

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2017.06.21

三峡水库运行下荆南三口地区水环境承载力研究

张需琴^{1,2}, 李景保¹, 李忠武²

(1. 湖南师范大学资源与环境科学学院, 湖南 长沙 410081; 2. 湖南大学环境科学与工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要:结合层次分析法和“模加和”法,分析了荆南三口地区在三峡水库运行前后的水环境承载力变化情况。结果表明:①三峡水库运行前,荆南三口地区的水环境承载力取值在0.24~0.36之间,属弱可承载等级,承载状态极为脆弱。空间上,华容的承载水平最高,在0.30以上;南县最低,小于0.29。②三峡水库运行后,华容、安乡、南县的水环境承载力值分别由2003年的0.32、0.38、0.27增至2014年的0.42、0.40、0.40。2007年前,安乡的水环境承载力高于华容和南县,地区间差异较大。2007年以后华容的承载水平略具优势,随着南县承载水平的提高,各分区间的差距缩小。③与三峡水库运行前的水环境承载力相比,荆南三口地区三县的承载水平均有所提升:华容县由0.32增至0.42,安乡由0.24增至0.40,南县由0.26增至0.40,但并无大的改善,水环境仍处于脆弱状态。④三峡水库运行下,荆南三口水沙量大幅下降,成为限制三口地区水环境承载力提升的关键要素。

关键词:水环境承载力;承载度;层次分析法;“模加和”法;三峡水库;荆南三口地区

中图分类号:X24

文献标志码:A

文章编号:1004-6933(2017)06-0133-09

Research on water environment carrying capacity of Three Diversions of Jingjiang River under operation of Three Gorges Reservoir

ZHANG Xuqin^{1,2}, LI Jingbao¹, LI Zhongwu²

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081, China;

2. College of Environmental Science and Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Combining the method of Analytic Hierarchy Process with “mode and sum”, this study analyzed the change of the water environment carrying capacity (WECC) of the Three Diversions of the Jingjiang River after the operation of the Three Gorges Reservoir (TGR). The results show that: (1) before the operation of the TGR, the WECC of the Three Diversions of the Jingjiang River was between 0.24-0.36, which was in a weak level, and the carrying capacity was extremely fragile. In the space domain, the carrying level of Huarong was the highest, over 0.30. The lowest was in Nanxian, less than 0.29. (2) after the running of the TGR, the WECC of Huarong, Anxiang, Nanxian were increased respectively from 0.32, 0.38, 0.27 in 2003 to 0.42, 0.40, 0.40 in 2014. Before 2007, the WECC of Anxiang was higher than Huarong and Nanxian with considerable discrepancies between regions. After 2007, the carrying level of Huarong was at a slight advantage. With the increase of Nanxian's WECC, the gap between various partitions was narrowed. (3) Compared with the WECC prior to operation of the TGR, the carrying level of each partition in the Three diversions of the Jingjiang River has been enhanced. The WECC of Huarong, Anxiang, Nanxian was increased respectively from 0.32 to 0.42, 0.24 to 0.40, 0.26 to

基金项目:国家自然科学基金(41571100);湖南省重点学科地理学建设项目(41571100)

作者简介:张需琴(1993—),女,硕士研究生,研究方向为土壤侵蚀与碳循环。E-mail:zhangxq@hnu.edu.cn

通信作者:李景保,教授。E-mail:lijingbao1951@126.com

0.40), but had no big improvement, the water environment was still in a fragile state. (4) Under the operation of the TGR, the significant decline of water and sediment in the Three Diversions of the Jingjiang River has become the key factor of restricting the enhancing of the WECC in the Three Diversions of the Jingjiang River.

Key words: water environment carrying capacity; carrying degree; AHP; mode and sum

三峡水库自 2003 年 6 月蓄水运行以来,在防洪、发电等方面的贡献日益增大^[1]。但与此同时,由于高坝大库的建立,水库调节水沙,天然水文要素发生了显著的变化,位于三峡水库下游的荆南三口(松滋口、太平口、藕池口)地区也因此受到极大的影响^[2]。荆南三口作为沟通长江与洞庭湖的重要水流通道,在三峡水库运行下,其分泄长江水的能力减弱,导致该地区出现资源性、水质性、工程性等复合型缺水^[3-6]。受其影响,荆南三口地区的水环境承载力又发生了怎样的变化? 这种变化与三峡水库的运行又存在何种联系? 这是人们所关注的问题。水环境承载力状况的评价融社会、经济、环境三要素为一体,是保证地区可持续发展的关键^[7-12]。目前,国内学者就荆江三口水沙变化及江湖关系演变等方面展开了大量的研究^[13-16],但对三峡水库运行下荆南三口地区水环境承载力的研究却几乎是空白。鉴于此,笔者在梳理水环境承载力概念与内涵的基础上,选取若干不同层次的指标,构建科学的评价指标体系,并联合“模加和”法与层次分析法(analytic hierarchy process, AHP),分别计算荆南三口地区在三峡水库运行前后的水环境承载力。通过对比,分析该地区三县水环境承载力的差异,揭示三峡水库运行下荆南三口地区水环境承载力的时空分异特征及其影响机制,旨在为进一步优化三峡水库调度方案,制定三峡水库运行下水环境、水资源保护规划提供理论依据。

1 资料来源及研究方法

1.1 资料来源

荆南三口位于 111°47'E ~ 112°19'E, 29°44'N ~ 30°13'N, 该水系涉及的行政区域包括湖北石首、公安, 湖南安乡、华容及南县等多个县市^[17]。考虑到资料的可取性以及水环境承载力评价的地域意义, 选择荆南三口地区的核心地域华容、安乡、南县作为研究区域(图 1)。该区域国土总面积达 3 758 km², 是国家重要的商品粮棉油鱼猪生产基地。

本研究水环境生态承载力、水环境社会承载力、水环境经济承载力的相关基础数据来源于《湖南省水资源公报》《益阳水资源公报》《常德水资源公报》《岳阳水资源公报》《湖南省统计年鉴》、2015 年《湖南长江经济带开发建设总体规划研究报告》, 以及

2015 年《湖南省生态经济区规划报告》。

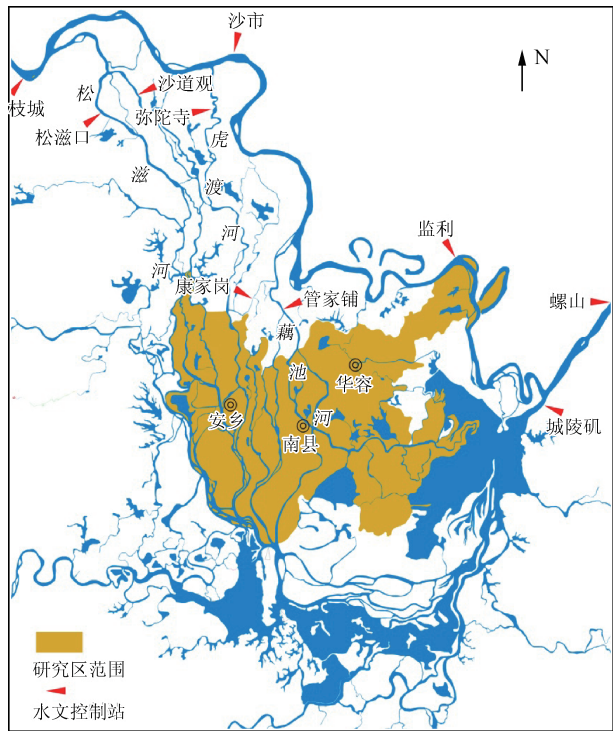


图 1 荆南三口地区水系示意图

1.2 研究方法

1.2.1 水环境承载力评价方法

本文采用 AHP 结合“模加和”法^[18-20]对荆南三口地区水环境承载力进行评估。计算公式为

$$E = \sum_{i=1}^m E_i W_i \tag{1}$$

$$|E| = \left| \sum_{i=1}^3 (\overline{W_i} \overline{E_i})^2 \right|^{\frac{1}{2}} \tag{2}$$

式中: E 为水环境分承载力; W_i 为第 i 个指标的权重; E_i 为第 i 个指标的数值; m 为指标数目; $|E|$ 为水环境总承载力; $\overline{W_i}$ 为第 i 个分承载力的权重; $\overline{E_i}$ 为第 i 个分承载力的数值。

“模加和”法是通过一定的量化分析过程建立评价指标体系, 最终计算出来的水环境承载力是一个介于 0 到 1 之间的无量纲值。该评价值反映水环境承载力的大小, 越靠近 1, 说明水环境承载力越大, 水环境与社会经济发展协调性越好; 越接近 0, 则说明区域水环境承载力越小, 水环境与社会经济发展越不和谐。对水环境承载力的取值划为 4 个判断区间(表 1)。

表 1 承载力与可承载类型对照

水环境承载力取值	承载类型	水环境状态
(0.00,0.20]	极差	崩溃
(0.20,0.50]	差	脆弱
(0.50,0.80]	一般	一般
(0.80,1.00]	好	弹性好

1.2.2 建立评价指标体系

基于水环境承载力的定义,将水环境承载力主客体统一的身份具体化。承载主体是水资源可利用量,承载客体指施加负载或被支撑的对象。这个复杂的巨系统包括水生态系统、社会系统、经济系统等,因此,从生态、社会、经济 3 个层面构建水环境承载力评价指标体系^[21]。同时在参考国家水资源评估标准指标体系的基础上,根据各项指标原始数据的可获得性,最终确定表征荆南三口地区水环境承载力的 9 项指标(图 2)。

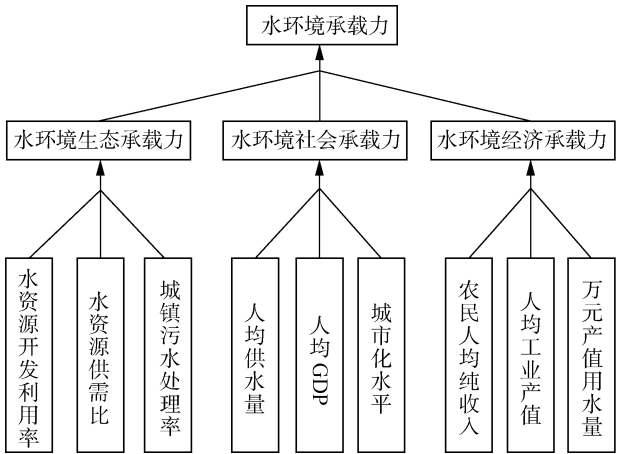


图 2 水环境承载力指标体系

1.2.3 指标权重的确定

AHP 法将繁杂问题解析成不同的构成要素,并根据要素间的相关度及从属关系进行组合分类,然后在相同层面的各要素间展开两两比较,得出权重,最终依照各要素的权重大小,确定各要素的重要程度。

根据水环境承载力的分层状态,将各要素用字

表 3 水环境承载力指标核算标准

类别	C_1 / %	C_2 / %	C_3 / %	C_4 / ($\text{m}^3 \cdot \text{人}^{-1}$)	C_5 / 美元	C_6 / %	C_7 / 元	C_8 / 美元	C_9 / ($\text{m}^3 \cdot \text{万元}^{-1}$)
最差值(0)	—	60	20	30	100	20	1950	100	—
及格值(0.6)	40	100	—	600	3 000	45	5 700	1 500	240
最优值(1)	10	—	100	—	—	—	—	—	10

表 4 水环境承载力模型

指标	承载力模型	指标	承载力模型	指标	承载力模型
C_1	$y = -0.661gx + 0.34$	C_4	$y = 0.461gx - 0.68$	C_7	$y = 1.281gx - 4.24$
C_2	$y = 2.711gx + 0.61$	C_5	$y = 0.411gx - 0.82$	C_8	$y = 0.51gx - 1.02$
C_3	$y = 1.431gx + 1.00$	C_6	$y = 1.701gx + 1.19$	C_9	$y = -0.291gx + 1.29$

母表示:水环境承载力(A)、水环境生态承载力(B_1)、水环境社会承载力(B_2)、水环境经济承载力(B_3)、水资源开发利用率(C_1)、水资源供需比(C_2)、城镇污水处理率(C_3)、人均用水量(C_4)、人均 GDP(C_5)、城市化水平(C_6)、农民人均纯收入(C_7)、人均工业产值(C_8)、万元产值用水量(C_9)。

根据各指标的相互关系,并结合荆南三口的水环境现状和专家意见,得出各层的判断矩阵,然后用层次分析法软件 yaahp 计算水环境承载力各指标的权重值(表 2),并进行一致性检验。

表 2 水环境承载力各指标的权重系数

目标层	领域层	权重	指标层	分权重	综合权重
A	B_1	0.55	C_1	0.49	0.27
			C_2	0.31	0.17
			C_3	0.20	0.11
	B_2	0.21	C_4	0.54	0.11
			C_5	0.16	0.04
			C_6	0.30	0.06
	B_3	0.24	C_7	0.21	0.05
			C_8	0.24	0.06
			C_9	0.55	0.13

1.2.4 指标承载力计算模型的确定

各指标的承载度是计算水环境承载力的基础,本文选用对数函数作为指标承载力的计算模型,该模型适用于单纯指标计算^[22-24]。模型结构如下:

$$y = a + b \lg x \tag{3}$$

式中: y, x 分别为因变量和自变量; a, b 均为模型参数。

明确各指标的核算标准,是建构承载力模型的基础。依照国际公认的部分指标值、国内颁布的《全国人民小康生活水平的基本标准》《生态城市建设标准》以及荆南三口地区社会人口和经济发展的实际情况,并结合相关专家的意见,经综合考量,最终确定各指标的核算标准(表 3)。

根据表 3 中的水环境承载力评价核算准则,最终建立各指标的承载力计算模型(表 4)。

2 评价结果与分析

2.1 评价结果

首先将 3 县的各项原始值代入对应的承载力计算模型中,分别得到华容、安乡、南县近 15 年来各指标的承载力(表 5~7)。

表 5 华容县水环境指标承载力

年份	承载力								
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉
2000	0.64	0.69	0.25	0.56	0.37	0.04	0.07	0.25	0.44
2001	0.67	0.70	0.20	0.56	0.38	0.19	0.12	0.21	0.45
2002	0.61	0.66	0.20	0.56	0.40	0.28	0.33	0.33	0.47
2003	0.60	0.65	0.20	0.56	0.43	0.30	0.22	0.32	0.49
2004	0.58	0.62	0.50	0.56	0.45	0.33	0.31	0.42	0.51
2005	0.57	0.66	0.54	0.57	0.47	0.37	0.36	0.49	0.53
2006	0.54	0.63	0.43	0.57	0.5	0.43	0.42	0.56	0.55
2007	0.54	0.62	0.72	0.57	0.54	0.47	0.51	0.65	0.56
2008	0.57	0.60	0.76	0.57	0.58	0.48	0.58	0.75	0.58
2009	0.60	0.56	0.76	0.56	0.61	0.53	0.64	0.53	0.60
2010	0.60	0.60	0.82	0.56	0.64	0.45	0.72	0.61	0.63
2011	0.54	0.61	0.91	0.58	0.67	0.48	0.81	0.67	0.64
2012	0.59	0.60	0.93	0.57	0.68	0.51	0.90	0.68	0.66
2013	0.57	0.58	0.93	0.58	0.70	0.53	0.93	0.71	0.67
2014	0.56	0.60	0.94	0.58	0.72	0.56	0.96	0.72	0.69

表 6 安乡县水环境指标承载力

年份	承载力								
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉
2000	0.63	0.81	-0.60	0.57	0.33	0.11	-0.03	0.16	0.40
2001	0.60	0.69	0.53	0.57	0.34	0.28	0.02	0.10	0.41
2002	0.61	0.71	-0.64	0.58	0.36	0.30	0.08	0.19	0.43
2003	0.58	0.66	0.79	0.58	0.41	0.32	0.13	0.23	0.45
2004	0.59	0.61	0.58	0.60	0.41	0.36	0.19	0.25	0.47
2005	0.50	0.93	0.57	0.57	0.45	0.39	0.24	0.28	0.49
2006	0.47	0.67	0.70	0.59	0.50	0.50	0.29	0.32	0.51
2007	0.54	0.60	0.71	0.59	0.53	0.42	0.36	0.37	0.52
2008	0.53	0.59	0.75	0.58	0.55	0.42	0.38	0.44	0.59
2009	0.54	0.53	0.73	0.58	0.58	0.42	0.45	0.32	0.60
2010	0.54	0.60	0.82	0.60	0.61	0.33	0.52	0.43	0.63
2011	0.53	0.62	0.92	0.60	0.63	0.36	0.63	0.49	0.65
2012	0.55	0.59	0.84	0.60	0.64	0.40	0.73	0.45	0.66
2013	0.52	0.63	0.94	0.61	0.64	0.44	0.81	0.44	0.67
2014	0.54	0.60	0.90	0.61	0.65	0.45	0.87	0.47	0.69

表 7 南县水环境指标承载力

年份	承载力								
	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈	C ₉
2000	0.62	0.6	-0.16	0.47	0.29	0.01	-0.03	0.06	0.38
2001	0.57	0.58	0.04	0.46	0.30	0.10	0.01	0.10	0.40
2002	0.57	0.60	0.09	0.48	0.31	0.14	0.03	0.14	0.42
2003	0.54	0.60	-0.03	0.49	0.35	0.15	0.09	0.14	0.43
2004	0.52	0.58	-0.03	0.50	0.40	0.15	0.16	0.18	0.45
2005	0.53	0.60	0.65	0.50	0.41	0.16	0.20	0.25	0.47
2006	0.48	0.53	0.73	0.51	0.42	0.26	0.27	0.31	0.49
2007	0.53	0.60	0.57	0.52	0.46	0.36	0.35	0.39	0.51
2008	0.54	0.59	0.71	0.52	0.49	0.41	0.44	0.46	0.54
2009	0.51	0.54	0.77	0.51	0.52	0.45	0.50	0.29	0.56
2010	0.55	0.58	0.92	0.53	0.55	0.44	0.58	0.30	0.58
2011	0.49	0.53	0.91	0.56	0.60	0.46	0.70	0.47	0.59
2012	0.52	0.59	0.91	0.55	0.62	0.47	0.78	0.50	0.62
2013	0.54	0.59	0.88	0.55	0.64	0.48	0.86	0.52	0.63
2014	0.54	0.58	0.94	0.55	0.66	0.52	0.91	0.54	0.64

其次是将各指标的权重及对应的承载力代入式(1),即可得到荆南三口地区华容、安乡、南县 3 县的分承载力评价结果(表 8~10)。

表 8 荆南三口水环境生态承载力

年份	生态承载力		
	华容	安乡	南县
2000	0.58	0.44	0.46
2001	0.59	0.61	0.47
2002	0.54	0.39	0.48
2003	0.53	0.65	0.44
2004	0.58	0.59	0.43
2005	0.59	0.65	0.58
2006	0.55	0.58	0.54
2007	0.60	0.59	0.56
2008	0.62	0.59	0.59
2009	0.62	0.57	0.57
2010	0.64	0.61	0.63
2011	0.63	0.64	0.59
2012	0.66	0.62	0.62
2013	0.64	0.64	0.62
2014	0.65	0.63	0.63

表 9 荆南三口水环境社会承载力

年份	社会承载力		
	华容	安乡	南县
2000	0.37	0.39	0.30
2001	0.42	0.45	0.33
2002	0.45	0.46	0.35
2003	0.46	0.47	0.36
2004	0.47	0.50	0.38
2005	0.49	0.50	0.38
2006	0.52	0.55	0.42
2007	0.53	0.53	0.46
2008	0.54	0.53	0.48
2009	0.56	0.53	0.49
2010	0.54	0.52	0.51
2011	0.56	0.53	0.54
2012	0.57	0.55	0.54
2013	0.58	0.56	0.54
2014	0.60	0.57	0.56

表 10 荆南三口水环境经济承载力

年份	经济承载力		
	华容	安乡	南县
2000	0.32	0.25	0.22
2001	0.32	0.25	0.25
2002	0.41	0.30	0.27
2003	0.40	0.33	0.29
2004	0.45	0.36	0.32
2005	0.48	0.39	0.36
2006	0.52	0.42	0.40
2007	0.57	0.45	0.45
2008	0.62	0.51	0.50
2009	0.59	0.50	0.48
2010	0.64	0.56	0.51
2011	0.68	0.61	0.58
2012	0.71	0.62	0.62
2013	0.73	0.64	0.65
2014	0.75	0.67	0.67

最后运用“模加和”法计算水环境综合承载力,

将各分承载力的权重(表 2)和 3 县历年的分承载力值代入式(2),即可得 15 年来华容、南县、安乡 3 县的水环境综合承载力值(表 11)。

表 11 荆南三口地区水环境承载力综合值

年份	综合承载力		
	华容	安乡	南县
2000	0.33	0.26	0.26
2001	0.34	0.35	0.27
2002	0.33	0.25	0.28
2003	0.32	0.38	0.27
2004	0.35	0.35	0.26
2005	0.36	0.38	0.34
2006	0.34	0.35	0.33
2007	0.37	0.36	0.34
2008	0.39	0.36	0.36
2009	0.39	0.36	0.35
2010	0.40	0.38	0.38
2011	0.40	0.39	0.37
2012	0.42	0.39	0.39
2013	0.41	0.40	0.39
2014	0.42	0.40	0.40

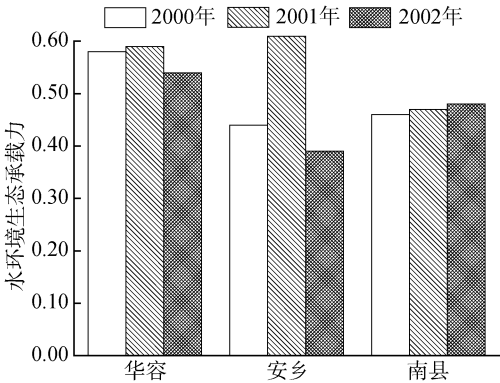
2.2 评价结果分析

2.2.1 三峡水库运行前三口地区水环境承载力的时空分异特征

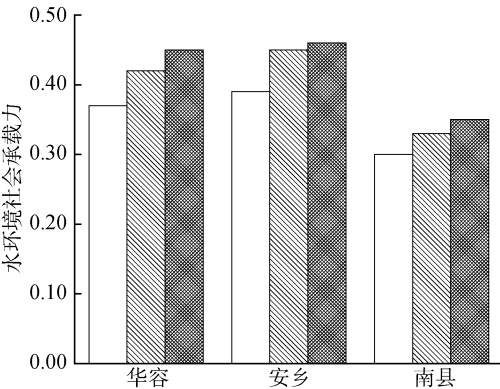
2003 年前荆南三口地区水环境承载力取值在 0.24~0.36 之间(图 3(d)),处于弱可承载等级,水环境状态极为脆弱。在空间上,华容县的水环境承载水平处在 0.30 以上,优于安乡和南县。相比之下,南县的水环境承载力最低,一直处于 0.30 以下,虽有逐年递增的趋势,但幅度不大。

就各分承载力而言,三县中水环境生态承载力值波动最为显著的是安乡,2001 年该县的生态承载力达 0.62 (图 3(a));三县的水环境社会承载力均呈逐年上升的趋势(图 3(b)),2000 年华容、安乡、南县均处于 0.40 以下,到 2002 年,只有南县的承载力值仍未及 0.40。同一水平年,华容县的水环境社会承载力虽一直处于相对较高的地位,但始终未超过 0.50;2000—2002 年,荆南三口地区水环境经济承载力最低值接近 0.20,而最大值也仅为 0.40,各县的承载状况差异不大,均在极度脆弱的边缘(图 3(c))。

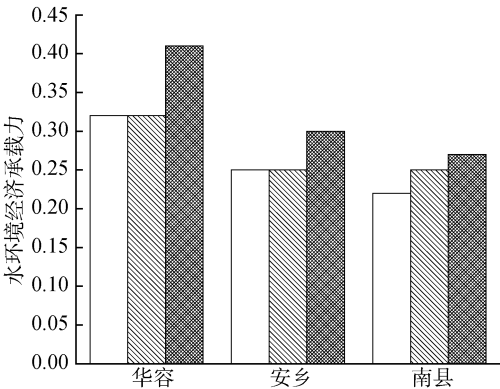
就各单项指标的原始值来看,2003 年前华容、安乡、南县的水资源开发利用率在 40% 附近,低于 50%,而该项指标是负向指标,值越小越好,由此说明该时段本地区水资源开发潜力仍处于较高水平。同时段各县水资源的供给量一般都大于需求量,2001 年南县由于干旱,导致水资源供给量略小于需求量。各县污水处理率极低,华容、南县的平均污水处理率均在 25% 以下,安乡 2000 年和 2002 年对污



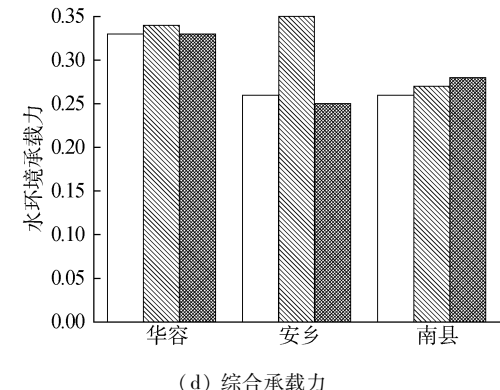
(a) 生态承载力



(b) 社会承载力



(c) 经济承载力



(d) 综合承载力

图 3 2000—2002 年三口地区水环境承载力

水的处理率仅为 7.5%,这对该县水环境质量有极大的负面影响。人均供水量、人均 GDP 及城市化水平平均处于初级阶段,农民人均纯收入、人均工业产值

相对较低。该地区产业以发展农业为主以及工业生产水平极低的现实状况导致各县万元产值用水量都偏高,尤以南县最为显著。

2.2.2 三峡水库运行后三口地区水环境承载力的时空分异特征

三峡水库运行后荆南三口地区水环境综合承载力虽略有波动,但整体上呈现小幅度上升趋势(图4(d)),华容、安乡、南县的水环境承载力值分别由2003年0.32、0.38、0.27增至2014年的0.42、0.40、0.40。其中南县水环境承载力水平提高较为明显。2007年以前,安乡、华容、南县的水环境承载力差异较大;而之后,华容的承载力水平逐步上升至3县中的最高水平,三者的承载力差异也慢慢减小。

从空间上分析,2003—2007年,安乡水环境生态承载力水平一直高于华容和南县,3县的相对差值为0.20,在2007年以后,华容县水环境生态承载力上升至最高水平,南县虽仍处于末位,但3县的生态承载水平均在0.45~0.60之间波动(图4(a));华容、安乡、南县三地的水环境社会承载力的波动范围在0.35~0.60之间,由于南县水环境社会承载力水平的不断提高,三者之间的差距逐年缩小,直至2010年,各县的社会承载力基本一致(图4(b))。相对于水环境生态承载力及水环境社会承载力而言,荆南三口地区各县的经济承载力状态变化最为突出,其承载力值最低到0.30,最高接近0.80。安乡与南县的水平线基本重合,而华容的承载力水平明显高于前两者(图4(c))。据上述分析可知,2007年以前,安乡的水环境承载力相对较高,华容次之,南县最低,这主要是因为水环境生态承载力和社会承载力占有优势。而自此以后,华容的承载力水平居上,这与当地水环境经济承载力的稳步提升有密切的关系。

从时间尺度上看,2003—2014年华容、安乡、南县水环境承载力均有小幅度的上升趋势(图5)。3个县的水环境综合承载力变化曲线与水环境生态及社会分承载力的变化曲线基本平行,而各县的水环境经济承载力的增长态势极为突出。在水环境生态承载力指标中,3县的城市污水处理率显著提高,最大值达90%。伴随着水资源开发利用率的逐步提高,各县水资源的开发潜力开始下降,县域水资源可供量低于需求量的频率增大;水环境社会承载力指标中的人均GDP增长幅度最大,2014年的人均GDP与2003年相比,华容县翻了5倍,安乡、南县也分别翻了3倍和4倍;在水环境经济承载力指标中,农民人均纯收入和人均工业产值均有上升趋势,万元产值用水量逐年减少。

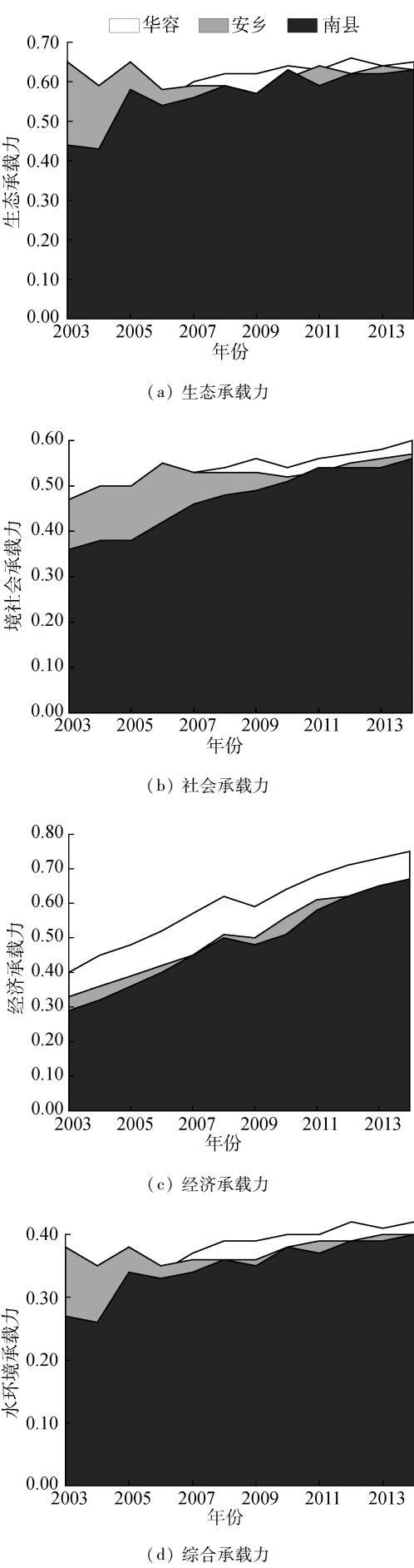
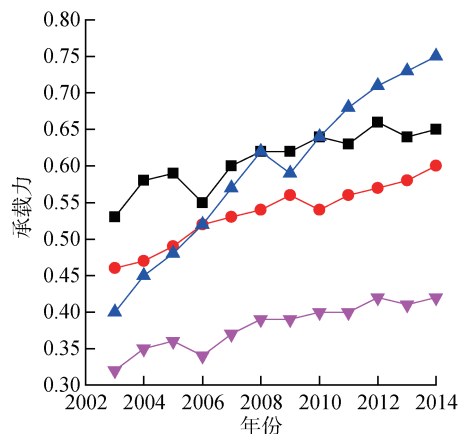
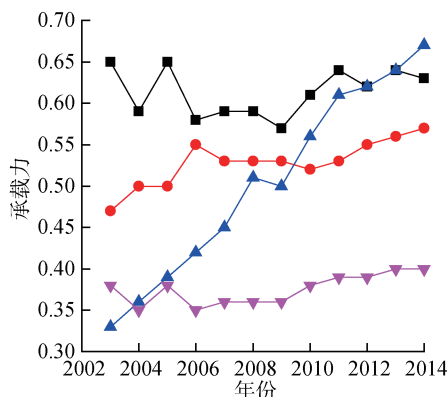


图4 2003—2014年水环境承载力

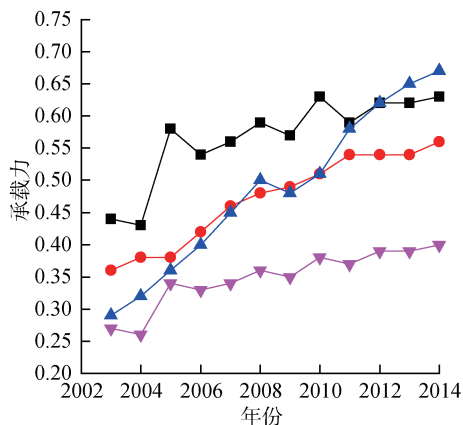
—■— 水环境生态承载力 —●— 水环境社会承载力
—▲— 水环境经济承载力 —▼— 水环境承载力



(a) 华容



(b) 安乡



(c) 南县

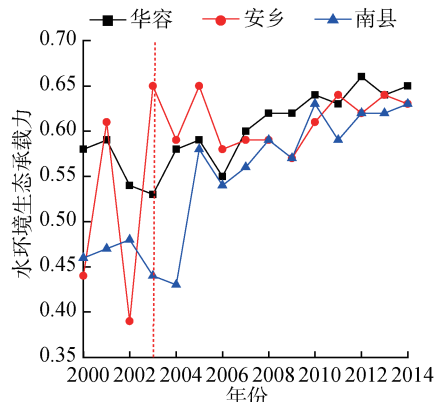
图 5 2003—2014 年荆南三口地区水环境承载力

2.2.3 三口地区水环境承载力变化的主要驱动因素

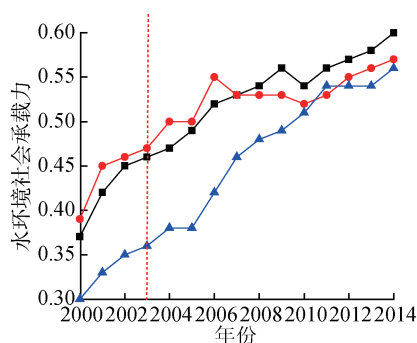
三峡水库运行后荆南三口地区各县的水环境承载力与运行前相比,均有所提升:华容县由 0.32 增至 0.42,安乡由 0.24 增至 0.40,南县由 0.26 增至 0.40,但均无大的改善(图 6(d)),这表明该地区水环境承载力仍处于弱可承载区间,水环境承载力呈脆弱状态。

在水环境这个复杂的巨系统中,水环境承载力的大小实质上反映的是流域水质和量的存在状

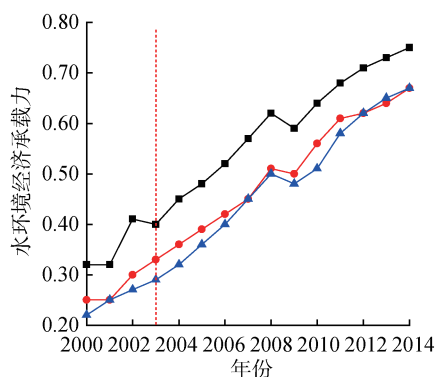
态,而这种存在状态是动态的,它的变化趋势是系统内部因素和外部因素综合作用所致。其中外部要素主要包括水环境系统负载的水生态系统、社会系统和经济系统;内部要素主要指河流水沙对水体的净化能力。



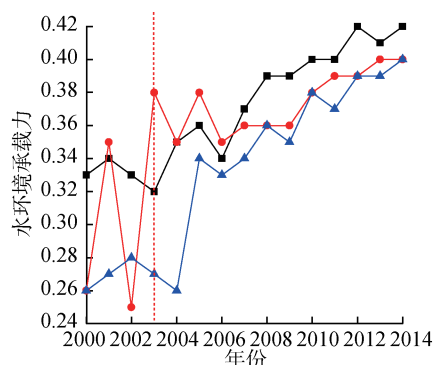
(a) 水环境生态承载力



(b) 水环境社会承载力



(c) 水环境经济承载力



(d) 水环境综合承载力

图 6 2000—2014 年荆南三口地区水环境承载力

从外部要素进行分析,三峡水库运行后,三口地区的水环境社会承载力稳步提升,最终达到基本可承载范围(图 6(b));水环境经济承载力逐年增强,趋于良好可承载区间(图 6(c));权重占比最大(0.55)的水环境生态承载力也有小幅增长(图 6(a))。三者不同强度的作用是促成三口地区水环境承载力提高的直接原因。但同时,由于权重占比最大的水环境生态承载力增长甚微,最终导致三口地区水环境承载力的增幅并不显著。就承载力指标来看,表 2 显示, C_1 和 C_2 在生态指标的分权重中分别占比 0.49、0.31,两者对生态承载力的总影响度高达 80%。在综合权重中,两者占比分别为 0.27、0.17,位居第一和第二,充分体现出其对水环境承载力影响的重要程度。三峡水库运行后, C_1 愈来愈大,这表明三口地区的水资源开发潜力相对在下降;同时, C_2 指标值小于 1 的出现频率较之前增大,这说明伴随着人口的增加以及社会发展的需求,水资源供给量不能满足需求量的可能性越来越大。在城市污水处理率不断优化的条件下, C_1 和 C_2 的恶化已成为抑制生态承载力快速增长的直接因素,以及水环境承载力改善效果不佳的根本原因。

那么,对于 C_1 和 C_2 的变化,究竟存在着怎样的内在机制呢?

荆南三口河系与长江相连,三峡水库对水沙的调节作用使荆南三口水沙量均呈递减趋势(表 12 ~ 13)。在河流系统中,运动的水沙既具有水体的环境作用又具有泥沙的环境作用,在河流水动力作用下,两者共同影响污染物的化学物理转化过程。当河道水量大、水动力条件活跃时,物化物净化、稀释,降解能力增强,从而降低水体中的污染物含量,提高水环境质量;而当河道水量小、水动力条件不活跃时,物化物凝聚、浓缩,水体中的污染物含量增加,从而导致水环境质量下降。同时,河流泥沙可以吸附多种污染物,在一定动力条件下沉

积于河床底部,一定时间内可减小赋存于水体中的污染物含量^[25]。

三峡水库运行下,三口多年平均径流量已由 2003 年前的 662.5 亿 m^3 下降至 486.9 亿 m^3 ,平均分流比下降 3.1 个百分点。水量变小,在水体环境作用下污染物的含量相对增加,水环境质量相对下降。再者,三口多年平均输沙量也由运行前的 7485 万 t 降至 974 万 t,河流输沙量的减少在一定程度上弱化了泥沙的环境效应。三口河系的水质和水量都由此受到严重影响。而三口河系作为三口地区的重要水源,其水环境质量的下降,必然导致该水体水资源可利用量的减少。

在此背景条件下,为满足社会经济发展的需要,三口地区的水资源开发利用率(C_1)势必进一步提高,水资源供需比(C_2)也必然上升。

3 结 论

a. 三峡水库运行前,荆南三口地区水环境承载状态极为脆弱。这主要是由于地区的社会经济发展仍处于初级阶段,工农业生产技术均处于较低水平,再加上社会对污水排放和处理的忽视造成的。

b. 三峡水库运行后,荆南三口地区水环境综合承载力有所改善,但整体增幅不大。从空间上来看,2007 年以前,水环境承载力情况是:安乡 > 华容 > 南县;2007 年以后华容的承载力状态略占优势,南县虽仍处于末位,但其承载水平逐年与华容、安乡接近。从时间尺度上来看,2003—2014 年,各县的水环境承载力均有所上升,并与相应地区水环境生态承载力及社会承载力的变化趋势基本一致。这说明在促进地区经济发展的同时,控制城市污水处理率以及地区人均用水量对保障水环境良性循环具有重要意义。

c. 与三峡水库运行前相比,运行后的荆南三口地区的水环境承载力虽有所提高,但幅度极小。这

表 12 三口各时段多年平均径流量与分流比

时段	径流量/亿 m^3							三口分流比/ %
	枝城	新江口	沙道观	弥陀寺	康家岗	管家铺	三口合计	
1981—2002 年	4 446	286.3	74.5	129.5	10.0	162.2	662.5	15.2
2003—2014 年	3 994	233.3	56.1	90.5	4.4	102.6	486.9	12.1

表 13 三口各时段多年平均输沙量与分沙比

时段	输沙量/万 t							三口分沙比/ %
	枝城	新江口	沙道观	弥陀寺	康家岗	管家铺	三口合计	
1981—2002 年	41 850	2 825	810	1 330	145	2 375	7 485	18
2003—2014 年	7 460	440	134	155	16	339	974	13

一方面得益于三口地区社会和经济发展的正面效应;另一方面受限于三峡水库运行的水文效应,即三峡水库运行后,三口水沙量显著减少引起的水环境质量下降。

d. 自三峡水库运行以来,大规模的调度工程在一定程度上缓解了枯水期荆南三口地区所面临的用水压力,对水环境的改善有积极的促进作用。但是由于三峡水库运行下,三口水沙量减少过于显著,引起的水环境质量负面变化相对更加突出。限于篇幅,本文仅就所选指标体系对荆南三口地区水环境承载力及三峡水库运行的影响展开了分析,更深入的探究有待下一步工作。

参考文献:

[1] 张曼,周建军,黄国鲜. 长江中游防洪问题与对策[J]. 水资源保护,2016,32(4):1-10. (ZHANG Man,ZHOU Jianjun,HUANG Guoxian. Flood control problems in middle reaches of Yangtze River and countermeasures [J]. Water Resources Protection,2016,32(4):1-10. (in Chinese))

[2] 邹家祥,翟红娟. 三峡工程对水环境与水生态的影响及保护对策[J]. 水资源保护,2016,32(5):136-140. (ZOU Jiaxiang,ZHAI Hongjuan. Impacts of Three Gorges Project on water environment and aquatic ecosystem and protective measures [J]. Water Resources Protection,2016,32(5):136-140. (in Chinese))

[3] 周永强,李景保,张运林,等. 三峡水库运行下洞庭湖盆冲淤过程响应与水沙调控阈值[J]. 地理学报,2014,69(3):409-421. (ZHOU Yongqiang, LI Jingbao, ZHANG Yunlin, et al. Silting process responses of Lake Dongting basin to the operations of TGR and thresholds of water-sediment regulation [J]. Acta Geographica Sinica,2014,69(3):409-421. (in Chinese))

[4] 李景保,周永强,欧朝敏,等. 洞庭湖与长江水体交换能力演变及对三峡水库运行的响应[J]. 地理学报,2013,68(1):108-117. (LI Jingbao, ZHOU Yongqiang, OU Chaomin, et al. Evolution of water exchange ability between Dongting Lake and Yangtze River and its response to the operation of the Three Gorges Reservoir [J]. Acta Geographica Sinica,2013,68(1):108-117. (in Chinese))

[5] 李景保,钟一苇,周永强,等. 三峡水库运行对洞庭湖北部地区水资源开发利用的影响[J]. 自然资源学报,2013,28(9):1583-1593. (LI Jingbao, ZHONG Yiwei, ZHOU Yongqiang, et al. Impacts of the operation of TGR on the development and utilization of water resources of northern Dongting Lake Area [J]. Journal of Natural Resources,2013,28(9):1583-1593. (in Chinese))

[6] 李志斌,黄云仙. 洞庭湖四口河系水资源综合调控体系

方案建议[J]. 湖南水利水电,2009,4(21):47-48. (LI Zhibin, HUANG Yunxian. Proposal of comprehensive regulation and control system for water resources in the region of Dongting Lake along Yangtze River [J]. Hunan Hydro & Power,2009,4(21):47-48. (in Chinese))

[7] 沈珍瑶,祝莹欣,贾超,等. 基于动态模拟递推算法和向量模法的水环境承载力计算方法[J]. 水资源保护,2015,31(6):32-39. (SHEN Zhenyao,ZHU Yingxin, JIA Chao, et al. Calculation method of water environment carrying capacity based on dynamic simulation-recursion algorithm and vector norm method [J]. Water Resources Protection,2015,31(6):32-39. (in Chinese))

[8] 王玉梅,丁俊新. 山东省水环境承载力动态变化趋势分析[J]. 水资源与水工程学报,2011,22(6):50-55. (WANG Yumei, DING Junxin. Analysis on dynamic changing tendency of water environmental carrying capacity in Shandong Province [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering,2011,22(6):50-55. (in Chinese))

[9] 莫淑红,孙新新,沈冰,等. 基于系统动力学的区域水环境动态承载力研究[J]. 西安理工大学学报,2007,23(3):251-256. (MO Shuhong,SUN Xinxin,SHEN Bing, et al. Dynamic carrying capacity of regional water environment based on system dynamics [J]. Journal of Xi'an University of Technology,2007,23(3):252-256. (in Chinese))

[10] 王丽,毕佳成,向龙,等. 基于“五水共治”规划的水资源承载力评估[J]. 水资源保护,2016,32(2):21-25. (WANG Li,BI Jiacheng,XIANG Long, et al. Evaluation of water resources carrying capacity based on plan of co-governance on five water categories [J]. Water Resources Protection,2016,32(2):21-25. (in Chinese))

[11] 崔东文,金波. 基于WDO-PP模型的文山州近10年水资源承载力评价[J]. 水利经济,2016,34(6):43-49. (CUI Dongwen,JIN Bo. Evaluation of carrying capacity of water resources of Wenshan Prefecture in latest 10 years based on WDO-PP model [J]. Journal of Economic of Water Resource,2016,34(6):43-49. (in Chinese))

[12] 戴薇,汪群,王华. 太湖流域水资源承载力研究[J]. 水利经济,2005(6):13-17. (DAI Wei,WANG Qun,WANG Hua. Research on bearing capacity of water resources of Taihu Basin [J]. Journal of Economics of Water Resources,2005(6):13-17. (in Chinese))

[13] 帅红,李景保,何霞,等. 环境变化下长江荆南三口径流变化特征检测与归因分析[J]. 水土保持学报,2016,30(1):83-88. (SHUAI Hong, LI Jingbao, HE Xia, et al. Feature detection and attribution analysis of runoff variation in the Three Outlets of southern Jingjiang River under environmental changes [J]. Journal of Soil and Water Conservation,2016,30(1):83-88. (in Chinese))

(下转第166页)

- [13] YUM L, YIN D Y, SHI J, et al. Phosphorus removal and recovery from high phosphorus wastewater by the HAP crystallization process[J]. Oriental Journal of Chemistry, 2016, 32(1): 235-241.
 - [14] 谷彩霞, 张超杰, 李咏梅, 等. 牛骨粉为晶种的磷酸钙结晶法回收污泥发酵液中磷[J]. 环境工程学报, 2015, 9(7): 3127-3133. (GU Caixia, ZHANG Chaojie, LI Yongmei, et al. Phosphorus recovery from sludge fermentation broth by cow-bone powder-seeded crystallization of calcium phosphate [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2015, 9(7): 3127-3133. (in Chinese))
 - [15] 谭婧, 张涛, 梁睿, 等. 磷酸铵镁和磷酸钙法处理厌氧上清液的比较[J]. 给水排水, 2008, 34(增刊2): 140-144. (TAN Jing, ZHANG Tao, LIANG Rui, et al. Phosphorus removal comparison by crystallization of magnesium ammonium phosphate and hydroxyapatite from anaerobic supernatant [J]. Water & Wastewater Engineering, 2008, 34(sup2): 140-144. (in Chinese))
 - [16] 李晋雅, 张顺, 戴荣海, 等. 鸟粪石结晶法回收磷中 Ca^{2+} 对产物沉淀特性的影响[J]. 环境工程, 2014, 32(2): 54-58. (LI Jinya, ZHANG Shun, DAI Ronghai, et al. Impact of Ca^{2+} on the product precipitation in phosphorous recovery by struvite crystallization [J]. Environmental Engineering, 2014, 32(2): 54-58. (in Chinese))
 - [17] VALSAMI J E. Mineralogical controls on phosphorus recovery from wastewaters[J]. Mineralogical Magazine, 2001, 65(5): 611-620.
 - [18] CAO X, HARRIS W. Carbonate and magnesium interactive effect on calcium phosphate precipitation[J]. Environmental Science & Technology, 2007, 42(2): 436-442.
(收稿日期: 2017-04-21 编辑: 徐 娟)
- +++++
- (上接第 141 页)
- [14] 王崇浩, 韩其为. 三峡水库建成后荆南三口洪道及洞庭湖淤积概算[J]. 水利水电技术, 1997, 28(11): 16-20. (WANG Chonghao, HAN Qiwei. Estimate of aggregation and degradation in the Dongting Lake and the flood diversion channels of the Jingjiang River after the Three Gorges Reservoir being built [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 1997, 28(11): 16-20. (in Chinese))
 - [15] 窦身堂, 余明辉, 段文忠, 等. 长江荆南三口五河水沙变化及治理规划[J]. 武汉大学学报(工学版), 2007, 40(4): 40-44. (DOU Shentang, YU Minghui, DUAN Wenzhong, et al. Study on flow and sediment load and preliminary proposal in five tributaries of Jingjiang River [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2007, 40(4): 40-44. (in Chinese))
 - [16] 张丽, 钱湛, 张双虎. 变化水沙条件下三口入洞庭湖水量变化趋势研究[J]. 中国农村水利水电, 2015(5): 102-104, 108. (ZHANG Li, QIAN Zhan, ZHANG Shuanghu. An analysis of changing trends of water inflow from Sankou to Dongting Lake in variation of incoming water and sediment [J]. China Rural Water and Hydropower, 2015(5): 102-104, 108. (in Chinese))
 - [17] 钟一苇. 荆南三口地区径流演变特征及水资源承载力研究[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2015.
 - [18] 曾现进, 李天宏, 温晓玲. 基于 AHP 和向量模法的宜昌市水环境承载力研究[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(6): 200-205. (ZENG Xianjin, LI Tianhong, WEN Xiaoling. Analysis on carrying capacity of water environment in Yichang City based on AHP and vector norm method [J]. Environmental Science & Technology, 2013, 36(6): 200-205. (in Chinese))
 - [19] 樊庆铎, 于森, 徐东川, 等. 大庆地区水环境承载力计算分析与评价[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(2): 66-70. (FAN Qingxin, YU Miao, XU Dongchuan, et al. Computing analysis and evaluation of water environment carrying capacity in Daqing area [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(2): 66-70. (in Chinese))
 - [20] 程兵芬, 罗先香, 王刚. 基于层次分析-模糊综合评价模型的东辽河流域水环境承载力评价[J]. 水资源保护, 2012, 28(6): 33-36. (CHENG Bingfen, LUO Xianxiang, WANG Gang. Assessment of water environmental carrying capacity in Dongliao River Basin based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation model [J]. Water Resources Protection, 2012, 28(6): 33-36. (in Chinese))
 - [21] 李清龙, 闫新兴. 水环境承载力量化方法研究进展与展望[J]. 地学前缘, 2005, 12(4): 43-49. (LI Qinglong, YAN Xinxing. Progress and prospect of research on quantifying method of water environmental carrying capacity [J]. Earth Science Frontiers, 2015, 12(4): 43-49. (in Chinese))
 - [22] 赵彦红. 河北省水环境现状及水环境承载力研究[D]. 保定: 河北师范大学, 2005.
 - [23] 钱华. 河流水库水环境承载力研究: 以黄河万家寨水库为例[D]. 郑州: 华北电力大学, 2004.
 - [24] 李建兵. 水环境承载力评估方法及案例研究[D]. 上海: 复旦大学, 2009.
 - [25] 禹雪中, 杨志峰, 钟德钰, 等. 河流泥沙与污染物相互作用数学模型[J]. 水利学报, 2016, 37(1): 10-15. (YU Xuezhong, YANG Zhifeng, ZHONG Deyu, et al. Numerical model for interaction between sediment and pollutant in river [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2016, 37(1): 10-15. (in Chinese))
- (收稿日期: 2017-01-07 编辑: 彭桃英)