

山水林田湖海多维测度环境影响与时空分异 ——以广西北部湾为例

黄思敏^{1,2,4}, 胡宝清^{1,2}, 张中秋³, 张泽^{1,2,4}, 韦高杨⁴

(1.南宁师范大学 北部湾环境演变与资源利用教育部重点实验室,

广西 南宁 530001; 2.广西地表过程与智能模拟重点实验室, 广西 南宁 530001; 3.北部湾大学
资源与环境学院, 广西 钦州 535011; 4.南宁师范大学 地理科学与规划学院, 广西 南宁 530001)

摘要: [目的] 揭示山水林田湖海各要素之间的耦合协调效应关系及其驱动力因素,为更精准地开展陆海统筹生态修复工作提供科学依据。[方法] 以广西北部湾为研究区,运用综合评价指数、耦合指数、协调指数、灰色关联指数(“4C指数”),从山、水、林、田、湖、海6个子元素构建评价单元体系,揭示其各要素间的相互作用、综合发展水平、耦合协调情况,分析广西北部湾山水林田湖海生命共同体耦合协调分异特征及其驱动因素。[结果] ①2005—2020年,广西北部湾山水林田湖海生命共同体综合评价指数上升了0.2466,具体表现为:水系统>林系统>海系统>湖系统>田系统>山系统。②2005—2020年广西北部湾耦合协调度上升了0.1605,其类型表现为:初级协调—中级协调—良好协调的耦合协调演变过程。③灰色关联度高的是水系统和田系统及其子指标,灰色关联度分别为0.6667、0.6341。[结论] 广西北部湾山水林田湖海生命共同体的主要驱动因子是水田系统和田系统。未来研究需以田、湖、水系统综合整治入手,发展海洋特色产业,注重海洋生态修复,减少山、田、湖系统对区域发展的制约,强化生态资源的保护,使其向可持续方向展开。

关键词: 山水林田湖海; 多维测度; 时空分异; 广西北部湾

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)06-0369-09

中图分类号: X321

文献参数: 黄思敏, 胡宝清, 张中秋, 等. 山水林田湖海多维测度环境影响与时空分异[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 369-377. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20220705.001; Huang Simin, Hu Baoqing, Zhang Zhongqiu, et al. Multi-dimensional measurement of landscapes, forests, fields, lakes and seas, and spatio-temporal differentiation [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6): 369-377.

Multi-dimensional Measurement of Landscapes, Forests, Fields, Lakes and Seas, and Spatiotemporal Differentiation —A Case Study for the Beibu Gulf of Guangxi Zhuang Autonomous Region

Huang Simin^{1,2,4}, Hu Baoqing^{1,2}, Zhang Zhongqiu³, Zhang Ze^{1,2,4}, Wei Gaoyang⁴

(1. The Key Laboratory of Environmental Evolution and Resource Utilization of the Beibu Gulf, Ministry of Education, Nanning Normal University, Nanning, Guangxi 530001, China;

2. Guangxi Key Laboratory of Surface Process and Intelligent Simulation, Nanning, Guangxi 530001,

China; 3. School of Resources and Environment, Beibu Gulf University, Qinzhou, Guangxi 535011,

China; 4. School of Geography and Planning, Nanning Normal University, Nanning, Guangxi 530001, China)

Abstract: [Objective] To reveal the coupling and coordination effect relationship and driving factors among the elements of mountain, water, forest, field, lake and sea, and to provide scientific basis for more accurate

收稿日期: 2022-02-18

修回日期: 2022-04-28

资助项目: 国家自然科学基金项目“北部湾红树林滩涂响应海水沙变化的沉积动力过程”(42071135); 国家社会科学基金项目(21XGL015); 广西科技基地与人才专项(桂 AD19110142); 国家自然科学基金项目(42071135); 广西研究生教育创新计划项目(YCSW2021279)

第一作者: 黄思敏(1997—), 女(汉族), 广西壮族自治区贵港市人, 硕士研究生, 研究方向为资源开发与国土整治。Email: 1486305832@qq.com。

通讯作者: 胡宝清(1966—), 男(汉族), 江西省抚州市人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事脆弱环境与整治方面的研究。Email: h bq1230@n nnu.edu.cn。

ecological restoration work on land and sea. [Methods] Taking Beibu Gulf Guangxi as the research area, the comprehensive evaluation index, coupling index, coordination index and grey correlation index (“4C index”) were used to construct the evaluation unit system from the six sub-elements of mountain, water, forest, field, lake and sea, to reveal the interaction, comprehensive development level and coupling coordination of each element, and to analyze the coupling of the life community of mountains, water, forest, field, lake and sea in Beibu Gulf Guangxi. The characteristics of coordination differentiation and its driving factors. [Results] ① From 2005 to 2020, the comprehensive evaluation index of the life community of mountains, rivers, forests, fields, lakes and seas in Beibu Gulf Guangxi increased 0.246 6, as follows: water system > forest system > sea system > lake system > field system > mountain system. ② From 2005 to 2020, the coupling coordination degree of Guangxi Beibu Gulf increased by 0.160 5, which showed a coupling coordination evolution process of “primary coordination, intermediate coordination and good coordination”. ③ The high grey correlation degree of water system and field system and their sub-indexes is 0.666 7 and 0.634 1, respectively. [Conclusion] The main driving factors of the life community of mountains, rivers, forests, lakes and seas in Guangxi Beibu Gulf are the paddy field system and the paddy field system. The future researches need to start with the comprehensive renovation of the fields, lakes and water systems, develop the marine characteristic industries, pay attention to the marine ecological restoration, reduce the restriction of the mountain, field and lake systems on the regional development, strengthen the protection of ecological resources, and make it develop in a sustainable direction.

Keywords: mountains, rivers, forests, fields, lakes, and seas; multi-dimensional measurement; spatiotemporal differentiation; Guangxi Beibu Gulf

21 世纪以来,水资源短缺,水体污染严重,海洋生态环境退化等问题仍然比较严峻,因此,注重生态文明建设是一项必须长期坚持的任务。2012 年党的十八大报告指出,推行陆海统筹,人海和谐,海洋生态文明建设可持续发展^[1];2016 年国家相关部门印发了《关于推进山水林田湖生态保护修复工作的通知》(财建[2016]725 号);2020 年,自然资源部联合财政部、生态环境部印发《山水林田湖草生态保护修复工程指南》。因此,对区域山水林田湖海生命共同体进行生态保护与修复研究既是当今生态文明建设和可持续发展的热点话题,也是现实社会发展的需要。近年来,国内学者在此领域已取得丰富的成果。国外主要是从社会视角进行研究生态系统修复的内容,由世界自然保护联盟、欧盟、世界银行三大组织为维护生物多样性,运用自然方案进行经济—生态文明建设^[2-3],对生态系统修复研究主要是利用整体论和系统论的理念与方法管理提出了生态系统综合整治的方法及其基本要素^[4]。目前,国内研究在研究内容上主要体现为基于生态系统服务分析^[5-9],生态保护修复实践与探索^[9-10],山水林田湖草理论内涵研究^[11-13],生态健康评价^[14-17]等方面;在研究方法上主要有基于工程项目的业主方管理代表(PMO)模式^[18]、自然的解决方案(Nbs)模式^[19]、DPSIR 模型^[20]等方法;研究区主要是大江大河的生态脆弱

区^[21-22]。从研究趋势上,首先是在 2013 年习近平总书记提出山水林田湖草是一个生命共同体并进行理论探索^[14],其次提出意见对其进行体制机制改革、成因研究、外延扩展至山水林田湖草沙雪城海^[15],对典型地区进行试点工程实践研究^[18],最后对存在破坏地区进行生态修复研究^[19]。综上,前人的研究取得较好的成效,可为本文研究奠定基础。但学者们对山水林田湖草研究仍存在着不足。比如大多数学者仅是对单个要素研究,鲜有多要素进行研究,并且主要是对山水林田湖草的各要素进行综合性评价,但对要素之间的耦合协调分析不够,大多都停留在山水林田湖草这几个要素研究。甚少有增加海元素,基于研究指标数据对山水林田湖海耦合协调指数时空演变分异展开剖析。山水林田湖海是一个生命共同体,对于不同地区的研究具有不同的典型性。本文基于研究区域近海的特殊性,增加海元素进行分析研究,具有一定的创新性,为该地区研究山水林田湖海综合整治提供新方法、新思路。鉴于此,本文选取广西北部湾为研究区,以“压力—状态—响应”(SPR)为核心,构建山水林田湖海综合评价指标体系,从时空视角分析研究区山水林田湖海生命共同体耦合协调分异特征对区域环境的影响及其驱动性因素分析。各要素存在交互效应,探讨它们之间的耦合关系,掌握其协调规律,对更精准开展山水林田湖海生态保护、修复

及构建自然资源综合体系具有重要意义,可为资源高效利用和国土空间整治提供科学参考。

1 研究区概况

广西北部湾坐落于中国沿海西南部,本文研究范围包括北海市、钦州市、防城港市,位于 $106^{\circ}33' - 109^{\circ}56'E$, $20^{\circ}26' - 22^{\circ}41'N$ 之间。区内地理环境典型,拥有山脉、河流、森林、海岸带等生态要素。区内西北部地势较高,多山地丘陵,河湖众多,水资源丰富,年径流量约为 $3.91 \times 10^8 \text{ m}^3$;林木资源丰富,造林面积约为 $3\,720 \text{ hm}^2$;耕地资源较为稀缺,区内的耕地资源为 $4.22 \times 10^5 \text{ hm}^2$;河流面积约有 189.59 km^2 ;海岸线长度 $1\,628 \text{ km}$,红树林面积 $9\,330.34 \text{ hm}^2$ 。为响应“十三五”国家发展规划,广西北部湾由海而生,面海而兴,在这样的背景下,在经济得以发展的同时区内的生态系统也面临着严峻的挑战,选择 2005—2020 年这一时间尺度即 2005,2008,2011,2014,2017 和 2020 年 6 期进行分析,具有一定的针对性;由于目前区内生态环境问题制约生态文明可持续发展,因此需从山、水、林、田、湖、海等要素出发,开展生态文明整治工作,进一步提高生态文明修复的功效。由于草元素在研究区中不具备典型性,因此在本研究区中不进行研究。

2 理论依据与方法

2.1 理论框架

2.1.1 内涵 4C 指数是对各要素进行多维测度的方法。基于 4C 指数的多维测度方法对各要素进行分析,其中 4C 指数分别是指综合评价指数(comprehensive evaluation index)、耦合指数(coupling index)和协调指数(coordination index)、灰色关联指数(correlation index)。山水林田湖草生命共同体内涵是树立自然价值理念,确保生态系统健康和可持续发展,要求从过去的单一要素保护修复转变为以多要素构成的生态系统服务功能提升为导向的保护修复^[23]。

2.1.2 耦合协调机理 耦合是指几个系统间发生的耦合协调,是各子系统相互依赖、相互影响的关系^[24],山水林田湖海生命共同体在压力状态下响应耦合关系(图 1)。

①山—海耦合关系。海水通过一定的物质能量运输水汽,输送到山系统中,进一步使海水系统对山系统进行地貌构造,海水在一定层程度上塑造了地形地貌。基于山系统压力指标和状态指标,需积极响应荒山绿化,水土流失之山地环境治理,对山系统进行绿化保护,山地整治。

②湖—海耦合关系。湖系统是流域范围内调蓄水源的重要通道,河流

直排入海量、直排入海占工业废水排放比例增加将对海洋环境造成破坏。基于湖系统的压力指标和状态指标需积极响应污水处理,水土流失之小流域治理使湖系统发挥调节小气候,流域源头清洁作用。

③林—海耦合关系。林系统具有净化水源、涵养水土作用,森林资源遭破坏,没有红树林防护每年将会有大量地表土冲入大海,生物多样性将受到威胁,因此应积极退耕还林造林,水土流失之保林,使林系统发挥涵养水源,保持水土作用。

④田—海耦合关系。田系统在粮食安全方面发挥着重要的作用,海洋生态环境好坏进一步影响田系统安全。因此,应积极响应土地整治规范,水土流失之保田,使田系统发挥退耕还林,坡地改造梯田作用。

⑤水—海耦合关系。海系统对水系统起到维护生物多样性作用,水系统使海系统海洋资源丰富,因此应积极响应海洋生态保护,水土流失之海洋生态修复,使海系统生态得以保护。

2.1.3 指标体系构建 山水林田湖海生命共同体,各个子系统间关系密切,每个子系统的发展形态都会影响整体的发展形态。本文参考已有的文献^[25-26]分析研究其指标体系,针对广西北部湾的自然人文实际情况,根据指标体系的系统性、综合性、可获性、科学性、区域性原则,构建评价指标体系(表 1)。本研究同时加入 SPR 模型和“4C 指数”对山水林田湖海各子系统进行阐述分析。

2.2 数据源及预处理

本研究的 30 m 分辨率 DEM 遥感影像数据来自地理空间数据云平台(<http://www.gscloud.cn/>)。基础地理数据包含行政区域数据,来自于全国 1:100 万数据库。阳坡比例、地形起伏度、沟壑密度均通过遥感影像在 ArcGIS 中提取得到;地表水资源、地下水资源、森林覆盖率、造林面积、林业产值、耕地面积占比、人均粮食产量、耕地利用率、园林绿地面积、水产品产量、人均水资源量、人均废水排放量、污水处理率、农作物与经济作物比值、直排入海占工业废水排放总量比例来源于中国经济与社会统计数据库(<https://data.cnki.net/>);河湖面积由 DEM 影像提取,来自于土地调查成果共享服务平台;自然保护区面积来源于广西地情网(http://www.gxdzf.org.cn/flbg/szgx/201705/t20170505_41374.html);水土流失治理面积来源于广西水土保持公报(<http://slt.gxzf.gov.cn/zwgk/jbgb/gxstbcgb/>)及广西地情网(<http://www.gxdzf.org.cn/index.html>)的北海市、防城港市、钦州市年鉴;红树林面积来源于美国地质勘探局(<https://www.usgs.gov/natural-hazards/earthquake-hazards>)的 Landsat5, Landsat8 遥感影像

通过 ArcGIS 创建矢量图层进行人工目视解译获取^[27];河流入海污染物排放总量来源于中国海洋环境质量公报(<http://www.mnr.gov.cn/sj/sjfw/hy/>

gbgg/zghyhjzlgb/),由于部分指标数据个别年份存在缺失的情况,本文选用各地(市)统计公报和插值法补齐。

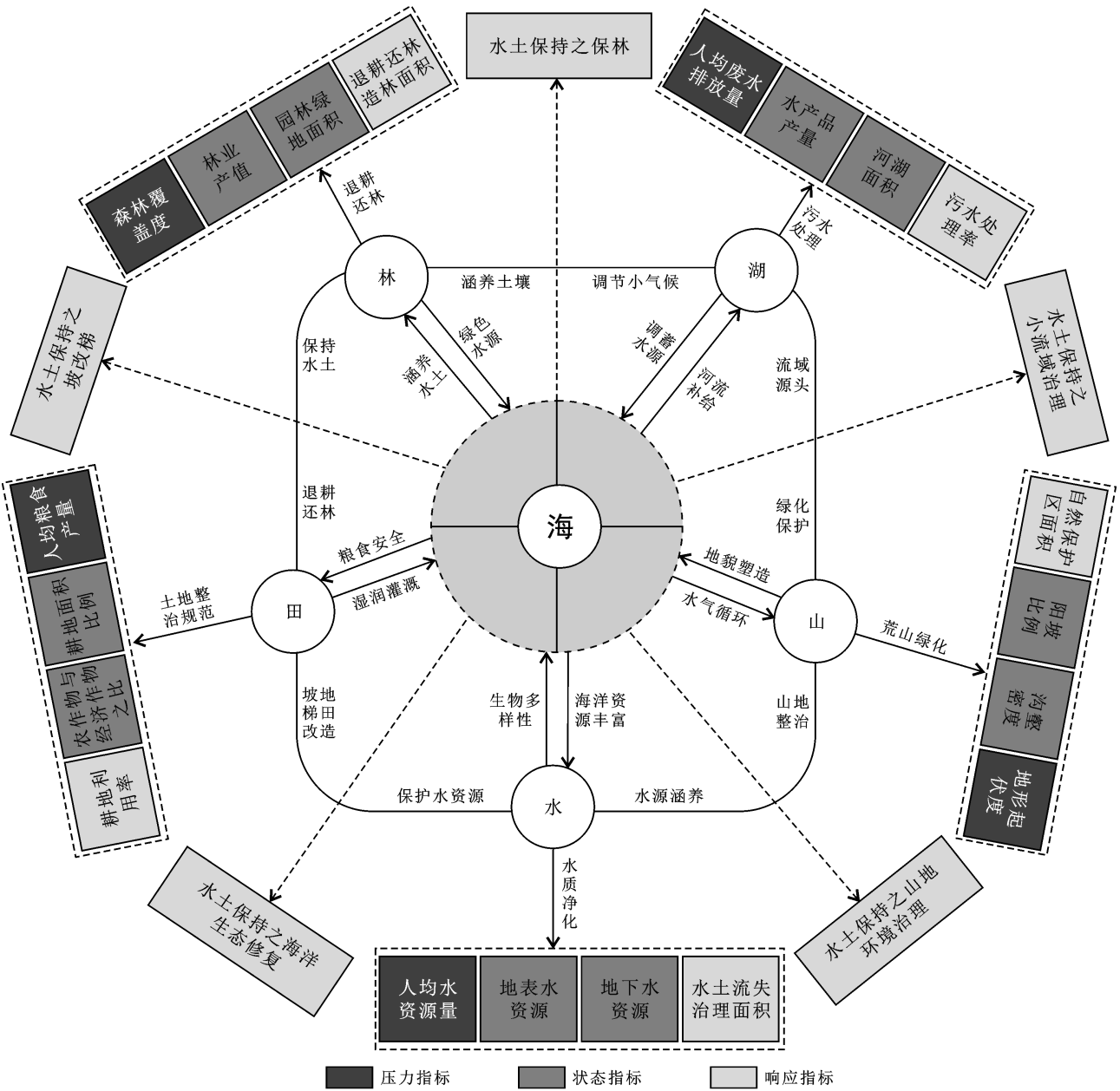


图 1 广西北部湾山水林田湖海耦合协调关系

2.3 研究方法

2.3.1 无量纲化模型 运用极小化无量纲法对各要素指标进行无量纲标准化,运用小数定标法对山系统各指标进行标准化。计算公式为:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij}}{10^a}$$
 (1)

式中: x_{ij} 表示第*i*年份*j*项指标的最终原始值; x'_{ij} 是第*i*年份*j*项指标的一个标准化值;*a*为满足条件的最小整数。

2.3.2 综合评价模型 运用熵值法求出区域各指标权重,采用综合评价模型计算该区域山水林田湖海等级综合开发水平,计算公式为:

$$W_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^m (1 - e_j)}, W_j \in [0, 1], \sum_{j=1}^a W_j = 1$$
 (2)

$$q_i = \sum_{j=1}^m w_j \cdot x'_{ij} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$
 (3)

式中: q_i 表示各系统的综合评价得分; W_j 表示各项指标的权重; e_j 表示熵值。

表 1 山水林田湖海生命共同体评价指标体系

准则层	指标层	计算方法(来源)	方向	权重
山系统 (0.183 4)	阳坡比例/%	区域阳坡表面积与区域单元面积的比值	+	0.028 8
	地形起伏度/m	单位区域内,最高点海拔高度与最低点海拔高度的差值	—	0.032 0
	沟壑密度/(km·km ⁻²)	沟壑总长度/地区面积	—	0.028 8
	自然保护区面积/hm ²	来自广西地情网	+	0.093 9
水系统 (0.186 0)	水土流失治理面积/km ²	北海、防城港、钦州年鉴及其广西水土保持公报	+	0.057 4
	人均水资源量/10 ⁸ m ³	来自于人口总量/水资源总量	+	0.052 7
	地表水资源/10 ⁸ m ³	来自于中国经济社会统计数据库	+	0.039 0
	地下水资源/10 ⁸ m ³	来自于中国经济社会统计数据库	+	0.037 0
林系统 (0.171 6)	森林覆盖率/%	来自于中国经济社会统计数据库	+	0.032 4
	退耕还林造林面积/10 ³ hm ²	来自于中国经济社会统计数据库	+	0.043 8
	林业产值/10 ⁴ 元	来自于中国经济社会统计数据库	+	0.049 2
	园林绿地面积/hm ²	来自于中国经济社会统计数据库		0.046 2
田系统 (0.135 3)	人均粮食产量/10 ⁴ t	来自于中国经济社会统计数据库	+	0.030 6
	农作物与经济作物面积比值/%	广西统计年鉴,农作物面积/经济作物面积	+	0.036 7
	耕地面积比例/%	来自于中国经济社会统计数据库	+	0.036 1
	耕地利用率/%	生产粮食使用面积/常用耕地面积	+	0.031 9
湖系统 (0.147 8)	河湖面积/10 ³ hm ²	来自于广西栅格地图像元个数*单个像元面积及其土地调查成果共享服务平台	+	0.037 0
	水产品产量/10 ⁴ t	来自于中国经济社会发展数据库	+	0.036 1
	人均废水排放量/10 ⁴ t	废水排放量/总人口	—	0.037 2
	污水处理率/%	城市废水处理量/城市废水排放总量	—	0.037 5
海系统 (0.175 8)	直排入海占工业废水排放总量比例/%	直排入海量/工业废水排放总量	—	0.050 4
	渔业产值/10 ⁸ 元	来自于广西统计年鉴	+	0.042 0
	河流入海污染物排放总量/10 ⁴ t	来自于中国海洋环境公报	—	0.048 7
	红树林面积/ hm ²	来自于美国地质勘探局 Landsat 5,Landsat 8	+	0.034 7

2.3.3 耦合协调模型 运用耦合协调模型测算区域山水林田湖海各要素的耦合发展状况,计算公式为:

$$C=\left[\frac{q_1\times q_2\times q_3\times q_4\times q_5\times q_6}{\left(\frac{q_1+q_2+q_3+q_4+q_5+q_6}{6}\right)^6}\right]^{\frac{1}{6}}\quad (4)$$

式中: C 代表山水林田湖海各系统之间的耦合度,其取值范围为 $[0,1]$ 。 C 值越远离 0,表示各系统间的耦合度越大; C 值远离 1,表示各系统间的耦合度越小。为进一步辨别各子系统相互间影响程度,需借助耦合协调度进行测评,计算公式为:

$$D=\sqrt{C\times T}$$
$$T=W_1q_1+W_2q_2+W_3q_3+W_4q_4+W_5q_5+W_6q_6\quad (5)$$

式中: D 代表山水林田湖海生命共同体的耦合协调度; T 综合评价指数。 D 的取值范围为 $[0,1]$,取值越大,协调程度越好,其类型详见表 2。

2.3.4 灰色关联度模型 借助灰色关联模型,分析影响山水林田湖海生命共同体耦合协调发展的主要驱动因素,为其可持续利用提供参考。

表 2 山水林田湖海生命共同体耦合协调度等级分类		
耦合协调程度	取值范围	耦合协调类型
失调衰退	(0.0~0.1)	X 极度失调型
	(0.11~0.2)	IX 严重失调型
	(0.21~0.3)	VIII 中度失调型
过度失调	(0.31~0.4)	VII 轻度失调型
	(0.41~0.5)	VI 濒临失调型
基本协调	(0.51~0.6)	V 勉强协调型
	(0.61~0.7)	IV 初级协调型
高度协调	(0.71~0.8)	III 中级协调型
	(0.81~0.9)	II 良好协调型
	(0.91~1.0)	I 优质协调型

3 结果与分析

3.1 山水林田湖海生命共同体综合分析

由图 2 可以看出,广西北部湾整体上山水林田湖海综合评价指数上升了 0.246 6,综合评价指数平均分具体为:水>林>海>湖>田>山。①山系统的各项指标短期内不会有急剧变化,该区山系统的综合评价得分是 0.428 6。由于国家“十三五”规划的提出,

一直以来注重对自然保护区的建设发展,以及山系统由于本身的发展状态比较稳定,所以评价水平变化幅度并不明显。②水系统的综合评价指数在 2005—2014 年期间上升了 0.336 0,2020 年下降为 0.774 4。2008 年水系统的综合评价指数在急剧上升说明政府出台“节能减排”措施,使用水的质量在增加;2020 年水系统综合评价再有些下降,说明当时水系统的提升空间可能出现饱和状态,后期的发展仍需创新发展水系统治理措施,促使水生态环境得到改善。③林系统的综合评价指数整体上呈现出不断上升趋势,2008 年出现下降是由于人们对森林的破坏,以及大量种植桉树,破坏生态环境;2011—2020 年稳步上升至 0.822 4,说明政府颁布保护森林资源的法律法规,如退耕还林还草,合理建设园林绿地面积,封山育林同时减少人工桉树林种植的政策实施取得一定的成效。④田系统的综合评价指数 2005—2014 年下降了 0.094 1,2014—2020 年上升至 0.447 76。这说明田系统的综合评价水平总体上处于较高水平。2014 年后该数值在上升说明该区域实行“八山一水一分田”的政策取得一定的成效。但从整体上看,田系统仍呈现出波动起伏的状态,因此后期仍需加强田系统的合理规划,使其持续稳步向好方向发展。⑤湖系统的综合评价指数 2008—2011 年下降了 0.242 6,2014 至 2020 年上升了 0.184 2。这表明 2011 年该地区污水排放不合理,导致河流的水质下降。2014 年实施节能减排的优化方案,对工业排放的污水进行优化处理,提升了城市污水的处理率。因此,这几年的污水处理成效比较显著,湖系统综合评价指数在稳步上升。⑥海系统的综合评价指数 2005—2017 年上升了 0.502 7,2017—2020 年下降了 0.427 9。2005 年出现最低值,表明人们在对海洋进行开发活动的时候,海洋生态保护意识差,填海造陆,致使海洋生态环境遭到破坏。2017 年的综合评价水平达到 0.888 4,这表明 2016 年“十三五”规划纲要提出后,人们更注重保护湿地、海岸线、红树林,保护海洋生态环境,使海系统呈现向良好的趋势发展。

3.2 山水林田湖海耦合协调性分析

3.2.1 山水林田湖海生命共同体耦合协调度时序演变分析 运用耦合协调度法计算结果得出研究区 2005—2020 年山水林田湖海耦合协调效应(表 3)。2005—2020 年,耦合协调度上升 0.160 5,并且经历了“初级协调—中级协调—良好协调”的耦合协调演变过程。2011 年以前的山水林田湖海综合评价都处于较低的水平,制约着整体综合效益水平,耦合协调发展效益较低,说明该地区为发展经济对资源的开发程度加大,人为的干扰程度加大,各子系统间的协调能

力出现下降趋势。2011 年后的综合效益发展水平较之前有所上升,表明山水林田湖海生命共同体耦合协调度总体上处于较好的水平,其耦合协调发展水平正向好的态势协调发展。

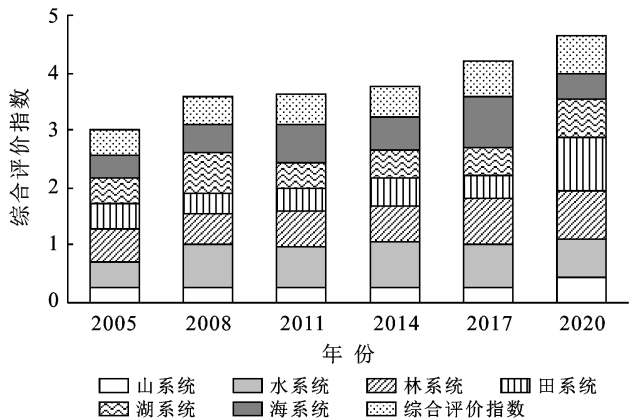


图 2 广西北部湾 2005—2020 年山水林田湖海生命共同体综合评价指数

表 3 山水林田湖海耦合协调结果

年份	耦合度	综合评价指数	耦合协调度	耦合协调程度类型
2005	0.969 0	0.428 6	0.644 5	初级协调
2008	0.933 0	0.510 3	0.690 0	初级协调
2011	0.932 3	0.512 0	0.690 9	初级协调
2014	0.940 7	0.536 6	0.710 5	中级协调
2017	0.913 4	0.595 2	0.737 3	中级协调
2020	0.959 9	0.675 2	0.805 0	良好协调

从耦合协调度的具体值情况进行分析来看(表 4),北海市六期的耦合协调度平均值为 0.751 6,防城港市为 0.807 2,钦州市为 0.767 3,表明在近 15 a 来,3 个地级市中防城港市的山水林田湖海生命共同体耦合协调效益发展程度最优。

3.2.2 山水林田湖海耦合协调度空间演变分析

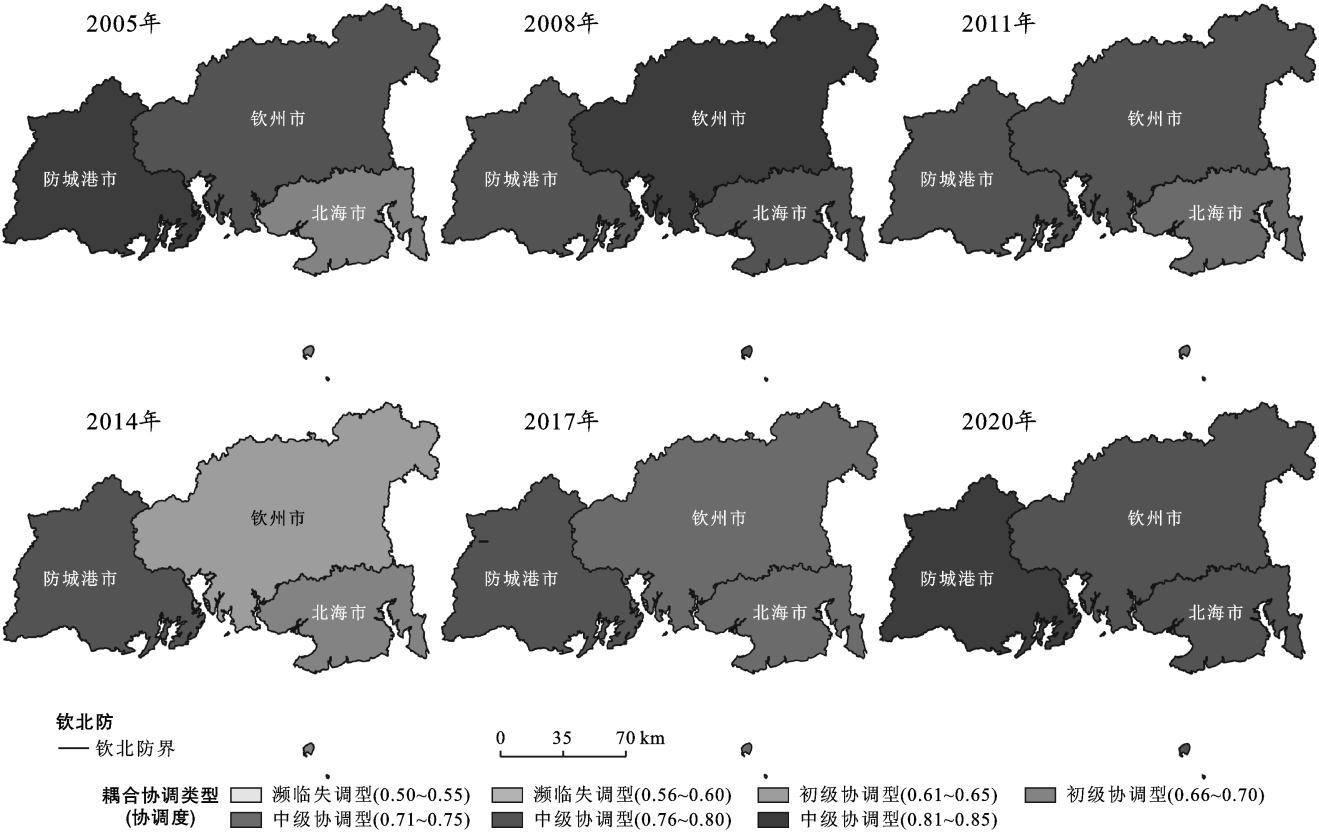
2005—2011 年,北海市、防城港市的耦合协调类型基本保持不变,分别为中级协调和良好协调;钦州市呈现出“倒 U”波动起伏趋势,其原因在于 2005 年当地处于沿海开放城市,工业、生活废水不得以合理处置,直排入海工业废水的比例较高达到 14.7%,耦合协调水平较低。2008 年防城港市一直能保持较好的水平,由于该地区在生态文明建设背景下,注重生态保护,防城港的森林覆盖率达到 60%以上,钦州市的污水处理率和耕地利用率相对较高,耦合协调水平发展较好。2011 年北海市、钦州市山水林田湖海耦合协调度不同程度都有下降,但是北海市下降 0.039 5%,原因是随着城市的发展对自然的开发程度加大,红树林面积在削减,污水处理率较低,约为 80.17%,废水直排入海量大达 1.52×10^5 t,影响了区域的生态环境。

表 4 广西北部湾 2005—2020 年各市
山水林田湖海耦合协调性分析

年份	地级市	耦合度	综合评价 指数	耦合 协调度	耦合协调 程度类型
2005	北 海	0.856 5	0.648 3	0.742 8	中级协调
	防城港	0.994 5	0.653 6	0.800 4	良好协调
	钦 州	0.875 8	0.728 5	0.751 2	中级协调
2008	北 海	0.899 6	0.688 5	0.784 7	中级协调
	防城港	0.940 5	0.650 5	0.802 3	良好协调
	钦 州	0.873 1	0.791 0	0.831 0	良好协调
2011	北 海	0.850 7	0.656 9	0.745 2	中级协调
	防城港	0.980 4	0.686 4	0.800 0	良好协调
	钦 州	0.876 5	0.687 2	0.776 1	中级协调
2014	北 海	0.787 4	0.599 4	0.684 7	初级协调
	防城港	0.974 4	0.640 9	0.761 7	中级协调
	钦 州	0.874 3	0.494 1	0.657 2	中级协调
2017	北 海	0.807 2	0.702 6	0.750 9	中级协调
	防城港	0.973 5	0.575 0	0.824 7	良好协调
	钦 州	0.865 5	0.637 0	0.742 5	中级协调
2020	北 海	0.871 5	0.680 1	0.801 5	良好协调
	防城港	0.989 3	0.682 9	0.853 9	良好协调
	钦 州	0.866 7	0.734 6	0.797 9	中级协调

2014 年北海市、防城港市、钦州市的山水林田湖海耦合协调度分别下降了 0.060 5%,0.038 3%和 0.118 9%;2017 年北海市和钦州市均为中级协调,防城港市为良好协调;2020 年北海市、防城港市、钦州市的耦合协调度均由中级上升至良好协调。其原因在于该地区在 2011—2014 年的河流直排入海量增加导致河流入海污染物增加,并且由于人为活动导致当地的“三废”排放量增加,对当地的生态环境造成了一定的破坏;2017 年综合评价指数除防城港市出现下降外,北海市和钦州市都有所提升,由于国家注重生态文明建设,注重对红树林的保护,提升污水的处理率,减少废水排放量;2020 年三市耦合协调度获得一定提升,红树林面积相比 2017 年均扩大,红树林对生态环境的修复具有一定的保护作用。

综上分析,2005—2020 年广西北部湾各市的山水林田湖海生命共同体耦合协调程度北海市、防城港市、钦州市的发展水平都获得了一定程度的提升。从总体上看,该区存在耦合协调水平不够高的问题,因此亟需构建更好的耦合协调发展对策,提升耦合发展水平(图 3)。



3.3 山水林田湖海耦合协调驱动力分析

运用灰色关联模型计算山水林田湖海 6 个子系

统的耦合协调度与山、水、林、田、湖、海系统的灰色关
联度(表 5)。由表 5 可知,水系统及其各指标元素是

影响各要素耦合协调发展的首要驱动因素,其值为 0.666 7,水系统中的水土流失治理面积、地下水资源、地表水资源、人均水资源量反映了水系统与人类活动对生态环境的影响,广西北部湾地表水资源含量为 $1.528\ 4\times 10^{10}\ \text{m}^3$,地下水含量为 $4.017\ 0\times 10^9\ \text{m}^3$ 。并且地下水和地表水在维持生态环境系统与演化过程中发挥着重要作用。从生态学的视角来看,水系统的基本形态将会影响其他子系统。因此,在社会生态文明建设的背景下,广西北部湾需要进行社会治理和海陆交错地带生态修复相结合,贯彻落实山水林田湖海是一个生命共同体的理念。田系统及其各指标元素是影响各要素耦合协调发展的次要驱动因素,值为 0.634 1,这说明田系统在山水林田湖海生命共同体的影响程度相对较强。广西北部湾地理位置比较优越,地处沿海,人口密集,人均粮食产量少,耕地面积支离破碎,耕地利用率低将严重影响当地的可持续发展。因此,广西北部湾应该严格遵循生态文明建设理念,同时考虑田系统对区域可持续发展具有的生态文明价值,积极推进生态文明建设统筹布局工作。

表 5 广西北部湾的灰色关联度计算结果

准则层	指标层	关联度	总关联度
山系统	阳坡比例	0.445 2	0.452 5
	地形起伏度	0.415 1	
	沟壑密度	0.422 7	
	自然保护区面积	0.527 0	
水系统	水土流失治理面积	0.708 3	0.666 7
	人均水资源量	0.601 8	
	地表水资源	0.703 0	
	地下水资源	0.653 8	
林系统	森林覆盖率	0.603 1	0.606 6
	退耕还林造林面积	0.599 8	
	林业产值	0.659 1	
	园林绿地面	0.564 4	
田系统	人均粮食产量	0.398 9	0.634 1
	农作物与经济作物面积比值	0.617 2	
	耕地面积	0.784 4	
	耕地利用率	0.736 1	
湖系统	河流面积	0.689 8	0.593 2
	水产品产量	0.445 8	
	人均废水排放量	0.518 8	
	污水处理率	0.718 5	
海系统	直排入海占工业废水排放总量比例	0.517 4	0.627 1
	渔业产值	0.610 9	
	河流入海污染物排放总量	0.613 2	
	红树林面积	0.766 8	

4 讨论

本研究基于“4C 指数法”对广西北部湾山水林田

湖海生命共同体的 24 个评价指标的耦合协调性进行了综合评价。海元素的综合评价水平最高,因此以海元素作为核心要素多维测度分析山水林田湖海对环境影响,对生态文明建设和可持续发展具有一定的理论参考和现实意义。

(1) 在研究尺度上,本文主要从市域尺度进行研究会存在一些不完善之处。如果能够将研究区域缩小到县级或更小的研究尺度,评价指标体系将会更加完善、具体,关联度和契合度将会更高。

(2) 在评价指标体系上,目前只有 24 个评价指标,选取的评价指标体系可能并不完善,在后面研究中水系统可增加侵蚀模数等指标;山系统可增加海拔、坡度、岩性等指标研究。很多学者的研究主要从生态视角分析山水林田湖草及其生态修复,而本质上,山水林田湖草生态修复是隶属国土综合整治的范畴,也应该从社会经济学视角开展研究与讨论。本文主要是从社会视角出发进行研究,视角不同指标体系的选择也会存在一定的差异;并且由于目前研究跨度只有 16 a 的数据,时间尺度不够长,数据量不足。未来评价指标体系仍需进一步地完善,山水林田湖海综合评价方能更加系统全面。

(3) 在研究评价结果上,由于生命共同体概念是近几年提出的,之前各方面的发展都不成体系。生态领域存在各自为政的情况,所以耦合协调度不高。对于驱动力的分析,根据不同的研究指标,将会得到不同的驱动因子判别结果。本研究在获取数据及其研究能力方面还存在一定不足,因此后期应增加更多影响山水林田湖海系统协调性的重要因素进行研究分析。如人口密度、城镇化率、建设用地比重、产业结构变化、交通基础设施建设等指标,使得研究结果更加准确、全面。未来基于“4C 指数”进行多维测度环境影响研究和“山水林田湖海+”生命共同体研究可提供理论基础和参考借鉴。“山水林田湖海+”生命共同体建设中政府需要完善各方面的机制。工农业生产应以减少生态环境破坏,防止水土流失,更加注重海洋生态保护,促可持续发展作为重要举措,以及提高“山水林田湖海”耦合发展水平,促进区域生态文明和社会发展相协调,经济发展向高质量发展迈进。

5 结论

(1) 广西北部湾山水林田湖海生命共同体综合评价指数 2005—2020 年上升了 0.246 6,具体表现为:水>林>海>湖>田>山。这表明区域内的山水林田湖海综合评价水平均得到显著提升,具有一定的可持续性。

(2) 广西北部湾山水林田湖海生命共同体的耦合协调度 2005—2020 年上升了 0.160 5。该区山水林田湖海生命共同体经历了“初级协调—中级协调—良好协调”的耦合协调演变过程。

(3) 广西北部湾山水林田湖海生命共同体的主要驱动因子是水田系统和田系统。未来研究需以田、湖、水系统综合整治为核心,发展海洋特色产业,注重海洋生态修复,减少山、田、湖系统对区域发展的制约,强化生态资源的保护,使其向可持续方向发展。

[参 考 文 献]

- [1] 吴运连,谢国华.赣州山水林田湖草生态保护修复试点的实践与创新[J].环境保护,2018,46(13):80-83.
- [2] IUCN. The IUCN Programme 2013—2016 [R]. Gland: IUCN International Union for Conservation of Nature, 2012.
- [3] Cohen-Shacham E, Walters G, Janzen C, et al. Nature-based solutions to address global societal challenges [M]. Gland: IUCN International Union for Conservation of Nature, 2016,97:2016-2036.
- [4] Frost A, Stewart S, Kerr D, et al. Agricultural environmental management: Case studies from theory to practice [J]. Water Science & Technology: A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2004, 49(3):71-9.
- [5] 陈阳,王西平,甄娜,等.基于生态系统服务理论内涵的山水林田湖草生态保护修复实践:以河南省南太行地区试点工程为例[J].环境工程技术学报,2021,11(4):701-710.
- [6] 王军,钟莉娜.生态系统服务理论与山水林田湖草生态保护修复的应用[J].生态学报,2019,39(23):8702-8708.
- [7] 田野,冯启源,唐明方,等.基于生态系统评价的山水林田湖草生态保护与修复体系构建研究:以乌梁素河流域为例[J].生态学报,2019,39(23):8826-8836.
- [8] 孔令桥,郑华,欧阳志云.基于生态系统服务视角的山水林田湖草生态保护与修复:以洞庭湖流域为例[J].生态学报,2019,39(23):8903-8910.
- [9] 刘世梁,董玉红,孙永秀,等.基于生态系统服务提升的山水林田湖草优先区分析:以贵州省为例[J].生态学报,2019,39(23):8957-8965.
- [10] 朱振肖,王夏晖,张箫,等.湖北省长江三峡地区山水林田湖草生态保护修复实践探索与思考[J].环境工程技术学报,2020,10(5):769-778.
- [11] 张淑霞,吕淑莲.中卫市山水林田湖草生态保护修复模式探讨[J].资源节约与环保,2020(10):35-36.
- [12] 陈洁,叶兵,何璆,等.国外山水林田湖草生态综合治理实践与启示:以苏格兰斯佩河集水区管理为例[J].世界林业研究,2022,35(1):113-117.
- [13] 李春华,叶春,刘燕,等.山水林田湖草思想的理论内涵及生态保护修复实践:以广西左右江流域工程试点为例[J].环境工程技术学报,2019,9(5):499-506.
- [14] 成金华,尤喆.“山水林田湖草是生命共同体”原则的科学内涵与实践路径[J].中国人口·资源与环境,2019,29(2):1-6.
- [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):57-67.
- [16] 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.
- [17] 李晓阳,丰华丽,陆海明.基于山水林田湖草系统的河流健康研究初探[J].水利发展研究,2018,18(6):53-56.
- [18] 赵文强,黄舒城.基于 PMO 模式的山水林田湖草生态保护修复工程项目管理探索[J].南方农业,2020,14(9):172-173.
- [19] 杨崇曜,周妍,陈妍,等.基于 NbS 的山水林田湖草生态保护修复实践探索[J].地学前缘,2021,28(4):25-34.
- [20] 张仕超,周仪琪,李英杰,等.基于 DPSIRM 模型的全域综合整治前后山水林田湖草村健康评价[J].重庆师范大学学报(自然科学版),2020,37(5):45-58.
- [21] 迟妍妍,王夏晖,宝明涛,等.重大工程引领的黄河流域生态环境一体化治理战略研究[J].中国工程科学,2022,24(1):104-112.
- [22] 徐飞,焦玉国,唐丽伟,等.泰安市山水林田湖草生态修复区生态脆弱性评价与生态修复对策研究[J/OL].现代地质:1-14[2022-03-02].
- [23] 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(S1):17-20.
- [24] 张中秋,劳燕玲,何彩珍,等.土地利用多功能机制及其耦合协调时空分异:以广西为例[J].农业资源与环境学报,2021,38(2):317-331.
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] 张兴余,刘勇,许宝荣,等.乌兰布和沙漠高分辨率遥感影像梭梭林解译方法探讨[J].遥感技术与应用,2010,25(6):828-835.