

长江经济带生态系统健康正态云模型构建及其诊断

曹鑫^{1,3}, 官冬杰^{1,2}, 贺光秀¹, 姚尧¹, 王瑞兵¹, 李婕¹

(1.重庆交通大学 建筑与城市规划学院, 重庆 400074; 2.重庆交通大学 省部共建山区桥梁及隧道工程国家重点实验室, 重庆 400074; 3.首都师范大学 城市环境过程和数字模拟国家重点实验室培育基地, 北京 100048)

摘要: [目的] 对作为国家重大战略发展区域之一的长江经济带的生态系统健康状况进行诊断, 为推进区域生态与经济社会的协调发展提供科学依据。[方法] ①以长江经济带城市群为研究对象, 从活力、组织结构、恢复力、生态系统服务和人群健康 5 个维度出发, 构建长江经济带生态系统健康诊断指标体系; ②根据生态系统健康标准将其划分为病态、不健康、亚健康、健康和很健康 5 个等级, 并基于熵权法确定诊断指标权重; ③构建正态云模型, 对长江经济带 2000、2009、2018 年生态系统健康状况进行综合诊断。[结果] 从 2000 年至 2018 年, 长江经济带无论从整体还是省市层面上的生态系统健康等级均有所提升, 2018 年底整个研究区的生态系统健康状况普遍已趋于亚健康水准。[结论] 人口密度、人均可支配收入、人均耕地面积和人均地区 GDP 是影响长江经济带生态系统健康的主要因素。因此, 关注人口发展规划, 提高人均可支配收入, 严守耕地红线, 注重城市科学健康扩张, 耦合经济发展和生态保护的关系尤为重要。

关键词: 长江经济带; 生态系统健康诊断; 熵权法; 正态云模型

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2021)05-0206-12

中图分类号: X171.1, X826

文献参数: 曹鑫, 官冬杰, 贺光秀, 等. 长江经济带生态系统健康正态云模型构建及其诊断[J]. 水土保持通报, 2021, 41(5): 206-217. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.05.028; Cao Xin, Guan Dongjie, He Guangxiu, et al. Construction and diagnosis of a normal cloud model of ecosystem health in Yangtze River economic belt [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(5): 206-217.

Construction and Diagnosis of a Normal Cloud Model of Ecosystem Health in Yangtze River Economic Belt

Cao Xin^{1,3}, Guan Dongjie^{1,2}, He Guangxiu¹, Yao Yao¹, Wang Ruibing¹, Li Jie¹

(1.College of Architecture and Urban Planning, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2.State Key Laboratory of Mountain Bridge and Tunnel Engineering Co-built by Provincial Government and the

Ministry of Transport, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 3.National Key Laboratory of

Urban Environmental Process and Digital Simulation Cultivation Base, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: [Objective] The health of the ecosystem of the Yangtze River economic belt, one of the major strategic development regions of China, was diagnosed in order to provide a scientific basis for promoting the coordinated development of the regional ecology and economic society. [Methods] ① The urban agglomerations of the Yangtze River economic belt were taken as the research area. Starting from the five dimensions of vitality, organizational structure, resilience, ecosystem services, and population health, an ecosystem health diagnostic index system for the Yangtze River economic belt was constructed. ② According to ecosystem health standards, the area was divided into the following five levels: sickness, unhealthy, sub-healthy, healthy, and very healthy. Diagnostic index weights were then determined based on the entropy weight method. ③ A normal cloud model was constructed to comprehensively diagnose the health of the ecosystem of the Yangtze River economic belt in 2000, 2009, and 2018. [Results] From 2000 to 2018, the ecosystem

收稿日期: 2021-05-20

修回日期: 2021-06-14

资助项目: 重庆市教委重点项目(KJZD-K201800702); 重庆市自然科学基金(cstc2020jcyj-jqX0004); 教育部人文社科一般项目(20YJA790016); 重庆交通大学大学生创新训练计划项目(X20200618047)

第一作者: 曹鑫(1999—), 女(汉族), 河南省南阳市人, 硕士研究生, 研究方向为地图学与地理信息系统。Email: cqcaoxin@gmail.com。

通讯作者: 官冬杰(1980—), 女(汉族), 黑龙江省富锦市人, 教授, 博士生导师, 主要从事生态系统服务与可持续发展研究。Email: guandongjie_2000@163.com。

health level along the Yangtze River economic belt had been improved at both the overall level and at the provincial and municipal levels. At the end of 2018, the ecosystem health status of the entire study area had generally tended to the sub-health level. [Conclusion] Population density, per capita disposable income, per capita arable land area, and per capita regional GDP were the main factors affecting the ecosystem health of the Yangtze River economic belt. Therefore, it is particularly important to give attention to population development planning, increase per capita disposable income, strictly observe the red line of arable land, give attention to the scientific and healthy expansion of cities, and couple the relationship between economic development and ecological protection.

Keywords: Yangtze River economic belt; ecosystem health diagnosis; entropy method; normal cloud model

近些年来,随着城镇化进程的加快,长江经济带出现了空气质量恶化、水资源污染、土地资源浪费以及能源消耗过度等一系列生态系统健康问题,直接威胁长江经济带的生态安全及区域经济的可持续发展。而生态系统健康,是指生态系统在保障正常的生态服务功能、满足合理的人类需求的同时,维持自身复杂性和持续发展的能力或状态^[1]。

目前国内外关于生态系统健康领域的总体研究,主要集中在生态系统健康诊断指标体系构建,诊断模型开发及应用。国内方面,在对四川省和珠三角地区生态环境脆弱性的诊断当中,诸如“空间主成分分析法”、“生态敏感性—生态恢复力—生态压力度(SRP)模型”等数学方法和理论模型都被很好地应用其中^[2-3]。国外方面,Kienberger 等^[4]关于“脆弱性立方体”这一理念的提出,也促进了相关领域的理论研究和发 展。随着研究的进一步深入,能够处理多来源、多类型、多尺度数据的方法和技术逐渐被应用到生态环境精准监测和综合决策当中^[5]。此外,依据不同研究 区的地域特征,国内外在生态系统健康诊断研究的各个具体领域也均有建树。国内方面,在对东北地区泥炭地 的水文生态系统健康状况诊断时,研究人员充分采纳了分布 式水文系统模拟软件 MIKE SHE 所构建的生态水文模型所 反映的拟合结果,建立对应的“水位盈亏指数”^[6];在新疆艾 比湖流域,研究在充分结合新疆艾比湖流域草地生态环 境健康现状的基础上,基于“压力—状态—响应(PSR)模 型”,对该区域的草地生态系统健康状况进行诊断^[7]。国外 方面,如对印度南古吉拉特邦海岸地区生态环境状况的 研究当中,部分学者借助层次分析法,从物理脆弱性和社 会经济变量两个维度出发构建了生态系统健康诊断指 标体系,并赋予权重分数,对印度南古吉拉特邦海岸地 区的生态环境脆弱性进行了诊断及诊断^[8]。

长江经济带作为中国生态文明建设的先行示范带,其生态系统健康问题一直备受 关注。部分研究人员基于程序化扎根理论,借助质性分析软件 NVIVO12 对长江经济带生态保护与高质量发展之间所蕴含的

内部关系进行分析,并提出相应举措^[9]。然而到目前为止,长江流域沿线的生态一体化建设还停留在以跨区域、多政府主体为架构的制度摸索阶段,这需要跨省市、跨部门单位的多方主体协商共治才能有所成效^[10]。近年来,国家的多项重大会议均强调了构建生态文明体系和促进经济社会发展全面绿色化转型的重要性,为此各地也逐步开始制定并实施最为严格的生态环境保护政策,为促进长江经济带生态环境和经济社会协同发展乃至实现美丽中国的重要保障^[11]。

本文以长江经济带为研究对象,选取 2000, 2009, 2018 年 3 个时间节点,从生态系统健康诊断的不同维度出发,建立一套相对完整的生态系统健康诊断指标体系。在此基础上,通过熵权法、正态云模型及模糊矩阵等方法的综合应用,得出综合诊断结果,以期为保障长江经济带新型城镇化建设的平稳运行及推动区域内生态环境保护的科学化、规范化实施提供科学依据。

1 研究区域及数据来源

长江经济带横跨中国东部、中部和西部 3 大区域,总面积约 $2.05 \times 10^6 \text{ km}^2$,占全国面积的 21.4%,覆盖了上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、云南、贵州 11 个省市。截止 2018 年末,长江经济带总人口和地区生产总值均占全国 40% 以上,依托长江黄金水道优越的地理位置、丰富的自然资源 and 人才资源以及雄厚的经济基础,其已发展成为中国综合实际最强、战略支撑作用最大的区域之一。由于长江经济带本身具有的生态脆弱性和经济发展不平衡性,对长江经济带的生态系统健康状况进行诊断尤为重要。

研究数据主要来源于 2001, 2010, 2019 年长江经济带各省市统计年鉴、中国统计年鉴、中国生态环境状况公报、住建部文书及公告、中国国民经济和社会发展公报等相关资料。

2 长江经济带生态系统的健康诊断模型构建

2.1 长江经济带生态系统健康诊断指标体系的构建

对于城市生态系统健康诊断所使用的指标在国内外文献中并没有较为统一的说法,目前较为普遍的方法是通过生态系统的活力、组织结构、恢复力、生态系统服务功能的维持、管理选择、外部输入减少、对邻近系统的影响以及人类健康影响等 8 个方面来衡量生态系统的健康状况,本文将自然生态系统健康状况评价引申到城市生态系统中,从影响城市生态系统的自然、人文和经济等角度出发^[12]。

根据综合性、代表性、可比性和可操作性的原则,结合城市生态系统健康诊断指标体系,参考相关学者

的研究成果,基于长江经济带地域特色,选择活力、组织力、恢复力、生态系统服务功能和人群健康状况作为诊断的 5 个主要要素^[13]。并且结合长江经济带的实际情况,针对每一个要素所涵盖的内容,参照城市可持续发展指标、生态城市指标等,考虑生态系统的服务功能,通过文献资料法等方法构建长江经济带生态系统健康诊断指标体系^[14]。

另外,为了减少主观性,增强研究结果的科学性和合理性,本文运用 SPSS 软件对数据进行处理,通过主成分分析法,依照贡献率排序,从初始指标中筛选出 24 个最有价值的指标,确定城市生态系统健康状况诊断指标体系^[11]。长江经济带生态健康诊断指标体系划分为 5 个主要要素,13 个因素,共涵盖 24 个指标(表 1)。

表 1 长江经济带生态系统健康诊断指标体系及诊断标准

目标层	准则层	指标层	诊断标准					指标类别	参考依据
			病态(I)	不健康(II)	亚健康(III)	健康(IV)	很健康(V)		
长江经济带生态系统健康诊断指标体系	活力(V)	人均地区 GDP X_1 (10 ⁴ 元/人)	<0.7	0.7~4.0	4.0~8.0	8.0~12.0	>12.0	+	⑤
		年 GDP 增长率 X_2 /%	<2	2~6	6~8	8~10	>10	+	④
		单位 GDP 能耗 X_3 (t/10 ⁴ 元,以标煤计)	>2	1.5~2	1~1.5	0.5~1	<0.5	-	⑤
		COD 排放量 X_4 /10 ⁴ t	>12	10~12	8~10	6~8	<6	-	⑧
		单位播种面积农药使用量 X_5 / (t · hm ⁻²)	>0.06	0.02~0.06	0.01~0.02	0.005~0.01	<0.005	-	⑧
		人均公共绿化面积 X_6 (m ² /人)	<7	7~10	10~16	16~20	>20	+	⑤
	组织结构(O)	森林覆盖率 X_7 /%	<20	20~30	30~40	40~50	>50	+	⑤
		人均耕地面积 X_8 (hm ² /人)	<0.05	0.05~0.1	0.1~0.15	0.15~0.2	>0.2	+	④
		建设用地比重 X_9 /%	>20	15~20	10~15	5~10	<5	-	⑧
		人口自然增长率 X_{10} /%	>1.1	0.9~1.1	0.7~0.9	0.5~0.7	<0.5	-	②
		人口密度 X_{11} / (人 · km ⁻²)	<300	300~600	600~1 000	1 000~2 000	>2 000	+	⑧
		第三产业占 GDP 比重 X_{12} /%	<30	30~40	40~60	60~80	>80	+	⑥
	恢复力(R)	城镇登记失业率 X_{13} /%	>48	36~48	30~36	12~30	<12	-	④
		城市污水处理率 X_{14} /%	<40	40~50	50~65	65~80	>80	+	①
		生活垃圾无害化处理率 X_{15} /%	<30	30~50	50~70	70~90	>90	+	①
		环境污染治理投资总额占 GDP 比重 X_{16} /%	<0.5	0.5~1	1~1.5	1.5~2.5	>2.5	+	⑤
		自然保护区面积比例 X_{17} /%	<3	3~6	6~9	9~15	>15	+	⑤
		人均粮食占有量 X_{18} (kg/人)	<500	500~700	700~800	800~1 000	>1 000	+	②
	生态系统服务(S)	区域昼间平均等效噪声 X_{19} /分贝	>75	60~75	50~60	45~50	<45	-	⑤
		空气质量好于二级以上天数 X_{20} /%	<20	20~40	40~60	60~80	>80	+	⑤
	人群健康(P)	人均可支配收入 X_{21} /元	<4 500	4 500~8 000	8 000~12 000	12 000~16 000	>16 000	+	③
		万人拥有执业(助理)医师人数 X_{22} (人/10 ⁴ 人)	<55	55~75	75~95	95~100	>100	+	③
		死亡率 X_{23} /%	>15	12~15	10~12	8~10	<8	-	③
		万人拥有高等学历人数 X_{24} (人/10 ⁴ 人)	<360	360~580	580~1 000	1 000~1 500	>1 500	+	④

注:①参照国家城市考核指标标准;②参照国际发达国家城市建设标准;③参照国内城市建设最佳值或较好值;④参照国内城市发展现状;⑤参照国家环保总局颁布的生态县、生态市、生态省建设指标(试行)标准;⑥参照中等发达国家的标准值;⑦参照国际大都市的平均值;⑧参照已有文献研究。

2.2 熵权法确定指标权重

诊断指标所占的权重直接影响着最终诊断结果,目前确定指标权重的方法主要有 Delphi 法、层次分析

法、均方差法和熵权法等。其中,Delphi 法、层次分析法主观性较强,权重结果中人为因素起的作用较大,而熵权法是根据各指标的熵值所提供的信息量的大小来决

定指标权重的方法,具有较强的客观性,在一定程度上避免了人为的主观臆断,使诊断结果合理并具有说服

力,因此本研究中选取熵权法作为确定指标体系权重的方法^[15-16]。诊断指标权重结果如表 2 所示。

表 2 长江经济带生态系统健康诊断指标权重

活力 V (W ₁ =0.201 6)		组织结构 O (W ₁ =0.374 2)		恢复力 R (W ₁ =0.111 6)		生态系统服务 S (W ₁ =0.202 2)		人群健康 P (W ₁ =0.110 6)	
指标	权重	指标	权重	指标	权重	指标	权重	指标	权重
X ₁	0.080 8	X ₇	0.033 0	X ₁₄	0.020 3	X ₁₈	0.025 0	X ₂₂	0.040 0
X ₂	0.017 3	X ₈	0.087 5	X ₁₅	0.019 1	X ₁₉	0.020 0	X ₂₃	0.035 1
X ₃	0.019 0	X ₉	0.015 0	X ₁₆	0.030 7	X ₂₀	0.061 9	X ₂₄	0.035 4
X ₄	0.043 1	X ₁₀	0.045 2	X ₁₇	0.041 5	X ₂₁	0.095 2		
X ₅	0.019 9	X ₁₁	0.141 2						
X ₆	0.021 5	X ₁₂	0.029 6						
		X ₁₃	0.022 7						

注: X₁—X₂₄为不同健康诊断指标,具体含义见表 1。下同。

由表 2 中各诊断指标的权重可以看出,人口密度(0.141 2)、人均可支配收入(0.095 2)、人均耕地面积(0.087 5)、人均地区 GDP(0.080 8)所占的比重较大,表明人口密度、人均可支配收入、人均耕地面积、人均地区 GDP 是影响长江经济带生态系统健康的主要因素;且这 4 个指标都是正向指标,表明它们的值越大,长江经济带生态系统越健康。生活垃圾无害化处理率(0.019 1)、单位 GDP 能耗(0.019 0)、年 GDP 增长率(0.017 3)、建设用地比重(0.015 0)所占的比重较小,表明这四者对长江经济带生态系统健康的影响程度相对较小;其中单位 GDP 能耗、建设用地比重是负向指标,表明单位 GDP 能耗和建设用地比重越大,长江经济带生态系统健康状况越差。

2.3 长江经济带生态系统健康诊断等级判定

长江经济带生态系统健康诊断指标确定后,需要明确各项指标的健康标准,才能对生态系统的健康状况进行诊断^[17]。针对 5 个要素所涵盖的内容提出相应的诊断指标,把生态医学理论用于生态系统健康诊断,将生态系统健康状况划分为病态、不健康、亚健康、健康、很健康 5 级。参考国内外公认的生态城市、健康城市、园林城市、环保城市的建议值作为很健康的标准值,将《中国城市年鉴》中城市同类指标的全国最低值作为病态的限定值,在前者的基础上向下浮动 20%作为健康和亚健康的标准值,在后者基础上向上浮动 20%作为不健康和亚健康的标准值,前后两次确定的亚健康标准值相互调整得到最终值^[12,18-19](表 1)。

2.4 正态云模型构建

正态云模型是李德毅等^[18]于 1995 年提出的一种模糊数学模型,有利于解决概念的随机性和模糊性问题,实现定性和定量概念之间的不确定性转换。首先,计算每个指标不同级别的隶属度,其次,根据正态

云模型的最大隶属度原理确定每个指标对应的诊断等级。鉴于区域生态健康诊断定量过程的模糊性和随机性,利用云的 E_x, E_n, H_e 这 3 个数值特征可以计算出云滴,重复计算多次产生的云滴就构成了云图^[20]。本文在正态云模型的基础上建立了长江经济带生态系统健康诊断模型,具体步骤如下:

(1) 构建生态系统健康状况诊断的因素集为 $A = \{a_1, a_2, a_3, \dots, a_n\}$, 诊断集为 $B = \{b_1, b_2, b_3, \dots, b_m\}$ 。

(2) 建立模糊关系矩阵 R 。 R 中元素 r_{ij} 表示诊断对象因素集 A 中第 i 个元素对于诊断集中第 j 个等级的隶属度。由云模型的概念,可求云滴的特征值 (E_x, E_n, H_e) 。

设定诊断等级数值上下限,由于单一诊断客体在两个诊断等级之间存在模糊性,因此:

$$E_{xij} = (x_{ij}^1 + x_{ij}^2) / 2 \tag{1}$$

式中: i 为各项诊断指标; j 为对应的诊断等级; E_{xij} 为期望; x_{ij}^1 和 x_{ij}^2 为各诊断指标对应诊断等级区间的上下限。参数 i 的隶属度的上下边界值是从两种等级之间过渡的中间值,应同属于相邻两种等级,由此:

$$\exp\left[-\frac{(x_{ij}^1 - x_{ij}^2)}{8(E_{nij})^2}\right] = 0.5 \tag{2}$$

$$E_{nij} = |x_{ij}^1 - x_{ij}^2| / 2.355 \tag{3}$$

$$H_e = k \tag{4}$$

式中: E_{nij} 为对应诊断指标在当前诊断等级下的熵。

超熵 H_e 表示云滴的汇集程度或离散程度,在云模型的云滴中表现为云的厚度。超熵取值由多次试验所得,本研究超熵取值为 0.1^[21]。

(3) 建立隶属度矩阵 U 。对于每个待诊断对象,根据各指标的数据,利用正向云发生器,由公式 $\mu_i = \exp\left(-\frac{(x_i - E_x)^2}{2E_x'^2}\right)$ 确定指标 i 对应诊断等级 j 的隶

隶属度 μ_{ij} , 构成隶属度矩阵 $U = (\mu_{ij})_{n \times m}$ 。

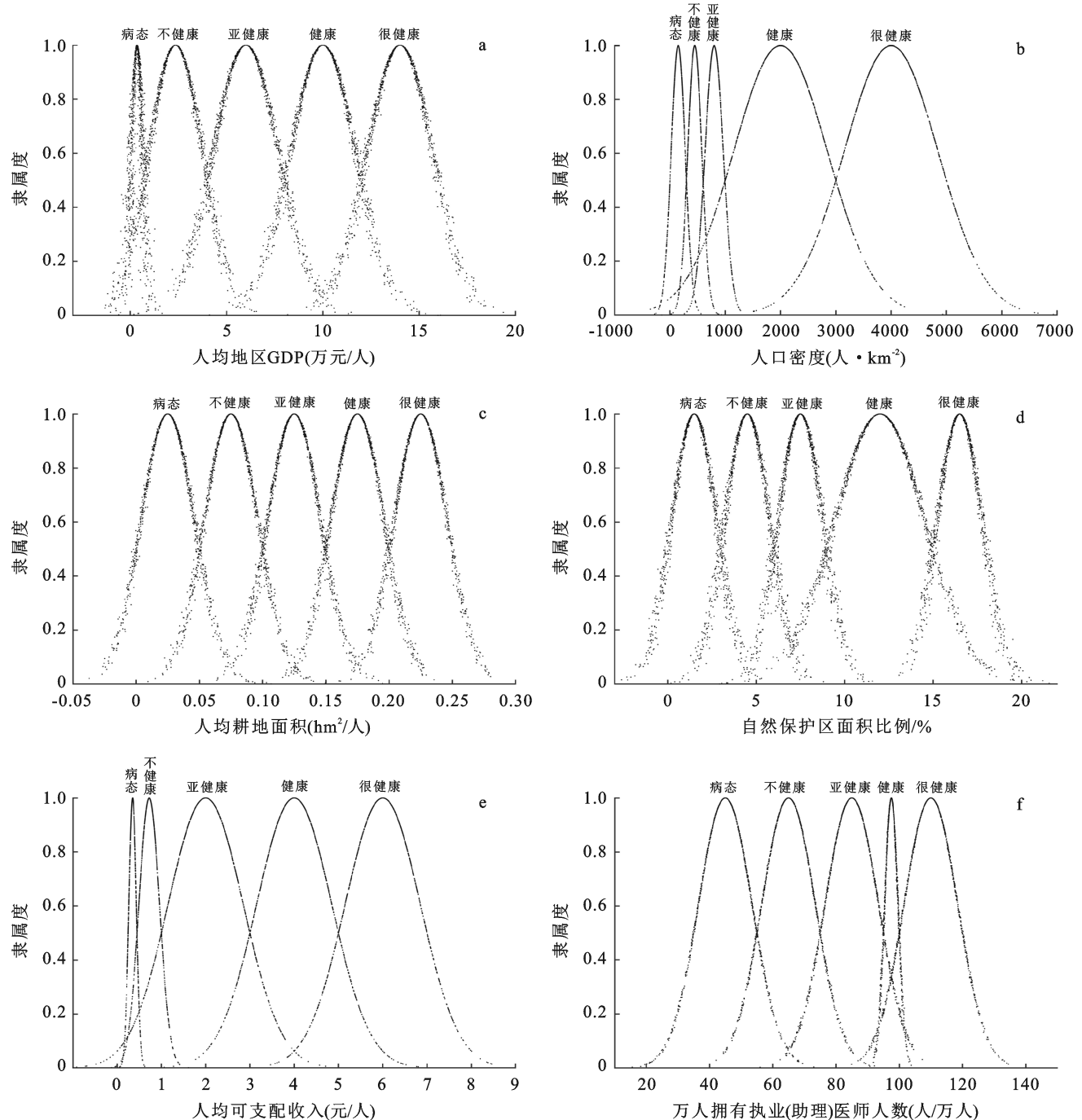
(4) 利用权重向量 W 与隶属度矩阵 U 进行模糊转换得出诊断集 B 上的模糊子集 C 。

$$C = WU = (c_1, c_2, c_3, \dots, c_m) \quad (5)$$

式中: $c_j = \sum_{i=1}^n w_j \mu_{ij}$ ($j = 1, 2, 3, \dots, m$), 表示待诊断对象指标 i 对第 j 条评语的隶属度指标 i 对第 j 条评语的隶属度。再根据最大隶属度原则, 选择最大隶属度

对应的等级作为生态系统健康诊断的综合诊断结果。

根据表 3 中各指标对应各等级的隶属云, 通过 MATLAB 2019a 软件编程, 可以得到各诊断指标的正态云图。限于篇幅, 本文根据表 1, 从每个子系统中选择一些权重较高的指标, 以人均地区 GDP 值、人口密度、人均耕地面积、自然保护区面积比例、人均可支配收入和万人拥有执业(助理)医师人数的正态云图为例(图 1)。



注: a 为 人均地区 GDP 正态云模型; b 为 人口密度正态云模型; c 为 人均耕地面积正态云模型; d 为 自然保护区面积比例正态云模型; e 为 人均可支配收入正态云模型; f 为 万人拥有执业(助理)医师人数正态云模型。

图 1 长江经济带生态系统健康正态云模型图(部分)

表 3 长江经济带生态系统健康不同等级正态云隶属度(E_x, E_n, H_e)

诊断指标	病态(I)	不健康(II)	亚健康(III)	健康(IV)	很健康(V)
X_1	(0.35,0.297 2,0.1)	(2.35,1.401 3,0.1)	(6,1.698 5,0.1)	(10,1.698 5,0.1)	(14,1.698 5,0.1)
X_2	(1,0.849 3,0.1)	(4,1.698 5,0.1)	(7,0.849 3,0.1)	(9,0.849 3,0.1)	(11,0.849 3,0.1)
X_3	(2.25,0.212 3,0.1)	(1.75,0.212 3,0.1)	(1.25,0.212 3,0.1)	(0.75,0.212 3,0.1)	(0.25,0.212 3,0.1)
X_4	(13,0.849 3,0.1)	(11,0.849 3,0.1)	(9,0.849 3,0.1)	(7,0.849 3,0.1)	(5,0.849 3,0.1)
X_5	(0.07,0.008 5,0.1)	(0.04,0.107 0,0.1)	(0.015,0.004 2,0.1)	(0.007 5,0.002 1,0.1)	(0.002 5,0.002 1,0.1)
X_6	(3.5,2.972 4,0.1)	(8.5,1.273 9,0.1)	(13,2.547 8,0.1)	(18,1.698 5,0.1)	(22,1.698 5,0.1)
X_7	(15,4.246 3,0.1)	(25,4.246 3,0.1)	(35,4.246 3,0.1)	(45,4.246 3,0.1)	(55,4.246 3,0.1)
X_8	(0.025,0.021 2,0.1)	(0.075,0.021 2,0.1)	(0.125,0.021 2,0.1)	(0.175,0.021 2,0.1)	(0.225,0.021 2,0.1)
X_9	(37.5,6.369 4,0.1)	(25,4.246 3,0.1)	(15,2.123 1,0.1)	(7.5,2.123 1,0.1)	(2.5,2.123 1,0.1)
X_{10}	(1.2,0.084 9,0.1)	(1.0,0.084 9,0.1)	(0.8,0.084 9,0.1)	(0.6,0.084 9,0.1)	(0.4,0.084 9,0.1)
X_{11}	(150,127.388 5,0.1)	(450,127.388 5,0.1)	(800,169.851 4,0.1)	(2 000,849.256 9,0.1)	(4 000,849.256 9,0.1)
X_{12}	(20,8.492 6,0.1)	(35,4.246 3,0.1)	(50,8.492 6,0.1)	(70,8.492 6,0.1)	(90,8.492 6,0.1)
X_{13}	(54,5.095 5,0.1)	(42,5.095 5,0.1)	(33,2.547 8,0.1)	(21,7.643 3,0.1)	(6,5.095 5,0.1)
X_{14}	(30,8.492 6,0.1)	(45,4.246 3,0.1)	(57.5,6.369 4,0.1)	(72.5,6.369 4,0.1)	(90,3.606 2,0.1)
X_{15}	(20,8.492 6,0.1)	(40,8.492 6,0.1)	(60,8.492 6,0.1)	(80,8.492 6,0.1)	(95,4.246 3,0.1)
X_{16}	(0.25,0.212 3,0.1)	(0.75,0.212 3,0.1)	(1.25,0.212 3,0.1)	(2,0.424 6,0.1)	(3,0.424 6,0.1)
X_{17}	(1.5,1.273 9,0.1)	(4.5,1.273 9,0.1)	(7.5,1.273 9,0.1)	(12,2.547 8,0.1)	(16.5,1.273 9,0.1)
X_{18}	(400,84.925 7,0.1)	(600,84.925 7,0.1)	(750,42.462 8,0.1)	(900,84.925 7,0.1)	(1 100,84.925 7,0.1)
X_{19}	(82.5,6.369 4,0.1)	(67.5,6.369 4,0.1)	(55,4.246 3,0.1)	(47.5,2.123 1,0.1)	(37.5,6.369 4,0.1)
X_{20}	(10,8.492 6,0.1)	(30,8.492 6,0.1)	(50,8.492 6,0.1)	(70,8.492 6,0.1)	(90,8.492 6,0.1)
X_{21}	(3 500,849.256 9,0.1)	(7 250,2 335.456 5,0.1)	(20 000,8 492.569 0,0.1)	(40 000,8 492.569 0,0.1)	(60 000,8 492.569 0,0.1)
X_{22}	(45,8.492 6,0.1)	(65,8.492 6,0.1)	(85,8.492 6,0.1)	(97.5,2.123 1,0.1)	(110,8.492 6,0.1)
X_{23}	(16,0.849 3,0.1)	(13.5,1.273 9,0.1)	(11,0.849 3,0.1)	(9,0.849 3,0.1)	(6,1.698 5,0.1)
X_{24}	(230,100.403 4,0.1)	(470,93.418 3,0.1)	(790,178.343 9,0.1)	(1 250,212.314 2,0.1)	(1 750,212.314 2,0.1)

选择 2000,2009,2018 年长江经济带 11 个省市的各项指标数据,并根据步骤(3)代入正向云生成器,确定与各个等级相对应的各项指标的云确定度,建立隶属度矩阵 U 。再根据公式(5),利用各指标的隶属

度矩阵 U 和权重向量 W 进行模糊转换,得到诊断集 B 上的模糊子集 C ,得到综合隶属度,然后根据最大隶属度的原理,选择与最大隶属度相对应的第 j 个诊断等级作为综合诊断结果(表 4)。

表 4 2000,2009,2018 年长江经济带 11 省市生态系统健康等级诊断结果

城市	2000 年各市生态系统健康隶属度					健康等级	2009 年各市生态系统健康隶属度					健康等级	2018 年各市生态系统健康隶属度					健康等级
	I	II	III	IV	V		I	II	III	IV	V		I	II	III	IV	V	
上海	0.132 4	0.235 5	0.217 3	0.232 9	0.250 6	V	0.132 5	0.137 1	0.293 0	0.227 1	0.327 9	V	0.140 1	0.163 4	0.156 0	0.133 6	0.454 0	V
江苏	0.148 7	0.413 7	0.337 8	0.187 1	0.149 8	II	0.178 0	0.298 7	0.447 9	0.151 8	0.170 0	III	0.140 0	0.222 1	0.398 9	0.312 4	0.172 6	III
浙江	0.216 0	0.435 2	0.179 0	0.196 3	0.206 4	II	0.161 3	0.337 8	0.309 2	0.204 4	0.206 2	II	0.136 5	0.234 8	0.301 7	0.250 1	0.298 9	III
安徽	0.266 4	0.501 1	0.198 6	0.217 5	0.131 1	II	0.140 3	0.427 2	0.318 4	0.198 1	0.163 4	II	0.103 9	0.359 2	0.340 3	0.361 5	0.1345	IV
江西	0.419 3	0.324 1	0.154 0	0.133 4	0.180 8	I	0.243 2	0.303 6	0.278 0	0.198 9	0.166 8	II	0.159 2	0.152 7	0.281 8	0.242 0	0.169 2	III
湖北	0.319 5	0.463 2	0.199 0	0.178 3	0.125 0	II	0.232 1	0.362 9	0.293 5	0.173 6	0.166 7	II	0.136 4	0.274 9	0.371 5	0.339 6	0.146 3	III
湖南	0.356 2	0.389 5	0.160 4	0.187 1	0.138 8	II	0.242 7	0.374 2	0.271 1	0.184 8	0.148 8	II	0.177 1	0.319 1	0.266 4	0.309 0	0.159 5	II
重庆	0.302 1	0.409 3	0.187 3	0.168 6	0.164 3	II	0.160 5	0.292 3	0.270 2	0.218 2	0.248 7	II	0.130 0	0.307 1	0.270 1	0.329 6	0.212 9	V
四川	0.382 4	0.329 6	0.192 0	0.199 4	0.163 6	I	0.267 2	0.294 5	0.288 7	0.138 7	0.176 7	II	0.276 7	0.178 1	0.367 9	0.266 0	0.207 3	III
云南	0.372 6	0.370 9	0.199 1	0.102 3	0.172 7	I	0.228 1	0.177 9	0.319 3	0.210 1	0.221 5	III	0.214 2	0.194 3	0.319 6	0.257 9	0.242 1	III
贵州	0.441 4	0.303 2	0.137 3	0.093 1	0.174 0	I	0.258 7	0.203 5	0.277 6	0.178 5	0.226 6	III	0.246 2	0.217 7	0.289 1	0.285 2	0.196 8	III

注:表中 I—V 代表生态系统健康等级(I 为病态; II 为不健康; III 为亚健康; IV 为健康; V 为很健康)。下同。

3 结果与分析

3.1 长江经济带生态系统健康诊断结果

根据构建的正态云模型,对长江经济带生态系统健康进行诊断,并进行等级划分,划分结果见图 2。长江经济带整体生态系统健康状况:2000 年以病态和不健康状态为主,比例为 36.36% 和 54.55%;2009 年以不健康和亚健康状态为主,比例为 63.64% 和 27.27%;2018 年以亚健康和健康状态为主,比例为 63.64% 和 18.18%。

由图 2a,2b,2c 可知,2000 年长江经济带生态系统健康等级呈现出东高西低的空间分布格局,研究区东侧的生态系统健康等级多为不健康,而西侧多为病态。到了 2009 年,这一格局呈现出了研究区东北侧

和西南侧高,其余部分低的新特点,其中东北侧和西南侧多为亚健康,其余部分多为不健康。2018 年,这种内部分异的格局进一步减小,大部分区域达到了亚健康及以上水准。由图 2d 可知,从 2000 年到 2009 年,长江经济带有江苏、江西、四川、云南和贵州共计 5 省市的生态系统健康状况发生了变化,且均为提升,其中变化幅度较大的省市为云南、贵州,其生态系统健康状况由病态变为亚健康,提升了 2 个等级。从 2009 年到 2018 年,长江经济带有浙江、安徽、江西、湖北、重庆、四川共计 6 省市的生态系统健康状况发生了变化,同样均为提升,其中变化幅度较大的省市为安徽、重庆,其生态系统健康状况由不健康变为健康,也提升了 2 个等级。

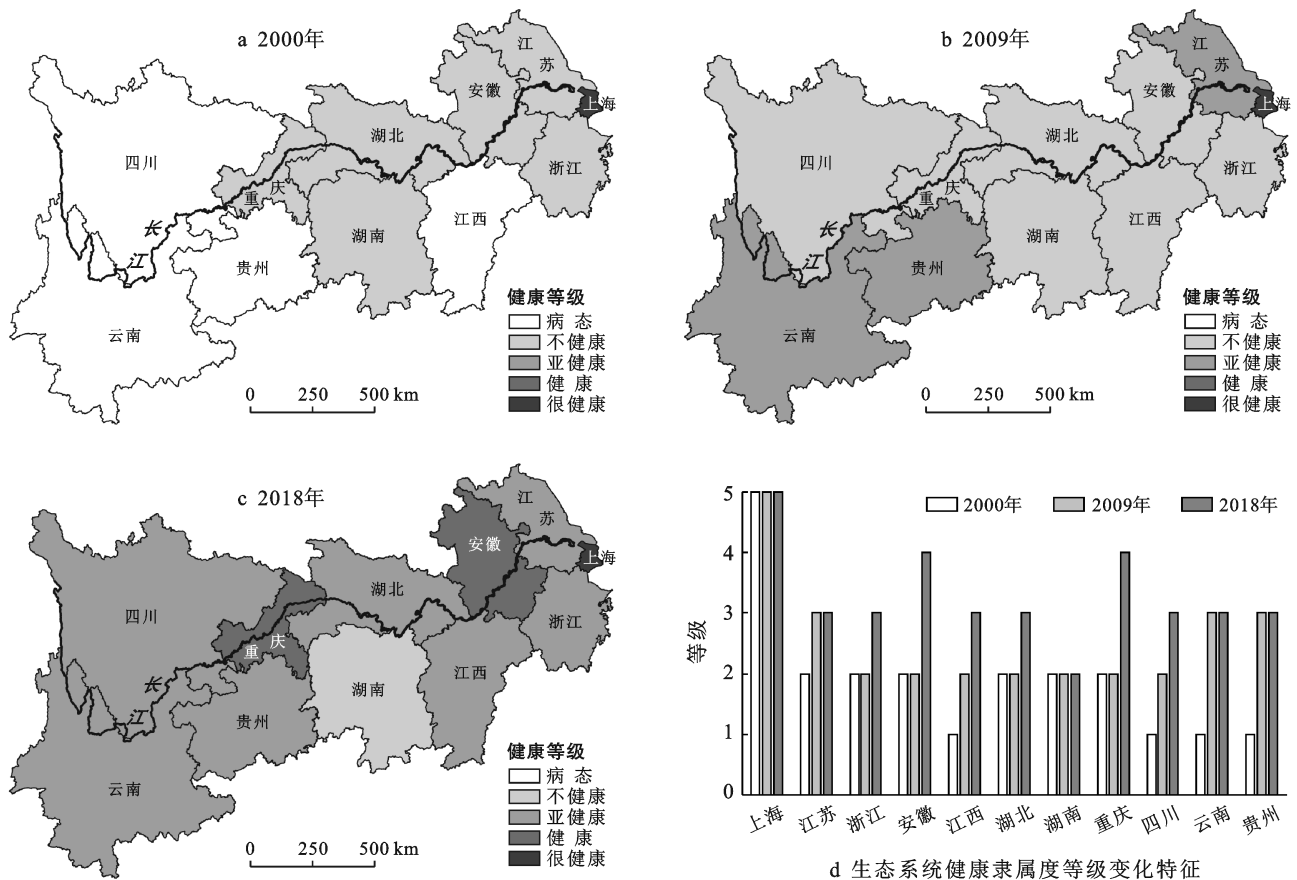


图 2 2000—2018 年长江经济带生态系统健康诊断结果时空差异特征

综上所述,从 2009 年到 2018 年,长江经济带生态系统健康状况整体上呈现出两大特点。①上海市的健康等级长期处于“很健康”水准,而湖南省的健康等级却长期处于“不健康”水准。上海市生态系统健康状况长期处于高水准,可能与其发达的社会经济发展水平及严格的环境保护政策密切相关,湖南省可能在这些方面稍有欠缺,从而导致生态系统健康等级偏低;②研究区健康等级的内部分异逐步减小且整体

趋于上升趋势,这与近些年来长江经济带的生态环境治理工作有着密不可分的关系。长江流域沿线区域,在经历了阶段性的治理工作之后,生态环境状况得到了逐年改善,特别是自从 2016 年长江环境大保护战略实施以来,长江流域沿线各省市的治污能力得到了有效提升,治污工程建设速度也逐步加快,这一些原因,促使了长江经济带沿线各省市的生态系统健康状况在整体上不断向好发展^[10]。

3.2 长江经济带生态系统健康子系统诊断结果

在一定范围内生态系统的能量输入越多,物质循环越快,活力就越高。由图 3 可知,2000—2018 年长江经济带活力子系统诊断等级整体上由病态上升为亚健康。研究区内人均地区 GDP 和人均公共绿化面积等正向指标逐年提高,单位 GDP 能耗、COD 排放量以及单位播种面积农药使用量等负向指标均逐年降低,但是由于近年来对经济高质量发展的要求,2009—2018 年的年 GDP 增长率大幅度降低,长江经济带平均年 GDP 增长率下降至 7.57%,减少了 4.75%。截止 2018 年底,上海的活力子系统提升至健康等级,这主要由于地区人均 GDP 大幅度上涨,达到了 14.87 万元/人,而单位 GDP 能耗下降至 0.32

t/万元(以标准煤计)。浙江的活力子系统健康等级仅次于上海,人均公共绿地面积和人均 GDP 等正向指标有明显的上升,虽年 GDP 增长率略高于上海,但其 COD 排放量是上海的 3 倍之多。江苏、安徽等 9 个省(市)均提升到亚健康等级,人均 GDP 相较于 2000 年大幅度提升,最低诊断等级为亚健康;年 GDP 增长率除云南、贵州外,其余省市均下降,其中重庆的年 GDP 增长率最低,只有 4.4%;9 个省(市)单位 GDP 能耗均呈下降趋势,COD 排放量诊断等级为病态,人均公共绿化面积逐年增加,2018 年底人均可占有的公共绿地面积在 10 m²/人以上。对于活力子系统而言,应增加正向投入,减少负向产出,平衡经济发展和生态保护,坚持生态保护优先。

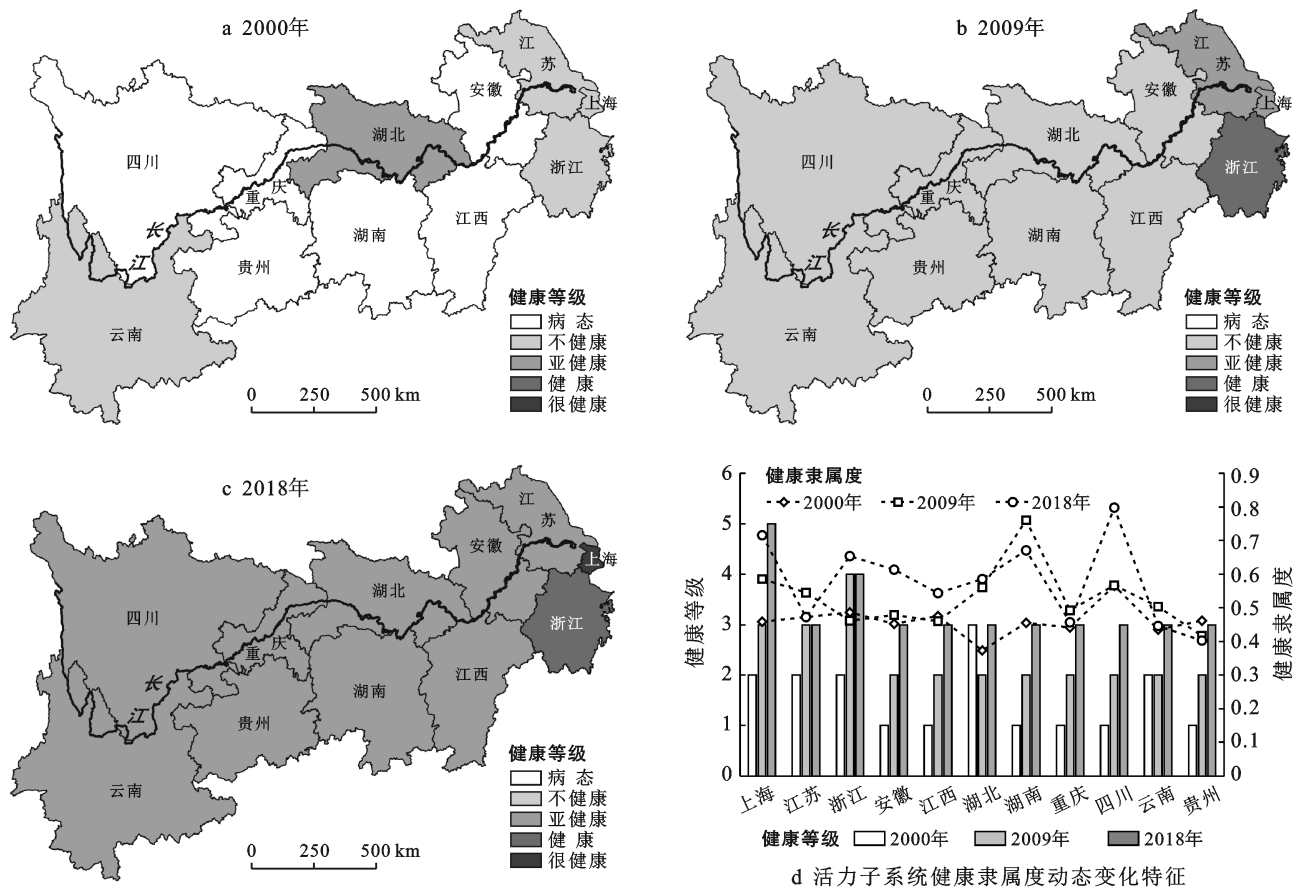


图 3 2000—2018 年长江经济带生态系统健康活力子系统诊断结果

如图 4 所示,2000—2018 年长江经济带生态系统组织结构反映了生态系统结构的复杂性,该特征会随生态系统的演替而发生变化。由图 4 可知,上海和江苏的组织结构健康等级较高,截止 2018 年底,分别提升至很健康和亚健康。两省(市)森林覆盖率虽逐年提高,但上海和浙江的整体水平较低,均在 30% 以下,有待进一步提升。此外,人均耕地面积基数低,且呈下降趋势。随着人口的增加,建设用地面积比例大

幅度上涨。2000 年—2018 年浙江、安徽、湖北、湖南和重庆的健康等级几乎无变化,均为不健康等级,人均拥有的耕地面积不足 0.1 hm²/人,建设用地面积比例不断上升。江西、云南、四川和贵州的等级偏低,且无提升的趋势,这主要由于人口过于分散,用地不集中,建设用地面积比例的提升速度大于人均耕地。四川省的人口密度低,城镇登记失业率高。江西省人口自然增长率高,2018 年达到了 0.95%。整体而言,人

均耕地虽增加,但区域分布差异大,大部分地区人均耕地依旧处于不健康等级。随着人口的增长,建设用地的需求逐年增加。城镇登记失业率偏高,重庆、湖

北和江西尤为突出。对于活力子系统而言,应集约利用土地,合理规划建设用地,调整第三产业占 GDP 比重,严格控制人口出生率。

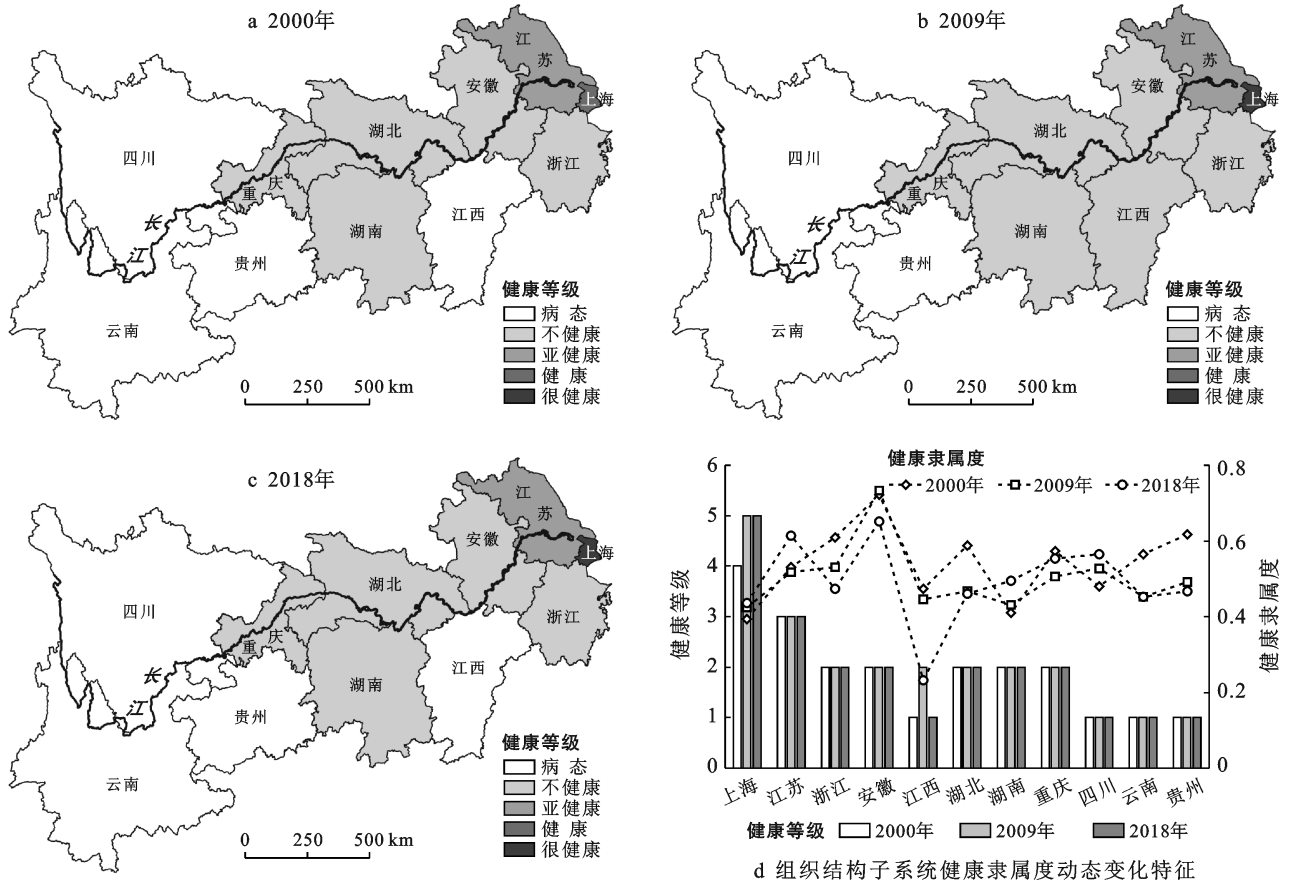


图 4 2000—2018 年长江经济带生态系统健康组织结构子系统诊断结果

恢复力子系统在外界压力消失的情况下逐步恢复的能力,一定程度上可用城市生态系统的自我调节能力来体现。从图 5 可以看出,2000—2018 年,长江经济带恢复力子系统健康诊断等级的分省市变化幅度较大,但 2009 年和 2018 年的健康诊断等级相较于 2000 年是整体向好的。在 2000 年,四川省、上海市和重庆市的健康诊断等级较高,分别为健康、亚健康、亚健康,到了 2009 年,格局发生了显著变化,重庆、四川和贵州 3 个省市的诊断等级为健康,而诊断等级为病态的浙江省,其自然保护区面积比例仅为 1.5%。2018 年,恢复力子系统的空间分布格局又一次发生了较大变化,研究区中安徽、湖南、贵州和重庆 4 个省市的诊断等级降低,江西、湖北、四川和云南的诊断结果在向好发展。随着生态环境治理工作的稳步推进,城市污水处理率和生活垃圾无害化处理率成为各城市环境治理效果的重要评价标准,此外环境污染治理投资总额占 GDP 比重和自然保护区面积比例的提高也有利于区域生态系统的自我调节能力的提高,所以对于恢复

力子系统而言,应加大环保投资力度,并注重城市治理能力的提升。

生态系统提供的服务功能通过环境质量、民生改善两个方面来体现。从图 6 可以看出,2000,2009,2018 年 3 个时间节点上,长江经济带各省市的生态系统健康生态系统服务子系统诊断结果依次为:不健康、健康、亚健康水平,2000—2018 年间长江经济带各省市的生态系统健康生态系统服务子系统诊断等级有所提升,生态系统的健康状况改善较为明显。究其原因有:①在 2000—2018 年间,国家坚持以经济建设为中心,促进了国家经济的增长,人均可支配收入显著提高;②科学技术逐渐应用到了农业生产,农业生产逐渐规模化,人均粮食占有量也明显增加;③随着生态文明建设的进程,各地方注重环境质量的改善,推动形成绿色发展方式和生活方式,主要表现在空气质量改善方面。对于生态系统服务子系统而言,应进一步提高生产力,注重农业发展,在人民生活方面做出积极调整。

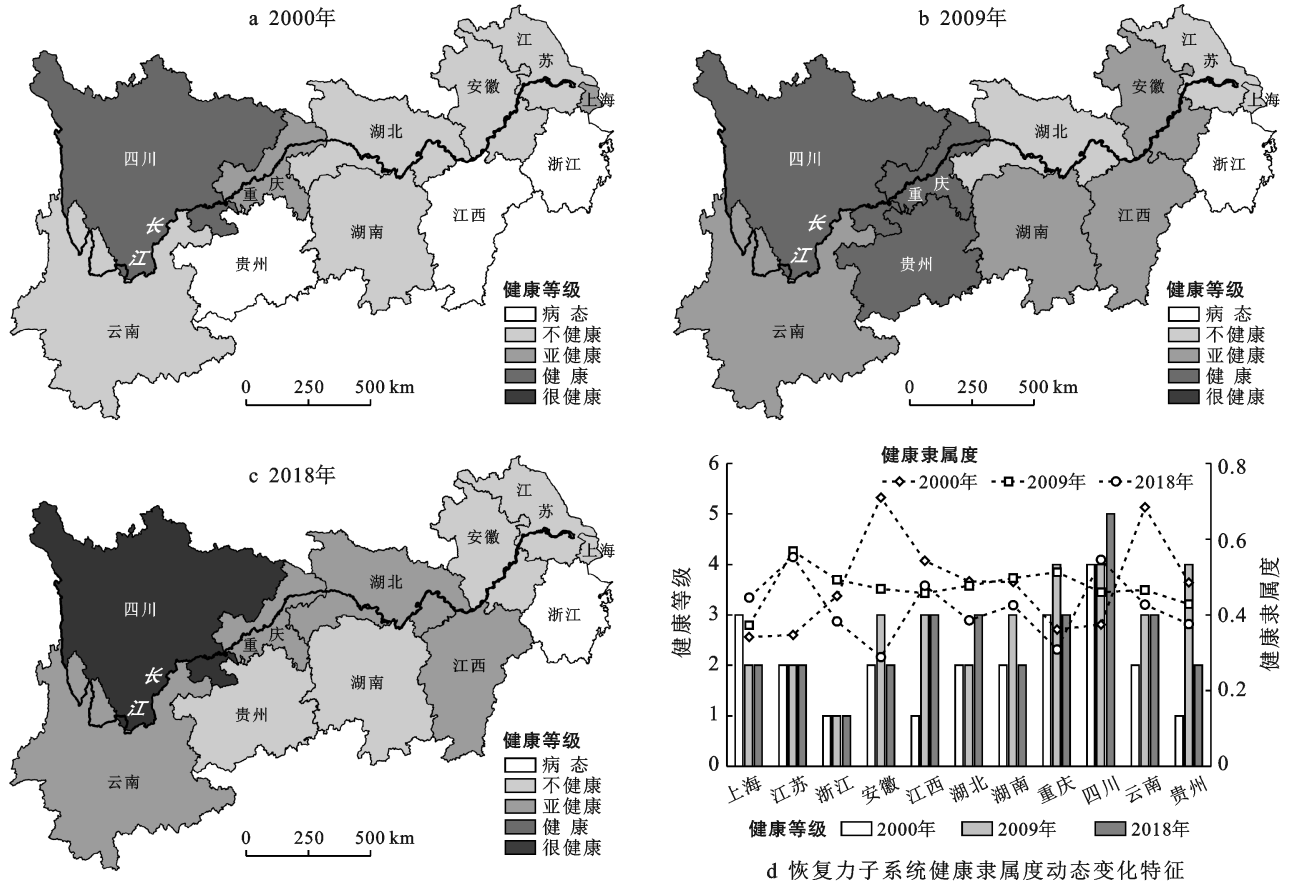


图 5 2000—2018 年长江经济带生态系统健康恢复力子系统诊断结果

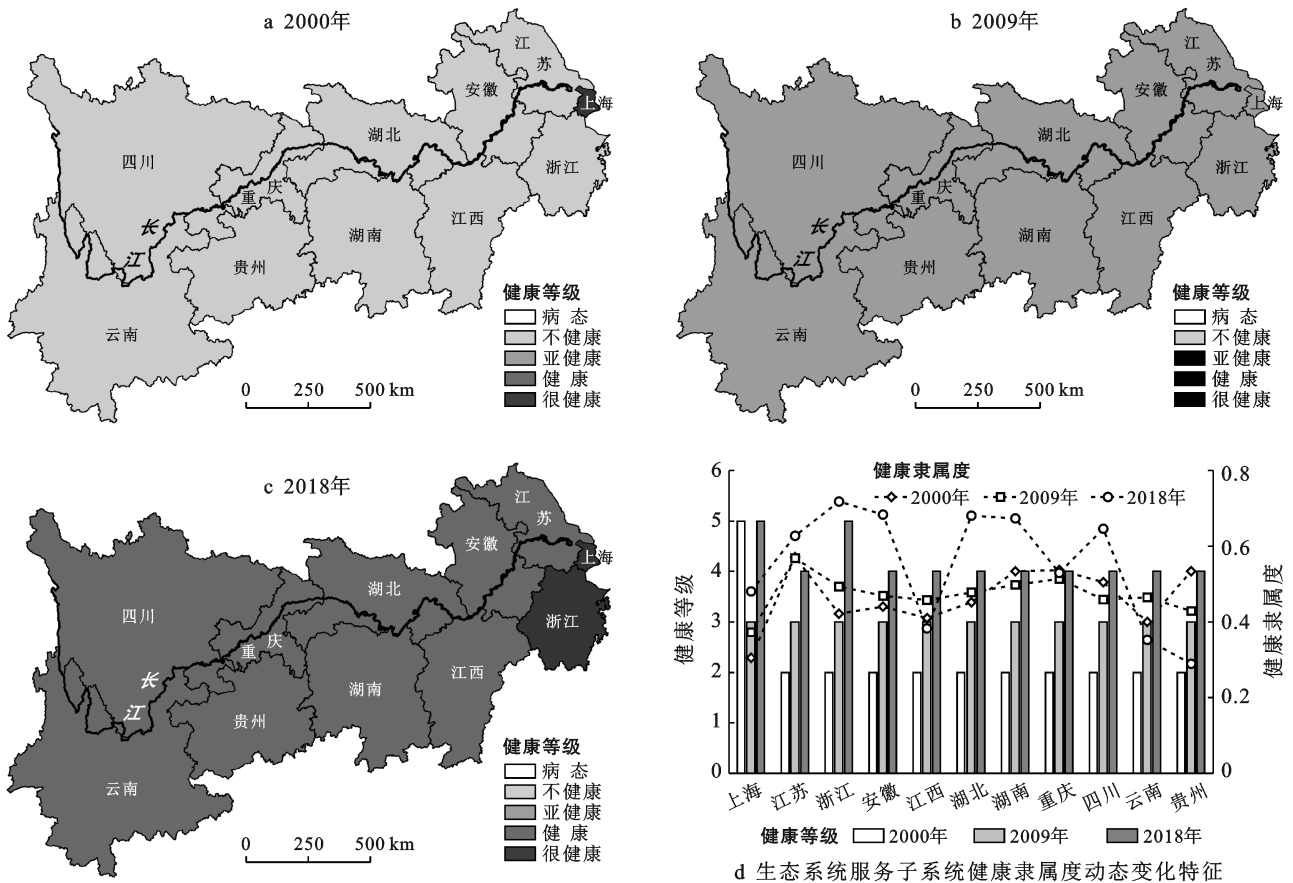


图 6 2000—2018 年长江经济带生态系统健康生态系统服务子系统诊断结果

如图 7 所示,人群健康状况可以从生活状况和文化教育水平两个方面来反映。由图 7 可以看出,在 2000,2009,2018 年 3 个时间节点上,长江经济带各省市的生态系统健康人群健康子系统诊断结果整体位于病态、很健康、亚健康这 3 个水平,表明 2000—2018 年间长江经济带生态系统的健康状况整体一般,2000—2009 年,长江经济带生态系统的健康状况明显变好,2009—2018 年间因为经济的快速发展,长江经济带生态系统的健康状况反而呈现下降趋势。

主要原因在于 2000—2018 年间,得益于国家综合国力的提升,医疗技术水平发展,死亡率有所下降;人才是第一资源,是国家增强核心竞争力的第一动力,各行各业及各个地区的发展都离不开人才。但是在 2009 年后,人才流动较大,在经济发达地区与欠发达地区,人才布局十分不均衡,导致 2009—2018 年间长江经济带各城市在人群健康层面,健康状况有所下降。对于人群健康子系统而言,应加注重人才吸引与引进,强化医疗基础设施建设。

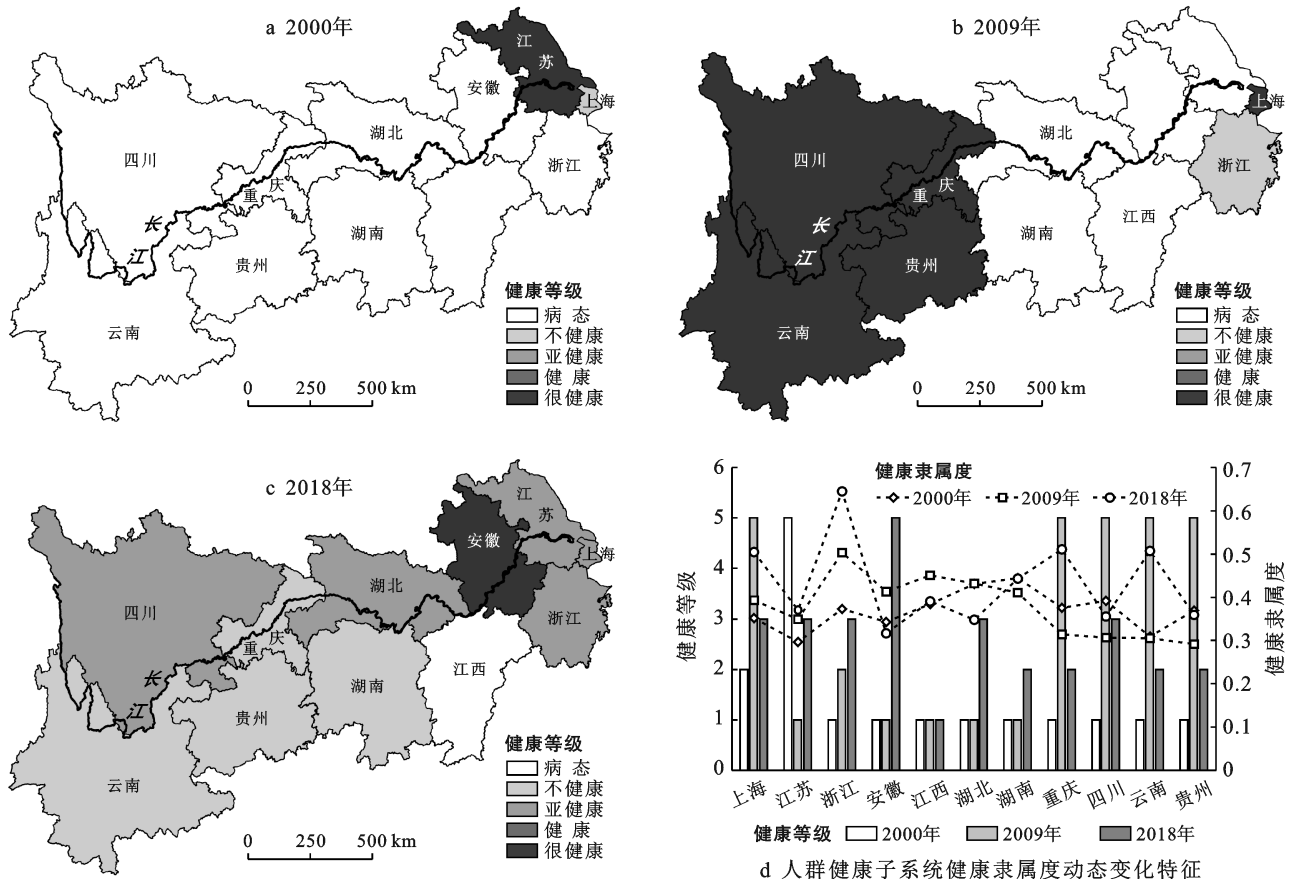


图 7 2000—2018 年长江经济带生态系统健康人群健康子系统诊断结果

4 结论

本文通过构建长江经济带生态系统健康诊断指标体系,利用熵权法和正态云模型,得出 2000,2009,2018 年长江经济带的城市生态系统健康状况,从整体和子系统两个层面进行分析,得到 2000—2018 年间长江经济带生态系统健康状况变化的一些结论。

(1) 综合当前城市生态系统健康研究的理论和方法,基于长江经济带的地域特色,构建了长江经济带生态系统健康诊断指标体系,该体系分为活力、组织结构、恢复力、生态系统服务和人群健康 5 个子系统,共包含 24 个诊断指标。同时,明确了各指标健康

诊断标准,并将长江经济带生态系统健康状况划分为病态、不健康、亚健康、健康和很健康 5 个等级。

(2) 根据长江经济带生态系统健康诊断指标体系数据库,利用熵权法确定指标体系权重,分析结果显示人口密度、人均可支配收入、人均耕地面积、人均地区 GDP 是影响长江经济带生态系统健康的主要因素。

(3) 运用正态云模型,计算得出 2000,2009,2018 年长江经济带生态系统健康的健康等级隶属度,并对长江经济带生态系统健康进行分析。从整体上看,2000 年至 2018 年,长江经济带生态系统健康诊断等级的总体变化趋势向着更高等级的方向演变;长江经

济带生态系统的健康状况存在时空分布差异性,在2000—2018年间年表现出内部分异逐渐减小的趋势,从区域空间分布来看,部分省市的生态系统健康状况变化幅度较大,而上海和湖南的生态系统健康诊断结果一直保持不变。从活力、组织结构、恢复力、生态系统服务和人群健康5个子系统来看,长江经济带活力子系统健康状况呈现出上升趋势;组织结构子系统健康状况稳定,但除上海市和江苏省以外,整体健康等级低;恢复力子系统健康状况呈波动式变化,但整体健康状况有一定程度上的改善;生态系统服务子系统健康状况除上海市先降后升之外,其余各省市均呈现出逐年上升的趋势;从时序发展来看,人群健康子系统健康状况变化大,但各省市之间的差异在不断减小,且整体健康状况有一定的上升趋势。

(4) 结合本文的研究结果,从长远来看,为了保持长江经济带生态系统健康水平长期平稳向好发展,优先从活力、恢复力和人群健康3个子系统方面入手,减少负向产出,提高生产力,注重农业发展,在人民生活方面做出积极调整,加大力度吸引高层次人才,坚持生态优先的发展战略。

本文的研究结论充分依赖于研究区各类指标要素的数据质量及健康诊断标准,故在研究中还存在很多不足支出。首先,因为部分早期统计数据的确缺失,诊断生态健康的指标数据不够全面;其次,囿于数据获取及部分健康诊断标准的时效性,不同研究中对长江经济带生态系统的健康诊断结果存在着一定的偏差。

[参 考 文 献]

- [1] 孔红梅,赵景柱,马克明,等.生态系统健康评价方法初探[J].应用生态学报,2002,13(4):486-490.
- [2] 姚昆,余琳,刘光辉,等.基于SRP模型的四川省生态环境脆弱性评价[J].物探化探计算技术,2017,39(2):291-295.
- [3] 徐庆勇,黄玫,刘洪升,等.基于RS和GIS的珠江三角洲生态环境脆弱性综合评价[J].应用生态学报,2011,22(11):2987-2995.
- [4] Kienberger S, Blaschke T, Zaidi R Z. A framework for spatio-temporal scales and concepts from different disciplines: The 'vulnerability cube' [J]. Natural Hazards, 2013,68(3):1343-1369.
- [5] 熊丽君,袁明珠,吴建强.大数据技术在生态环境领域的应用综述[J].生态环境学报,2019,28(12):2454-2463.
- [6] 马良.东北地区泥炭地水文动态与生态系统健康诊断研究[D].吉林 长春:东北师范大学,2020.
- [7] 刘思怡,丁建丽,张钧泳,等.艾比湖流域草地生态系统环境健康遥感诊断[J].草业学报,2020,29(10):1-13.
- [8] Mahapatra M, Ramakrishnan R, Rajawat A S. Coastal vulnerability assessment using analytical hierarchical process for South Gujarat coast, India [J]. Natural Hazards, 2015,76(1):139-159.
- [9] 林凯,顾锋,史玉民.长江经济带生态保护和高质量发展研究:基于扎根理论的分析[J].华东经济管理,2021,35(5):12-19.
- [10] 孙颖,尹少华.长江经济带生态一体化协同治理的机制创新[J].中南林业科技大学学报(社会科学版),2021,15(2):26-33.
- [11] 冯丹阳,郝海广.关于加快完善长江流域生态文明制度的对策建议[J].环境与可持续发展,2021,46(2):83-88.
- [12] 官冬杰,苏维词.城市生态系统健康评价方法及其应用研究[J].环境科学学报,2006,26(10):1716-1722.
- [13] 高彩玲,田采霞,麻冰涓.基于熵权法的焦作市城市生态系统健康动态评价[J].水土保持通报,2015,35(3):197-202.
- [14] 孟伟庆,李洪远.基于模糊综合评价模型的天津滨海新区城市生态系统健康评估[J].生态经济,2011,27(9):174-177.
- [15] 陈克龙,苏茂新,李双成,等.西宁市城市生态系统健康评价[J].地理研究,2010,29(2):214-222.
- [16] 黄木易,何翔.基于云模型与熵权法的安徽省土地生态安全评价研究[J].土壤,2016,48(5):1049-1054.
- [17] 刘丹丹,王大娟,陈思思.河南省城市生态系统健康状况评价[J].河南科学,2017,35(9):1518-1522.
- [18] 李德毅,孟海军,史雪梅.隶属云和隶属云发生器[J].计算机研究与发展,1995,32(6):15-20.
- [19] 周继霞,官冬杰,张艳军,等.重庆都市圈生态系统健康变化评价[J].贵州农业科学,2014,42(1):205-209.
- [20] 何刚,王雯雯,夏业领,等.基于正态云模型的区域生态安全评价[J].安全与环境学报,2018,18(2):807-813.
- [21] 曾一笑.三峡库区生态系统健康可视化系统构建及应用[D].重庆:重庆交通大学,2018.