Chinese)) DOI: 10. 3901/JME. 2021. 12. 099.
- [20] 杨海燕, 付凯, 孙晓博, 等. 基于 CRITIC-GR-TOPSIS 法的烟台市水资源承载力综合评价[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2): 215-221. (YANG H Y, FU K, SUN X B, et al. Comprehensive evaluation and obstacle factor diagnosis of water resources carrying capacity in Yantai City based on CRITIC-GR-TOPSIS method [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2): 215-221. (in Chinese)) DOI: 10. 13961/j. cnki. stbctb. 2021. 02. 029.

Spatial-temporal variation of water environment carrying capacity in the Yangtze River Economic Belt

YANG Yafeng^{1,2}, YAN Jiawei¹, WANG Hongrui¹, ZHOU Lichao³, YANG Rongxue¹

(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2. College of Sciences, North China University of Science and Technology, Tangshan 063210, China;

3. Linyi Natural Resources and Planning Bureau, Linyi 276001, China)

Abstract: Yangtze River Economic Belt (YEB) is one of the important strategic development regions in China which has created more than 2/5 of China's GDP, but it faces the conflicts between economic development and water environment protection. With the rapid development of economic-society, human activities have more and more impacts on the water environment, therefore it is of great significance to study the water environment carrying capacity (WECC) of this area, in which the spatial-temporal variation of WECC are an important content.

In most previous related studies, some method are usually used to determine the grade of WECC. In fact, WECC is a fuzzy concept, and the boundary between two adjacent grades is not clear. Therefore, it is necessary to consider the law of unity of opposites between adjacent grades in the evaluation of WECC. Variable set method is an important uncertainty mathematical theo-

ry in the field of water resources system analysis. The variable set method is used to calculate the relative membership degree, and the index based on grade eigenvalue is used to characterize the state of WECC. Focusing on the dual effects of natural background and human activities, the evaluation index system of WECC is constructed from the three subsystems of water resources, ecological environment and economy and society, and a water environment carrying capacity index (WECCI) model is established based on variable set method, and the temporal and spatial variation characteristics of WECC in YEB are discussed.

The results show that the WECCI of YEB increased from 4.20 to 6.08, showing a basic trend of increasing year by year; The WECCI in the upper, middle and lower reaches is becoming more and more balanced, the variance decreased by 57.27% from 0.14 to 0.06, but increased slightly in 2018; The constraints have spatial differentiation characteristics; The ecological environment subsystem of upper reaches is relatively weak, but the gap is narrowing year by year; The restriction of water resources subsystem in the middle reaches is becoming more and more prominent; The economic-society subsystem of lower reaches maintains significant advantages all year round, while the water resources subsystem lags behind seriously; In 2018, except Zhejiang, the WECC showed that the upper reaches were better than the middle reaches, and the middle reaches were better than the lower reaches. According to the provinces (manicipalities), Zhejiang, Sichuan, Chongqing, Yunnan, Guizhou, Hunan, Jiangxi, Hubei, Jiangsu, Shanghai and Anhui were ranked from high to low.

The WECC of YEB has improved year by year from 2009 to 2018, and has an obvious spatial distribution law; The water resources subsystem has a significant restrictive effect on the improvement of WECC of the current YEB and become one of the main contradictions that need to be paid attention to in the process of improving the WECC of YEB. Analyzing the temporal-spatial variation and main interference factors of WECC of YEB and its region can provide reference for the formulation of sustainable and high-quality development policies of YEB.

Key words: water environment carrying capacity; spatial-temporal variation; variable set method; CRITIC method; Yangtze River Economic Belt

(上接第 649 页)

evaporation estimates from the Penman model were validated at the site and whole-reservoir scales. At the two scales, pan evaporation observations were used as benchmark data. The contribution of different meteorological variables (temperature, net radiation, relative humidity, and wind speed) to the trend in annual evaporation was quantified based on a detrending experiment. The difference in the annual evaporation trend calculated by the original and detrended specific meteorological variables can be attributed to the effect of the change in this meteorological variable. The results showed that temperature, net radiation, and wind speed in the reservoir showed a significant ($p < 0.05$) upward trend during the study period, while the relative humidity showed an insignificant ($p > 0.05$) downward trend. Changes in these meteorological variables are all conducive to the increase of water evaporation. The remote sensing reservoir area also showed a significant ($p < 0.05$) increasing trend, and the increasing trend was more pronounced after 2015 due to the heightening of the dam. Also, the intra-annual fluctuation of the reservoir surface area during the period 2015-2020 is remarkably smaller than that during the period 2000-2014 because of the implementation of the water transfer project. The evaporation validation results confirmed that the Penman model can be used as a reliable tool to simulate water evaporation loss of the reservoir. It can well reproduce the temporal variability of the reference evaporation at both the site and whole reservoir scales. Annual evaporative loss of the reservoir simulated by the Penman model showed a significant ($p < 0.05$) increasing trend from 2000 to 2020, with a trend value of $3.4 \times 10^{-3} \text{ km}^3/\text{a}$. The mean annual evaporation loss of the reservoir was $0.26 \text{ km}^3/\text{a}$, accounting for 2.7% of the planned annual water transfer (9.5 km^3). However, actual annual water transfer was far lower than the planned annual water transfer (it was $6.3 \text{ km}^3/\text{a}$ during the first seven years of operation of the water transfer project). Annual evaporation loss during this period accounts for 4.8% of the actual water transfer. In the future, the amount of evaporation loss from the reservoir is likely to further increase with climate warming. Among the four meteorological variables, the net radiation change contributed the most to the trend of the reservoir's annual evaporation (72.0%), followed by the changes in temperature (23.6%), relative humidity (2.7%), and wind speed (1.7%). The findings of this study can provide references for the water resources management and planning of the middle route of the South-to-North Water Transfer Project.

Key words: open-water evaporation; water resource; Danjiangkou; South-to-North Water Transfer Project; attribution