

长江经济带山水林田湖草生命共同体 健康诊断及耦合协调关系分析*

李子辉^{1,2,3}, 官冬杰¹, 贺光秀¹, 张艳军⁴

(1. 重庆交通大学 智慧城市学院, 重庆 400074; 2. 中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心, 昆明 650100;
3. 重庆市生态环境科学研究院, 重庆 401147; 4. 重庆理工大学 管理学院, 重庆 400050)

摘要:【目的】对长江经济带山水林田湖草生命共同体的健康状况进行诊断,并对它的耦合协调关系进行分析,为它的健康管理及长江经济带的生态治理提供科学依据。【方法】基于构建的长江经济带山水林田湖草生命共同体健康诊断指标体系,使用正态云模型进行有关健康诊断,并运用耦合协调模型对山、水、林、田、湖、草子系统间的耦合协调关系进行分析。【结果】1) 2000—2018年长江经济带山水林田湖草生命共同体健康等级整体上呈上升趋势;在空间分布上,山水林田湖草生命共同体健康等级较低的省(直辖市)位于长江经济带的上游和下游区域,中游区域是整个长江经济带山水林田湖草生命共同体健康状况最好的区域。2) 长江经济带山、水、林、田、湖、草子系统按健康等级由高到低进行排序,依次为:田子系统、水子系统、山子系统、草子系统、湖子系统、林子系统。3) 在由长江经济带山、水、林、田、湖、草子系统构成的46种系统组合中,90%以上的系统组合的耦合度高于0.8,处于高水平耦合阶段;但约98%的系统组合协调度为0.3~<0.5,处于轻度失调阶段。4) 林业单产、森林蓄积量、湖泊面积、人均水产品、渔业总产值等指标是长江经济带山水林田湖草生命共同体健康的主要驱动因子。【结论】虽然2000—2018年长江经济带山水林田湖草生命共同体的耦合性和协调性的发展阶段水平差异较大,但两者都有向更高水平阶段发展的趋势。

关键词: 生命共同体;健康诊断;耦合协调;长江经济带

中图分类号:X37

文献标志码:A

文章编号:1672-6693(2023)03-0061-17

“山水林田湖草生命共同体”指山、水、林、田、湖、草等各要素(子系统)协调且有机组合,人类与之相互作用、影响,形成一个相互联系的命运共同体,其中不仅包含了自然内部的互联关系,也包含了人与自然和谐相处的范式^[1]。然而近些年来,人类活动干扰的加强使得生命共同体内各子系统间的关系发生紊乱,由此进一步导致了生态环境与人类关系的恶化。在人口、环境、资源与发展矛盾关系日益凸显的背景下,实现人与环境和谐发展迫在眉睫。随着人与自然的关系越来越受到人们重视,相关研究也越来越多。最初的研究主要侧重于从社会科学角度出发并结合相关法制理念对人与自然关系的影响^[2-3],对自然生态生命共同体的研究大多局限于探究其中单一子系统的健康状况,例如:Leser等人^[4]从景观层面对能反映生态系统的生物、地质多样性以及人类活动间的关系进行分析,并基于景观多样性功能对景观生态健康进行了评价;Sandifer等人^[5]评价了生物多样性以及生态系统服务对维持人类健康与促进福祉的重要性。随着研究的深入,目前关于人与生态系统相互关系的探讨已经成为研究热点。在中国,最初的有关研究侧重于自然科学视角下的自然生态生命共同体的相关内涵理论^[6-7]、生态修复举措以及生态工程^[8-10]、生态效益及生态风险评价^[11-13]等。近些年来,基于社会科学视角探究生命共同体的系统修护与治理以及有关流域生命共同体的研究在中国已成为新的研究热点^[14];吕思思等人^[12]使用SC模型将山水林田湖生命共同体的健康状况与地方政策相结合,对生命共同体健康的影响因子进行识别和分析;曾春芬等人^[15]以山水林田湖草生命共同体为研究对象,构建了健康评价指标体系,并基于人、地与自然三者的综合对生命共同体健康轨迹进行评价和提出了有关协调发展对策;陈阳等人^[16]从黄河南岸矿区山水林田湖草生态修

* 收稿日期:2022-01-28 修回日期:2022-05-09 网络出版时间:2023-06-15T17:27

资助项目:教育部人文社会科学一般项目(No. 20YJA790016);国家自然科学基金面上项目(No. 42171298);重庆市自然科学基金杰青项目(No. cstc2020jcyj-jqX0004);重庆理工大学科研启动基金资助项目(No. 0108220002);重庆市生态环境局科研项目(No. CQEE2022-STHBZZ118);滇西北高寒草甸区生态修复综合调查项目(No. DD20230482)

第一作者简介:李子辉,男,研究方向为生态安全与生态修复;通信作者:官冬杰,女,教授,博士,E-mail:guandongjie_2000@163.com

网络出版地址:https://kns.cnki.net/kcms2/detail/50.1165.N.20230615.1424.010.html

护带来的生态效益角度出发强调了生命共同体保护的必要性;贺磊等人^[17]根据山水林田湖草综合整治项目实施前后效益的模糊综合评价模型对修护项目的经济效益、社会效益、生态效益和综合效益进行了全面评价。然而上述研究的对象主要集中于国家生态重点保护区、大河流域生态保护区等重要地带^[18-19],对其他区域的研究较少;此外,这些研究也缺乏对山水林田湖草生命共同体的整体耦合机制的探讨。

通过文献梳理可知,现有研究虽然在生命共同体的理论框架、生态修护工程、生态效益评估等内容上取得了一定的成就,但仍然存在以下不足之处:1)在研究内容方面,多侧重于综合治理和生态效应评价而缺乏对各生态子系统或各子系统间耦合协调机制的分析;2)在研究方法方面,多是就单一生物群落的健康进行评价分析而有关多生物群落或结构的相关研究较少;3)对生命共同体健康风险评估以及未来风险预测研究较少。

长江经济带横跨中国东、中、西部三大区域,覆盖上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、云南和贵州共 11 个省(直辖市),区域总面积约 2 050 000 km²,约占中国陆地国土面积的 21.4%;区域内人口众多,聚集了中国约 42.8%的人口(2020 年区域总人口约 6 亿人);2020 年长江经济带的国内生产总值占中国国内生产总值的 44.1%左右,是中国名副其实的经济和文化核心区域^[20]。近些年来,长江经济带社会经济发展和生态环境保护的矛盾日益突出,对区域可持续发展造成了严重的威胁^[21]。目前,有关以长江经济带山水林田湖草生命共同体为对象的研究较为缺乏,为此本研究构建了能够表征该生命共同体的指标体系,在对其中各子系统间的耦合协调关系机制进行探讨的同时,还基于正态云模型对它的健康进行了诊断,期望为长江经济带山水林田湖草生命共同体的健康管理和长江经济带的生态治理提供科学依据。

1 研究方法

1.1 数据来源与处理

本研究所用数据主要包括 DEM 数据和基础统计数据。其中 DEM 数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)的 ASTER GDEM 30 m 分辨率数字高程数据,经 ArcMap 软件处理和分析以获取相关指标数据。基础统计数据主要用于计算山、水、林、田、湖、草等各子系统的状态值,具体数据来源于中国全国及相关地方的统计年鉴、国民经济和社会发展公报,以及《中国水资源公报》《中国农业统计年鉴》等。

1.2 健康诊断指标体系构建

长江经济带以长江为联系纽带,将山、水、林、田、湖、草等各子系统从时间、空间上串联起来,形成了相互联系、相互制约的完整生命共同体^[1,12]。从整体功能上看,水子系统作为生命共同体的“血液”,以长江经济带内大大小小的“导管”(河流)和“节点”(湖泊)作为空间载体连接起来,为长江经济带山水林田湖草生命共同体的健康提供了基础和保障;山子系统的高低起伏重构整个长江经济带山水林田湖草生命共同体内各子系统的空间格局,形成了长江经济带上、中、下游不同的空间结构;林、草、田子系统则反映了长江经济带内不同区域的山水林田湖草生命共同体在生命结构上的空间异质特征。从作用结果来看,长江经济带山水林田湖草生命共同体的基础是山、水这两个子系统,其余子系统则为它们的产物;人类在整个山水林田湖草生命共同体系统中通过生产活动直接或间接影响它的功能、结构以及演变进程,同时也受到它的反作用影响。在参考已有研究^[22-24]基础上,基于客观、科学及数据可获取的原则,通过山水林田湖草生命共同体的健康状况和自我恢复力的研究视角,本研究构建了长江经济带山水林田湖草生命共同体健康诊断指标体系,其中:目标层为长江经济带山水林田湖草生命共同体的健康状况;准则层分别由山、水、林、田、湖、草等 6 个子系统组成,具体又包括了下属指标层的 18 个影响指标。山水林田湖草生命共同体健康诊断标准值参照了《国家生态文明建设示范区管理规程(试行)》《国家生态文明建设示范县、市指标(试行)》《国家环境保护模范城市考核指标(试行)》^[25-26]以及吕思思等人^[12]的研究,并将诊断等级划分为病态、不健康、亚健康、健康、非常健康等 5 级,具体情况如表 1 所示。

1.3 健康诊断模型构建

正态云模型是一种可以用来解决不确定性和模糊性问题的模糊数学模型,它可以实现定性和定量间不确定性的转换。本研究采用正态云模型的最大隶属度原理确定每个指标对应的健康诊断等级^[27-28],原理如下:

$$\mu = e^{-\frac{(x-E)^2}{2S^2}},$$

其中: μ 为数值表示的定量论域, x 属于 μ 的子集, E 为期望, S 为熵。若论域 Z 中的元素 z 对应 T (T 是 μ 的定

性概念)中的隶属度 μ_z 满足 $\mu_z \sim N(E, S^2)$ (N 为指标个数), 则 T 从 μ 到隶属度区间在属于空间中的分布就定义为云模型。当 S 满足 $S \sim N(S, H^2)$, 则模型为正态云模型, 其中超熵 H 表示云滴的汇集程度或离散程度, 在云模型中表现为云的厚度。超熵取值由多次试验所得, 在本研究中 $H = 0.1$ 。本研究按以下过程进行正态云模型的具体建模:

表 1 长江经济带山水林田湖草生命共同体健康诊断指标体系及诊断标准

Tab. 1 Health diagnostic index system and diagnostic criteria of the mountains-rivers-forests-fields-lakes-grasses life community in the Yangtze River Economic Zone

目标层	准则层	指标层 (指标名称及代码)	指标单位	类型	诊断等级及划分标准				
					I	II	III	IV	V
长江经济带山水林田湖草生命共同体健康状况	山子系统	起伏度(X1)	m	-	>300	300~>100	100~>50	50~20	<20
		$\geq 25^\circ$ 坡地覆盖率(X2)		-	>25%	>15%~25%	>6%~15%	2%~6%	<2%
	水子系统	降水量(X3)	mm	+	<300	300~600	>600~1 200	>1 200~1 600	>1 600
		人均水资源量(X4)	$m^3 \cdot 人^{-1}$	+	<500	500~2 000	>2 000~4 000	>4 000~8 000	>8 000
	城市污水	单位面积水资源量(X5)	$万 m^3 \cdot km^{-2}$	+	<10	10~20	>20~30	>30~50	>50~200
		城市污水处理率(X6)		+	<40%	40%~50%	>50%~60%	>60%~80%	>80%
	造林	造林总面积(X7)	万 hm^2	+	<5	5~25	>25~55	>55~70	>70
		森林覆盖率(X8)		+	5%~10%	>10%~20%	>20%~35%	>35%~45%	>45%~65%
	林子系统	林业单产(X9)	$元 \cdot hm^{-2}$	+	<1 500	1 500~4 000	>4 000~6 500	>6 500~9 000	>9 000
		森林蓄积量(X10)	亿 m^3	+	<4	4~8	>8~14	>14~18	>18
	田子系统	粮食单产(X11)	$kg \cdot hm^{-2}$	+	<3 000	3 000~4 500	>4 500~6 000	>6 000~7 500	>7 500
		人均耕地面积(X12)	$hm^2 \cdot 人^{-1}$	+	0.05~0.07	>0.07~0.1	>0.1~0.27	>0.27~0.47	>0.47
	粮食播种	粮食播种比例(X13)		+	0~20%	>20%~45%	>45%~65%	>65%~80%	>80%~100%
		湖泊面积(X14)	万 hm^2	+	<5	5~15	>15~30	>30~40	>40
	湖子系统	人均水产品(X15)	$kg \cdot 人^{-1}$	+	<1	1~5	>5~18	>18~35	>35
		渔业总产值(X16)	亿元	+	<50	50~200	>200~1 000	>1 000~1 400	>1 400
	草子系统	牧业总产值(X17)	万元	+	<200	200~750	>750~1 300	>1 300~1 900	>1 900
		建成区绿化覆盖率(X18)		+	<20%	20%~30%	>30%~40%	>40%~50%	>50%

注:“-”“+”分别表示逆向指标和正向指标。I、II、III、IV、V依次表示病态、不健康、亚健康、健康、非常健康,下同。

1) 构建长江经济带山水林田湖草生命共同体健康诊断指标集合 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_{18}\}$, 其中 a_1 到 a_{18} 即为诊断指标(表 1)。

2) 建立长江经济带山水林田湖草生命共同体健康诊断等级隶属关系。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性, 由此有:

$$E' = (x_{upper,ij} + x_{lower,ij}) / 2, \tag{1}$$

式中: i 为各项诊断指标的编号, $i = 1, 2, \dots, 18$; j 为对应的诊断等级编号, $j = 1, 2, \dots, 5$; E' 为统计学理论中的厚颜估计期望; $x_{upper,ij}$ 和 $x_{lower,ij}$ 分别为各评价指标对应评价等级区间的上下限。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, 由此有:

$$\exp[-(x_{upper,ij} - x_{lower,ij}) / (8S_{ij}^2)] = 0.5, \tag{2}$$

$$S_{ij} = |x_{upper,ij} - x_{lower,ij}| / 2.355,$$

式中: S_{ij} 表示第 i 项指标在对应第 j 项诊断等级下的熵。

根据表 1 中各影响指标诊断等级, 通过式(1)、(2)确定各项指标的期望和熵。

3) 对于每个待评价对象, 根据各指标的数据并利用正向云发生器, 确定第 i 项指标对应第 j 项诊断等级的隶属度并构成隶属度矩阵, 有关计算公式如下:

$$Y_{ij} = \sum_{m=1}^n (y_{ij}^m / n),$$

式中: Y_{ij} 为将第 i 项指标计算 n 次 ($n > 1000$) 后所处的第 j 项诊断等级的平均隶属度; y_{ij}^m 为计算 m 次的第 i 项指标在不同诊断等级下的隶属度。

4) 根据最大隶属度原则判定该指标对应的健康诊断等级, 由此得到的长江经济带山水林田湖草生命共同体健康诊断指标正态云分布如图 1 所示。

5) 通过每个指标对应下的生态风险等级的隶属度和与之相应的指标权重相乘^[27]求得长江经济带各省市的健康诊断等级。

1.4 耦合协调关系模型构建

各子系统间的耦合协调性是判断山水林田湖草生命共同体健康状况的重要指标之一, 耦合协调性说明了子系统之间的发展状态。因此, 本研究运用耦合协调模型来测度长江经济带山水林田湖草生命共同体各子系统间的发展状态, 其中各子系统间的耦合度 (C) 的计算公式^[29-30]如下:

$$C = K \left(\prod_{k=1}^K U_k \right)^{1/K} / \sum_{k=1}^K U_k,$$

式中: U_k 代表第 k 个子系统; K 为子系统总个数, 本研究中 $K = 6$ 。 C 的取值范围为 $0 \sim 1$ 。 C 值越接近 1, 表示各子系统间的耦合度越大; C 值越接近 0, 则表示各子系统间的耦合度越小。但 C 值并不能进一步判别各子系统组合间的良性互动状况, 因此需要对各子系统的协调度 (D) 以及综合调和指数 (T) 进行测评, 计算公式为:

$$D = \sqrt{CT}, \quad T = \sum_{k=1}^K a_k U_k,$$

式中 a_k 为待定权数, 用以衡量子系统对山水林田湖草生命共同体的贡献程度。根据 C 值和 D 值大小, 对各子系统间耦合和协调阶段及特征进行划分, 如表 2 所示。

2 结果与分析

2.1 健康等级诊断分析

基于正态云模最大隶属度原理, 得到长江经济山水林田湖草生命共同体健康综合诊断结果(表 3)。总体上看, 2000—2018 年长江经济带山水林田湖草共同体的健康等级整体呈上升的发展趋势。在此期间, 江苏、浙江、安徽、重庆、四川和贵州的山水林田湖草生命共同体健康等级呈上升发展趋势, 其中: 江苏的山水林田湖草生命共同体健康等级最高, 由 2000 年和 2009 年的亚健康上升为 2018 年的健康, 同时江苏也是长江经济带山水林田湖草生命共同体健康等级最高的省份; 安徽和四川的山水林田湖草生命共同体健康等级由 2000 年的不健康发展为 2018 年的亚健康; 浙江、重庆和贵州的山水林田湖草生命共同体健康等级虽然上升, 但仍为不健康, 仍需进一步提高。另外, 将近 45% 的省(直辖市)山水林田湖草生命共同体健康状况提升不明显, 健康等级维持原状, 其中: 上海山水林田湖草生命共同体的健康等级最低, 为病态; 云南山水林田湖草生命共同体的健康等级稍高, 为不健康; 江西、湖北和湖南山水林田湖草生命共同体的健康等级为亚健康。整体上长江经济带山水林田湖草生命共同体的健康状况有所改善, 但改善程度不明显, 到 2018 年仍然有部分省(直辖市)的山水林田湖草生命共同体健康等级处于病态(上海)和不健康(浙江、重庆、云南和贵州)。因此, 整个长江经济带山水林田湖草生命共同体的健康等级仍然有待进一步提高。

从表 3 还可以看出长江经济带各省(直辖市)山水林田湖草生命共同体健康状况时空演变格局存在健康等级不变、健康等级上升和健康等级先上升后下降 3 种变化趋势, 其中: 上海、江西、湖北、湖南及云南的山水林田湖草生命共同体健康等级在 2000—2018 年间不变, 且山水林田湖草生命共同体健康等级较低的省(直辖市)主要分布于长江经济带的上游和下游地区, 而中游地区则是整个区域山水林田湖草生命共同体健康状况最好的区域。目前长江经济带各区域的经济水平为下游最高、中游次之、上游最低, 由此可见长江经济带各区域山水林田湖草生命共同体健康发展状态很可能和对应区域的经济水平相关。

2.2 健康状况纵向诊断分析

长江经济带各省(直辖市)山水林田湖草生命共同体各子系统健康诊断结果如图 2 所示。总体上看, 长江经济带山水林田湖草各子系统的健康状况存在较大的空间差异。

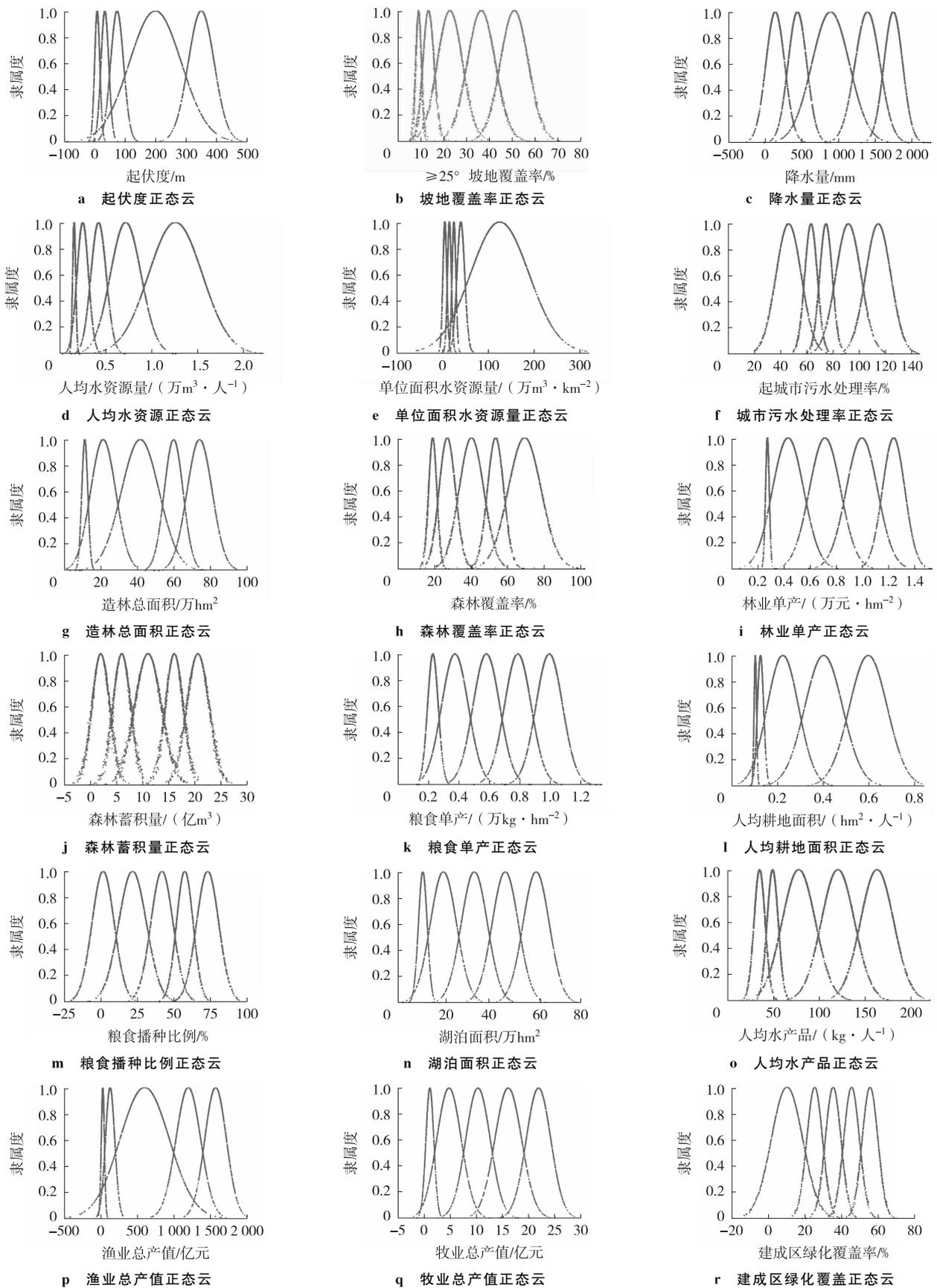


图1 长江经济带山水林田湖草生命共同体健康诊断指标正态云分布

Fig. 1 Normal cloud distribution of health diagnostic indicators of the mountains-rivers-forests-fields-lakes-grasses life community in the Yangtze River Economic Zone

表 2 长江经济带山水林田湖草生命共同体各子系统的耦合协调阶段和特征

Tab. 2 Coupling coordination stages and characteristics of the mountains-rivers-forests-fields-lakes-grasses life community subsystems in the Yangtze River Economic Zone

指标名称	数值范围	阶段	特征
耦合度(C)	[0,0.3]	低水平耦合	某个(些)子系统水平较低,其他子系统水平较高
	(0.3,0.5]	拮抗阶段	各子系统存在矛盾
	(0.5,0.8]	磨合阶段	各子系统开始良性耦合
	(0.8,0.1]	高水平耦合	各子系统相互促进、共同发展
协调度(D)	[0,0.3)	失调	某个(些)子系统快速发展,其他子系统发展与改善较为滞后
	[0.3,0.5)	轻度失调	各子系统快速发展
	[0.5,0.8)	初级协调	各子系统基本协调,整体协调达到较高的程度
	[0.8,0.1]	良好协调	各子系统约束发展,相互促进、协调

表 3 2000—2018 年长江经济带山水林田湖草生命共同体健康状况诊断结果

Tab. 3 The health diagnosis results of the mountains-rivers-forests-fields-lakes-grasses life community in the Yangtze River Economic Zone from 2000 to 2018

年份	等级	上海	江苏	浙江	安徽	江西	湖北	湖南	重庆	四川	云南	贵州
2000	I	0.365 9	0.119 9	0.273 5	0.176 7	0.128 6	0.110 7	0.126 0	0.370 4	0.293 0	0.210 5	0.304 8
	II	0.343 8	0.240 4	0.180 5	0.368 3	0.268 7	0.316 8	0.260 4	0.251 4	0.177 0	0.254 2	0.182 6
	III	0.170 3	0.267 6	0.187 6	0.317 1	0.290 9	0.449 5	0.299 0	0.143 8	0.271 1	0.160 2	0.231 0
	IV	0.157 1	0.155 5	0.053 5	0.182 8	0.142 4	0.073 5	0.178 0	0.097 6	0.170 4	0.243 5	0.106 2
	V	0.120 3	0.171 8	0.190 3	0.025 3	0.135 5	0.033 2	0.069 1	0.052 3	0.064 7	0.059 8	0.023 5
	结果	I	III	I	II	III	III	III	I	I	II	I
2009	I	0.317 6	0.132 8	0.244 8	0.097 1	0.114 6	0.083 9	0.206 0	0.309 7	0.133 1	0.171 3	0.280 2
	II	0.291 5	0.161 5	0.221 6	0.262 4	0.235 1	0.218 2	0.221 1	0.273 1	0.265 5	0.288 4	0.236 6
	III	0.199 0	0.295 5	0.218 7	0.391 4	0.335 5	0.475 0	0.394 4	0.233 1	0.312 8	0.255 7	0.290 5
	IV	0.221 5	0.239 7	0.089 7	0.212 8	0.254 8	0.156 0	0.212 0	0.082 0	0.242 2	0.204 1	0.080 1
	V	0.097 7	0.189 6	0.175 8	0.032 6	0.080 7	0.043 8	0.053 0	0.054 8	0.050 5	0.094 8	0.030 4
	结果	I	III	I	III	III	III	III	I	III	II	III
2018	I	0.257 7	0.150 3	0.196 3	0.091 8	0.091 8	0.034 7	0.076 6	0.151 9	0.188 3	0.082 9	0.210 2
	II	0.208 8	0.094 6	0.286 9	0.130 2	0.130 2	0.267 4	0.203 0	0.457 3	0.221 5	0.391 4	0.346 5
	III	0.126 0	0.125 7	0.154 6	0.400 4	0.400 4	0.363 1	0.379 8	0.277 6	0.312 6	0.238 6	0.323 6
	IV	0.068 4	0.367 6	0.132 1	0.332 6	0.332 6	0.263 1	0.292 2	0.079 9	0.136 2	0.135 4	0.070 7
	V	0.140 8	0.274 9	0.198 1	0.080 6	0.080 6	0.096 5	0.089 7	0.066 3	0.171 5	0.196 5	0.082 9
	结果	I	IV	II	III	III	III	III	II	III	II	II

长江经济带山子系统的健康状况稳定,存在非常健康、亚健康、不健康等 3 种等级(图 2a)。2000—2018 年,上海和江苏的山子系统为非常健康等级,浙江、安徽、江西和湖南的山子系统为亚健康等级,湖北、重庆、四川、云南和贵州的山子系统均为不健康等级;从空间分布上看,山子系统处于非常健康和亚健康等级的省(直辖市)主要分布在长江经济带的中下游区域,山子系统处于不健康等级的省(直辖市)则主要集中分布于长江经济带的中上游区域。

2000—2018 年长江经济带水子系统的健康状况空间变化明显(图 2b)。浙江、湖北、重庆、四川等省(直辖市)水子系统的健康等级未发生变化——浙江的水子系统处于非常健康等级,湖北、重庆和四川的水子系统为亚

健康等级。相比之下,长江经济带的其他7省(直辖市)的水子系统健康等级则变化较大:上海的水子系统健康等级在2000—2009年为健康,到2018年上升为非常健康;江西、贵州的水子系统在2000年分别为非常健康、健康等级,在2009—2018年则分别下降为健康、亚健康等级;安徽的水子系统健康等级则从2000年的不健康上升为2018年的健康;2000—2018年间,江苏、湖南和云南的水子系统健康等级呈健康—亚健康—健康的先下降后上升的“V”型演变趋势。

2000—2018年长江经济带林子系统健康等级有病态、不健康、健康、非常健康等4种,如图2c所示。2000—2009年,长江经济带上游区域林子系统的健康状况较好,中下游区域林子系统的健康状况较差。四川和云南的林子系统处于健康等级,而中下游大部分省(直辖市)的林子系统均处于病态或不健康等级。2018年,云南的林子系统健康等级上升为非常健康,但四川的林子系统健康等级则大幅下降到病态,这反映出长江经济带各省(直辖市)对林子系统的保护力度差异较大。虽然上海、江苏、四川等省(直辖市)的林子系统健康等级在2000—2018年间出现下降,但长江经济带林子系统的健康等级在此期间总体上仍呈上升趋势。

2000—2018年长江经济带田子系统健康等级有不健康、健康、亚健康和非常健康等4种(图2d)。浙江、江西、湖北、湖南、四川、贵州等6省的田子系统健康等级在2000—2018年为亚健康。而在同一时期,上海、江苏和安徽的田子系统健康等级均有所提高:上海的田子系统由2000年的亚健康等级提升为2018年的非常健康等级;江苏、安徽的田子系统的健康等级在2000年分别为亚健康、不健康,在2018年则分别提升为健康、亚健康。此外,重庆、云南的田子系统健康等级下降,均由2000年的健康转变为2018年的亚健康。整体上看,长江经济带田子系统的健康状况一般,健康等级需要进一步提升。

图2e显示,长江经济带湖子系统健康等级变化较大。2000—2018年,上海及长江经济带上游省(直辖市)如重庆、四川、云南、贵州等地的湖子系统均为病态或不健康等级;长江经济带除上海以外的中下游区域湖子系统在2000—2009年间均处于亚健康等级,在2018年,江苏和湖北的湖子系统健康等级分别提升到非常健康和健康。整体来看,长江经济带湖子系统健康等级处于较低水平,且长江经济带中下游绝大部分区域的湖子系统健康等级相对于上游区域而言明显更高。

2000—2018年长江经济带草子系统健康等级涵盖了从病态到非常健康所有的5种等级,且空间变化明显(图2f)。2000年重庆、贵州、上海的草子系统健康等级较低,均为病态;到2018年,三者的草子系统健康状况具有明显的提升趋势,均提升为不健康以上的等级。四川的草子系统健康等级提升最为明显,由不健康提升为非常健康。整体上看,长江经济带草子系统健康等级在2000—2018年呈上升趋势。

综合上述,尽管长江经济带山水林田湖草生命共同体的各子系统健康等级状况存在较大差异,但各子系统的健康等级总体呈上升趋势。对长江经济带山水林田湖草生命共同体中各子系统按整体健康状况由高到低排序,依次为:田子系统、水子系统、山子系统、草子系统、湖子系统、林子系统。

2.3 系统耦合协调探讨

不同子系统间存在着必然的联系,这种关系的强弱会影响整个系统的运行机制。耦合度和协调度作为描述各系统之间的联系的指数,能很好地表征不同子系统作用的联系强度与协调性。本研究对长江经济带山水林田湖草生命共同体各子系统之间的耦合协调性进行了探讨,结果如表4所示:6个子系统中任意2者组合有15种、任意3者组合有19种、任意4者组合有8种、任意5者组合有3种,加上全部6个子系统构成的组合,一共有46种系统组合。

从耦合度来看,除少数系统组合的耦合度小于0.8以外,其余大部分系统组合的耦合度均超过0.8,均处于高水平耦合阶段(表2)。2000—2018年,大部分系统组合的耦合度呈波动增长趋势,说明各子系统之间相互促进、相互影响的程度关系进一步加深,反映出长江经济带的生态环境保护取得巨大成就。尤其是对于林、湖、水3个子系统的治理和保护效果明显,与3者相关的系统组合耦合度均较高。与山子系统有关的不少系统组合的耦合度在0.7~0.8之间,处于磨合阶段,各子系统之间开始良性耦合,说明山子系统与各子系统的耦合作用加深。与山子系统相关的系统组合的耦合度一般较低,这与长江经济带区域地形地貌以及人文活动相关:长江经济带中西部区域地势陡峭,滑坡、泥石流等地质灾害时有发生,加上在过去的城市化进程中部分山地植遭受破坏而造成水土流失加剧,因此山子系统的稳定性有所降低。不过近些年来,在政府大力提倡生态文明建设和实施生态补偿的政策下,山子系统得到持续地保护和治理,系统稳定性上升,与其他子系统间的相互作用关系增强。

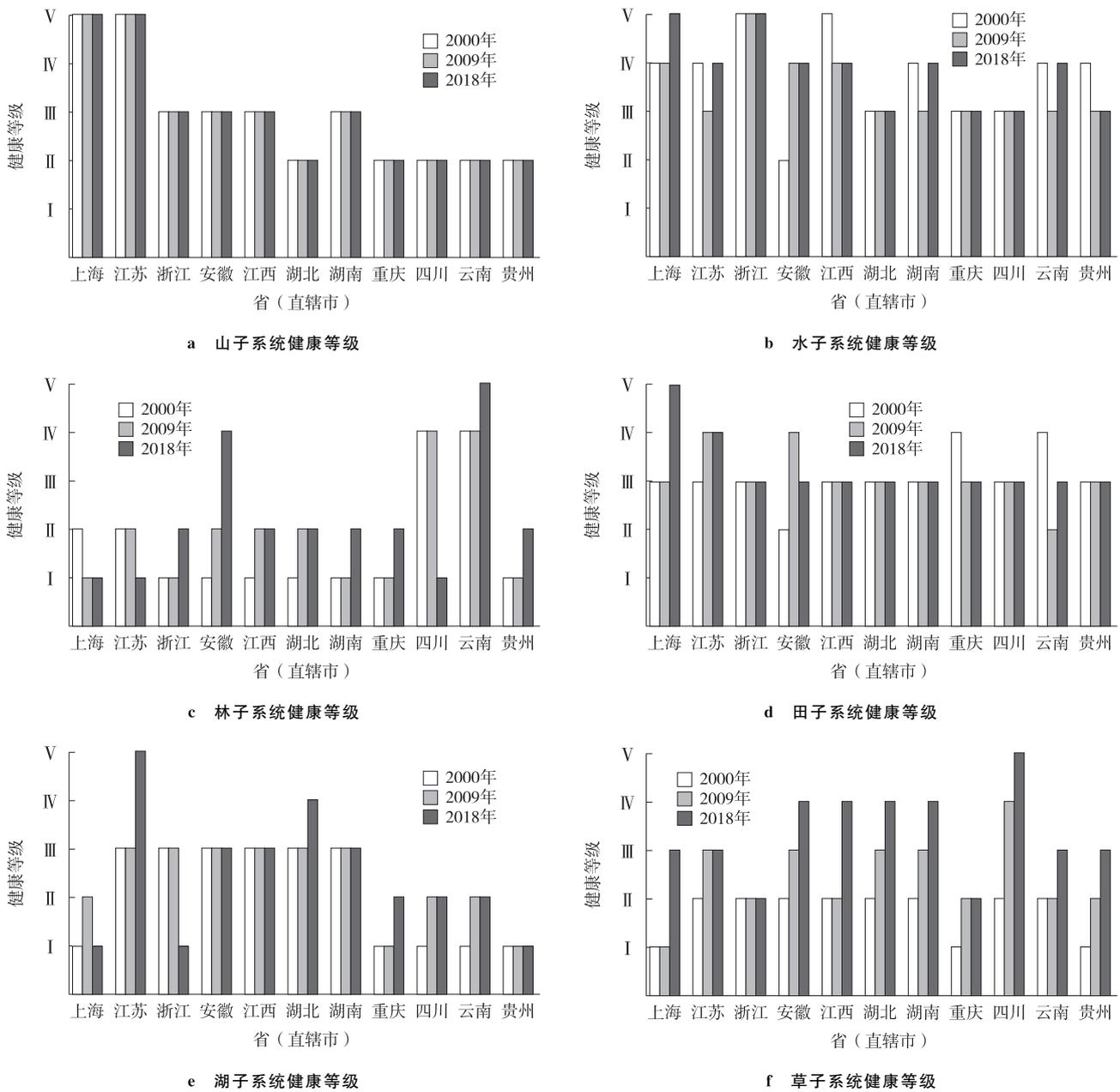


图 2 长江经济带山水林田湖草生命共同体各子系统健康诊断

Fig. 2 Health diagnosis on subsystems of the mountains-rivers-forests-lakes-grasses life community in the Yangtze River Economic Zone

从协调度来看,2000、2009 和 2018 年长江经济带山-水-林-田-湖-草系统组合的协调度分别为 0.382 1、0.371 0 和 0.377 7,处于轻度失调阶段;除田-山、山-草系统组合外,其余大部分系统组合的协调度在 0.3~<0.5 之间,处于轻度失调阶段。这说明长江经济带山、水、林、田、湖、草各子系统间的发展速度存在着较大差异,尤其是田、山、草这三个子系统的发展速度较为缓慢,以至于田-山、山-草系统组合处于失调阶段。不过总体上看,2000—2018 年长江经济带山水林田湖草生命共同体中各子系统间的系统组合的协调度基本上呈上升趋势,各子系统的发展速度差异在逐渐缩小,说明在此期间对长江经济带山水林田湖草生命共同体的保护和建设上取得了明显成效。

综合上述,虽然长江经济带山水林田湖草生命共同体的耦合性和协调性所处阶段水平仍有较大差异,但两者均有向更高水平阶段发展的趋势。这主要得益于长江经济带生态文明建设体制下对区域山、水、林、田、湖、草子系统的保护。但长江经济带山水林田湖草生命共同体的协调机制仍然存在较大问题,不同子系统的发展水平存在较大差异,仍需进一步加强对长江经济带山、水、林、田、湖、草各子系统的专项治理。

表4 长江经济带山水林田湖草生命共同体系统耦合度和协调度

Tab. 4 Coupling and coordination index of the mountains-rivers-forests-fields-lakes-grasses life community in the Yangtze River Economic Zone

系统组合	耦合度(C)			协调度(D)		
	2000年	2009年	2018年	2000年	2009年	2018年
林-湖	0.994 5	0.982 7	0.999 4	0.521 1	0.532 9	0.530 1
林-水	0.964 2	0.954 4	0.972 4	0.479 6	0.501 8	0.479 1
林-田	0.859 3	0.843 7	0.891 1	0.414 2	0.433 7	0.422 4
林-山	0.774 8	0.765 3	0.818 9	0.378 4	0.399 4	0.389 2
林-草	0.890 8	0.709 3	0.785 2	0.429 9	0.377 5	0.375 7
湖-水	0.986 4	0.992 8	0.979 9	0.454 9	0.456 9	0.470 8
湖-田	0.903 1	0.920 7	0.905 0	0.392 9	0.394 9	0.415 0
湖-山	0.825 3	0.853 9	0.835 2	0.359 0	0.363 7	0.382 4
湖-草	0.930 3	0.801 7	0.802 2	0.407 8	0.343 8	0.369 2
水-田	0.958 5	0.958 9	0.969 1	0.361 6	0.371 8	0.375 1
水-山	0.897 4	0.904 1	0.919 3	0.330 4	0.342 4	0.345 6
水-草	0.976 5	0.857 4	0.892 4	0.375 3	0.323 7	0.333 6
田-山	0.984 0	0.986 6	0.986 7	0.285 3	0.295 9	0.304 7
田-草	0.997 2	0.962 7	0.973 2	0.324 1	0.279 7	0.294 1
山-草	0.968 4	0.993 7	0.997 5	0.296 2	0.257 6	0.271 0
林-湖-水	0.976 0	0.968 0	0.979 4	0.484 4	0.496 2	0.492 6
林-湖-田	0.899 7	0.892 6	0.916 2	0.439 3	0.450 2	0.452 9
林-湖-山	0.836 1	0.835 3	0.860 6	0.413 7	0.426 2	0.428 9
林-湖-草	0.923 0	0.793 1	0.834 6	0.450 3	0.410 5	0.418 9
林-水-田	0.902 2	0.889 5	0.925 0	0.415 7	0.432 5	0.423 4
林-水-山	0.843 3	0.835 4	0.875 2	0.391 4	0.409 4	0.400 9
林-水-草	0.922 9	0.794 8	0.851 1	0.426 1	0.394 3	0.391 6
林-田-山	0.809 0	0.795 9	0.850 5	0.355 0	0.371 5	0.368 6
林-田-草	0.917 7	0.851 5	0.845 9	0.395 9	0.378 6	0.363 6
林-山-草	0.822 6	0.722 7	0.795 5	0.363 9	0.338 7	0.340 9
湖-水-田	0.934 2	0.945 5	0.935 3	0.401 3	0.406 3	0.418 5
湖-水-山	0.878 5	0.896 8	0.886 8	0.377 9	0.384 6	0.396 2
湖-水-草	0.952 9	0.857 9	0.863 0	0.411 4	0.370 5	0.387 0
湖-田-山	0.859 7	0.884 6	0.866 6	0.342 7	0.349 0	0.364 3
湖-田-草	0.917 7	0.851 5	0.845 9	0.373 1	0.336 1	0.355 9
湖-山-草	0.870 2	0.822 8	0.813 7	0.332 9	0.319 0	0.320 1
水-田-山	0.925 5	0.929 8	0.942 4	0.324 2	0.335 2	0.340 5
水-田-草	0.968 5	0.899 7	0.925 2	0.353 0	0.322 9	0.332 6
田-山-草	0.978 2	0.974 1	0.980 5	0.301 4	0.277 3	0.289 6
林-湖-水-田	0.920 4	0.914 8	0.932 7	0.434 1	0.445 2	0.445 9
林-湖-水-山	0.872 4	0.871 7	0.891 3	0.414 9	0.427 2	0.428 0
林-湖-水-草	0.937 3	0.839 0	0.871 4	0.442 2	0.415 3	0.420 6
林-水-田-山	0.851 9	0.842 3	0.884 3	0.369 9	0.385 4	0.382 1
林-水-田-草	0.904 1	0.813 5	0.867 4	0.394 2	0.374 7	0.375 4
湖-水-田-山	0.887 4	0.904 3	0.895 7	0.360 3	0.367 7	0.378 7
湖-水-田-草	0.935 7	0.876 7	0.879 0	0.384 0	0.357 5	0.372 1
水-田-山-草	0.943 6	0.908 1	0.929 1	0.327 2	0.309 5	0.318 8
林-湖-水-田-山	0.866 3	0.865 6	0.886 9	0.392 0	0.403 5	0.406 5
林-湖-水-田-草	0.912 8	0.840 8	0.872 0	0.412 5	0.394 6	0.400 8
湖-水-田-山-草	0.904 3	0.872 1	0.872 5	0.355 4	0.338 6	0.351 7
山-水-林-田-湖-草	0.876 1	0.825 7	0.856 0	0.382 1	0.371 0	0.377 7

2.4 健康驱动因子分析

根据信息熵基本原理,诊断指标权重的大小是指标影响程度的体现:指标权重越大,说明它的贡献程度也越大。长江经济带山水林田湖草生命共同体的子系统影响权重与指标影响权重如图 3 和图 4 所示。根据图 3 可知,对长江经济带山水林田湖草生命共同体整体健康状况的驱动作用最大的子系统是林子系统,湖子系统的驱动作用次之,水、草、田等 3 个子系统的驱动作用依次再次之,山子系统的驱动作用最小。

2000—2018 年,长江经济带山水林田湖草生命共同体林子系统的累计权重最大,达 0.93。林地是长江经济带最主要的地表类型,林地内植物生长、覆盖情况影响着森林生态环境以及林地服务人类的能力。结合图 4 可知,2000—2018 年长江经济带山水林田湖草生命共同体的林业单产(X9)及森林蓄积量(X10)在所有指标中的累计权重最高,均超过了 0.25。因此,林业单产及森林覆盖率是影响林子系统健康状况的最主要因子,这两项指标值越高,表明林子系统的生态系统服务能力越大,林子系统也越健康。近些年来,长江经济带各省(直辖市)注重森林保护,极大提高了森林在山水林田湖草生命共同体中的作用。

长江经济带山水林田湖草生命共同体的湖、水子系统中,湖泊面积(X14)、人均水产品(X15)和渔业总产值(X16)在 2000—2018 年间的累计权重均大于 0.07(图 4),因此它们对湖、水子系统的健康等级有着重要影响。湖泊的功能主要体现在洪水调蓄、水质净化、水产品供给等方面,湖泊面积大小直接关系到上述功能的实现与大小。长江经济带中下游地区拥有中国最丰富的湖面和水资源,是湖、水子系统功能体现最为明显的区域,因而这些区域山水林田湖草生命共同体的湖、水子系统健康等级也相应较高。

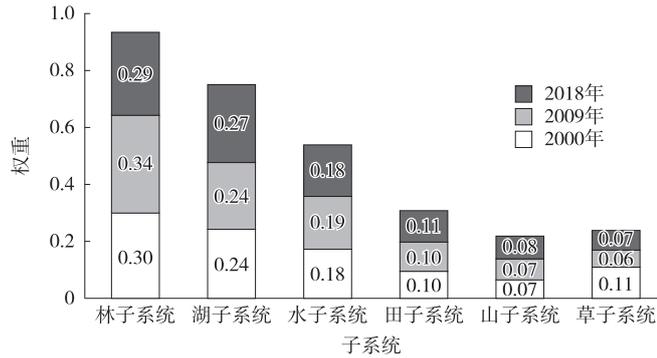
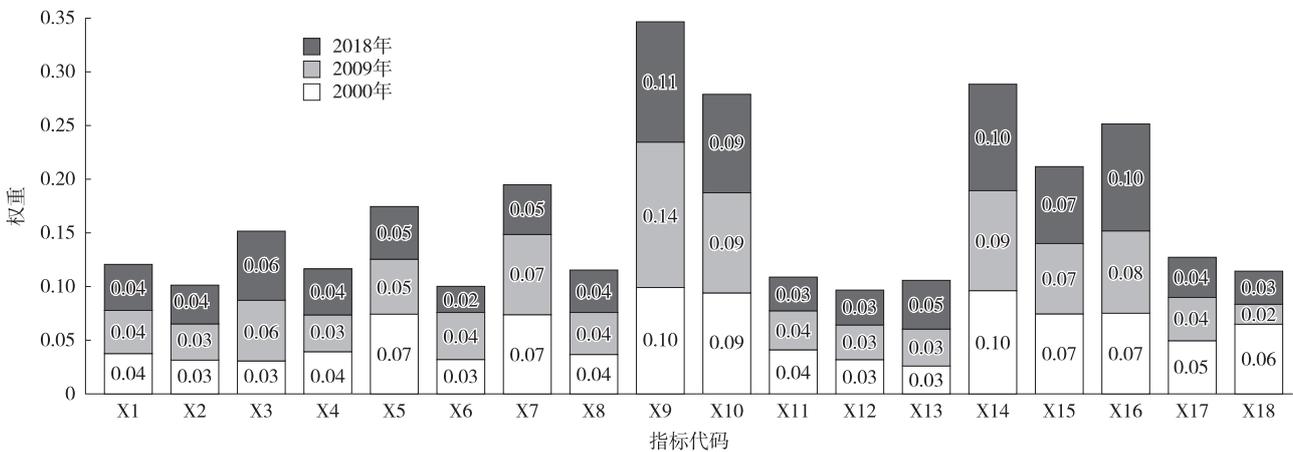


图 3 长江经济带山水林田湖草生命共同体子系统的影响权重
Fig. 3 The influence weight of the ecosystem of the mountains-rivers-forests-fields-lakes-grasses life community in the Yangtze River Economic Zone



注:各指标代码对应的中文含义见表 1。

图 4 长江经济带山水林田湖草生命共同体健康体系影响指标的影响权重
Fig. 4 The influence weights of the health system impact indicators of the mountains-rivers-forests-fields-lakes-grasses life community in the Yangtze River Economic Zone

在长江经济带山水林田湖草生命共同体中,田、山、草等 3 个子系统的权重明显低于林、湖、水等 3 个子系统的权重。对于山子系统来说,因为本研究主要考虑山子系统的固有属性,因而山子系统的权重及相关指标的权重变化较小;田地作为长江经济带主要用地类型之一,由于受人类活动影响较大,因此健康等级上处于较低水平;草子系统中植被类型较为单一,群落结构简单,且系统整体稳定性较差,因此该子系统对长江经济带山水林田湖草生命共同体的影响也较低。

总体上看,尽管长江经济带山水林田湖草生命共同体的不同子系统和指标的影响权重存在着较大的差异,

但是不同子系统和指标相互作用、相互影响是整个生命共同体健康状况改善的关键。协调利用不同指标因素来提升不同子系统健康等级,就能改善和提升整个长江经济带山水林田湖草生命共同体的健康状况。

3 讨论

3.1 基于山水林田湖草生命共同体研究的综合对比分析

山水林草田湖生命共同体理念是推进生态文明建设和长江经济带生态系统的综合整治、修复与健康管理的,坚守长江经济带发展生态底线,实现经济绿色发展转型的方向和保障^[31-32]。在过去,学者们根据特定目标与研究背景,对山水林田湖草生命共同体展开了大量的研究。本研究将不同山水林田湖草生命共同体的研究与本研究进行对比后发现(表5),相关研究的共性主要表现在均从山水林田湖草生命共同体指标体系构建角度出发对山水林田湖草生命共同体展开健康评价或诊断。同时,这些研究的评价方法具有较大的差异:系统聚类、等级评价、综合指数等传统方法能够满足评价指标体系的复杂特征,但不能消除由于指标体系的不确定性、多样性等数据模糊引起的问题;基于实数编码的加速遗传算法求解模型通过决策变量的编码作为运算对象,可以直接对指标数据集合、序列、矩阵进行操作,解决数据的不确定性和模糊性问题,但由于单一的算法编码不能全面将优化问题的约束表示出来,存在工作量大、效率低下、容易出现过早收敛等缺点;本研究使用正态云模型进行健康诊断,兼顾了数据的模糊性和评价等级的不确定性,客观分析各个指标因子的隶属等级,弥补了传统研究方法的缺点。此外,相关研究所关注的侧重点也有所不同,其中大多数研究仅对山水林田湖草生命共同体的健康诊断;虽然也有部分研究进行了驱动因子、耦合关系的研究,但仅局限于区域整体视角。与已有研究相比,本文研究结果具有以下创新性:1)从整体和分散的视角对整体区域山水林田湖草生命共同体以及各子系统的健康进行了诊断识别;相比以往研究仅从单一视角出发进行健康状况诊断,多视角诊断可以更好地了解摸清山水林田湖草生命共同体的健康状况。2)山水林田湖草生命共同体各子系统间的耦合协调关系描述了山水林田湖草生命共同体以及各子系统间的内在关系,与传统的相关分析、回归分析相比,耦合协调关系分析更能描述子系统之间存在的实质关系。3)山水林田湖草生命共同体的耦合协调驱动分析揭示了生命共同体耦合协调发展的内在机制,对优化各子系统之间的联系具有重要的意义。

表5 不同山水林草田湖生命共同体研究的比较分析

Tab. 5 Comparative analysis of different studies of the mountains-rivers-forests-fields-lakes-grasses life community

研究区	研究方法	研究结果	文献来源
长江经济带	健康诊断指标体系、正态云模型、耦合协调模型	山水林田湖草生命共同体健康诊断结果、子系统健康诊断结果、共同体耦合协调水平、驱动因子	本研究
三峡水库重庆段	健康评价指标体系、系统聚类	山水林(草)田湖人生命共同体健康状况分级及特征、山水林(草)田湖人生命共同体健康的成因	文献[1]
贵阳市红枫湖区域	健康评价体系、等级评分法	山水林田湖生命共同体基本状态、山水林田湖生命共同体协同性分析、主要影响因子分析	文献[12]
南昌市	评价指标体系构建、综合指数法	山水林田湖草城生命共同体健康状况、水林田湖草和城系统耦合协调发展分析	文献[32]
三峡库区重庆段	健康评价体系、基于实数编码的加速遗传算法求解模型	山水林田湖草生命共同体健康诊断结果、驱动因子	文献[15]
长白山地区	基于收集数据的自然断点法、空间叠置分析法	山水林田湖草空间分布特征、山水林田湖草生命共同体各子系统间的依存关系	文献[33]
广西壮族自治区	健康评价体系、综合评价指数、耦合协调模型	山水林田湖生命共同体的综合评价指数、耦合协调度结果与分析	文献[14]

3.2 山水林田湖草生命共同体耦合协调驱动机制分析

山水林田湖草生命共同体间的耦合协调关系是各子系统单独或综合作用的结果^[14,31],各子系统间良性的相

互作用、相互影响与制约关系是决定山水林田湖草生命共同体向耦合协调发展的关键^[14,33]。本研究以构建的 18 个指标体系作为影响长江经济带山水林田湖草生命共同体耦合协调发展的驱动因子,在 SPSS 19.0 中使用因子分析方法进行降维分析。基于主成分特征值大于 1 的特性^[34],共提取得到 5 个主成分,5 个主成分的累计贡献率超过 85%。相关主成分的载荷得分大于 0、小于 0 分别表明有关指标能够促进、抑制山水林田湖草生命共同体的耦合协调发展。由表 6 可知:各影响指标的驱动作用具有极大的不确定性和波动性,没有表现一定的规律性;起伏度(X1)、 $\geq 25^\circ$ 坡地覆盖率(X2)、人均水资源量(X4)、单位面积水资源量(X5)和造林总面积(X7)的主成分载荷得分均达到 0.8 以上,表明它们在促进长江经济带山水林田湖草生命共同体耦合协调发展中发挥着重要作用;林业单产(X9)、粮食单产(X11)的主成分载荷得分低于 -0.7,表明它们在长江经济带山水林田湖草生命共同体耦合协调发展中起到较强的抑制作用;降水量(X3)、城市污水处理率(X6)等指标的作用随主成分的影响作用发生变化,在不同成分中起不同作用(促进或抑制)。引起驱动指标不确定性变化的主要原因是这些指标之间的相互作用关系以及各子系统之间的影响关系。例如起伏度、 $\geq 25^\circ$ 坡地覆盖率、人均水资源量、森林覆盖率等一般可作为表征区域生态环境质量的因子;在长江经济带,地形起伏度高的山区一般为林地所覆盖,具有丰富的降水量和植被覆盖率,使得整个系统具有良好的功能结构,从而促进长江经济带山水林田湖草生命共同体的耦合协调发展。又例如林业单产、粮食单产表征了人类在林、田子系统生产活动,而人类的生存经营活动会对系统产生干扰,使得系统的稳定性降低,从而对林、田子系统的耦合协调发展产生约束作用。此外,降水量等指标的作用具有不确定性:合适的降水量会促进各子系统之间耦合协调关系;过高的降水量则引发水土流失以及滑坡、泥石流等灾害,使得植被覆盖率降低^[33],不利于山、水、田等子系统的健康,对它们的耦合协调发展起到抑制作用。因此,长江经济带山水林田湖草生命共同体耦合协调关系的驱动机制是驱动因子相互影响、作用的综合结果,对于优化各子系统之间的耦合协调关系要考虑这些驱动因子间的相互作用关系,以此提升协调水平,促进长江经济带山水林田湖草生命共同体的良性耦合发展。

3.3 山水林田湖草生命共同体保护的思考与建议

山水林田湖草生命共同体中各子系统相互联系、相互制约形成统一整体。因此,有关治理思想观念需要打破传统保守局限^[35],强调统筹规划、综合治理;在治理技术选用方面要因地制宜、结合实际,根据不同类别生命共同体的健康程度及存在突出问题,针对性地应用相关治理技术。长江经济带作为重要的生态保护源地,对它的山水林田湖草生命共同体治理必须将客观自然规律和可持续发展观念相融合,实施分类保护与单项治理相结合的修复模式,同时在治理过程中应以多因素为导向,注重系统整体性功能^[36]保护。

在山水林田湖草生命共同体的修护与治理过程中,要充分利用各子系统间的耦合协调性,充分调动区域生态环境的自我修复能力,以提升环境治理水平。同时,对山、水、林、田、湖、草子系统进行专项治理时,应做如下考虑:1) 在治理山子系统时要尽量维护山体轮廓和生态廊道的完整性^[37]。长江经济带中上游区域地处中国地形第一阶梯、第二阶梯地段,地势起伏落差大,产生了不同的地域空间形态,因此要着重改善重点生态区域及周围人类活动区如废弃的矿山等,同时应通过植物措施加强山体的保护,以此来治理水土流失并减少山体滑坡等灾害的发生。2) 优化水子系统,增强水土保持能力。长江经济带属亚热带季风气候,降水量充沛,过高的降水量使得区域面临严重的水土流失问题。据统计,长江经济带水土流失面积达 40.10 万 km^2 ,占整个区域总面积的 19.46%,其中水力侵蚀面达到侵蚀总量的 99%且主要集中于中上游地区^[21,38]。因此,对于中上游区域,尤其是四川、云南、贵州等水子系统健康等级长期处于健康以下的区域,应持续加强水土流失动态监测,依据水土流失的程度来进行分类、分区治理^[39];同时还要加强地下水的保护和合理开发,提高水子系统的安全供给保障能力。3) 修复林子系统,提高坡地森林覆盖率,有利于减轻水土流失和提高水源涵养调蓄能力。根据本研究中的长江经济带山水林田湖草生命共同体林子系统健康诊断结果可知,长江经济带中下游省(直辖市)的林子系统大部分处于病态或者不健康等级;因此相关省(直辖市)应适度扩大生态经济林草(如特色经济果林、中药材、茶)等种植面积比例,守住发展和生态两条底线^[40],提升林子系统物质产出和生态服务功能。4) 保护田子系统,保证国家粮食安全。对于田子系统健康等级低下的四川、安徽等省,对基本农田的保护要全面规划、合理利用、用养结合,同时重视质的保护,合理减少农药化肥的施用量,提高土壤质量。5) 加强湖子系统修护建设。长江经济带中下游区域作为“江南水乡”,湖泊、河流纵横交错,同时人口密集,人类的生产生活对湖子系统有巨大影响,这些区域要提高生产生活污水处理率,提升河湖水域的环境容量,为水生生物提供适宜的生产环境,从而增加水产品产量、保证水产品供应品质。6) 提升草子系统功能,要注意城市生态用地的合理配置和草生态系统结构、服务功能

的优化提升,提高草生态系统稳定性及承载力。例如在重庆,对于草子系统的保护可以通过增加城市公共绿地面积、提高建成区绿化覆盖率来进行。

表6 长江经济带山水林田湖草生命共同体健康胁迫因子主成分分析结果

Tab. 6 Principal component analysis results of health stress factors in the mountains-rivers-forests-fields-lakes-grasses life community in the Yangtze River Economic Zone

年份	主成分	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
2000	1	0.932	0.822	0.020	0.891	0.867	-0.637	0.838	0.538	-0.864
	2	0.163	0.204	0.944	0.183	-0.016	-0.331	-0.438	0.782	-0.240
	3	0.062	0.147	-0.053	0.131	-0.033	-0.141	0.141	0.194	0.038
	4	0.285	0.464	-0.236	-0.182	-0.119	0.377	0.177	-0.006	0.155
	5	0.016	-0.062	-0.007	-0.032	0.161	0.238	-0.052	-0.132	0.262
2009	1	0.851	0.724	-0.651	0.857	-0.245	-0.381	0.830	0.242	-0.652
	2	0.469	0.578	0.614	0.393	0.845	0.344	0.009	0.873	-0.406
	3	-0.050	-0.003	-0.233	0.106	-0.263	0.096	0.220	-0.006	-0.418
	4	0.137	0.256	-0.145	-0.054	-0.309	0.611	0.378	-0.366	0.330
	5	-0.104	-0.142	0.211	0.155	0.177	-0.521	0.105	0.120	0.266
2018	1	0.947	0.865	-0.076	0.939	0.861	-0.173	0.717	0.632	-0.809
	2	-0.019	-0.010	0.160	0.108	-0.279	0.273	0.208	0.300	-0.436
	3	0.212	0.297	0.836	-0.004	-0.084	-0.014	-0.184	0.654	-0.223
	4	0.089	0.276	-0.236	0.001	0.035	-0.898	0.044	-0.136	-0.034
	5	-0.101	-0.197	0.376	0.208	-0.017	-0.026	0.203	0.111	0.206
年份	主成分	X10	X11	X12	X13	X14	X15	X16	X17	X18
2000	1	0.774	-0.772	0.758	0.602	-0.496	-0.452	-0.604	-0.027	-0.343
	2	-0.269	0.010	-0.311	-0.169	-0.059	0.649	0.297	-0.372	-0.076
	3	0.204	-0.047	0.321	0.179	0.639	0.357	0.593	0.739	0.681
	4	0.271	0.252	-0.270	0.180	-0.469	0.430	0.311	0.119	-0.248
	5	-0.249	-0.492	0.255	0.456	-0.060	0.160	0.264	-0.449	0.139
2009	1	0.779	-0.857	0.713	0.414	-0.381	-0.622	-0.595	0.274	-0.572
	2	0.112	0.255	-0.262	-0.302	-0.203	0.554	0.114	0.030	0.230
	3	0.244	0.101	-0.018	0.576	0.778	0.382	0.653	0.733	0.504
	4	0.480	0.162	-0.517	-0.239	-0.333	-0.069	-0.026	0.055	0.297
	5	0.224	0.190	-0.372	0.080	0.134	-0.296	-0.374	0.313	0.218
2018	1	0.804	-0.794	0.606	-0.109	-0.443	-0.343	-0.512	0.499	-0.051
	2	0.020	-0.201	0.155	0.741	0.793	0.524	0.581	0.432	0.835
	3	-0.135	0.109	-0.380	-0.474	-0.281	0.580	0.088	-0.559	0.171
	4	0.358	0.474	-0.555	0.003	0.017	0.270	0.325	0.382	-0.027
	5	0.252	0.249	-0.359	0.170	0.171	-0.400	-0.476	0.005	0.303

注:各指标代码对应的中文含义见表1。

4 结论

本研究结果显示:2000—2018年长江经济带山水林田湖草生命共同体健康等级上升的省(直辖市)数量约占

长江经济带省(直辖市)总数的 55%,且长江经济带山水林田湖草生命共同体健康等级整体上呈上升的趋势;在空间分布上,山水林田湖草生命共同体健康等级较低的省(直辖市)主要分布于长江经济带的上游和下游区域,中游区域是整个长江经济带山水林田湖草生命共同体健康状况最好的区域。长江经济带山、水、林、田、湖、草子系统总体上的健康状况存在较大的差异,按健康等级由高到低对各子系统进行排序,依次为:田子系统、水子系统、山子系统、草子系统、湖子系统、林子系统。在由长江经济带山、水、林、田、湖、草子系统构成的 46 种系统组合中,除少数系统组合的耦合度小于 0.8 以外,其余系统组合的耦合度均超过 0.8,处于高水平耦合阶段;接近 98%的系统组合的协调度在 $0.3 \sim < 0.5$ 之间,处于轻度失调阶段;林业单产、森林蓄积量、湖泊面积、人均水产品 and 渔业总产值是长江经济带山水林田湖草生命共同体健康的主要驱动因子。上述结果揭示:虽然 2000—2018 年长江经济带山水林田湖草生命共同体的耦合性和协调性处于不同发展阶段水平,但两者都有向更高水平阶段发展的趋势。

参考文献:

- [1] 苏维词,杨吉.山水林(草)田湖生命共同体健康评价及治理对策:以长江三峡水库重庆库区为例[J].水土保持通报,2020,238(5):215-223.
SU W C, YANG J. Health assessment and countermeasures on mountains-rivers-forests (grasslands)-farmlands-lakes-human life communities: a case study at Chongqing area of Three Gorges Reservoir of Yangtze River [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(5): 209-217.
- [2] ANGELO M J. Harnessing the power of science in environmental law: why we should, why we don't, and how we can [J]. Texas Law Review, 2008, 86(6): 1527.
- [3] BIRAT J P, DECLICH A, FICK G, et al. The environment and materials, from the standpoints of ethics, social sciences, law and politics [J]. Matériaux & Techniques, 2019, 107(1): 102.
- [4] LESER H, NAGEL P. Landscape diversity—a holistic approach [M] // Barthlott W, Winiger M, Biedinger N. Biodiversity: a challenge for development research and policy. Heidelberg: Springer, 2001: 129-143.
- [5] SANDIFER P A, SUTTON-GRIERA E, WARD B P, et al. Exploring connections among nature, biodiversity, ecosystem services, and human health and well-being: opportunities to enhance health and biodiversity conservation [J]. Ecosystem Services, 2015, 12: 1-15.
- [6] 王志芳,高世昌,苗利梅,等.国土空间生态保护修复范式研究[J].中国土地科学,2020,34(3):1-8.
WANG Z F, GAO S C, MIAO L M, et al. Paradigm research for territorial ecological protection and restoration [J]. China Land Science, 2020, 034(3): 1-8.
- [7] 彭建,吕丹娜,张甜,等.山水林田湖草生态保护修复的系统性认知[J].生态学报,2019,39(23):8755-8762.
PENG J, LÜ D N, ZHANG T, et al. Systematic cognition of ecological protection and restoration of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(23): 8755-8762.
- [8] 罗明,于恩逸,周妍,等.山水林田湖草生态保护修复试点工程布局及技术策略[J].生态学报,2019,39(23):8692-8701.
LUO M, YU E Y, ZHOU Y, et al. Distribution and technical strategies of ecological protection and restoration projects for mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(23): 8692-8701.
- [9] 叶艳妹,林耀奔,刘书畅,等.山水林田湖草生态修复工程的社会-生态系统(SES)分析框架及应用:以浙江省钱塘江源头区域为例[J].生态学报,2019,39(23):8846-8856.
YE Y M, LIN Y B, LIU S C, et al. Social-ecological system (SES) analysis framework for application in ecological restoration engineering of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands: utilizing the source area of Qiantang River in Zhejiang Province as an example [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(23): 8846-8856.
- [10] 王夏晖,何军,饶胜,等.山水林田湖草生态保护修复思路与实践[J].环境保护,2018,46(3):19-22.
WANG X H, HE J, RAO S, et al. Design of implementation path of ecological engineering for ecological protection and restoration of multi ecological elements [J]. Environmental Protection, 2018, 46(3): 19-22.
- [11] 张翼,王波.石川河富平(城区段)山水林田湖草综合整治效益评价[J].西部大开发(土地开发工程研究),2019,4(7):19-24.
ZHANG J, WANG B. Comprehensive renovation benefit evaluation of mountains, rivers, forests, fields, lakes and grasses in Fuping Shichuan River (urban section) [J]. Land Development and Engineering Research, 2019, 4(7): 19-24.
- [12] 吕思思,苏维词,赵卫权,等.山水林田湖生命共同体健康评价:以红枫湖区域为例[J].长江流域资源与环境,2019,28(8):1987-1997.

- LÜ S S, SU W C, ZHAO W Q, et al. Life community health evaluation of mountains, rivers, forests, farmland and lakes: taking Hongfeng Lake as an example[J]. Resources and Environment in the Yangtze River Basin, 2019, 28(8): 1987-1997.
- [13] 罗明, 周妍, 鞠正山, 等. 粤北南岭典型矿山生态修复工程技术模式与效益预评估: 基于广东省山水林田湖草生态保护修复试点框架[J]. 生态学报, 2019, 39(23): 8911-8919.
- LUO M, ZHOU Y, JU Z S, et al. Technological model and benefit pre-evaluation of eco-environmental rehabilitation engineering of typical mines in the Nanling area of Northern Guangdong Province under the pilot framework of the eco-restoration of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(23): 8911-8919.
- [14] 张中秋, 劳燕玲, 王莉莉, 等. 广西山水林田湖生命共同体的耦合协调性评价[J]. 水土保持通报, 2021, 41(3): 320-332.
- ZHANG Z Q, LAO Y L, WANG L L, et al. Evaluation on coupling and coordination status of mountain, water, forest, field, and lake life community in Guangxi Zhuang Autonomous Region[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(3): 320-332.
- [15] 曾春芬, 周仪琪, 段振东, 等. 山水林田湖草城生命共同体健康轨迹评价: 以三峡库区重庆段为例[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2020, 37(4): 57-66.
- ZENG C F, ZHOU Y Q, DUAN Z D, et al. Life community health trajectory evaluation of mountains, rivers, forests, farmland, lakes, grass, and cities: a case study of Three Gorges Reservoir Area[J]. Journal of Chongqing Normal University (Natural Science), 2020, 37(4): 57-66.
- [16] 陈阳, 王西平, 张冬冬, 等. 三门峡市黄河南岸铝土矿区山水林田湖草生态保护修复的必要性及对策探讨[J]. 环境生态学, 2020, 2(5): 43-46.
- CHEN Y, WANG X P, ZHANG D D, et al. Discussion on the necessity and countermeasures for ecological protection and restoration of mountains, rivers, forests, farmlands, lakes and grasslands in the bauxite mine area on the south bank of the Yellow River in Sanmenxia City[J]. Environmental Ecology, 2020, 2(5): 43-46.
- [17] 吴钢, 赵萌, 王辰星. 山水林田湖草生态保护修复的理论支撑体系研究[J]. 生态学报, 2019, 39(23): 8685-8691.
- WU G, ZHAO M, WANG C X. Research on the theoretical support system of ecological protection and restoration of full-array ecosystems[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(23): 8685-8691.
- [18] 余新晓, 贾国栋. 统筹山水林田湖草系统治理带动水土保持新发展[J]. 中国水土保持, 2019(1): 5-8.
- YU X X, JIA G D. Coordinating the governance of mountains, rivers, forests, fields, lakes and grasses to drive new development of soil and water conservation[J]. Soil and Water Conservation in China, 2019(1): 5-8.
- [19] 杨胜苏, 刘卫柏. 基于恢复生态学的洞庭湖区“山水林田湖草”生态修复研究[J]. 生态学报, 2021, 41(16): 6430-6439.
- YANG S S, LIU W B. Research on ecological restoration of “landscapes, forests, fields, lakes and grasses” in Dongting Lake area: based on the perspective of restoration ecology[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(16): 6430-6439.
- [20] 欧阳友, 汪发元. 绿色技术创新、能源发展对实体经济发展的影响: 基于长江经济带 2005—2020 年数据的实证分析[J]. 统计理论与实践, 2023(1): 12-17.
- OU Y Y, WANG W B. The impact of green technology innovation and energy development on the development of the real economy: an empirical analysis based on the data of the Yangtze River Economic Belt from 2005 to 2020[J]. Statistical Theory & Practice, 2023(1): 12-17.
- [21] 杨荣金, 孙美莹, 张乐, 等. 长江经济带生态环境保护的若干战略问题[J]. 环境科学研究, 2020, 33(8): 1795-1804.
- YANG J R, SUN M Y, ZHANG L, et al. Some strategic issues of ecological environmental protection in the Yangtze River Economic Belt[J]. Research of Environmental Sciences, 2020, 33(8): 1795-1804.
- [22] 张哲, 郝海广, 张强, 等. 新疆阿勒泰地区持续推进山水林田湖草沙生态保护修复的对策建议[J]. 环境与可持续发展, 2021, 46(5): 93-98.
- ZHANG Z, HAO H G, ZHANG Q, et al. Countermeasures and suggestions for continuously promoting protection and restoration of “mountains, rivers, forests, farmlands, lakes, grasslands and deserts” in Altay Prefecture of Xinjiang[J]. Environment and Sustainability Development, 2021, 46(5): 93-98.
- [23] 苏海磊, 王凡凡, 陈海燕, 等. 浙江省丽水市山水林田湖草生态保护修复工程规划与实践[J]. 环境工程技术学报, 2022, 12(1): 224-231.
- SU H L, WANG F F, CHEN H Y, et al. Planning and practice of “mountain-river projects” in Lishui City, Zhejiang Province [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2022, 12(1): 224-231.
- [24] LI Y, LIU Y J, ZHANG Q, et al. Research on ecological protection and restoration measures in Altay Region based on the coupling perspective of the mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands system[J]. Journal of Resources and Ecology,

- 2021,12(6):791-800.
- [25] 中华人民共和国环境保护部. 环境保护部关于印发《国家生态文明建设示范区管理规程(试行)》、《国家生态文明建设示范县、市指标(试行)》的通知[J]. 中华人民共和国国务院公报,2016(15):82-87.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Circular of the ministry of environmental protection on printing and issuing the rules on administration of demonstration zones for promoting national ecological progress (for trial implementation) and the indicators of demonstration cities and counties for promoting national ecological progress (for trial implementation)[J]. Gazette of the State Council of the People's Republic of China,2016(15):82-87.
- [26] 《环境保护》编辑部. 国家环境保护模范城市考核指标(试行)[J]. 环境保护,1997(7):4.
Editorial Department of *Environmental Protection*. Assessment indicators for national environmental protection model cities (for trial implementation)[J]. *Environmental Protection*,1997(7):4.
- [27] 曹佳梦,官冬杰,黄大楠,等. 重庆市生态风险预警等级划分及演化趋势模拟[J]. 生态学报,2022,42(16):6579-6594.
CAO J M, CUAN D J, HUANG D N, et al. Classification of ecological risk warning levels and simulation of evolutionary trends in Chongqing Municipality[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2022,42(16):6579-6594.
- [28] 龚艳冰. 基于正态云模型和熵权的河西走廊城市化生态风险综合评价[J]. 干旱区资源与环境,2012,26(5):169-174.
GONG Y B. Comprehensive assessment on ecological risk of Hexi Corridor urbanization based on normal cloud model and entropy weight[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*,2012,26(5):169-174.
- [29] 季晓翠,王建群,傅杰民. 基于云模型的滨海小流域水生态文明评价[J]. 水资源保护,2019,35(2):74-79.
JI X C, WANG J Q, FU J M. Evaluation of water ecological civilization in small coastal watershed based on cloud model[J]. *Water Resources Protection*,2019,35(2):74-79.
- [30] 苏宏枝,吴宗杰,董会忠. 黄河三角洲高效生态经济区人口、经济与环境协调发展研究:基于主成分与耦合协调度模型[J]. 山东理工大学学报(自然科学版),2018,32(2):21-25.
SUN H Z, WU Z J, DONG H Z. Research on the coordinated development of population, economy and environment in the high-efficiency ecological economic zone of the Yellow River Delta: based on the model of principal component and coupling coordination[J]. *Journal of Shandong University of Technology (Natural Science Edition)*,2018,32(2):21-25.
- [31] 李正,赵林. 西北干旱区山水林田湖草沙系统治理研究实践:以塔里木河重要源流区为例[J/OL]. 中国国土资源经济,2022,35(2):13-18.
LI Z, ZHAO L. Research and practice on systematic management of mountains, rivers, forests, fields, lakes, grasslands, and sands in the northwest arid zone: taking the Tarim River important headwaters area as an example[J]. *Natural Resource Economics of China*,2022,35(2):13-18.
- [32] 甘凤,叶长盛. 南昌市山水林田湖草城生命共同体健康评价[J]. 江西科学,2022,40(3):459-467.
GANG F, YE C S. Health assessment on mountain-water-forest-field-lake-grass-city life community in Nanchang[J]. *Jiangxi Science*,2022,40(3):459-467.
- [33] 于恩逸,齐麟,代力民,等. “山水林田湖草生命共同体”要素关联性分析:以长白山地区为例[J]. 生态学报,2019,39(23):8837-8845.
YU E Y, QI L, DAI L M, et al. Correlation analysis of elements in the mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands life community: using Changbai Mountains as an example[J]. *Acta Ecologica Sinica*,2019,39(23):8837-8845.
- [34] 辛顺杰,连华,梁浩东,等. 基于“山水林田湖草沙”生命共同体理念的生态问题识别与修复策略:以甘南洮河流域为例[J]. 草业科学,2022,39(6):1256-1268.
XIN S J, LIAN H, LIANG H D, et al. Ecological problem identification and restoration strategy based on the mountain-water-forest-field-lake-grass-sand life community concept in Taohe River Watershed, Gannan, China[J]. *Pratacultural Science*,2022,39(6):1256-1268.
- [35] 张洪敏,张艳芳,田茂,等. 基于主成分分析的生态变化遥感监测:以宝鸡市城区为例[J]. 国土资源遥感,2018,30(1):203-209.
ZHANG H M, ZHANG Y F, TIAN M, et al. Dynamic monitoring of eco-environment quality changes based on PCA: a case study of urban area of Baoji City[J]. *Remote Sensing for Land and Resources*,2018,30(1):203-209.
- [36] LI Z H, GUAN D J, ZHOU L L, et al. Constraint relationship of ecosystem services in the Yangtze River Economic Belt, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*,2021,29(9):12484-12505.
- [37] 余新晓,吴岚,饶良懿,等. 水土保持生态服务功能评价方法[J]. 中国水土保持科学,2007,5(2):110-113.
YU X X, WU L, RAO L Y, et al. Assessment methods of ecological functions of soil and water conservation measures[J]. *Science of Soil and Water Conservation*,2007,5(2):110-113.

- [38] 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.
HE G,WANG W W,XIA Y L,et al. Supervision and evaluation of the regional ecological security based on the normal cloud model[J]. Journal of Safety and Environment,2018,18(2):807-813.
- [39] 徐洲洋. 基于 PSR 模型的四川生态系统健康时空动态研究[J]. 国土资源遥感,2020,32(2):251-258.
XIU Z Y. Spatial-temporal dynamics of ecosystem health in Sichuan Province based on PSR model[J]. Remote Sensing for Land and Resources,2020,32(2):251-258.
- [40] 靳乐山,楚宗岭,邹苍改. 不同类型生态补偿在山水林田湖草生态保护与修复中的作用[J]. 生态学报,2019,39(23):8709-8716.
JIN L S,CHU Z L,ZOU C G. Role of various types of eco-compensation in ecological protection and restoration of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands[J]. Acta Ecologica Sinica,2019,39(23):8709-8716.

Resources, Environment and Ecology in Three Gorges Area

Health Evaluation of the Mountain-Water-Forest-Field-Lake-Grass Life Community in the Yangtze River Economic Zone

LI Zihui^{1,2,3}, GUAN Dongjie¹, HE Guangxiu¹, ZHANG Yanjun⁴

(1. School of Smart City, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074;

2. China Geological Survey Kunming General Survey of Natural Resources Center, Kunming 650100;

3. Chongqing Academy of Eco-environmental Science, Chongqing 401147;

4. School of Business Management, Chongqing University of Technology, Chongqing, 400050, China)

Abstract: [Purposes] The ecological management of mountain, water, forest, field, lake, and grass in the Yangtze River Economic Zone (YREZ) is a century-old plan for the sustainable development. [Methods] The mountain-water-forest-field-lake-grass (MWFFLG) life community in the YREZ was taken as the research object, based on the construction of the health diagnosis system of the MWFFLG life community, the Normal Cloud Model were used to diagnose the health status of the MWFFLG life community, and analyze the coupling and coordination relationship among the different subsystems. [Results] 1) The overall health status of the MWFFLG life community in the YREZ from 2000 to 2018 showed an improvement trend; spatially, the health ranking was in the order: Midstream > Upstream > Downstream. 2) The longitudinal diagnosis results of the health status of different subsystems were: field subsystem > water subsystem > mountain subsystem > grass subsystem > lake subsystem > forest subsystem. 3) There were 46 system combinations in the coupling associations among the six subsystems in the YREZ, most of which had coupling indices exceeding 0.8, which were all at a high level of coupling; however, the coordination coefficients of most system combinations were slightly out of adjustment (0.3–0.5). 4) Forestry yield, forest stock volume, lake area, per capita aquatic products, and total fishery output value were the main driving factors for the health of the MWFFLG life community in the YREZ. [Conclusions] The MWFFLG life community in the YREZ had been developing in a healthy way, and the coupling and coordination among systems were on the rise.

Keywords: life community; health diagnosis; coupling and coordination; Yangtze River Economic Zone

(责任编辑 方 兴)