

沱江流域城市生态安全评价及其耦合特征分析

李倩娜 唐洪松¹

(内江师范学院 沱江流域高质量发展研究中心, 四川 内江 641000;

内江师范学院 经济与管理学院, 四川 内江 641000)

【摘要】: 构建“压力—状态—响应(PSR)”模型, 利用熵权综合评价法和耦合协调度评价法, 分析比较沱江流域沿线成都、自贡、泸州、德阳、内江和资阳 6 个城市生态安全及耦合协调水平, 并利用 GIS 技术进行空间差异刻画。研究表明, 沱江全流域生态安全等级由Ⅳ级向Ⅱ级转变, 生态安全响应指数和生态安全状态指数稳步上升, 带动生态安全水平整体向好发展。各城市压力、状态、响应三个系统处于高度耦合阶段, 以基本协调和中度协调类型为主, 成都属于“响应超前—状态滞后”型, 自贡、泸州、内江、资阳属于“状态超前—压力滞后”型, 德阳属于“响应超前—压力滞后”型。对此, 应加快产业结构升级、控制污染物粗放排放、加大环境治理力度等。

【关键词】: 生态安全 沱江流域 PSR 模型 耦合协调度

【中图分类号】: X826; F062.2 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2021)12-091-07

党的十八大以来, 以习近平同志为核心的党中央站在新的历史方位, 对长江流域生态安全给予了高度重视, 先后提出“以共抓大保护、不搞大开发为导向推动长江经济带发展”“要把修复长江生态环境摆在压倒性位置”等重要观点, 为新时代长江流域的生态文明建设做出了重要的指示。沱江作为长江上游右岸重要一级支流, 流经德阳、成都、资阳、内江、自贡和泸州等城市, 是四川省人口密度最高、工业基础最雄厚、特色农产品最集中的流域, 是长江流域上游的重要生态屏障, 对维系长江经济带生态安全具有十分重要的地位。因此, 迫切需要对沱江流域沿线城市生态安全进行研判, 为牢固长江上游生态屏障提供决策依据。

生态安全是国家安全不可或缺的部分, 是我国推进生态文明建设, 实现可持续发展的重要基础, 也是近年来学术界和政界共同关注的热点问题^[1]。生态安全(ecological security)最早可追溯到 20 世纪 40 年代的土地健康及土地功能评价的管理思想当中^[2], 其概念建立在环境安全的基础上, 后来学者们将生态安全的概念逐渐应用在不同空间尺度上, 涵盖了森林^[3]、湿地^[4]、湖泊^[5,6]、河流^[7,8]、山区^[9]和城市^[10]等生态系统, 并通过构建指标体系对区域生态安全进行综合评价, 为政府决策、城市规划、生态环境治理等提供科学依据, 以实现区域环境与社会经济可持续发展^[11]。关于生态安全评价的模型, 学界较常用的主要有压力—状态—响应(PSR)模型^[12]、驱动力—压力—状态—影响—响应(DPSIR)模型^[13]和驱动力—压力—状态—响应(DPSR)模型^[14], 其中, PSR 模型和 DPSIR 模型具有可操作性强和逻辑清晰明了的优点, 能够反映人类社会与环境之间的关系^[15], 在不同尺度生态安全评估中被广泛应用。国内近几年针对不同类型生态系统的生态安全进行评价, 其中流域生态安全评价是研究重点, 流域生态安全问题与人类活动息息相关, 它是城市发展的基石, 保障流域城市安全就是要求流域环境和资源状况既能满足城市可持续发展的需

¹**作者简介:** 李倩娜, 博士研究生, 助教, 研究方向为生态经济。E-mail:18699098707@163.com;唐洪松, 博士, 副教授, 研究方向为资源环境经济。E-mail:15298203528@163.com

基金项目: 四川省社会科学规划项目青年项目“沱江流域生态补偿实践困境及破解对策研究”(SC20C057);四川省社会科学规划项目基地重大项目“沱江流域水环境综合治理与可持续发展模式研究”(SC20ED019);四川省社会科学重点研究基地沱江流域高质量发展研究中心项目“基于 PSR 模型的沱江流域城市生态安全评价研究”(TJGZL2020-11);内江师范学院科研项目“基于 PSR 模型的沱江流域生态安全评价研究”(2019QN07)

求，又能通过自身经济和社会的调节保证其生态环境状况处于平衡的状态^[16]。国内学者关于沱江流域的研究主要是围绕水质评价及时空变化^[17]、污染排放特征及标准^[18,19]、流域污染治理^[20]以及流域生态补偿机制的建立^[21]等内容，目前关于沱江流域城市生态安全评价鲜有研究。本文以沱江流域沿线城市为研究对象，构建生态安全评价模型和耦合协调模型，对沱江流域6个城市2009—2018年的生态安全及耦合协调水平进行综合评价，并分析其时空演变特征，为区域生态建设、经济发展和环境管理提供决策依据。

1 研究方法与数据来源

1.1 综合评价模型

1.1.1 评价指标体系构建

本研究依据沱江流域城市实际情况并结合相关文献^[22,23]，构建基于压力—状态—响应(PSR)模型的沱江流域城市生态安全指标体系(表1)。生态压力指标层包括人口压力、水资源压力、经济压力、能源压力、社会压力、土地资源压力六个方面，分别以人口密度和自然增长率、人均日生活用水量、农业经济比重、单位地区生产总值能耗、生活垃圾清运量、人均耕地面积等7个指标表示，反映的是城市生态安全问题产生的来源；生态状态指标层包括经济状态、水环境污染状态、空气污染状态、土地污染状态、土地脆弱性状态五个方面，分别用城镇居民人均收入、污水排放总量、工业二氧化硫排放量、化肥施用量、城市绿地覆盖率等5个指标表示，反映的是不同城市生态安全水平状况；生态响应指标层从经济响应、社会响应和环境响应三个方面考虑，分别以人均GDP和第三产业比重、城市环境基础设施建设投资额、城市生活污水集中处理率、生活垃圾无害化处理率和工业固体废物利用率等6个指标表示，反映的是人类对生态安全问题的应对措施和能力。

表1 沱江流域城市生态安全评价指标体系

目标层	准则层	指标层	具体指标	属性
沱江流域生态安全	生态压力 P	人口压力	人口密度/(人/平方千米)	-
			自然增长率/%	-
		水资源压力	人均日生活用水量/立方米	-
		经济压力	农业经济比重	-
		能源压力	单位地区生产总值能耗/(吨标准煤/万元)	-
		社会压力	生活垃圾清运量/万吨	-
		土地资源压力	人均耕地面积/公顷	-
	生态状态 S	经济状态	城镇居民人均收入/元	+
		水环境污染状态	污水排放总量/万立方米	-
		空气污染状态	工业二氧化硫排放量/万吨	-
		土地污染状态	化肥施用量/万吨	-
		土地脆弱性状态	城市绿地覆盖率/%	+

	生态响应 R	经济响应	人均 GDP/元	+
			第三产业比重	+
		社会响应	城市环境基础设施建设投资额/万元	+
		环境响应	城市生活污水集中处理率/%	+
			生活垃圾无害化处理率/%	+
			工业固体废物利用率/%	+

1.1.2 计算指标权重

采用熵权法计算各指标权重，其根据各指标反映的信息量来计算权重，具有客观性。具体步骤如下：

(1) 指标标准化处理。由于各指标属性不同，数据单位不同，因此需要对原始数据进行无量纲化处理，使数据具有可比性。首先构建判断矩阵：

$$X=(x_{ij})_{m \times n} \quad (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

式中：m 为样本个数，n 为评价指标个数；对判断矩阵进行标准化处理：

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (2)$$

正向指标计算公式为：

$$y_{ij} = \frac{x_{\max} - x_{ij}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (3)$$

负向指标计算公式为：

$$H_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n Y_{ij} \ln Y_{ij},$$

(2) 令 H_j 为第 j 项指标的信息熵，计算公式为：

，其中

$$Y_{ij} = \frac{y_{ij}}{\sum_{i=1}^n y_{ij}} \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

(3) 计算指标 j 的权重 w_j ：

$$w_j = \frac{1-H_j}{\sum_{j=1}^n (1-H_j)} \quad (5)$$

1.1.3 生态安全综合指数计算

生态安全综合指数能够全面地反映沱江流域整体的生态安全状况，本文采用综合评价法计算沱江流域城市生态安全指数 Z ，计算公式如下：

$$Z = \sum_{j=1}^7 W_j \times y_{ij} + \sum_{j=8}^{12} W_j \times y_{ij} + \sum_{j=13}^{18} W_j \times y_{ij} \quad (6)$$

式中： Z 为流域生态安全综合指数， n 为评价指标的个数， w_j 为第 j 个指标的权重， y_{ij} ($j=1, 2, \dots, n$) 为标准化指标数据。

1.1.4 生态安全评价标准

为评判沱江流域生态安全的等级状况，参考已有研究^[22]，结合本文计算出的沱江流域城市生态安全综合指数结果，取值范围在 $0 \sim 1$ ，将沱江流域生态安全等级划分为 I 级、II 级、III 级、IV 级和 V 级，从高到低依次为安全、较安全、临界安全、敏感和危险，以反映沱江流域城市生态安全状况，如表 2 所示。

表 2 沱江流域城市生态安全等级划分

安全指数	等级	安全程度	特征描述
≥ 0.800	I	安全	生态环境优越，与经济社会协调，处于可持续发展水平
$0.600 \sim 0.799$	II	较安全	生态环境良好，有利于经济社会稳定发展
$0.400 \sim 0.599$	III	临界安全	生态环境一般，经济社会发展过快，不利于可持续发展
$0.200 \sim 0.399$	IV	敏感	生态环境较差，一定程度阻碍经济社会发展
≤ 0.1999	V	危险	生态环境恶劣，不利于经济社会和人类生存发展

1.2 耦合协调度模型

系统受自身和外界的各种相互作用而彼此影响，对于生态环境压力、状态和响应 3 个系统进行分析时^[23]，运用耦合度模型，如公式 (7) 所示。

$$C = \left\{ \frac{f(x_1) \times f(x_2) \times f(x_3)}{[f(x_1) + f(x_2) + f(x_3)]} \right\}^{\frac{1}{k}} \quad (7)$$

式中：C 为耦合度， $0 \leq C \leq 1$ ；k 为调节系数，这里取 $k=3$ ， $f(x_1)$ 、 $f(x_2)$ 、 $f(x_3)$ 分别表示生态环境压力、状态和响应综合发展指数。当耦合度 C 越大，说明生态环境压力、状态和响应越协调；反之，则越不协调。根据已有研究，将耦合度划分为：当 $0 \leq C < 0.3$ 时，为低度耦合；当 $0.3 \leq C < 0.5$ 时，为拮抗阶段；当 $0.5 \leq C < 0.8$ 时，为磨合阶段；当 $0.8 \leq C \leq 1$ 时，为高度耦合，表明子系统处于良性共振耦合且有序发展状态。

为了反映生态环境压力、状态和响应之间的协调发展水平，构建协调度模型：

$$D = \sqrt{C \times T}, T = \alpha f(x_1) + \beta f(x_2) + \lambda f(x_3) \quad (8)$$

式中：D 为协调度，T 为耦合协调指数， α 、 β 、 λ 是待定系数，考虑到系统中生态环境压力、状态和响应重要性程度基本一致，故取 $\alpha = \beta = \lambda = 1/3$ 。将协调度划分为：当 $0 \leq D < 0.2$ ，为严重失调；当 $0.2 \leq D < 0.4$ ，为中度失调；当 $0.4 \leq D < 0.6$ ，为低度协调；当 $0.6 \leq D < 0.8$ ，为中度协调；当 $0.8 \leq D \leq 1$ ，为良好协调。

1.3 数据来源

本研究涉及社会、经济和自然环境状况三方面指标，各指标数据主要来源于《四川统计年鉴》（2010—2019 年）、《中国城市统计年鉴》（2010—2019 年）、《中国统计年鉴》（2010—2019 年）、《成都统计年鉴》（2010—2019 年）、《泸州统计年鉴》（2010—2019 年）、《德阳统计年鉴》（2010—2019 年）、《自贡统计年鉴》（2010—2019 年）、《内江统计年鉴》（2010—2019 年）和《资阳统计年鉴》（2010—2019 年）。研究区域底图来源于国家基础地理信息中心 <https://www.webmap.cn/>，借助 Matlab 软件对原始数据进行分析，并运用 ArcGIS 软件进行图件绘制。

2 结果分析

2.1 沱江流域生态安全指数时间变化

2.1.1 生态安全综合指数

沱江流域生态安全水平稳步提升，由 2009 年的 0.9905 上升至 2018 年的 1.7568，生态安全等级由Ⅳ级向Ⅱ级转变，整体向好趋势明显（表 3）。表明近些年沱江流域生态环境治理和生态文明建设取得了明显成效，生态环境改善程度高，有利于经济社会稳定发展。从指数构成来看，状态指数和响应指数的逐年提升成为沱江流域城市生态安全水平稳步上升的主要动力，而压力指数上升缓慢，个别年份出现波动现象，一定程度抑制了沱江流域城市生态安全水平的提升。

2.1.2 生态压力指数

2010—2012 年压力指数持续下降，由 0.3482 下降至 0.3255，表明社会经济活动对生态环境造成的压力持续增大。2013 年后，压力指数开始回升，上升到 2018 年的 0.4276（表 3）。沱江流域所经之地是四川省人口密度最大、城市分布最密集、经济社会最发达的地区，但是沱江流域资源相对较少，环境容量有限，以四川省约 3.5% 的水资源量，承载了全省约 27% 的人口和 30% 的经济总量，其负载远远大于容量，是“小马拉大车”的典型，在经济发展中长期超负荷运行，城市容量和负载明显不匹配。2013 年以后，压力指数持续下降的势头得到遏制。“十三五”期间，沱江地区人口增长速度放缓，农业比重快速下降，沿线各城市深入贯彻绿色发展理念，持续推动产业结构升级，加大节能减排力度，地区生产总值能耗下降幅度较大，发展压力持续上升的态势得以扭转。

2.1.3 生态状态指数

整体上看，沱江流域生态状态指数一直处于稳中有进的态势，从 2009 年的 0.3665 上升至 2018 年的 0.6703(表 3)。生态安全状态指数的上升主要源于经济状态的良好发展，虽然污水排放量在持续上升，但是上升速度放缓，二氧化硫排放量和化肥施用量下降趋势明显，整体环境状态有所改善，但生态状态指数提高幅度不大，离人民群众的期盼还有一定的差距。具体表现为，水环境质量局部范围污染形势依然严峻，内江、自贡等建成区黑臭水体犹存，沱江多条支流水污染严峻的形势并未得到根源性扭转，农药面源污染较为严重，农村人居环境治理效果还未真正体现出来，在持续稳定经济增长、保障人民收入增加的同时，不断改善环境质量状态，将是该地区高质量发展的长期主要任务。

2.1.4 生态响应指数

2009—2018 年期间生态响应指数快速上升，由 0.2966 上升至 0.6589(表 3)，表明流域沿线城市生态环境治理力度不断加大，成为生态安全综合指数上升的主要驱动力。沱江流域是长江重要水源补给来源地，沿线城市非常重视生态环境的治理，在法律、行政、制度、财政、项目等多方面采取措施，对环境治理的响应速度快、力度大。表现为城市环境基础设施建设投资规模逐渐扩大，城市生活污水集中处理率、生活垃圾无害化处理率、工业固体废物利用率稳步上升，产业结构不断优化升级，三次产业比重逐步上升。但 2018 年出现响应指数下降的特征，表明加快经济发展与资源环境约束趋紧的矛盾依然存在，对沱江流域各地区“十四五”期间巩固全面建成小康社会的初期成果，持续推动县域经济高质量发展带来一定挑战，后续推进生态环境治理任务仍然艰巨。

表 3 2009—2018 年沱江流域城市生态压力、状态、响应及综合指数

年份	压力指数	状态指数	响应指数	综合指数	等级
2009	0.3274	0.3665	0.2966	0.9905	IV
2010	0.3482	0.3905	0.3644	1.1031	IV
2011	0.3372	0.4400	0.4038	1.1811	IV
2012	0.3255	0.4711	0.4408	1.2374	IV
2013	0.3308	0.4965	0.4679	1.2953	III
2014	0.3321	0.5209	0.4944	1.3474	III
2015	0.4136	0.5469	0.5534	1.5139	III
2016	0.4212	0.5878	0.5708	1.5798	II
2017	0.4526	0.6297	0.7000	1.7823	II
2018	0.4276	0.6703	0.6589	1.7568	II

2.2 沱江流域各城市生态安全指数空间变化

2.2.1 生态安全综合指数空间变化分析

沱江流域 6 个城市生态安全综合指数时空分异明显(图 1)。具体来看,泸州、德阳、内江和资阳生态安全水平提升最为显著,安全等级由 V 级上升为 II 级,提升了 3 个等级;成都和自贡生态安全水平改善较为显著,也提高了 2 个等级,由 IV 级上升为 II 级,如表 4 所示。2009—2014 年间,自贡、泸州、内江和资阳生态综合指数上升缓慢,而成都和德阳生态综合指数上升幅度明显。虽然成都人口规模大、资源消耗多,社会经济发展的资源环境压力大,但是作为四川省会城市、成渝城市群的龙头城市之一,其经济发展水平高,科学技术发达,生态环境治理力度大,确保了生态安全综合指数的快速上升。在 2014—2018 年间,泸州、内江和资阳生态综合指数显著上升,安全等级提升 2 级,尤其是资阳,随着简阳被划调成都后,资阳的人口缩减,发展压力减小,其生态安全综合指数稳步上升。

2.2.2 生态压力指数空间变化分析

沱江流域 6 个城市的生态压力水平偏高,生态压力等级变化不显著(图 2)。2009—2014 年间,成都、自贡、泸州、德阳、内江和资阳生态压力指数停滞不前,泸州、德阳和内江甚至出现生态压力指数下降现象,如表 4 所示。究其原因发现,这些城市人口密度大幅度上升,人口自然增长率上升,人均耕地面积不断减少,人地矛盾进一步加剧,社会经济的快速发展造成流域沿线城市生态压力上升。2014—2018 年间,自贡和内江生态压力等级一直处于 IV 级状态,生态压力依旧严峻,而泸州、德阳和资阳生态压力有所缓解,由 IV 级转为 III 级。“十三五”期间,泸州、德阳和资阳持续调整产业结构,农业比重下降速度很快,如泸州 4 年间下降 2.4%,德阳下降 2.95%,资阳下降 5.88%。此外,人均耕地面积持续下降的情况得到好转,均有不同幅度的上升,如资阳 4 年间人均耕地面积增加了 0.08 公顷,泸州增加了 0.05 公顷,德阳增加了 0.02 公顷。值得注意的是,成都生态压力在此期间进一步加剧,由 III 级转为 IV 级。成都作为我国新一线城市,虽然农业比重较小,但人口密度、经济总量及发展速度均大于其他城市,社会经济发展面临的资源环境压力很大。

表 4 沱江流域城市生态压力指数、状态指数、响应指数和综合指数

地区	生态压力指数			生态状态指数			生态响应指数			生态安全综合指数		
	2009 年	2014 年	2018 年	2009 年	2014 年	2018 年	2009 年	2014 年	2018 年	2009 年	2014 年	2018 年
成都	0.4315	0.5654	0.3645	0.1848	0.4335	0.5402	0.5298	0.6512	0.9166	1.1461	1.6501	1.8213
德阳	0.2556	0.2840	0.3898	0.4800	0.5998	0.7592	0.3286	0.5184	0.6404	1.0641	1.4023	1.7895
内江	0.2913	0.2830	0.4634	0.3882	0.5680	0.7072	0.2331	0.3539	0.5722	0.9126	1.2049	1.7427
自贡	0.3720	0.2844	0.4047	0.2846	0.4331	0.5636	0.2073	0.5533	0.6583	0.8639	1.2709	1.6265
泸州	0.2970	0.2468	0.3833	0.3638	0.4348	0.6277	0.1544	0.4204	0.5687	0.8152	1.1021	1.5797
资阳	0.3168	0.3290	0.5599	0.4977	0.6560	0.8238	0.3263	0.4691	0.5971	1.1408	1.4541	1.9808

2.2.3 生态状态指数空间变化分析

沱江流域 6 个城市的生态状态指数显著上升,生态状态等级变化显著(图 3)。2009—2014 年间,泸州、德阳和内江生态状态由敏感转为临界安全,如表 4 所示。成都生态状态为 V 级,处于危险状态,好在 2014 年由 V 级转为 III 级,生态安全状态有向好转变的趋势。成都人口规模大、服务业高度发达,形成环境状态较差、经济状态优良的局面,表现为成都生活污水排放量和工业二氧化硫排放量过大,2014 年成都污水排放量高达 6.96 亿吨,是排放量最小的资阳(0.17 亿吨)的 40 倍左右,工业二氧化硫排放量 5.2 万吨,是资阳(0.61 万吨)的 8.5 倍,成都以牺牲环境为代价,换来经济快速发展,经济总量大,城乡居民人均收入高。

2014—2018 年间，成都和德阳生态安全状态等级没有发生变化，维持在临界安全的状态。德阳作为工业发达的城市，主要受工业污水排放、废气排放的影响，生态安全状态不容乐观；自贡、泸州和内江由Ⅲ级转为Ⅱ级，处在较安全状态；资阳生态状态由Ⅱ级转为Ⅰ级，达到安全状态。整体来看，近几年沱江流域沿线城市生态状态改善明显，成都、德阳还需在排放优化、资源节约和生态保护等方面进一步加大力度。

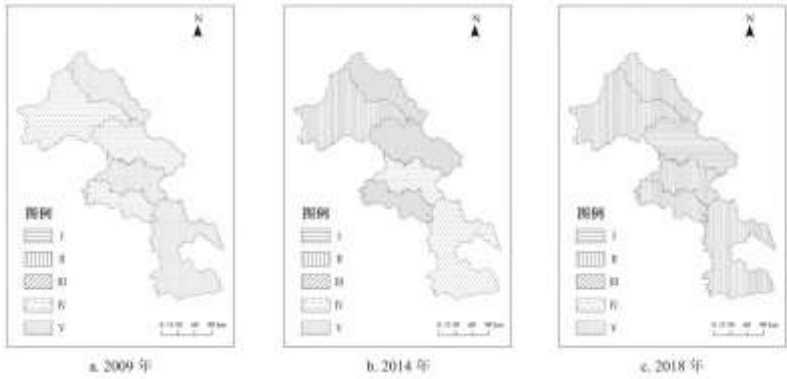


图 1 2009—2018 年沱江流域城市生态安全综合指数时空变化

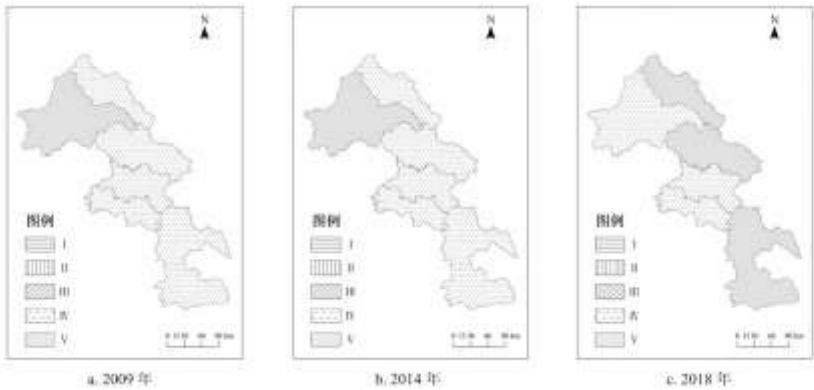


图 2 2009—2018 年沱江流域城市生态压力指数时空变化

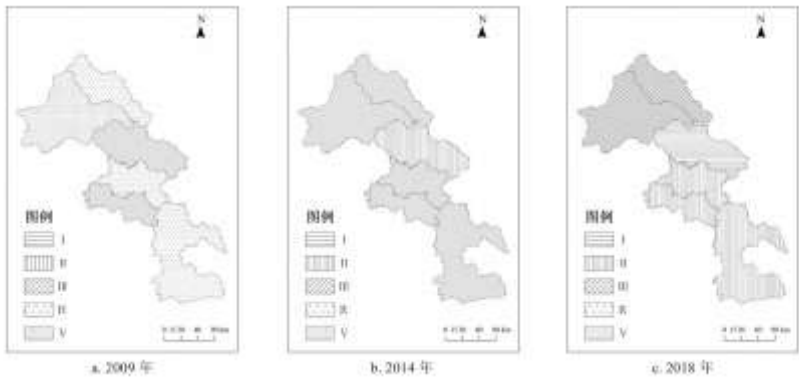


图 3 2009—2018 年沱江流域城市生态安全状态指数时空变化

2.2.4 生态响应指数空间变化分析

沱江流域 6 个城市的生态响应指数稳步上升,生态响应等级变化显著(图 4)。尤其是成都、德阳和自贡变化尤为显著,成都生态响应等级由Ⅲ级转变为Ⅰ级,德阳和自贡分别由Ⅳ级转变为Ⅱ级,内江也由Ⅴ级转变为Ⅲ级,如表 4 所示。生态响应等级的上升得益于人均 GDP、环境投资额度和废水废气废物处理利用率的提升。生态响应指数的变化幅度大于压力指数和状态指数,各城市在面对社会经济发展压力和应对生态环境污染等方面采取了大量有效措施,主要得益于各城市产业结构不断优化,城市污水集中处理效率的大幅度上升。2009—2018 年间,成都、自贡、泸州、德阳、内江、资阳第三产业比重分别上升 4.53%、11.53%、5.38%、14.13%、15.67%、11.42%,城市生活污水集中处理率分别上升 15.36%、18.56%、34.44%、48.32%、48.27%、29.82%。2018 年各城市生态安全响应指数大幅度上升,有可能是沱江流域水污染综合治理与可持续发展试点工作加大了各城市环境治理力度,尤其是自贡和泸州城市环境基础设施建设投资额同比增长 564.31%、176.49%。

2.3 生态安全耦合特征分析

由表 5 可知,在研究时间范围内,沱江流域 6 个城市的压力、状态、响应 3 个系统的耦合度均介于(0.9,1),均处于高度耦合阶段,多年耦合度平均值的大小关系为:内江>德阳>资阳>泸州>成都>自贡。但各市变化特征又存在差异,成都、自贡、德阳、内江耦合度呈现出先上升后下降的特征,耦合度分别在 2014 年、2010 年、2010 年、2016 年达到峰值;泸州、资阳大致呈现出先下降后上升的特征,分别在 2014 年、2013 年达到谷值。

沱江流域 6 个城市的压力、状态、响应 3 个系统的协调度绝大多数年份介于(0.5,0.8),以基本协调和中度协调类型为主,多年协调度平均值的大小关系为:成都>资阳>自贡>德阳>泸州>内江,如表 6 所示。其中,自贡和资阳的协调度等级为Ⅱ级,成都、德阳、泸州和内江的协调度等级为Ⅰ级。各市协调度上升趋势显著,内江、泸州、德阳的协调度上升幅度较大,9 年间分别上升了 0.2263、0.2169、0.2151,实现了由基本协调向中度协调的过渡。此外,资阳的协调度也上升较多,9 年间上升了 0.1972,实现了由基本协调向中度协调过渡再向高度协调的转变。从耦合协调度的基本特征来看,成都属于“响应超前—状态滞后”型、自贡、泸州、内江、资阳属于“状态超前—压力滞后”型,德阳属于“响应超前—压力滞后”型。

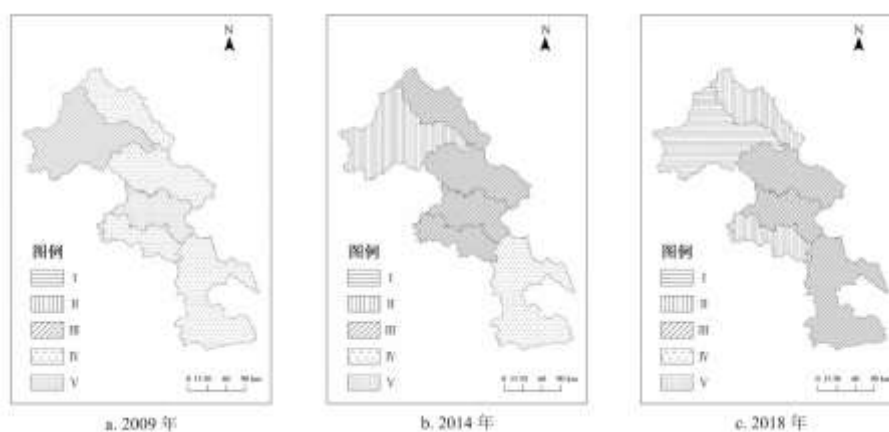


图 4 2009—2018 年沱江流域城市生态安全响应指数时空变化

3 结论与政策启示

3.1 结论

通过构建 PSR 模型对 2009—2018 年沱江流域 6 个城市生态安全进行评价，得到以下主要结论：第一，沱江流域城市整体的生态安全水平持续提升，生态安全等级由Ⅳ级向Ⅱ级转变，生态安全状态总体趋好，生态安全水平上升的动力主要来源于生态响应指数和生态状态指数的持续上升。第二，沱江流域 6 个城市生态安全综合指数呈上升状态，泸州、德阳、内江和资阳生态安全水平提升最为显著；压力指数上升速度缓慢，成都、自贡、泸州、德阳、内江和资阳生态压力等级呈停滞状态，泸州、德阳和内江甚至出现生态压力指数下降现象；生态状态指数上升趋势显著，泸州、德阳、成都和内江生态状态由敏感转为临界安全；生态响应指数稳步上升，成都、德阳和自贡变化显著。第三，沱江流域地区 6 个城市的压力、状态、响应 3 个系统均处于高度耦合阶段，而协调度主要以基本协调和中度协调为主，成都属于“响应超前一状态滞后”型，自贡、泸州、内江和资阳属于“状态超前一压力滞后”型，德阳属于“响应超前一压力滞后”型。

3.2 政策启示

为进一步提升沱江流域城市生态安全水平，实现流域高质量发展，提出以下建议：

第一，加快产业结构升级，降低能耗压力。

无论从沱江流域整个地区还是各城市来看，生态安全趋好形势令人欣喜。但当地经济发展对能源的依赖仍然较大，生态安全压力依然存在，短期之内难以改善。尤其德阳、自贡、泸州、资阳和内江还要大力发展第三产业和低碳循环经济产业，实现产业结构逐步转型，建设清洁低碳、安全高效的现代能源体系，实现经济发展与能源消耗的脱钩，降低生态压力对生态安全水平的抑制作用。

第二，控制污染物粗放排放，实现排放优化。

如何在保证经济稳定发展的情况下实现排放优化是当前亟须解决的问题，目前沱江流域污水排放上升趋势并未得到有效遏制，导致沱江流域成为四川污染最严重的河流，尤其是位于沱江上游的成都和德阳，更需要控制污水排放。重点抓好工业污染和农业面源污染防治，严格落实河长制，健全用水权、排污权分配制度，培育壮大节能环保产业，实现环境改善和经济发展双赢。

第三，加大环境治理力度，确保生态安全水平上升的主动力。

完善升级资阳、内江、德阳、自贡和泸州污水处理设施，提高城市生活污水集中处理率；加快城镇生活垃圾无害化处理设施建设，进一步提高自贡和资阳的生活垃圾无害化处理率；加快固体废物资源化利用体系建设，提高内江和德阳工业固体废物利用率，着力推进沱江流域城市生产、生活方式绿色化。

表 5 沱江流域城市生态安全耦合协调度结果分析

年份		2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
成都	耦合度	0.9116	0.9687	0.9563	0.9691	0.9601	0.9862	0.9714	0.9686	0.9424	0.9309
	协调度	0.6015	0.7035	0.6919	0.7295	0.7573	0.7433	0.7809	0.7854	0.8064	0.7707
自贡	耦合度	0.9015	0.9777	0.9486	0.9462	0.9516	0.9528	0.9723	0.9665	0.9707	0.9630
	协调度	0.5834	0.6100	0.6382	0.6424	0.6480	0.6710	0.7002	0.7151	0.7687	0.7607
泸州	耦合度	0.9783	0.9693	0.9606	0.9580	0.9702	0.9576	0.9869	0.9864	0.9841	0.9853

	协调度	0.5391	0.5351	0.5623	0.5806	0.6073	0.6165	0.6813	0.7033	0.7626	0.7560
德阳	耦合度	0.9403	0.9948	0.9946	0.9806	0.9830	0.9643	0.9842	0.9893	0.9733	0.9803
	协调度	0.5217	0.5819	0.6154	0.6240	0.6436	0.6489	0.6964	0.6890	0.7454	0.7368
内江	耦合度	0.9403	0.9799	0.9875	0.9803	0.9868	0.9691	0.9931	0.9869	0.9832	0.9786
	协调度	0.4944	0.5332	0.5556	0.5669	0.5793	0.6009	0.6611	0.6763	0.7083	0.7207
资阳	耦合度	0.9781	0.9968	0.9697	0.9651	0.9578	0.9616	0.9806	0.9748	0.9911	0.9854
	协调度	0.6055	0.6210	0.6349	0.6439	0.6432	0.6816	0.7153	0.7488	0.8071	0.8027

表 6 沱江流域城市生态安全耦合协调特征

城市	压力	状态	响应	耦合协调指数	耦合度	协调度	协调等级	特征
成都	0.4805	0.4094	0.7594	0.4948	0.9565	0.7370	I	响应超前一状态滞后型
自贡	0.3128	0.6070	0.4989	0.4256	0.7769	0.6738	II	状态超前一压力滞后型
泸州	0.3623	0.5436	0.3689	0.3825	0.8308	0.6344	I	状态超前一压力滞后型
德阳	0.3632	0.4136	0.5058	0.3848	0.8461	0.6503	I	响应超前一压力滞后型
内江	0.3079	0.4541	0.3905	0.3457	0.8298	0.6097	I	状态超前一压力滞后型
资阳	0.4030	0.6444	0.4470	0.4483	0.7993	0.6904	II	状态超前一压力滞后型

参考文献:

- [1]Steffen W,Richardson K,Rockström J,et al.Planetary boundaries:Guiding human development on a changing planet[J]. Science,2015, 348(6240):1217.
- [2]Rapport D J.Ecosystem services and management options as blanket indicators of ecosystem health[J]. Journal of Aquatic Ecosystem Health,1995,4(2):97-105.
- [3]郑永贤,薛菲,张智光.森林旅游景区生态安全 IRDS 模型实证研究[J].资源科学,2015(12):2350-2361.
- [4]秦趣,陈忠全,姚世美.贵州威宁草海湿地生态安全评价[J].水生态学杂志,2018(2):27-33.
- [5]徐志耀,刘滨铨.大湖流域地区生态质量评价及其时空演进——以洞庭湖流域为例[J].生态经济,2017(8):169-172.
- [6]赵筱青,谭琨,易琦,等.典型高原湖泊流域生态安全格局构建——以杞麓湖流域为例[J].中国环境科学,2019(2):768-777.

-
- [7]柳思, 张军, 田丰, 等. 2005—2014 年疏勒河流域土地生态安全评价[J]. 生态科学, 2018(3): 114-122.
- [8]张雅娴, 樊江文, 王穗子, 等. 三江源区生态承载力与生态安全评价及限制因素分析[J]. 兽类学报, 2019(4): 360-372.
- [9]刘延国, 廖彦淞, 王青, 等. 生态旅游视域下的岷江上游贫困山区生态安全评价[J]. 中国农业资源与区划, 2018(2): 189-195.
- [10]金辉, 王思. 基于 PSR 模型的武汉城市圈生态安全评价及态势研究[J]. 安全与环境学报, 2020(1): 352-363.
- [11]庞雅颂, 王琳. 区域生态安全评价方法综述[J]. 中国人口·资源与环境, 2014(S1): 340-344.
- [12]张崇淼, 李森, 张力喆, 等. 基于 PSR 模型的城市生态安全评价与贡献度研究——以铜川市为例[J]. 安全与环境学报, 2019(3): 1049-1056.
- [13]刘世栋, 薛东前, 高峻. 上海杭州湾北岸滨海地区生态安全评价[J]. 安全与环境学报, 2012(6): 124-130.
- [14]马新萍, 龙双双, 李玉婷, 等. 基于 DPSIR 模型的陕西关中城市群生态安全预警评价研究[J]. 国土资源科技管理, 2020(1): 82-94.
- [15]Ellis J B. Integrated approaches for achieving sustainable development of urban storm drainage[J]. Water Science & Technology, 1995, 32(1): 1-6.
- [16]李小玲, 杨成忠. 城市生态安全评价研究[J]. 湖北农业科学, 2018(16): 113-117.
- [17]许静, 王永桂, 陈岩, 等. 长江上游沱江流域地表水环境质量时空变化特征[J]. 地球科学, 2020(6): 1937-1947.
- [18]王宏, 徐娅玲, 张奇, 等. 沱江流域典型农业小流域氮和磷排放特征[J]. 环境科学, 2020(10): 4547-4554.
- [19]唐洪松. 沱江流域畜禽养殖污染物排放强度及环境风险[J]. 内江师范学院学报, 2020(4): 72-78.
- [20]唐洪松, 李倩娜. 沱江流域农户养殖废弃物治理意愿研究[J]. 天津农业科学, 2020(1): 46-49.
- [21]王吉泉, 廖姣, 林柯, 等. 建立岷江沱江流域水生态环境保护横向补偿机制对策建议[J]. 现代经济信息, 2019(15): 364-365.
- [22]刘海龙, 谢亚林, 贾文毓, 等. 山西省生态安全综合评价及时空演化[J]. 经济地理, 2018(5): 161-169.
- [23]周正柱, 王俊龙. 长江经济带生态环境压力、状态及响应耦合协调发展研究[J]. 科技管理研究, 2019(17): 234-240.