

# 长江中游荆南三口河网地区生态系统健康评价

李静芝<sup>1,2</sup>, 闫雪<sup>3,4</sup>, 李景保<sup>5</sup>

(1. 长沙理工大学 建筑学院, 长沙 410076;

2. 洞庭湖水环境治理与生态修复湖南省重点实验室, 长沙 410114; 3. 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011; 4. 中国科学院大学, 北京 100049; 5. 湖南师范大学 资源与环境科学学院, 长沙 410081)

**摘要:**基于长江中游荆南三口河网地区生态系统特征,从自然生态条件、资源利用与环境保护、社会经济发展 3 个方面,构建生态系统健康评价指标体系,运用模糊综合评判法对其 2001—2014 年的生态系统健康状况进行了评价分析。结果表明:近 14 年来荆南三口河网地区生态系统健康处于亚病态—一般健康状态,整体波动向好发展,脆弱的自然生态条件是关键性制约因素;受区域降水和长江来水双重影响,地区水文水资源情势复杂,自然生态健康水平长期在 0.6 上下波动,健康状态在亚病态和一般健康之间交替变化,提升水资源稳定性至关重要;资源利用与环境保护健康水平显著提升,由 2001 年的 0.290 提高到 2014 年的 0.742,健康状态由病态发展到一般健康状态,但水资源开发利用长期处于 40% 以上的较高的水平,水资源优化配置及集约利用有待加强;社会经济发展态势较好,健康水平由 2001 年的 0.362 稳步提升到 2014 年的 0.819,健康状态由病态发展到亚健康状态,但城市化水平稍低,城乡收入差距偏大,仍需对城乡统筹发展问题给予高度重视。

**关键词:**生态系统健康;模糊综合评判;荆南三口河网地区

中图分类号:X826

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)04-0272-08

## Assessment on Ecosystem Health of the Three Outfalls River System Region in the Middle Reaches of the Yangtze River

LI Jingzhi<sup>1,2</sup>, YAN Xue<sup>3,4</sup>, LI Jingbao<sup>5</sup>

(1. School of Architecture, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410076, China; 2. Key Laboratory of Dongting Lake Aquatic Eco-Environmental Control and Restoration of Hunan Province, Changsha 410114, China; 3. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 4. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 5. College of Resources and Environment Science, Hunan Normal University, Changsha 410081, China)

**Abstract:** In order to analyze the ecosystem characteristics of the three outfalls river system region in the middle reaches of the Yangtze River, three aspects including natural ecological conditions, resource utilization and environment protection, social economy and development were selected to construct the ecosystem health assessment index system. The fuzzy integrated evaluation method was used to evaluate and demonstrate the ecological health status in this region from 2001 to 2014. The results showed that: (1) the ecological health status of this region was inferior and in the sub-pathological or the fair healthy state in 2001—2014, the overall situation was fluctuating but increasingly better; the inducing factor of this status was the vulnerable natural ecological conditions; (2) the combined effect of these factors caused the status of hydrology and water resources in the area was complicated, the fluctuation of natural ecological health level was at the score of 0.6 for a long period and the health state alternated between sub-pathological and fair healthy state; thus, improving the stability of water resources was the key issue to be solved urgently in this region; (3) the health level of resource utilization and environmental protection increased significantly and the health score improved from 0.290 (the worst health state,) in 2001 to 0.742 (fair health state) in 2014; however, the exploitation and utilization rate of water resources in the area had been at a relatively high level above 40% for a long time; therefore, optimizing distribution of water resources and the intensive utilization of resources

should be emphasized; (4) the momentum of social and economic development was favorable; the health level was improved from the worst health state (0.362) in 2001 to the sub-healthy state (0.819) in 2014. However, the level of urbanization was slightly lower, the income gap between urban and rural was still large and the attention should be paid to overall development of urban and rural areas.

**Keywords:** ecosystem health; fuzzy integrated evaluation; the three outfalls river system region

复杂水系构成的河网地区是调节径流、涵养水源、净化水质和维持区域生态平衡的重要地理单元,长期以来也是人类社会发展与自然生态保护之间的矛盾冲突集中体<sup>[1]</sup>。随着人口的增多和社会经济发展,人类对自然界的一系列开发利用活动已导致了严重的生态环境问题,因此,对河网地区生态系统健康评价尤其重要,它不仅可以为自然环境综合治理提供依据,更能进一步促进地区生态与社会经济的可持续发展<sup>[2]</sup>。

目前,学术界对于生态系统健康并没有明确定义,早期的观点普遍认为健康的生态系统应能够保持自身稳定,并对外界干扰具有一定恢复力<sup>[3]</sup>,相关学者指出健康的生态系统应具有可持续性<sup>[4]</sup>,健康状况可以通过系统对外界的平衡恢复能力、组织结构多样性和新陈代谢活力3个方面进行衡量<sup>[5]</sup>,这些观点均侧重于生态系统自身;加拿大学者 Rapport 后又指出人类活动与生态系统之间存在相互反馈,因此应综合考虑生态系统自身的健康状态及其对人类的服务功能<sup>[6-7]</sup>。我国学者在总结各种有关生态系统健康的理解后提出:生态系统健康是指系统自身组分完整,系统内物质循环和能量流动稳定且对外界扰动能保持弹性和稳定性,整体功能复杂多样并具备一定活力,其发展的最终结果是生态整合性<sup>[8]</sup>，“健康”意味着社会—经济—自然复合生态系统整体健康,应将社会经济健康和人类健康两方面因素同时考虑在内<sup>[9]</sup>,目前这种定义被更广泛地接受。因此,总体上可以认为健康的生态系统应该具备自身完整功能,能够自我维持和更新并且与人类社会发展相协调。

生态系统健康评价方法一般包括指示物种法和指标体系法,指示物种法操作简单,但具有很大局限性,难以全面反映生态系统健康状况<sup>[10]</sup>,而指标体系法因其较强的综合性和全面性目前被广泛应用。作为生态系统健康研究先行者的美国,已建立了较为全面的评价指标体系,并在实践中进行推广,为水质改善和生态恢复提供了有力支持<sup>[11]</sup>。我国在相关领域的研究仍处于探索阶段,但部分学者结合 PSR 法、熵权综合指数法、层次分析法、生物膜方法、模糊数学方法等已构建了涉及流域<sup>[12-14]</sup>、河口<sup>[15]</sup>、湖泊<sup>[16]</sup>、城市<sup>[17-18]</sup>等生态系统的健康评价指标体系,并对生态系统健康状况进行分析。

洞庭湖是我国第二大淡水湖泊,也是长江中下游最大的调蓄湖泊,对长江中下游地区调蓄洪水、维持

水沙平衡、保护生物多样性等发挥着重要作用。荆南三口河网地区作为长江与洞庭湖之间的纽带,近几十年来,受气候变化和人类活动影响,江湖关系改变,该地区环境问题也逐渐显现<sup>[19]</sup>。自然生态状况破坏必将影响到洞庭湖区的可持续发展。因此,本文应用系统性较强和评价结果清晰的模糊数学方法,基于可获得数据从行政区域尺度出发对三口河网地区生态系统进行健康评价,使评价结果更易于公众感知,并以为改善该地区生态系统健康状况,优化和提升荆南三口河网地区生态系统功能提供依据。

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 研究区概况

洞庭湖北面松滋、太平、藕池三口及其分泄长江来流进入洞庭湖的河道所组成的复杂河网地区,其中以常德市的安乡县、益阳市的南县、岳阳市的华容县为核心区域,本文以此三县作为主要研究对象(图1)。该地区总面积 3 758 km<sup>2</sup>,2015 年末总人口为 199.9 万人,其中城镇人口 84.91 万人,城市化率为 42.48%;地区生产总值 634.88 亿元,比上年增长 7.06%,二三产业增加值 486.2 亿元,占地区生产总值的 76.58%。



图1 荆南三口河网地区示意图

荆南三口河网地区为北亚热带季风湿润气候,气候

温和,雨量充沛,多年年平均降水量 1 259.5 mm (1959—2010 年),同时温差大、日照长,多年平均蒸发量 1 208.7 mm(1959—2010 年)。长期以来该地区都因较好的土壤条件作为湖南省乃至全国重要的商品粮、棉、油、鱼生产基地,工业发展迅速,逐渐形成以纺织、化工、食品、造纸、建材工业等为特色的工业体系,在自然条件变化和人类活动的双重影响下,该地区河流断流、水资源过度开发等一系列生态环境问题逐渐显露。

1.2 研究方法

1.2.1 构建指标体系 依据整体性、目标性、动态与静态相结合、实用性和可操作性的原则,根据生态系统

健康内涵,结合荆南三口河网地区自身特点,构建了以自然生态条件、资源利用与环境保护、社会经济发展为出发点,包含 23 项评价指标的生态系统健康评价指标体系(表 1)。生态系统整体的健康状况往往是多因素共同作用的结果,为了避免评价指标权重主观性过强进而对结果造成偏差,本文引入熵权法<sup>[20]</sup>与层次分析法相结合<sup>[21]</sup>确定指标权重。计算结果(表 1)显示:权重值大于或接近 0.05 的指标有人均水资源占有量、年均降水量、森林覆盖率、水旱灾害成灾率、河流断流几率、水资源开发利用率,说明以上指标是影响荆南三口河网地区生态系统健康状况的关键因子。

表 1 指标体系及权重

目标层	标准层	指标层	单位	层次分析法 确权	熵权法修正 后权重	权重 排序	指标 属性
荆南 三口 河网 地区 生态 系统 健康	B <sub>1</sub> 自然 生态条件 (0.478)	C <sub>1</sub> 年均降水量	mm	0.145	0.092	2	正程
		C <sub>2</sub> 人均水资源占有量	m <sup>3</sup>	0.145	0.109	1	正程
		C <sub>3</sub> 河流断流几率	%	0.074	0.057	5	逆程
		C <sub>4</sub> 年输沙总量	万 t	0.037	0.031	16	区间
		C <sub>5</sub> 水旱灾害成灾率	%	0.079	0.062	4	逆程
		C <sub>6</sub> 森林覆盖率	%	0.081	0.079	3	正程
		C <sub>7</sub> 人均耕地面积	hm <sup>2</sup>	0.075	0.043	7	正程
	B <sub>2</sub> 资源利用 与环境保护 (0.287)	C <sub>8</sub> 水资源开发利用	%	0.051	0.049	6	逆程
		C <sub>9</sub> 单位 GDP 能耗	tce/万元	0.036	0.042	9	逆程
		C <sub>10</sub> 公共生态用水占比	%	0.017	0.026	19	正程
		C <sub>11</sub> 水田实灌每公顷平均用水量	m <sup>3</sup>	0.022	0.041	10	逆程
		C <sub>12</sub> 污水处理率	%	0.052	0.039	12	正程
		C <sub>13</sub> 化肥施用强度	kg/hm <sup>2</sup>	0.036	0.041	11	逆程
		C <sub>14</sub> 水利、环境等投资占 GDP 比重	%	0.028	0.028	17	正程
		C <sub>15</sub> 建成区绿化覆盖率	%	0.016	0.021	22	正程
	B <sub>3</sub> 社会经济 与发展 (0.241)	C <sub>16</sub> 二三产业增加值占比	%	0.008	0.019	23	正程
		C <sub>17</sub> 城镇人口占比	%	0.014	0.024	20	正程
		C <sub>18</sub> 人均 GDP	万元	0.016	0.034	15	正程
		C <sub>19</sub> 城镇居民收入	万元	0.008	0.028	18	正程
		C <sub>20</sub> 城乡居民收入比		0.014	0.035	14	逆程
		C <sub>21</sub> 医疗卫生机构床位数	张	0.009	0.036	13	正程
		C <sub>22</sub> GDP 总量	万元	0.021	0.043	8	正程
		C <sub>23</sub> 人均建设用地面积	m <sup>2</sup> /人	0.015	0.022	21	区间

1.2.2 模糊评价

(1) 评判标准制定。借鉴国家或国际标准、国家及地方发展目标、该领域相关研究成果<sup>[21-23]</sup>,根据指标的优良状况及可持续发展能力,将指标状态划分为“病态”、“亚健康”、“一般健康”、“亚健康”、“健康”5 个等级,评判标准详见表 2。

(2) 隶属度矩阵的确定。模糊综合评判中,需要建立隶属度矩阵从而确定评价目标的等级隶属情况。根据不同指标自身性质,本文针对正程和逆程两种指标分别建立升半梯形和降半梯形隶属函数,为了使指标隶属度在各个等级平滑过渡,这里对其进行模糊化处理:对于实际值处于病态或健康状态的指标,则令其距离临界值越远隶属于该等级的概率越高,当实际

值等于临界值时,则在该等级的隶属指数为 0.5;对于实际值处于中间 3 个等级的指标,当实际值为等级区间中点值时,令其隶属指数为 1,当实际值为区间两侧边缘点时,隶属指数为 0.5,中间点向两侧按线形规律递减。设第  $i$  项指标的样本值为  $x_i$ ,通过上述隶属函数求得的结果就构成了  $i$  个评价指标相对于各健康级别隶属度的模糊关系判断矩阵:

$$R=\begin{bmatrix}r_{11}&r_{12}&\cdots&r_{15}\\r_{21}&r_{22}&\cdots&r_{25}\\\vdots&\vdots&\cdots&\vdots\\r_{i1}&r_{i2}&\cdots&r_{i5}\end{bmatrix}$$

(1)

(3) 结果向量计算。由于指标体系为多层级,为

了更好地反映荆南三口河网地区生态系统健康状况,本文采用模糊综合评判法中的多级模型进行评价,即从指标层开始,采用  $M(-,+)$  算法模型逐级向上进行各层权重与隶属矩阵的复合计算,最终得到评价对象的模糊综合评判隶属向量,计算公式为:

$$X=W \cdot R=[W_1,W_2,\cdots,W_m] \cdot$$
$$\begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{15} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{25} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ r_{i1} & r_{i2} & \cdots & r_{i5} \end{bmatrix}=[x_1,x_2,\cdots,x_5] \quad (2)$$

式中: $X$  为评价对象的模糊综合评判隶属向量; $W$  为

权重矩阵; $R$  为隶属度矩阵; $m$  为参与赋权的要素个数。根据最大隶属度原则,取隶属指数最大值对应等级作为洞庭湖荆南三口河网地区生态系统健康等级。

(4) 指数值计算。根据指标层和要素层的隶属情况,对不同的健康等级赋予一定的分值:病态(0.2)、亚病态(0.4)、一般健康(0.8)、亚健康(0.8)、健康(0.9)。采用公式:

$$E=\sum_{n=1}^k x_n \times F_n \quad (3)$$

式中: $E$  为生态系统健康模糊评价得分值( $0 \leq E \leq 1$ ),各等级评分范围见表 3; $F_n$  为不同健康等级对应的分值; $x_n$  为评价对象在不同健康等级的隶属指数; $n$  为等级数。

表 2 荆南三口河网地区生态系统健康评价指标评分标准

指标		等级					标准
		健康	亚健康	一般健康	亚病态	病态	依据
C <sub>1</sub> 年均降水量	mm	≥1500	1500~1300	1300~1100	1100~1000	<1000	①②
C <sub>2</sub> 人均水资源占有量	m <sup>3</sup>	≥2000	1500~2000	1500~1000	1000~500	<500	①
C <sub>3</sub> 河流断流几率	%	≤25	25~35	35~45	45~55	>55	③ <sup>[23]</sup>
C <sub>4</sub> 年输沙总量	万 t	2000~3000	1000~2000,	500~1000,	100~500,	≤100,	③ <sup>[24]</sup>
			3000~4000	4000~5000	5000~6000	≥6000	
C <sub>5</sub> 水旱灾害成灾率	%	<0.5	0.5~1	1~10	10~30	≥30	①④
C <sub>6</sub> 森林覆盖率	%	≥65	55~65	38~55	30~38	<30	⑦
C <sub>7</sub> 人均耕地面积	hm <sup>2</sup>	≥0.06	0.057~0.06	0.053~0.057	0.033~0.053	<0.033	①
C <sub>8</sub> 水资源开发利用率	%	<10	10~25	25~40	40~55	≥55	①
C <sub>9</sub> 单位 GDP 能耗	tce/万元	≤0.5	0.5~0.65	0.65~0.8	0.8~1.2	≥1.2	①⑥⑦
C <sub>10</sub> 公共生态用水占比	%	≥1	1~0.7	0.7~0.5	0.5~0.3	<0.3	③ <sup>[19]</sup>
C <sub>11</sub> 水田实灌每公顷平均用水量	m <sup>3</sup>	4350~4950	4950~6000	6000~7050	7050~8100	≥8100	②
C <sub>12</sub> 污水处理率	%	100	100~80	80~65	65~50	<50	⑤⑦
C <sub>13</sub> 化肥施用强度	kg/hm <sup>2</sup>	<250	250~300	300~350	350~400	≥400	①⑦
C <sub>14</sub> 水利、环境等投资占 GDP 比重	%	≥12	12~9	9~6	6~3	<3	⑦
C <sub>15</sub> 建成区绿化覆盖率	%	≥40	34~40	30~34	26~30	<26	④⑤
C <sub>16</sub> 二三产业增加值占比	%	≥75	75~70	70~65	65~55	<55	⑧
C <sub>17</sub> 城镇人口占比	%	≥70	70~55	55~40	40~35	<35	⑧
C <sub>18</sub> 人均 GDP	万元	≥7	4.5~7	2.5~4.5	1~2.5	<1	⑧
C <sub>19</sub> 城镇居民收入	万元	≥5	3~5	1.5~3	1~1.5	<1	⑦
C <sub>20</sub> 城乡收入比		1~1.5	1.5~2	2~2.5	2.5~3	≥3	⑥⑧
C <sub>21</sub> 医疗卫生机构床位数	张	≥5000	5000~4000	4000~3500	3500~3000	<3000	⑧
C <sub>22</sub> GDP 总量	亿元	≥240	240~160	160~80	80~40	<40	⑧
C <sub>23</sub> 人均建设用地面积	m <sup>2</sup>	80~90	60~80,	50~60,	40~50,	≤40, ≥120	①
			90~100	100~110	110~120		

注:① 参照联合国公认标准(例如国际公认缺水标准、涝灾害等级划分标准、湿润区、半湿润区、干旱区、半干旱区划分标准;发展中国家人均建设用地标准);② 参照相关规划实施细则,如《湖南省用水定额》(DB43/T388—2014)、《全国水资源规划技术细节》;③ 参照国内相关文献的研究成果;④ 参照国家标准,如《气象干旱等级》(GB/T20481—2006)、《城市园林绿化评价标准》(GB50563—2010)等;⑤ 参照《国家生态园林城市分级考核标准》;⑥ 参照国家及地方政府规划文本及发展研究,“十二五”规划、“十三五”规划、中国首部《社会管理蓝皮书——中国社会管理创新报告》;⑦ 参照《生态县、生态市、生态省建设指标(修订稿)》标准、国家卫生县城标准、《国家环境保护模范城市考核指标及其实施细则(第六阶段)》;⑧ 参照湖南省内各区县最优值及最低值、全国平均水平或世界各国现状水平。

表 3 荆南三口河网地区生态系统健康等级及标准

等级标	病态	亚病态	一般健康	亚健康	健康
分值	(0,0.4)	(0.4,0.6)	(0.6,0.8)	(0.8,0.85)	(0.85,1.0)

资料序列长度为 2001—2014 年,其中水文泥沙数据来自于长江泥沙公报、湖南省水资源公报、常德市水资源公报、岳阳市水资源公报、益阳市水资源公

报,社会经济数据来自湖南省 2001—2015 年统计年鉴以及各市县国民经济和社会发展统计公报。

2 结果与分析

2.1 评价结果

根据上述评价方法,对荆南三口河网地区 2001—2014 年各年份生态系统健康状况进行计算,具体结果见表 4。

2.2 典型年生态系统健康状况分析

评价结果显示,2014 年洞庭湖荆南三口河网地区生态系统健康综合得分为 0.684,尚处于一般健康

状态较低水平。标准层中,得分最高社会经济发展健康水平,为 0.812,隶属于亚健康状态;其次为资源利用与环境保护健康水平,为 0.737,属于一般健康状态,自然生态条件健康水平最低,仅为 0.586,隶属于亚病态,脆弱的自然生态条件是该地区生态系统健康发展的制约因素。具体指标中,得分最高的是自然生态条件下的人均耕地面积,为 0.90,隶属于健康状态,其他健康状态较好的指标以资源利用与环境保护和社会经济与发展下属的指标居多;得分最低的是人均建设用地面积和森林覆盖率,评分值分别为 0.20,0.23,隶属于病态。

表 4 2001—2014 年荆南三口河网地区生态系统健康状况得分

年份	自然生态健康指数	资源利用与环境保护健康指数	社会经济与发展健康指数	生态系统健康指数	健康状况
2001	0.541	0.284	0.357	0.423	亚病态
2002	0.630	0.377	0.374	0.496	亚病态
2003	0.614	0.350	0.373	0.481	亚病态
2004	0.659	0.378	0.381	0.512	亚病态
2005	0.588	0.465	0.411	0.511	亚病态
2006	0.522	0.471	0.443	0.489	亚病态
2007	0.472	0.432	0.479	0.463	亚病态
2008	0.635	0.501	0.566	0.581	亚病态
2009	0.579	0.545	0.651	0.587	亚病态
2010	0.724	0.623	0.682	0.686	一般健康
2011	0.387	0.601	0.710	0.527	亚病态
2012	0.711	0.694	0.763	0.719	一般健康
2013	0.570	0.708	0.796	0.665	一般健康
2014	0.586	0.737	0.812	0.684	一般健康

荆南三口河网地区以客水为水资源的主要补给,但水资源年内分配不均,降水量的 60%~70%以及长江三口入湖水量几乎全部集中在汛期(4—9 月),丰水期洪涝灾害频繁,枯水期干旱缺水,特别是三峡水库蓄水运行后,长江来水减少而湖水流出加快,加剧了夏秋连旱或冬春连旱的发生。水文的变化对输沙量减少也造成了一定影响,而水沙环境是流域的重要组成部分以及污染物的主要载体,三口河网地区自然条件较弱与水沙情况不佳有很大关系。2014 年长江三口入境水量 553.6 亿 m<sup>3</sup>,比多年平均偏少 40.0%。当年水旱灾害成灾率为 23%,评分为 0.37;年输沙量 406.94 万 t,评分为 0.51;河流断流几率为 48.55%,评分为 0.46,均处于亚病态。

2014 年该地区在环保投资、节约资源以及降低环境污染方面基本表现较好(图 2),但水资源开发利用率得分较低(0.4)。国际上一般认为对一条河流的开发利用不能超过其水资源量的 40%,而 2014 年三口河网地区水资源开发率高达 47.5%,远超这一阈值,说明过高的水资源开发利用率制约了该地区资源

利用与环境保护方面的健康发展。

此外,尽管荆南三口河网地区社会经济发展状况相对较好,已经形成了食品、纺织、机械等支柱产业,规模工业产值不断增加,并积极推动工业园区体制改革,经济稳步发展,社会基础服务体系逐步完善。但是,该地区城镇居民收入偏低,2014 年人均收入 20 298 元,相较于湖南省 26 570 元的平均水平低 23.6%。

2.3 生态系统健康水平年际变化特征

(1) 生态系统健康水平波动提升。2001—2014 年荆南三口河网地区生态系统健康状态在亚病态与一般健康之间波动变化,但整体状况趋好,这主要得益于该地区资源利用、环境保护及社会经济发展水平的不断提高。其中自然生态健康指数与生态系统健康综合指数波动态势基本吻合(图 3),由此可知引起荆南三口河网地区生态系统健康状况出现波动的主要原因为自然生态环境的变化。因此,协调好该地区自然生态环境与社会经济发展之间的关系,在保护好生态环境的同时合理高效利用自然资源,是提升该地区生态系统健康水平的根本途径。

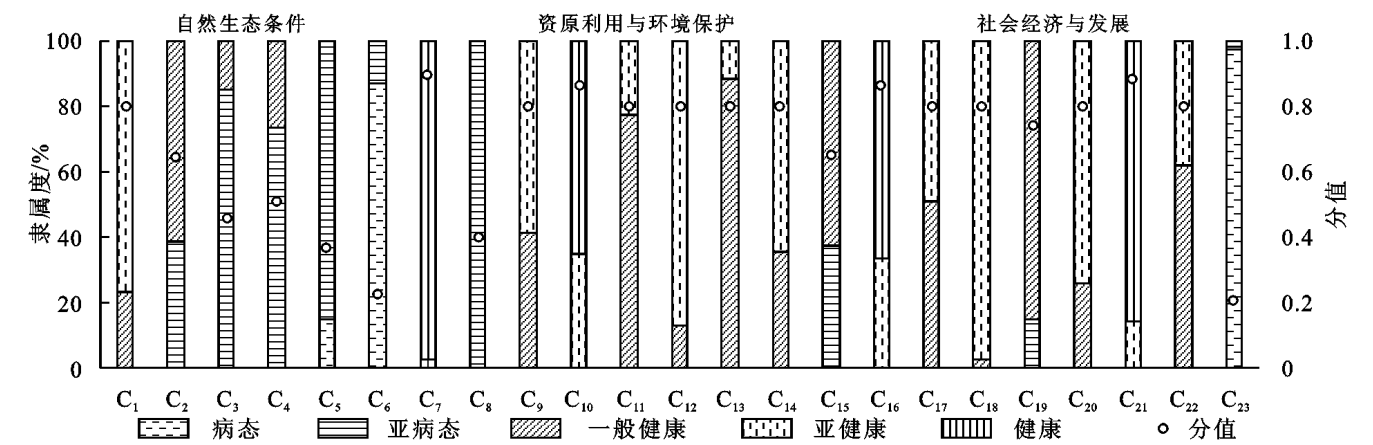


图 2 2014 年生态系统各指标隶属度及分值

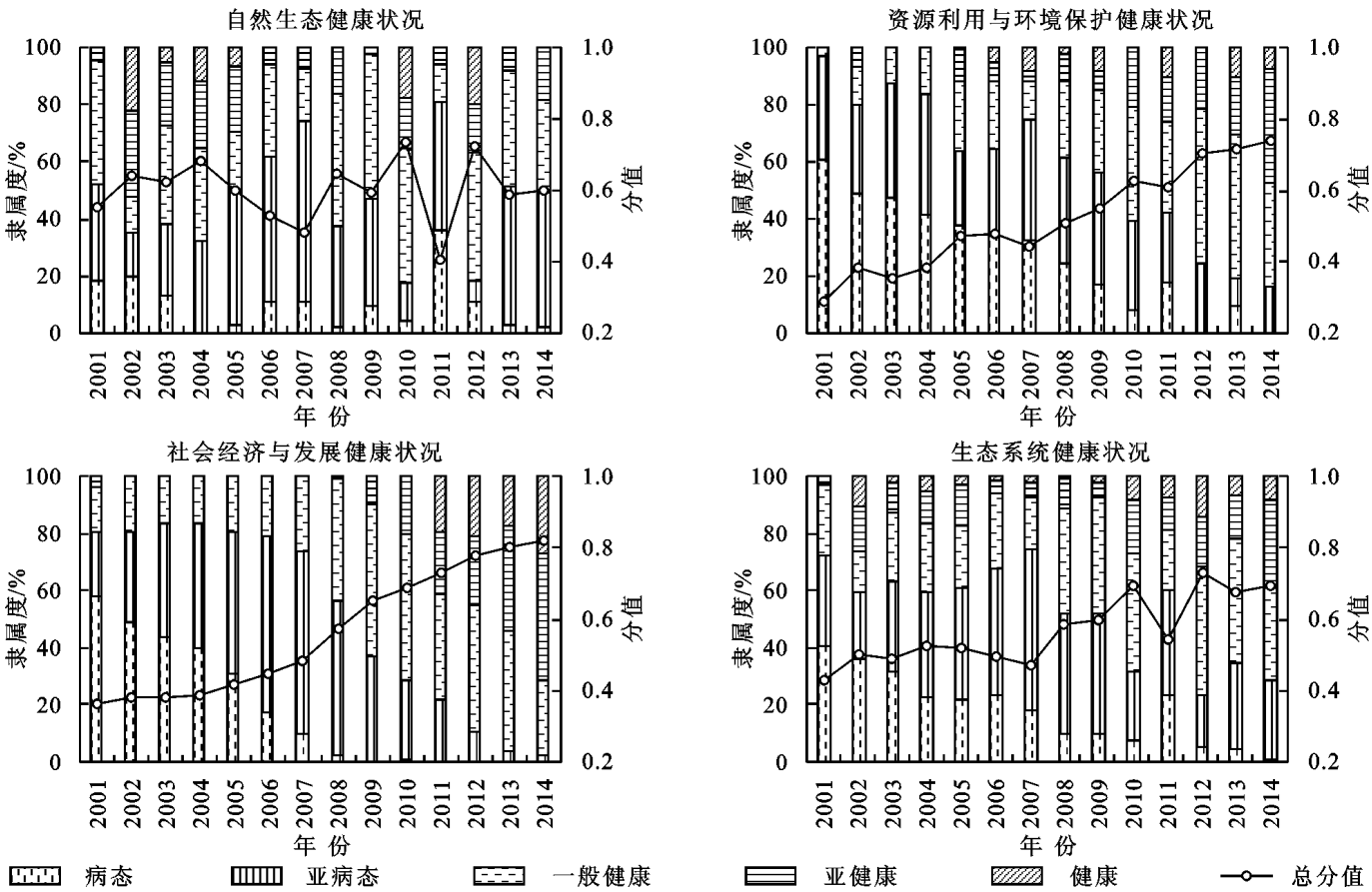


图 3 2001—2014 年各标准层及生态系统综合健康隶属状况及指数值变化

(2) 自然生态条件长期处于波动状态,降水和水文的变化是关键影响因素。该地区产水系数历年来均在 0.45~0.5 左右,区域降水和分泄长江来水是该地区水资源的重要补给来源,也是影响河流断流、输沙量减少的关键因素(2001—2014 年三口河网地区产水系数、长江来水量及年输沙量见表 5)。三峡工程建成以来,三口分流分沙呈减少趋势,1959—2000 年长江三口入境水量平均值为 922.67 亿 m<sup>3</sup>,工程运行后历年均值仅为 482.8 亿 m<sup>3</sup>。河流断流几率增加、输沙量减少,这些因素的综合作用在一定程度上制约了该地区自然生态系统健康发展。数据显示 2007 年自然生态指数得分为 0.472,处于亚健康,是 2001—2010 年 10 年间的最低值。与自然生态条件

同样处于亚病态的 2006 年相比当年河流断流几率、年输沙量以及建成区绿化覆盖率略优(2007 年这三项数值分别为 45.37%,1 329.90 万 t,31.1%;2006 年分别为 55.61%,162.03 万 t,30.9%),但降水量较少(2007 年为 1 035 mm;2006 年为 1 250 mm),水旱灾成灾率较高(2007 年为 27%;2006 年为 16%),可见降水和水文对于自然生态健康影响作用之大。同样,2011 年三口河网地区年均降水量仅为 893.33 mm(病态),比 2010 年减少了 44%,远低于 2001—2014 年的平均值 1 353.54 mm,人均水资源占有量为 667.65 m<sup>3</sup>/a(亚健康),比 2010 年减少 45%,水旱灾成灾率高达 31.1%(病态),输沙量也仅为 148.402 万 t,处于亚健康,远低于 2001—2014 年的平均值 1 463.53 万 t,当年自然生态指数

得分为 0.405,处于病态和亚病态的临界点处,是 2010 年以后分值最低的一年。

(3) 资源利用与环境保护发展势头较好,但水资源开发利用率高。近 14 a 来荆南三口河网地区在环保投资、节能降耗等方面稳步提升,污水处理率 2001 年仅为 31.88%,到 2014 年达到 87.43%;水田实灌平均用水量由 2001 年为 9 664.1 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup> 减少到 2014 年的 6 289.8 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>;水利、环境和公共设施管理业投资

占 GDP 比也由 2001 年的 0.48% 增长到 2014 年的 9.43%;单位 GDP 能耗由 2001 年的 1.638 降低到 2014 年的 0.637(根据《节能减排“十二五”规划》,到 2015 年全国万元国内生产总值能耗应下降到 0.869 t 标准煤,以此为标准,荆南三口河网地区已经达到要求)。同时,公共生态用水占比情况从病态提升到健康状态,其他 3 项指标均从病态提升到一般健康与亚健康临界处,资源利用与环境保护状况逐步改善。

表 5 2001—2014 年三口河网地区产水系数、长江来水量及年输沙量

项目	2001 年	2002 年	2003 年	2004 年	2005 年	2006 年	2007 年
产水系数	0.50	0.48	0.56	0.50	0.44	0.43	0.45
长江来水量/亿 m <sup>3</sup>	493.10	571.50	568.80	524.30	643.30	182.60	543.60
年输沙量/万 t	4595.00	3640.00	2050.10	1443.40	2334.48	162.03	1329.90
项目	2008 年	2009 年	2010 年	2011 年	2012 年	2013 年	2014 年
产水系数	0.43	0.46	0.40	0.47	0.42	0.47	0.45
长江来水量/亿 m <sup>3</sup>	528.40	444.90	565.90	258.50	653.40	396.90	553.60
年输沙量/万 t	732.68	827.01	928.00	148.40	1243.80	647.72	406.94

虽然近年来相关部门对该地区生态环境建设非常重视,但仍存在一些问题。一直以来该地区总用水量稳定在 10 亿 m<sup>3</sup> 左右,其中 2001—2014 年用水量均值为 9.87 亿 m<sup>3</sup>,人均用水量 481.39 m<sup>3</sup>,高于湖南省均值 471.21 m<sup>3</sup>,可见水资源开发利用率高且开发利用率与该地区水资源量大小密切相关。该地区虽河网密布,但近年来三口河道淤积与三峡水利枢纽的运行使得三口分流锐减,然而该地区长期以来水资源开发利用率偏高,资源性缺水日益突出,加之区内血吸虫有死灰复燃的趋势,这些因素共同作用下造成资源性、水质性、工程性等复合型缺水。荆南三口河网地区长期以来都是湖南省重要的农产品基地,人均耕地资源相对充裕虽然对区域生态系统整体而言具有突出的正面效应,但耕地面积范围广必然提出较高的用水要求,而该区域极低的森林覆盖率,对水源涵养及水土保持带来的负面影响,叠加三峡工程运行后水资源补给锐减、河流淤积断流等问题,必然使得区域水资源供给面临巨大压力。因此,应进一步做好水资源开发利用和优化配置工作,优先保护饮用水源,加强植树造林,减少水土流失;充分挖掘现有工程潜力,针对区域内部实际情况对原提灌泵站机电设备进行改造,提高水泵扬程;建设平原水库,提高区域蓄水能力;增建引水工程,通过疏挖进口河段,降低通流水位,从而增加枯水季节长江来水;推动各行业、部门结合技术改造和产品更新换代提高节水水平,工程措施、生态措施及管理措施并举,不断提高区域水资源保障能力和用水效益。

(4) 社会经济发展水平稳步提升,城乡收入差距依然偏大。2001 年该地区社会经济发展指数得分为 0.357,处于病态;2005 年得分为 0.411,提升到亚健康;2009 年进一步提高到 0.651,步入一般健康水平;2014 年得分为 0.812,隶属于亚健康状态。14 年来,该地区不断推进产业优化和转型,二三产业产值占比从 2001 年的 54.2% 增长到 2014 年的 76.2%;华容、南县、安乡 3 县平均生产总值和人均 GDP 分别从 2001 年的 29.44 亿元和 4 476.9 元增长到 2014 年的 197.67 亿元和 29 617 元。近年来荆南三口河网地区社会经济发展成果显著,社会基础服务体系不断完善,城乡居民收入逐年增长,但城镇居民人均可支配收入明显低于湖南省平均水平,城乡居民收入比总体处于轻微的波动递减状态,但其比值仍然高达 1.89,城乡二元化结构依然存在,城镇建设用地粗放,人均建设用地面积远高于湖南省平均水平。因此荆南三口河网地区城市化质量还有待提升,政府相关部门应该妥善处理好城乡生产要素的流动关系,提高生活质量,缩小城乡差距,使生态系统整体健康可持续运转。

3 结论与讨论

基于生态系统健康的内涵,运用模糊综合评判法对 2001—2014 年长江中游荆南三口河网地区生态系统健康状况进行评价分析,研究发现:2001 年以来荆南三口河网地区生态系统健康水平呈波动上升趋势,指数值由 2001 年的 0.423 提高到 2014 年的 0.684,健康状态由亚健康发展到一般健康状态。但各要素发

展不均衡,资源利用与环境保护和社会经济发展水平显著提升,健康指数分别由2001年的0.284,0.357提高到2014年的0.737,0.812,由病态分别发展到一般健康和亚健康状态;受区域降水和长江来水双重影响,荆南三口河网地区水文水资源情势复杂,其年均降水量、人均水资源占有量、河流断流几率均有较大起伏波动,三峡水库运行后(2003—2014年)水旱灾害成灾率有所下降,但年输沙量大幅锐减,这些因素综合作用下自然生态健康指数长期在0.6上下波动,健康状态在亚病态和一般健康之间交替变化,较弱的自然生态条件,尤其是水资源条件是关键性制约因素,应从科学合理开发及优化配置水资源、增强水资源保障能力着手,提高地区生态系统健康水平。

生态系统整体的健康状况受诸多因素影响,且各因素之间关系错综复杂,本文从自然生态、资源利用与环境保护、社会经济与发展三方面对构建生态系统健康评价指标体系,实证研究结构能够较好地切合荆南三口河网地区生态系统发展的实际状况,从而为地区社会经济与自然生态环境协调发展提供有效依据。需要指出的是,由于部分统计资料难以获得,本文建立的指标体系还有待完善,特别是水域面积、水系结构、水质以及生物多样性方面的数据有待补充。此外,模糊综合评判的结论的正确与否很大程度上取决于标准值确定的科学性,在合理界定标准值这个问题上还有待进一步探讨。

#### 参考文献:

- [1] 刘永,郭怀成. 湖泊一流域生态系统管理研究[M]. 北京:科学出版社,2010.
- [2] 于志慧,许有鹏,张媛,等. 基于熵权物元模型的城市化地区河流健康评价分析:以湖州市区不同城市化水平下的河流为例[J]. 环境科学学报,2014,34(12):3188-3193.
- [3] Fore L S, Karr J R, Wisseman R W. Assessing invertebrate responses to human activities: Evaluating alternative approaches[J]. Journal of the North American Benthological Society, 1996,15(2):212-231.
- [4] Rapport D J. What constitutes ecosystem health[J]. Perspectives in Biology & Medicine, 2015,33(1):120-132.
- [5] Rapport D J, Costanza R, McMichael A J. Assessing ecosystem health[J]. Trends in Ecology & Evolution, 1998,13(10):397-402.
- [6] Hezri A A, Dovers S R. Sustainability indicators, policy and governance: Issues for ecological economics [J]. Ecological Economics, 2007,60(1):86-99.
- [7] 刘焱序,彭建,汪安,等. 生态系统健康研究进展[J]. 生态学报,2015,35(18):5920-5930.
- [8] 肖风劲,欧阳华. 生态系统健康及其评价指标和方法[J]. 自然资源学报,2002,17(2):203-209.
- [9] Chen M X, Huang Y B, Tang Z P. The provincial pattern of the relationship between urbanization and economic development in China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2014,24(1):33-45.
- [10] 罗跃初,周忠轩,孙轶,等. 流域生态系统健康评价方法[J]. 生态学报,2003,23(8):1606-1614.
- [11] 张华,骆永明. 美国流域生态健康评价体系的发展和实践[J]. 应用生态学报,2013,24(7):2063-2072.
- [12] 朱卫红,郭艳丽,孙鹏,等. 图们江下游湿地生态系统健康评价[J]. 生态学报,2012,32(21):6609-6618.
- [13] 付爱红,陈亚宁,李卫红. 基于层次分析法的塔里木河流域生态系统健康评价[J]. 资源科学,2009,31(9):1535-1544.
- [14] 马牧源,刘静玲,杨志峰,等. 生物膜法应用于海河流域湿地生态系统健康评价展望[J]. 环境科学学报,2010,30(2):226-236.
- [15] 牛明香,王俊,徐宾铎. 基于PSR的黄河河口区生态系统健康评价[J]. 生态学报,2017,37(3):1-10.
- [16] 许文杰,许士国. 湖泊生态系统健康评价的熵权综合健康指数法[J]. 水土保持研究,2008,15(1):125-127.
- [17] 李双江,罗晓,胡亚妮. 快速城市化进程中石家庄城市生态系统健康评价[J]. 水土保持研究,2012,19(3):245-249.
- [18] 李建国,刘金萍,刘丽丽,等. 基于灰色极大熵原理的三峡库区(重庆段)生态系统健康评价[J]. 环境科学学报,2010,30(11):2344-2352.
- [19] 段玮娟,王旭,史璇. 洞庭湖三口河系地区水环境演变趋势研究[J]. 长江流域资源与环境,2012,21(S2):132-137.
- [20] 章穗,张梅,迟国泰. 基于熵权法的科学技术评价模型及其实证研究[J]. 管理学报,2010,7(1):34-42.
- [21] 李静芝,朱翔,李景保,等. 洞庭湖区城镇化进程与水资源利用的关系[J]. 应用生态学报,2013,24(6):1677-1685.
- [22] 于志慧,许有鹏,张媛,等. 基于熵权物元模型的城市化地区河流健康评价分析:以湖州市区不同城市化水平下的河流为例[J]. 环境科学学报,2014,34(12):3188-3193.
- [23] 李朝霞,岳彩云. 西藏河流健康评价体系与标准[J]. 兰州大学学报:自然科学版,2012,48(6):26-31.
- [24] 李景保,蒋文杰,李雅婷. 三峡水库运行对长江荆南三口生态系统健康的影响[J]. 湖南师范大学自然科学学报,2016,39(5):1-8.