

DOI: 10.5846/stxb202108032116

曹佳梦, 官冬杰, 黄大楠, 殷博灵, 和秀娟. 重庆市生态风险预警等级划分及演化趋势模拟. 生态学报, 2022, 42(16): 6579-6594.

Cao J M, Guan D J, Huang D N, Yin B L, He X J. Classification of ecological risk warning levels and simulation of evolutionary trends in Chongqing Municipality. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(16): 6579-6594.

重庆市生态风险预警等级划分及演化趋势模拟

曹佳梦, 官冬杰*, 黄大楠, 殷博灵, 和秀娟

重庆交通大学建筑与城市规划学院, 重庆 400074

摘要:生态风险预警等级评估和演化趋势模拟, 可为生态风险管理提供可靠的辅助决策。以重庆市为研究对象, 基于驱动力-压力-状态-影响-响应模型, 构建重庆市生态风险预警指标体系, 采用正态云模型和集对分析法, 定量分析重庆市生态风险时空分异特征和演化趋势。研究结果表明: (1) 2013—2019 年, 重庆市生态风险值呈“上升-下降”的波动趋势, 综合生态风险隶属于重警等级, 生态风险综合值从 0.295 下降到 0.278, 生态环境逐年好转; (2) 重庆市生态风险有下降、不变、先上升后降低、先降低后上升以及一直升高 5 种演化趋势, 分别占比 39%、16%、5%、21%、24%; (3) 重庆市生态风险转移分为两个方向, 2013—2016 年生态风险空间分异性增大, 中警、轻警和无警风险等级不断向东北、东南和西部四周分散转移; 2016—2019 年生态风险分布格局变化较小, 重警风险区在东部聚集; (4) 演化趋势模拟结果表明, 未来重庆市生态风险降低的区县有 13 个, 占比 34%, 生态环境有向好发展的趋势; 生态风险上升的区县有 25 个, 占比 66%, 生态环境会有所恶化, 但是恶化程度较低。将生态风险等级划分与预警演化趋势相结合, 能为城市生态风险管理提供科学依据。

关键词:生态风险评价; 预警; 正态云模型; 集对分析

Classification of ecological risk warning levels and simulation of evolutionary trends in Chongqing Municipality

CAO Jiameng, GUAN Dongjie*, HUANG Danan, YIN Boling, HE Xiujuan

School of Architecture and Urban Planning, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China

Abstract: The level assessment on the ecological risk early warning and the simulation on evolutionary trend can provide reliable auxiliary decision making for the ecological risk management. Taking into account the Driving-Pressure-State-Impact-Response model, this paper establishes an index system for ecological risk early warning to quantitatively analyze the temporal and spatial differentiation characteristics and evolution trend of ecological risk in Chongqing Municipality, using the normal cloud model and the set-pair analysis method. The results demonstrate that: (1) from 2013 to 2019, the ecological risk value of Chongqing presented a “rise-decline” fluctuation trend, and the comprehensively ecological risk was ranked as heavy warning level, while the comprehensive ecological risk value decreased from 0.295 to 0.278, denoting that the ecological environment had been improved. (2) There were five evolutionary trends of ecological risk in Chongqing: decreasing, unchanged, increasing-decreasing, decreasing-increasing and always increasing, accounting for 39%, 16%, 5%, 21% and 24% of all regions, respectively. (3) The ecological risk transferred to ward two orientations in Chongqing. From 2013 to 2016, the medium-alert, light-alert and no-alert risk areas continued to spread to the northeast, southeast and west of Chongqing, which intensified the spatial differentiation of ecological risks; whereas from 2016 to 2019, the high-alert risk areas were concentrated in the east, suggesting the little change in the ecological risk distribution pattern. (4) The

基金项目:重庆市自然科学基金杰出青年基金项目(cstc2020jcyj-jqX0004); 国家社科基金后期资助项目(20FJYB035); 教育部人文社科一般项目(20YJA790016)

收稿日期: 2021-08-03; 网络出版日期: 2022-04-20

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: guandongjie_2000@163.com

simulation results of evolution trend revealed that 13 counties, accounting for 34% of all areas, would experience the declining ecological risk and subsequently improving ecological environment in Chongqing in the future; additionally 25 counties, accounting for 66%, would maintain the deterioration of ecological environment to small extent. The combination of ecological risk classification with early warning evolutionary trend can contribute a scientific basis to urban ecological risk management.

Key Words: ecological risk assessment; warning; normal cloud model; set pair analysis

随着城市化进程的深入推进,一系列生态环境问题带来的负面效应不断显现,如何评估、管控和预测生态风险变化趋势成为当前生态风险研究的热点话题^[1-2]。生态风险是指一个种群、生态系统或整个景观的正常功能受到外界胁迫,从而在目前和未来减小该系统健康、生产力、遗传结构、经济价值和美学价值的一种状况^[3]。生态风险评价是从社会、经济和自然等不同视角将定性化的风险因子转化为定量的生态灾害发生概率的评估过程,综合考虑不同影响因素对环境造成的负面影响,因而在环境保护中引起广泛关注^[4-5]。

目前,国内外学者对生态风险问题研究主要集中在以下几个方面:(1)风险受体和研究尺度选择。早期生态风险以单一风险受体为研究对象^[6],研究尺度局限于对物种的风险评价^[7-8],但生态系统层次结构多样复杂,风险受体不仅局限于某一圈层,所以后期研究尺度逐渐从物种扩展到流域^[9-12]和区域^[13-16]尺度;(2)风险源分析。由于生态风险的复杂性,风险源的范围逐渐多元化^[17],部分学者从景观格局^[18]、土地利用^[19]、社会经济^[20]等视角出发分析风险来源;(3)生态风险评价方法探索。评价方法由定性评价发展为 GIS 技术^[21]、空间分析法^[22]和模糊评价法^[23]等定量分析法,使得抽象的生态风险更加数值化和定量化;(4)生态风险预警模拟。未来生态风险警情的可预见性是人为预防生态风险的前提,但深入探究未来风险警情及演化趋势的研究较少^[24],如:藏淑英等从土地利用类型视角建立了大庆市生态风险预警模型^[25];李杨帆等提出了景观生态风险预警模型,并在景观生态安全格局调控中进行应用^[26];李振兴等建立了城镇化动态生态风险预警指标数据库,但缺少社会经济因素对生态风险的影响分析^[27]。

综上,尽管已有研究在生态风险评估上取得了丰富的成果,但仍有以下三个方面的问题需要进一步探索:(1)缺乏多维度、多风险源、多风险受体的综合生态风险预警分析。生态风险的风险源和评价终点往往只选择生态系统的某一层或过程,不能综合地反映区域整体生态风险警情;(2)部分研究方法无法同时满足生态风险影响因素的不确定性和复杂性。区域的生态风险往往受到自然、经济发展和城市规划等因素影响,各种影响因子相互转换、相互联系;(3)预测未来的生态风险演化趋势较少。生态风险评价的目的是根据现有的生态风险态势通过人为调节手段来降低和预防灾害风险,但只评价历史趋势下的生态风险现状难以为生态环境的保护及风险调控提供有效参考。

重庆市作为西部大开发的重要战略支点,处于一带一路和长江经济带的连接点上。城市化进程的推进导致自然生态系统和社会经济系统失衡,诱发重庆生态风险的加剧,进行生态风险预警等级划分和演化趋势分析迫在眉睫。本文以重庆市为研究区域,基于驱动力-压力-状态-影响-响应模型,从社会、经济、自然和景观多角度选取生态风险预警指标,采用正态云模型对 2013—2019 年重庆市生态风险指数和时空变化特征分析的基础上,利用集对分析预测未来生态风险演化趋势,为重庆市生态风险的管控和城市可持续健康发展以及环境管理提供参考依据和决策支持。

1 研究区概况与数据

1.1 研究区域概况

重庆作为四大直辖市之一,位于东经 105°11′—110°11′和北纬 28°10′—32°13′之间,是推动共建“一带一路”国际循环的重要战略支点。由于其独特的经济区位优势,经济迅猛发展的同时,城市化进程不断加快,

2013—2019 年间,重庆市建成区面积从 1395.86km²扩张到 1680.52km²,是 2013 年面积的 1.2 倍;城镇人口由 2013 年的 1732.76 万人增加到 2019 年的 2086.99 万人,2019 年的城镇化率高达 66.8%,是 2013 年的 1.2 倍,城镇化水平持续提高达到新高度。重庆具有大城市、大农村和大库区的特殊市情,随着乡村的发展和城市化进程的不断推进,引发了热岛效应增强,人地关系紧张,生态系统稳定性降低等一系列生境问题。重庆地处长江上游,降低生态风险对生态环境的改善和推动长江经济带绿色发展有重大意义。

1.2 数据来源与处理

本文以 2013—2019 年为研究年限,土地利用数据用来计算景观格局指数和提取耕地面积及建成区面积,由于无法获取 2016 年和 2019 年土地利用数据,且 2015 年和 2020 年土地利用数据较 2016 年和 2019 年数据变化相差较小,所以用 2015 年数据替代 2016 年数据,2020 年数据替代 2019 年数据。2013、2015、2020 年 3 期重庆市土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn>),其空间分辨率为 1000m。土地利用类型采用中国科学院土地资源分类系统,数据包括 25 个二级类型和 6 个一级类型,本次研究主要对一级分类体系下的 6 种土地利用类型进行研究。社会经济数据来源于《重庆市统计年鉴》(2014—2020)、《重庆市环境状况公报》(2013—2019)和《重庆市水资源统计公报》(2013—2019),部分区县缺失指标数据通过平滑法进行预测。

2 研究方法

2.1 重庆市生态风险预警指标体系构建

生态风险具有多风险源、多风险受体等特征,全面综合的生态风险评估需建立科学完整的指标体系。驱动力-压力-状态-影响-响应模型(DPSIR)是将“驱动力”施加的社会环境“压力”与相应的环境“状态”的改变和人类生活质量等的“影响”及人类社会通过政策调整做出的“响应”进行有机整合,有效监测因素之间的相互影响和反馈(图 1)^[28—29]。遵循科学性、全面性及数据可得性等原则,结合重庆市发展现状及生态环境变化特征,通过 DPSIR 模型,以降低生态风险和增进人类福祉为目标,将人地关系与生态系统、政府决策及人类干扰活动有机的融合在一起,综合确定生态风险预警指标体系(表 1)。模型中,驱动力指标是人类对经济发展和社会文化的需求刺激生态系统变化的原因,故本文选取与经济和社会文化相关指标代替。经济和社会文化驱动力对生态风险的压力主要反映在其与生态环境保护的竞争,如造成的环境污染和能源消耗压力等。状态指标是在压力和驱动力的相互作用下,处于当前生态风险程度时重庆市的状态表现,包括社会资源状况、人类生活质量和环境现状几个方面。影响指标反映生态风险等级变化下重庆市的生态环境效果,主要体现在自然或人为干扰导致生态系统功能或生物多样性的变化,景观格局指数是生态多样性和人类干扰量化的表征。响应指标表示为降低生态风险等级,增进人类福祉,对“压力”和“影响”人类社会做出的决策和调整,如提高

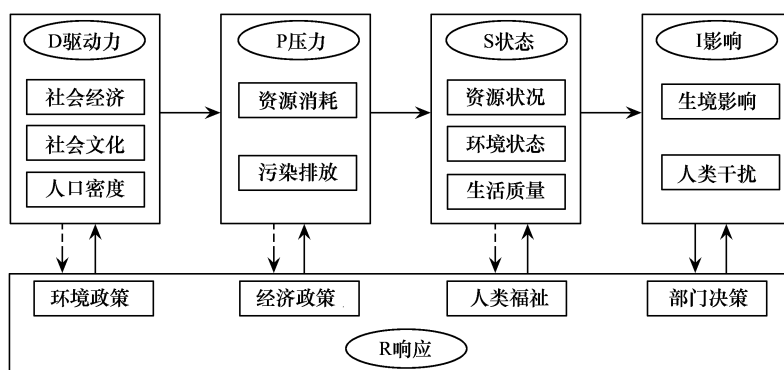


图 1 DPSIR 模型结构示意图

Fig.1 A schematic diagram for DPSIR model structure

城乡服务能力及灾害防范能力、改善产业结构、加强环境建设等^[30]。

参考相关文献的基础上^[31–32],在 ArcGIS 中使用自然断点法,将各预警指标值划分为五个等级,分别为无警、轻警、中警、重警和巨警,如表 2 所示。

表 1 重庆市生态风险预警指标体系

Table 1 An index system for ecological risk early warning in Chongqing

评价系统 Evaluation system	评价指标 Evaluation indicator	指标说明 Index description	权重 Weight
驱动力 Driver	人均 GDP	表征社会经济水平	0.0701
	人口密度	表征人口分布情况	0.0158
	城镇化率	表征城市化水平	0.0731
	旅游总收入	表征社会文化水平	0.0205
	登记失业率	反映经济和生活质量问题	0.0322
压力 Pressure	空气中二氧化硫浓度	反映环境污染压力	0.0417
	规模以上工业能源消费总量	反映能源消耗压力	0.0197
	农药使用量	反映环境污染压力	0.0276
状态 State	生活用水量	表征生活质量	0.0403
	城镇居民人均可支配收入	表征生活水平	0.0405
	森林覆盖率	反映生境质量和状态	0.0489
影响 Impact	斑块面积变异系数	表征人类干扰对生态系统影响	0.0243
	聚集度指数	反映景观聚集程度	0.0553
	斑块密度	反映景观破碎化程度	0.0258
	蔓延度指数	反映斑块类型延展优势	0.0428
	Shannon's 多样性指数	反映景观多样性和异质性	0.0261
响应 Response	耕地面积	反映区域政策响应和环保意识	0.0530
	第三产业占 GDP 比重	反映部门产业结构调整	0.0656
	水资源总量	反映区域政策影响	0.0764
	建成区面积	反映城乡服务能力	0.0877
	空气优良天数	反映区域政策响应和环保意识	0.0456
	公路密度	反映灾害应对能力	0.0672

表 2 生态风险预警指标标准

Table 2 Indicator criteria for ecological risk early warning

指标 Indicator	风险等级 Risk classification				
	巨警 Serous-alert	重警 High-alert	中警 Medium-alert	轻警 Light-alert	无警 No-alert
人均 GDP Per capita GDP/CNY	[28011,47318]	(47318,64284]	(64284,90889]	(90889,138718]	(138718,196816]
城镇化率 Urbanization rate/%	[36.51,38.41]	(38.41,52.17]	(52.17,64.08]	(64.08,71.27]	(71.27,100]
水资源总量 Total water resources/108m3	[0.10,2.45]	(2.45,7.69]	(7.69,15.27]	(15.28,24.32]	(24.32,44.60]
第三产业占 GDP 比重 The proportion of tertiary industry in GDP/%	[32.80,40.70]	(40.70,48.20]	(48.20,55.20]	(55.20,68.20]	(68.20,90.60]
城镇居民人均可支配收入 Per capita disposable income of urban residents/CNY	[26958,30466]	(30466,35322]	(35322,38396]	(38396,41096]	(41096,44209]
空气优良天数 Number of days with good air/d	[281,298]	(298,311]	(311,324]	(324,342]	(342,354]
公路密度 Road density/(km/km ²)	[0,0.08]	(0.08,1.34]	(1.34,2.27]	(2.27,2.99]	(2.99,3.93]

续表

指标 Indicator	风险等级 Risk classification				
	巨警 Serous-alert	重警 High-alert	中警 Medium-alert	轻警 Light-alert	无警 No-alert
空气中二氧化硫浓度 Sulfur dioxide concentration in the air/($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	(17,21]	(14,17]	(11,14]	(8,11]	[6,8]
农药使用量 Consumption of chemical pesticides/t	(698,1795]	(490,698]	(294,490]	(130,294]	[0,130]
森林覆盖率 Forest cover rate/%	[31.20,38]	(38,47.40]	(47.40,55]	(55,64.50]	(64.50,70.20]
人口密度 Population density/(人/ km^2)	(3032.06,21917.39]	(974.95,3032.06]	(516.46,974.95]	(281.65,516.46]	[76.47,281.65]
旅游总收入 Total tourist revenue/ 10^8 CNY	(224.57,463.50]	(109.01,224.57]	(74.11,109.01]	(42.20,74.11]	[8,42.20]
规模以上工业能源消费总量 Energy consumption of enterprises above designated size by region/1000 tons of standard coal	(479.61,989.64]	(282.26,479.61]	(135.68,282.26]	(50.60,135.68]	[2.10,50.60]
生活用水量 Water consumption for living/ 10^4t	(7120,9209]	(4334,7120]	(2835,4334]	(2033,2835]	[972,2033]
登记失业率 Registered unemployment rate/%	(4,5.50]	(3.40,4]	(2.79,3.40]	(2.10,2.79]	[1.62,2.10]
斑块面积变异系数 Coefficient of patch area variation	(1.29,2.18]	(0.99,1.29]	(0.67,0.99]	(0.40,0.67]	[0.19,0.40]
聚集度指数 Contagion index/%	[36.50,41.77]	(41.77,45.30]	(45.30,49.01]	(49.01,56.45]	(56.45,68.28]
蔓延度指数 Sprawl index/%	[21.53,25.46]	(25.46,33.91]	(33.91,38.02]	(38.02,46.71]	(46.71,59.06]
Shannon's 多样性指数 Shannon's diversity index	[0,0.66]	(0.66,1.46]	(1.46,1.72]	(1.72,1.89]	(1.89,2.04]
耕地面积 Cultivated land/ hm^2	[0,19500]	(19500,71900]	(71900,105900]	(105900,146700]	(146700,205200]
斑块密度 Patch density/(块/ 100hm^2)	(0.24,0.35]	(0.19,0.24]	(0.17,0.19]	(0.13,0.167]	[0.10,0.13]
建成区面积 Build-up land/ km^2	[500,2500]	(2500,4400]	(4400,7500]	(7500,15000]	(15000,30900]

2.2 正态云模型

生态风险是自然、社会经济和政府决策等多因素的综合体,其演化趋势、风险程度和影响机制等具有不确定性。故生态风险的评价需要具有处理不确定性因素和克服主观偏差的能力。正态云模型同时兼顾了数据的模糊性和评价等级的不确定性,可以客观的分析出各个指标因子的隶属等级^[33—34]。正态云模型的定义由期望(Ex)、熵(En)、超熵(He)来构成,如下:

$$\mu_1 = e^{-\frac{(x-Ex)^2}{2En^2}}$$

(1)

假设 U 为数值表示的定量论域,且 X 属于 U 的子集, T 是 U 的定性概念。若论域 A 中的元素 x 对应 T 中的隶属度 μx 满足 $\mu x \sim N(Ex, En^2)$, 则 T 从 U 到隶属度区间在属于空间中的分布,就定义为云模型。当 En' 满足 $En' \sim N(En, He^2)$, 则该云模型为正态云模型。其具体建模过程如下:

(1) 建立生态风险预警指标集合

$$A = \{a_1, a_2, a_3, \cdots, a_{22}\}$$

(2)

(2) 建立预警指标生态风险等级的隶属关系

设定生态风险警情的上下限,由于指标在隶属等级的划分存在不确定性,由此:

$$Ex_{ij} = (x_{ij}^{\perp} + x_{ij}^{\downarrow}) / 2 \quad (3)$$

式中: i 为不同预警指标 j 为指标 i 所处的生态风险等级, Ex_{ij} 为指标 i 所处风险等级的期望, $x_{ij}^{\perp}$ 和 $x_{ij}^{\downarrow}$ 为每个预警指标所处生态风险等级的临界值。由于指标 i 的临界值隶属于两种生态风险等级, 由此:

$$\exp \left[-\frac{(x_{ij}^{\perp} - x_{ij}^{\downarrow})}{8 (En_{ij})^2} \right] = 0.5 \quad (4)$$

$$En_{ij} = |x_{ij}^{\perp} - x_{ij}^{\downarrow}| / 2.355 \quad (5)$$

式中: En_{ij} 表示该指标在对应生态风险等级下的熵。

超熵 He 表示云滴汇集成云层的分散程度, 在可视化云图上呈现为云的厚度。超熵依据可视化云图的离散程度取值, 本文定义 $He = 0.01$ 。根据表 2 中各预警指标等级, 通过式 (3) 和式 (5) 确定各指标的期望和熵, 计算结果见表 3。

表 3 生态风险预警指标正态云模型的期望和熵

Table 3 Expectation and entropy of normal cloud models for ecological risk warning indicators

指标 Indicator	风险等级 Risk classification				
	巨警 Serous-alert	重警 High-alert	中警 Medium-alert	轻警 Light-alert	无警 No-alert
人均 GDP Per capita GDP/CNY	(37664.50, 8189.30)	(55801, 7204.25)	(77586.50, 11297.24)	(114803.50, 20309.55)	(167767, 24670.06)
城镇化率 Urbanization rate/%	(37.46, 0.81)	(45.29, 5.84)	(58.13, 5.06)	(67.68, 3.05)	(85.64, 12.20)
水资源总量 Total water resources/ 10^8 m^3	(1.28, 1.00)	(5.07, 2.22)	(11.48, 3.22)	(19.79, 3.84)	(34.46, 8.61)
第三产业占 GDP 比重 The proportion of tertiary industry in GDP/%	(36.75, 3.35)	(44.45, 3.18)	(51.70, 2.97)	(61.70, 5.52)	(79.40, 9.51)
城镇居民人均可支配收入 Per capita disposable income of urban residents/CNY	(28712, 1489.60)	(32894, 2062)	(36859, 1305.31)	(39746, 1146.50)	(42652.50, 1321.87)
空气优良天数 Number of days with good air/d	(289.50, 7.20)	(304.50, 5.52)	(317.50, 5.52)	(333, 7.64)	(348, 50.10)
公路密度 Road density/(km/km ²)	(0.04, 0.03)	(0.71, 0.54)	(1.81, 0.39)	(2.63, 0.31)	(3.46, 0.40)
空气中二氧化硫浓度 Sulfur dioxide concentration in the air/($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	(19, 1.70)	(15.50, 1.27)	(12.50, 1.27)	(9.50, 1.27)	(7, 0.85)
农药使用量 Consumption of chemical pesticides/t	(1246.50, 465.82)	(594, 88.32)	(392, 83.22)	(212, 69.63)	(65, 55.20)
森林覆盖率 Forest cover rate/%	(34.60, 2.89)	(42.70, 3.99)	(51.20, 3.22)	(59.75, 4.03)	(67.35, 2.42)
人口密度 Population density/(人/km ²)	(12474.72, 8019.25)	(2003.50, 873.51)	(745.70, 194.69)	(399.05, 99.71)	(179.06, 87.13)
旅游总收入 Total tourist revenue/ 10^8 CNY	(344.06, 101.46)	(166.79, 49.07)	(91.56, 14.82)	(58.16, 13.55)	(25.10, 14.52)
规模以上工业能源消费总量 Energy consumption of enterprises above designated size by region/1000 tons of standard coal	(479.61, 989.64)	(282.26, 479.61)	(135.68, 282.26)	(50.60, 135.68)	(2.10, 50.6)
生活用水量 Water consumption for living/ 10^4 t	(8164.50, 887.05)	(5727, 1183.01)	(3584.50, 636.52)	(2434, 340.55)	(1502.50, 450.53)
登记失业率 Registered unemployment rate/%	(4.75, 0.64)	(3.70, 0.25)	(3.10, 0.26)	(2.45, 0.29)	(1.86, 0.20)
斑块面积变异系数 Coefficient of patch area variation	(1.74, 0.38)	(1.14, 0.13)	(0.83, 0.13)	(0.54, 0.11)	(0.30, 0.09)
聚集度指数 Contagion index/%	(39.13, 2.24)	(43.53, 1.50)	(47.15, 1.57)	(52.73, 3.16)	(62.36, 5.02)

续表

指标 Indicator	风险等级 Risk classification				
	巨警 Serous-alert	重警 High-alert	中警 Medium-alert	轻警 Light-alert	无警 No-alert
蔓延度指数 Sprawl index/%	(23.50, 1.67)	(29.69, 3.59)	(35.97, 1.74)	(42.36, 3.69)	(52.88, 5.24)
Shannon's 多样性指数 Shannon's diversity index	(0.33, 0.28)	(1.06, 0.34)	(1.59, 0.11)	(1.81, 0.07)	(1.96, 0.06)
耕地面积 Cultivated land/hm ²	(9750, 8280.26)	(45700, 22250.53)	(88900, 14437.37)	(126300, 17324.84)	(175950, 24840.76)
斑块密度 Patch density/(块/100hm ²)	(0.30, 0.05)	(0.22, 0.021)	(0.18, 0.12)	(0.15, 0.02)	(0.12, 0.03)
建成区面积 Build-up land/km ²	(1500, 849.26)	(3450, 806.79)	(5950, 1316.35)	(11250, 3184.71)	(22950, 6751.59)

(3) 计算各个指标隶属度

将表 3 中的期望、超熵和熵代入 Python 2.7 编写的正向云发生器,求取生态风险各指标相应警情等级的隶属度,见图 2,但受篇幅影响,仅以万州各生态风险预警指标为例来展示。为提高隶属度结果的精确性,将循环参数 N 设置为 3000 次,取得的平均值为各指标对应下的不同警情下的最终隶属度。

$$Y_{ij} = \sum_{m=1}^N y_{ij}^m / N \quad (6)$$

式中: Y_{ij} 表示将指标 i 计算 N 次后所处的生态风险等级 j 的平均隶属度; y_{ij}^m 表示通过 Python 2.7 计算 m 次的指标 i 在不同生态风险等级下的隶属度。根据最大隶属度原则判定该指标对应的生态风险警情。

(4) 结合指标权重求取综合生态风险值

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求取重庆市各个区县的综合生态风险值。

2.3 集对分析

生态风险演化趋势的研究有利于市政部门对风险警情的掌握,对不同预警程度采取不同的措施。然而生态风险的影响因素之间相互作用,增加了预警的复杂性和不确定性。集对分析从辩证思维的角度出发,将多种不确定因素之间的联系和转化定量化,在特定的生态风险背景下更为科学地描述了风险演化趋势。集对分析的核心是为具有不确定性的集合构造集合对,然后分析集对中特定属性的同一性,差异性和对立性,并用联系度来描述这一集对的同一性、差异性和对立性的关系^[35],其表达式为:

$$\mu_2 = a + b \times i + c \times j \quad (7)$$

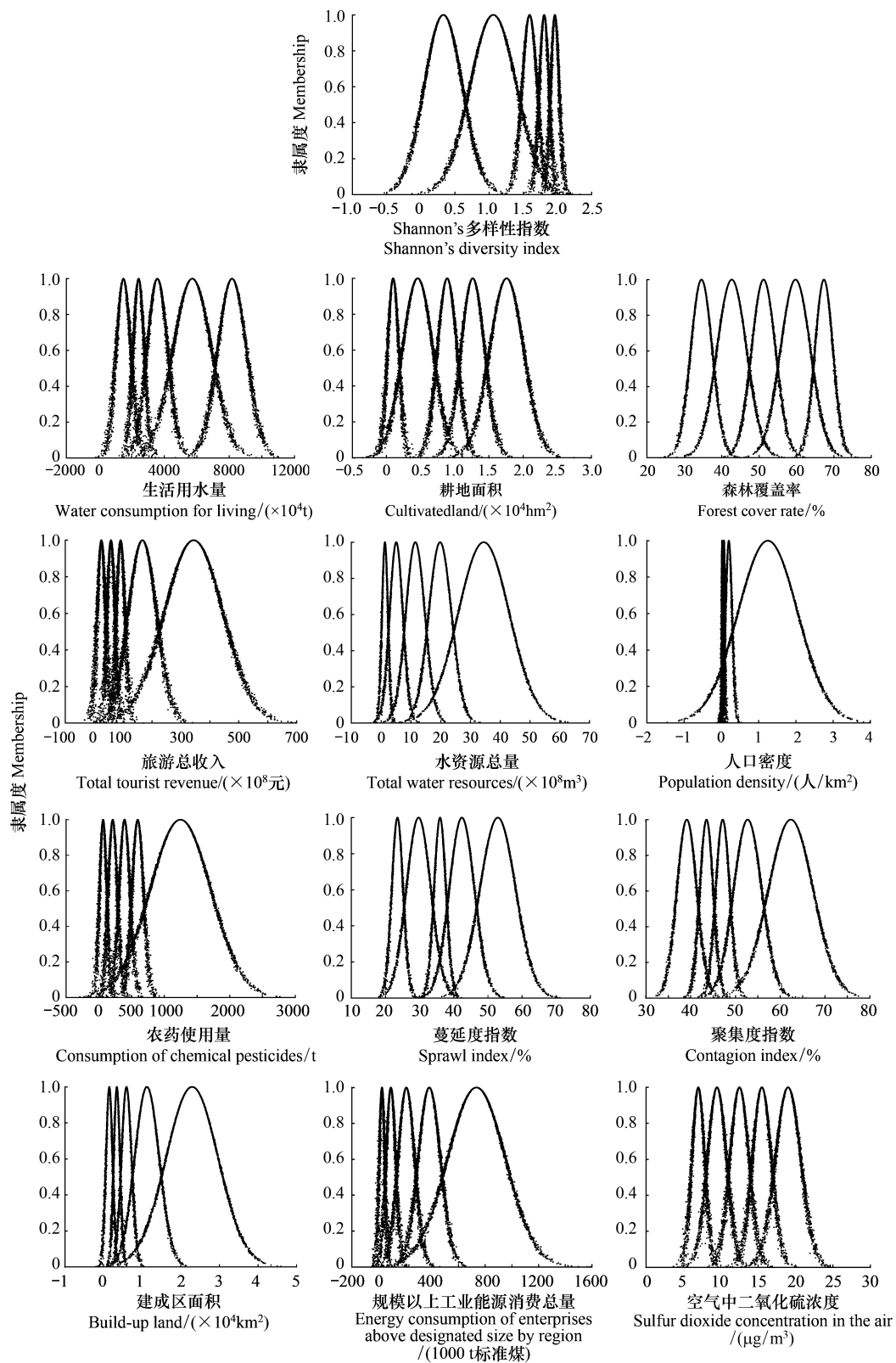
式中, μ_2 为联系度, $\mu_2 \in [-1, 1]$; a 表示具有相同属性的程度,即同一度; b 为差异度; c 为对立度; a 、 b 、 c 同为正数且满足 $a + b + c = 1$; i 为差异度系数且 $i \in [-1, 1]$; j 为对立度系数;根据具体情境选择相应的值。具体评价过程如下:

(1) 评价等级的确定

根据生态风险的联系度,所以本文采用均分原则将其划分为 5 个等级,无警:[1, 0.6];轻警:[0.6, 0.2];中警:[0.2, -0.2];重警:[-0.2, -0.6];巨警:[-0.6, -1]。

(2) 指标联系度的计算

在评价等级划分的基础上,为了深入探究重庆市生态风险未来趋势演化,将联系度函数更加细化,将式(7)进一步扩展为 $\mu_2 = a + b_1 \times i_1 + b_2 \times i_2 + b_3 \times i_3 + c \times j$,并确定单个指标因子的联系度。对于负向指标,四元联系度计算公式为:



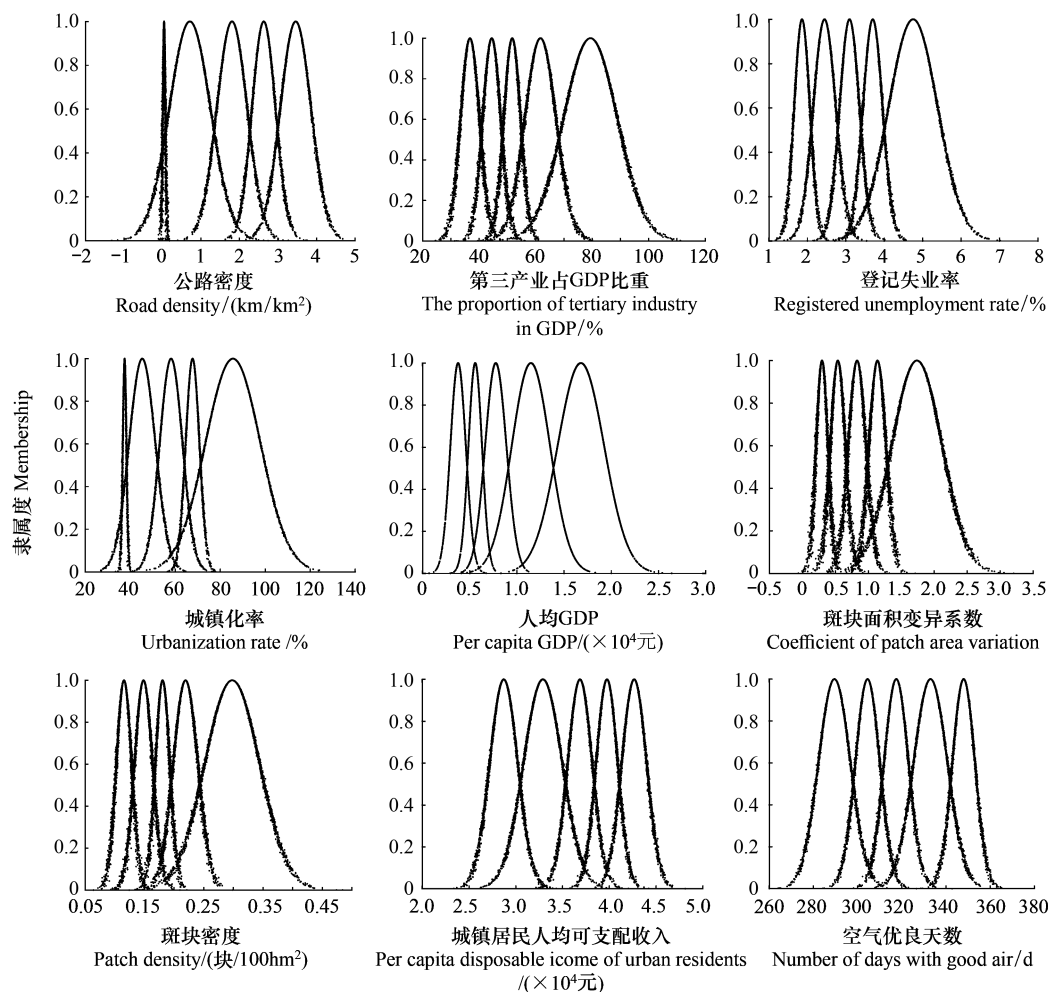


图2 万州各生态风险预警指标正态云模型

Fig.2 Normal cloud model for each ecological risk warning index in Wanzhou county

$$\mu_2 = \begin{cases} 1, & X_i \leq S_{i1} \\ (S_{i2} - X_i) / (S_{i2} - S_{i1}) + (X_i - S_{i1}) / (S_{i2} - S_{i1}) i_1, & S_{i1} < X_i \leq S_{i2} \\ (S_{i3} - X_i) / (S_{i3} - S_{i2}) i_1 + (X_i - S_{i2}) / (S_{i3} - S_{i2}) i_2, & S_{i2} < X_i \leq S_{i3} \\ (S_{i4} - X_i) / (S_{i4} - S_{i1}) i_2 + (X_i - S_{i3}) / (S_{i4} - S_{i3}) j, & S_{i3} < X_i \leq S_{i4} \\ 1j, & X_i > S_{i4} \end{cases} \quad (8)$$

对于正向指标,四元联系度计算公式为:

$$\mu_2 = \begin{cases} 1, & X_i \leq S_{i1} \\ (X_i - S_{i2}) / (S_{i1} - S_{i2}) + (S_{i2} - X_i) / (S_{i1} - S_{i2}) i_1, & S_{i2} \leq X_i < S_{i1} \\ (X_i - S_{i3}) / (S_{i2} - S_{i3}) i_1 + (S_{i3} - X_i) / (S_{i2} - S_{i3}) i_2, & S_{i3} \leq X_i < S_{i2} \\ (X_i - S_{i4}) / (S_{i3} - S_{i4}) i_2 + (S_{i4} - X_i) / (S_{i3} - S_{i4}) j, & S_{i4} \leq X_i < S_{i3} \\ 1j, & X_i < S_{i4} \end{cases} \quad (9)$$

式中, b_1 、 b_2 、 b_3 为差异度分量, a 表示属于 a 等级的可能性,即 a 、 b_1 、 b_2 、 b_3 、 c 分别表示各个区县属于无警、轻警、中警、重警和巨警的可能性。 X_i 表示不同指标, S_{i1} 、 S_{i2} 、 S_{i3} 、 S_{i4} 和 S_{i5} 分别表示该指标下的预警等级标准。

加入指标的权重后,同一、对立和差异性的联系度变为:

$$\mu_2 = \sum_{K=1}^S W_K + \sum_{K=S+1}^{S+F} W_K i + \sum_{K=S+F_1}^N W_{Kj} \quad (10)$$

式中 W_K 为 i 项指标的权重。

(3) 集对势计算分析

集对势反映两个集合的同异反联系程度。无警与巨警联系度的比值即为重庆市生态风险的集对势,其表达式为:

$$P_H = a/c \quad (11)$$

集对悲观势指从悲观的角度来分析重庆市未来生态风险的变化趋势,将所有的差异项即重警、中警和轻警全部转化为巨警,将转换后无警与转化后的所有巨警的比值来研究重庆生态风险的势态,以最消极的角度进行分析,其表达式为:

$$P_B = a/(b+c) \quad (12)$$

集对乐观势指从乐观的角度来分析重庆市未来生态方向的变化趋势,与悲观势相反,将所有重警、中警和轻警全部转化为无警,将转换后的无警与巨警的比值来研究重庆生态风险的势态,以最积极的角度进行分析,其表达式为:

$$P_o = (a+b)/c \quad (13)$$

3 结果与分析

3.1 重庆市生态风险预警整体变化分析

由图 3 可知,重庆市生态风险总体处于重警风险水平,风险等级有先减弱后上升的趋势,中警、轻警和无警隶属度都呈现增加趋势,说明研究期内整体风险等级都有相对减缓趋势。2013—2016 年重庆市整体生态风险等级大幅降低,主要以中警和轻警等级为主,重警风险等级次之,巨警风险等级数量占比最低。巨警和重

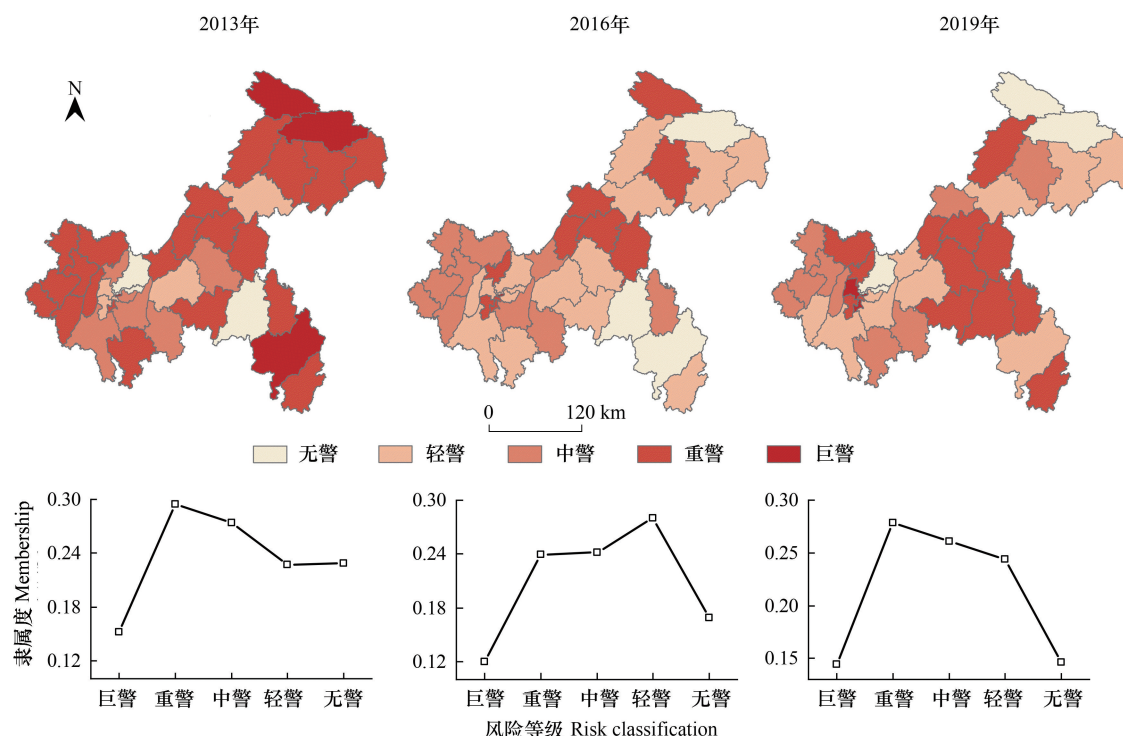


图 3 2013—2019 年重庆市生态风险预警等级变化图

Fig.3 Change of ecological risk warning level in Chongqing from 2013 to 2019

警风险区数量减少,占比分别从 11%、55%降到 3%、24%,中警和轻警风险区呈现不断扩展趋势,占比分别从 15%、11%增加到 26%、39%。综合生态风险值由重警的 0.295 逐年降低到轻警的 0.280,轻警隶属度值增加了 0.053,风险等级由重警演变为轻警。但是在 2016—2019 年间,重庆市整体生态风险等级有小范围的恶化,主要以重警等级为主,中警风险等级次之,无警风险区呈增加趋势。巨警、重警和无警风险区增加,占比分别上升到 2019 年的 8%、31%、11%,中警和轻警风险区下降到 24%、26%。轻警和无警隶属度值分别下降了 0.036 和 0.023,中警及以上风险等级隶属度逐年增加,生态风险等级面临整体上升趋势。综上,研究期间重庆市生态环境有较大幅度的改善,但是部分区县生态环境的恶化导致 2019 年整体生态风险等级较 2016 年有所提高。

3.2 重庆市生态风险预警空间差异化分析

生态风险等级从空间上看呈条带状分布,风险值整体空间分异性强,并在局部呈现高-高聚集和低-低聚集现象。2013—2016 年,重庆市生态风险等级呈现由中心向边缘减弱的趋势,轻警和无警风险区不断向东南、东北和西部地区扩展,中警风险区聚集分布在西部地区,重警风险区零星分布在东北部,巨警风险区分布在主城区内,重庆市重警风险区显著下降,生态环境质量改善明显;2016—2019 年,总体呈现重警风险区向南蔓延,风险值逐年扩大趋势,中警风险区聚集在西北和南部地区,轻警风险等级不断由中部向西部呈线状转移,无警风险等级向重庆主城区和东北部转移,且分布零散。

(1) 渝东北地区

由图 4 可知:2013—2019 年渝东北地区生态风险等级大幅下降,生态风险演变呈风险程度降低、风险程度不变和风险程度降低后增加三种趋势。55%的区县风险程度降低,主要为重警风险等级向轻警和中警风险等级转移,其中城口甚至由重警转为无警风险区。27%的区县风险程度不变,垫江和忠县一直维持在重警风

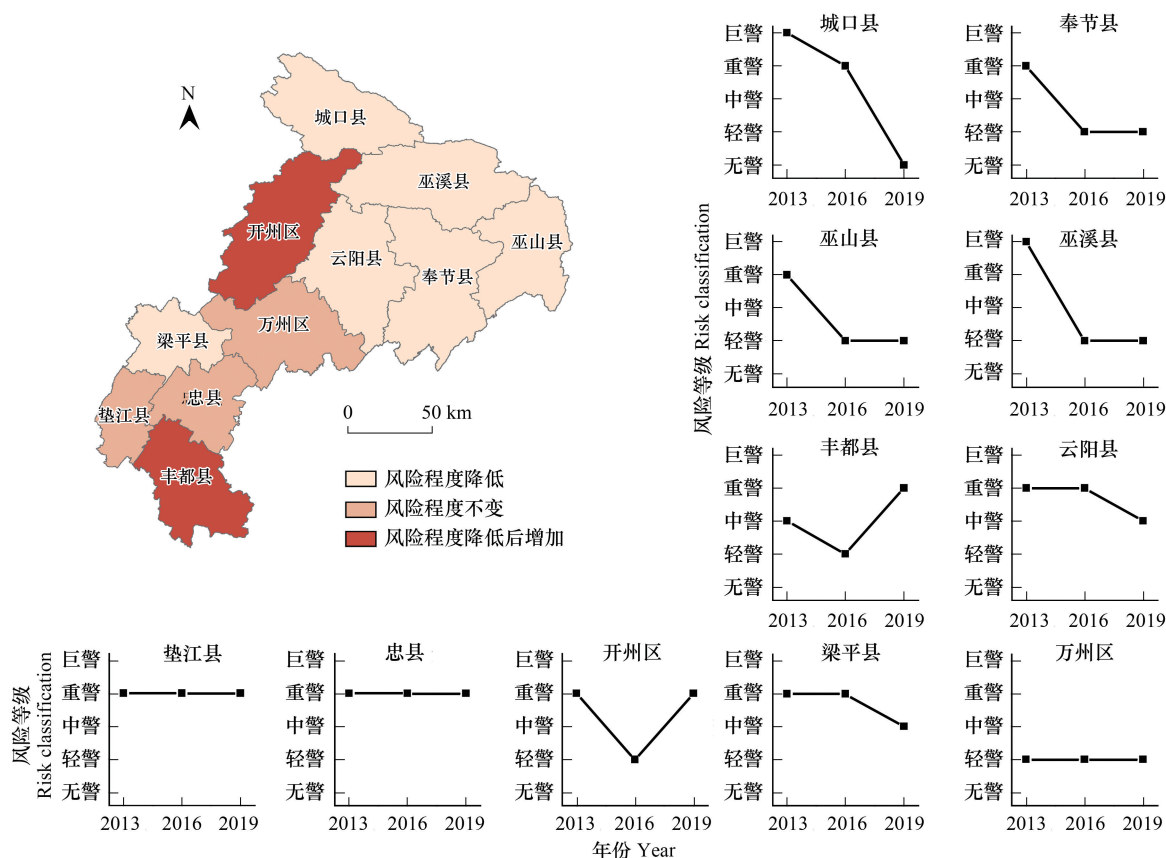


图 4 渝东北生态风险变化程度

Fig.4 Degree of ecological risk change in northeast Chongqing

险等级,应加大力度对其进行风险管控,只有万州区一直为轻警风险等级。18%的区县风险程度降低后增加,丰都由2013年的中警下降到2016年的轻警,到2019年陡然上升到重警,应当引起重视。

(2) 渝东南地区

由图5可知:2013—2019年渝东南地区生态风险等级有轻微上升。生态风险演变呈风险程度不变、风险程度降低后增加和风险程度径直增加三种趋势。石柱的风险程度不变,在研究期内风险等级一直处于重警风险区的稳定状态。66%的区县风险程度先降低后增加,主要为重警风险等级降低到中警后又转移到重警风险等级,其中酉阳从2013年的巨警风险区下降到2016年的无警风险区,虽然到2019年有轻微恶化上升到轻警风险区,但是总体而言其生态风险管控很好。彭水风险等级由无警上升到巨警,风险程度逐年增加,应加大生态工程建设。

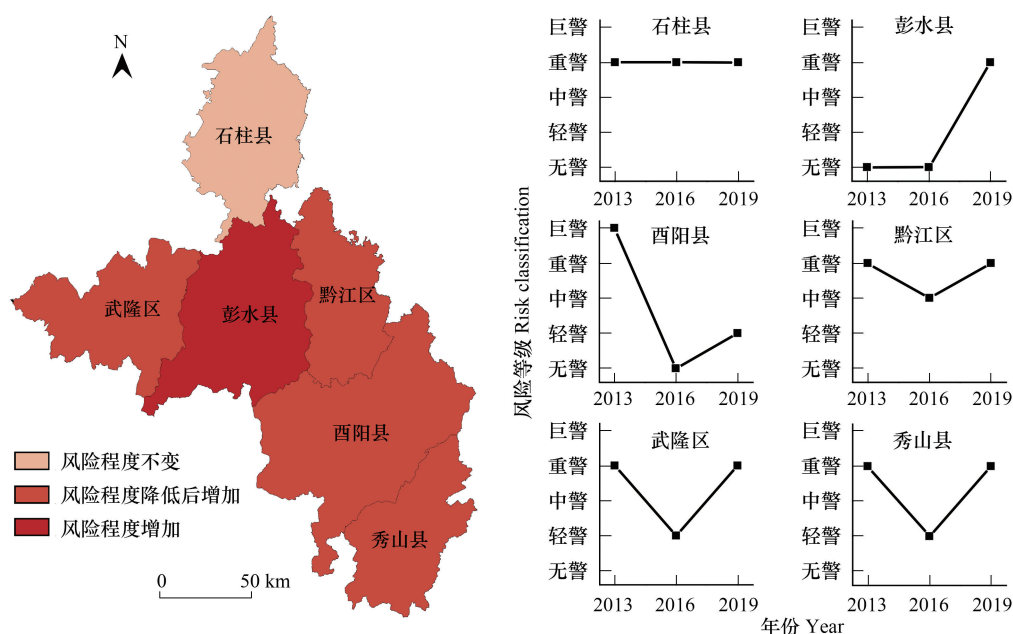


图5 渝东南生态风险变化程度

Fig.5 Degree of ecological risk change in southeast Chongqing

(3) 渝西南地区

由图6可知:渝西南的生态风险变化多样,风险等级下降明显。生态风险演变呈风险程度降低、风险程度不变、风险程度先增加后降低、风险程度先降低后增加和风险程度增加五种趋势。57%的区县生态风险等级有不同程度的降低,主要为中警向轻警风险等级转移。10%的区县生态风险程度维持不变,其中渝中因为人口密度大、人类干扰活动加剧等因素,导致其生态风险等级一直处于巨警状态。1%的区县生态风险程度先增加后降低,江北和渝北的生态风险都在轻警和无警风险等级内轻微波动。14%的区县生态风险程度先降低后增加,合川虽然波动范围最小,但是综合生态风险等级最高。19%的区县生态风险等级升高,主要向重警风险等级转化。

3.3 生态风险演化趋势模拟分析

为预测和分析重庆市未来生态风险压力的时空分布和演化趋势,本文对重庆市生态风险演化趋势进行集对势、乐观势和悲观势计算分析。如图7,生态风险等级下降区县占比36%,主要分布在渝西南地区,渝东北次之,渝东南最低;生态风险等级上升区县占比64%,主要分布在渝西南地区,渝东北和渝东南持平。从集对势角度分析,包含黔江、渝中和江北等36%的区县属于同趋势,加强生态管控和环境保护等措施,生态风险等级有向好的方向发展的趋势,甚至于达到无警等级;包括万州、涪陵和渝中在内的64%的区县集对势都小于

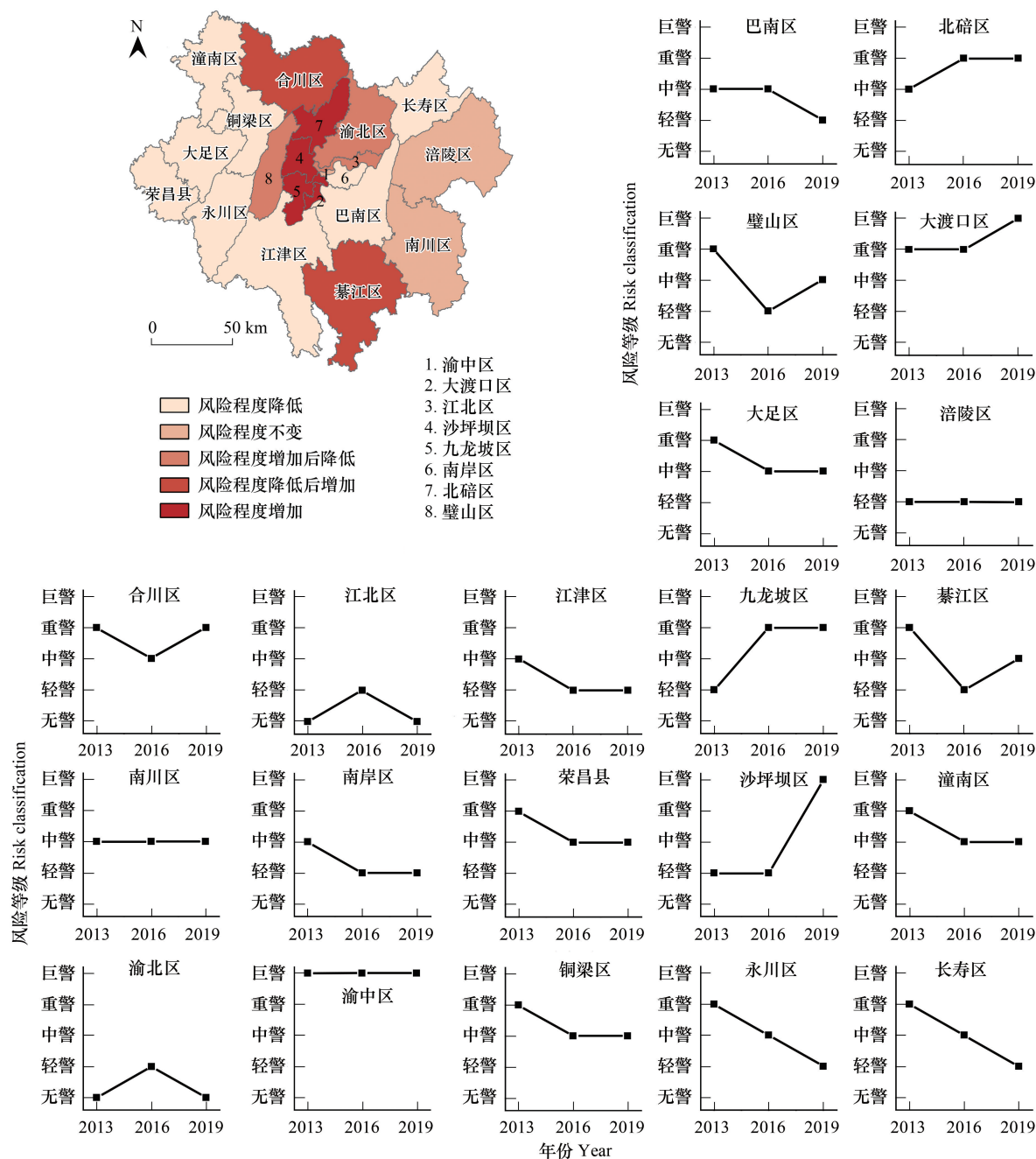


图6 渝西南生态风险变化程度

Fig.6 Degree of ecological risk change in southwest Chongqing

1,属于反趋势,即未来这些区县的生态风险等级有上升趋势。从集对势的距离角度分析,重庆市38个区县的集对势都距悲观势较近,恶化空间较小,同时,集对势与乐观势的距离较远,具备较大的改善空间。局部上,渝东北生态风险等级呈上升态势的区县占比为64%,呈下降态势的区县占比为36%。其中垫江的集对势变化范围最大,虽然垫江生态环境有变好趋势,但是政府仍应当积极地采取有利管控措施,防止盲目乐观导致生态风险向重警等级发展;忠县的集对势波动范围最小,虽然整体上有恶化趋势,但是生态风险变化程度相对稳定。渝东北是主要生态涵养区,应落实生态补偿政策,优化植被结构;加大旅游业的管控,遏制其无序发展现象。渝东南生态风险等级呈上升态势的区县占比为33%,呈下降态势的区县占比为67%。其中彭水的集对

势变化范围最小,黔江的变化范围最大。渝东南作为生态保护发展区,应协调产业发展新结构和城市发展新目标,对其生态用地进行修复,以增强生态景观整体性、连通性,促进生态物质循环。渝西南生态风险等级呈上升态势的区县占比为 77%,呈下降态势的区县占比为 23%,其中九龙坡的集对势变化范围最小,风险等级最为稳定,巴南的变化范围最大。渝西南区位条件优越,经济最为活跃,应当合理规划城乡土地利用结构,提高城市空间利用率,扩大自然保护区规模,增加城市绿化面积。

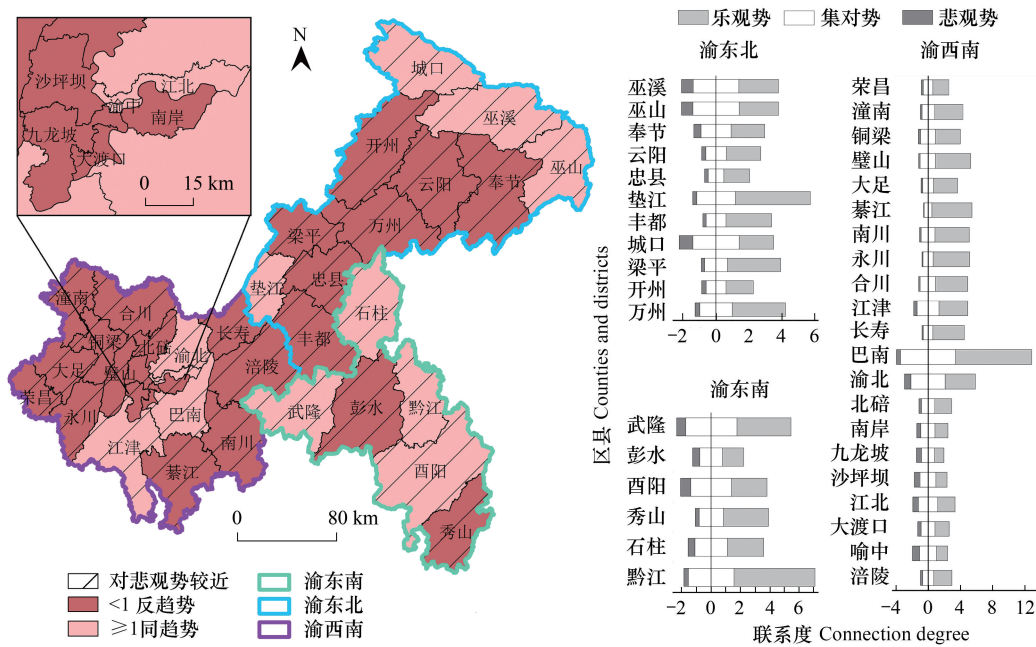


图 7 重庆市生态风险演化趋势模拟分析

Fig.7 Simulation analysis of ecological risk evolutionary trends in Chongqing

4 讨论

科学的生态风险预警指标体系是评价生态风险现状和演化趋势分析的基础。但是目前,对于生态风险预警指标体系构建设没有统一的、明确的标准。本文对不同生态风险评价和预警指标进行相关总结与对比发现(表 4):从研究方法来看,GIS 技术、相关分析法等较为传统的方法虽然能满足评价系统的复杂性特点,但是无法同时兼顾系统的不确定性和复杂性及数据的模糊性。灰色预测法虽然有处理不确定信息和模拟预测的优点,但是适用于小样本模拟。从指标选取来看,主要从土地利用和景观格局视角出发,围绕自然灾害风险源和社会经济驱动力影响因子等进行选取,指标选取不够全面或者不能反映研究区特性。生态环境的变化不仅受到自然因素、人为因素和经济发展等影响,要通过自然与人类社会的响应和反馈进行生态状况评估。本文针对重庆面临的生态风险因素,通过 DPSIR 模型从社会、经济、自然和景观格局指数构建复杂生态风险预警指标体系,对重庆市生态风险进行预警分析,以期为重庆市的生态环境管理提供一种科学有效的方法。从风险预警上看,基本是基于过去或者当下的生态风险的评估监测,缺少未来生态风险的预测。而预测生态风险变化趋势已然成为生态环境保护 and 生态文明建设的重要依据。生态风险的评价往往以优化风险管控为目的,本文通过正态云模型对生态风险进行综合评价,明确了重庆市生态风险现状,并基于目前的态势,利用集对分析将生态风险演化趋势定量化,掌握未来生态风险变化动态,预警结果有利于管控人员提前采取预防措施避免生态风险的加剧,为风险管控的优化提供依据。

尽管构建的生态风险预警指标体系和评估模型可以揭示生态风险综合隶属等级及未来演化趋势,但本研究仍存在部分局限性。指标因子的选取上,虽然包含的维度较多,但缺少具有区域性特点的指标,不同研究区

应选取不同区域性的风险因子。以高分辨率影像为基础,囊括区域性特征指标,构建更为完善的预警指标体系是未来的研究重点。正态云模型和集对分析虽然能兼顾评价系统的不确定性和模糊性,但是对于研究尺度较大、生态风险更为复杂的区域而言,存在工作量大等不足,且仅通过部分时间段对重庆市进行预警分析,揭露未来的演变趋势具有局限性。因此在后续的研究中,应结合其他方法综合考虑生态风险演变趋势,提高预警结果精确度。

表 4 不同生态风险评价和预警指标分析
Table 4 Evaluation on different ecological risk and analysis on early warning indicators

研究区域 Study area	研究方法 Research method	评价指标 Evaluation indicator	风险等级和预警结果 Risk classification and warning result	来源 Sources
重庆(中国) Chongqing(China)	DPSIR 模型、正态云模型、集对分析	社会、经济、自然和景观格局指数	重警;约 34%区县向好发展,约 66%区县有恶化倾向	本文
安蒂奥基亚沿岸地区(哥伦比亚) The coastal zone of Antioquia (Colombia)	RRM 模型	水、土壤等环境质量指数	处于较低风险;无预警	Yans 等 ^[36]
玛纳斯河流域(中国) Manas River Basin(China)	地统计学方法	景观格局指数	处于较低风险,整体生态风险指数减小;无预警	康紫薇等 ^[21]
环渤海地区(中国) Bohai Sea(China)	USEPA 模型、主成分分析法、GIS 技术	自然生态、灾害和社会经济数据	整体处于较高风险;无预警	卢亚灵等 ^[37]
三峡库区(中国) Three Gorges Reservoir Area(China)	正态云模型、压力-状态-响应模型	景观格局指数和社会经济数据	处于较低风险级;无预警	周启刚等 ^[20]
厦门(中国) Xiamen(China)	景观生态安全格理论、GIS 技术	不透水面增加率和缨帽变换湿度指数	景观生态风险程度有所提高,未来生态风险较大	李杨帆等 ^[26]
南充(中国) Nanchong(China)	压力—状态—响应模型和灰色预测法	社会、经济和自然数据	处于中警;无警风险面积增加,生态风险程度降低	李振兴等 ^[27]
大庆(中国) Daqing(China)	3S 技术、生态风险指数法	土地利用数据	生态风险趋于稳定,中级风险区面积占比最高	藏淑英等 ^[26]
长株潭城市群(中国) Changsha--Zhuzhou-Xiangtan urban Agglomeration(China)	相关分析法	景观格局指数	处于低风险区,生态风险随着城市化增加;无预警	欧阳晓等 ^[38]

5 结论

生态环境保护和社会经济发展的竞争下,重庆市生态风险加剧。本文构建的生态风险预警指标体系能全面综合的反映重庆的生境状况,在此基础上利用正态云模型对风险预警等级划分,通过集对分析预测未来生态风险演化方向,为正确处理环境保护和社会发展关系及风险管控提供科学依据。得到以下结论:

(1)2013—2019 年,重庆市综合生态风险隶属于重警等级,风险值由 2013 年的 0.295 下降到 2019 年的 0.278。2013—2016 年重庆市整体生态风险以中警和轻警等级为主,重警风险等级次之,巨警风险等级数量占比最低;2016—2019 年重庆市整体生态风险等级有小范围的恶化,主要以重警等级为主,中警风险等级次之,无警风险区呈增加趋势。

(2)2013—2019 年重庆市生态风险空间差异显著。2013—2016 年间重警风险等级以石柱-忠县-梁平为中心向两侧递减,以重警向中警等级转化为主,中警风险等级呈面状和线状分别分布在西北和中部地区,轻警风险等级呈半圆状分布在重警风险区周围,无警风险区零星分布在东南和东北地区;2016—2019 年,重警风险区增多,以忠县为分界区不断向南扩增,中警风险等级大多向轻警风险等级转化,聚集在西北和南部地区,轻警风险等级不断由中部向西部呈线状转移,无警风险等级向重庆主城区和东北部转移,且分布零散。

(3)重庆市生态风险变化是社会、经济、自然等多层面综合的结果。黔江、渝中和江北等在内的 34%的区县生态环境有向好发展的趋势;万州和涪陵等 66%的区县的生态环境有恶化趋势,但恶化程度较低。

(4)重庆市生态风险的演变具有一定的差异性,因根据风险演变趋势,科学合理地规划土地利用的布局

和结构,因地制宜建立科学可行的政策扶持并加强生态风险监测和评估系统的建立。

参考文献 (References):

- [1] 甄江红,王亚丰,田圆圆,何孙鹏,王金礼. 城市空间扩展的生态环境效应研究——以内蒙古呼和浩特市为例. 地理研究, 2019, 38(5): 1080-1091.
- [2] 刘长峰,侯鹰,陈卫平,崔昊天. 基于生态系统服务的城市化区域生态风险表征方法研究. 生态学报, 2021, 41(9): 3343-3353.
- [3] 邓飞,于云江,全占军. 区域生态风险评价研究进展. 环境科学与技术, 2011, 34(S1): 141-147.
- [4] 颜磊,许学工. 区域生态风险评价研究进展. 地域研究与开发, 2010, 29(1): 113-118, 129-129.
- [5] 杜军,赵胜朝,邱士可,郭雷. 2000—2015 年豫西黄土丘陵区土地利用变化及景观生态风险评价. 水土保持研究, 2021, 28(1): 279-284, 291-291.
- [6] 王美娥,陈卫平,彭驰. 城市生态风险评价研究进展. 应用生态学报, 2014, 25(3): 911-918.
- [7] Fan S B, Tian G, Li G, Huang Y H, Qin J P, Cheng S Y. Road fugitive dust e-mission characteristics in Beijing during Olympics Game 2008 in Beijing, China. Atmospheric Environment, 2009, 43(38): 6003-6010.
- [8] Thunnissen N W, Lautz L S, van Schaik T W G, Hendriks A J. Ecological risks of imidacloprid to aquatic species in the Netherlands: Measured and estimated concentrations compared to species sensitivity distributions. Chemosphere, 2020, 254: 126604.
- [9] 奚世军,安裕伦,李阳兵,蔡沛伶,龙立美,陈啟英. 基于景观格局的喀斯特山区流域生态风险评估——以贵州省乌江流域为例. 长江流域资源与环境, 2019, 28(3): 712-721.
- [10] 刘希朝,李效顺,蒋冬梅. 基于土地利用变化的黄河流域景观格局及生态风险评估. 农业工程学报, 2021, 37(4): 265-274.
- [11] Li H Z, Pei Y Y, You J. Ecological risk assessment of combined pollution in watersheds. Chinese Science Bulletin, 2019, 64(33): 3412-3428.
- [12] 李青圃,张正栋,万露文,杨传训,张杰,叶晨,陈裕婵. 基于景观生态风险评价的宁江流域景观格局优化. 地理学报, 2019, 74(7): 1420-1437.
- [13] 林佳,宋戈,张莹. 基于景观生态风险格局的盐碱地分区规划防治研究——以黑龙江省林甸县为例. 生态学报, 2018, 38(15): 5509-5518.
- [14] Kanwar P, Bowden W B, Greenhalgh S. A regional ecological risk assessment of the Kaipara Harbour, New Zealand, using a relative risk model. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2015, 21(4): 1123-1146.
- [15] Xu H, Wang Q, Wang X P, Feng W H, Zhu F. Diffusion of polycyclic aromatic hydrocarbons between water and sediment and their ecological risks in Wuhu city, Yangtze River Delta urban agglomerations, China. Applied Geochemistry, 2020, 119: 104627.
- [16] 王慧芳,饶恩明,肖焱,严岩,卢慧婷,朱捷缘. 基于多风险源胁迫的西南地区生态风险评价. 生态学报, 2018, 38(24): 8992-9000.
- [17] 冯琰玮,甄江红,马晨阳. 城市用地扩展对生态风险影响的多情景模拟——以内蒙古呼和浩特市为例. 生态学报, 2021, 41(3): 1199-1208.
- [18] 赵越,罗志军,李雅婷,郭佳滢,赖夏华,宋聚. 赣江上游流域景观生态风险的时空分异——从生产-生活-生态空间的视角. 生态学报, 2019, 39(13): 4676-4686.
- [19] Jin X, Jin Y X, Mao X F. Ecological risk assessment of cities on the Tibetan Plateau based on land use/land cover changes—Case study of Delingha City. Ecological Indicators, 2019, 101: 185-191.
- [20] 周启刚,张晓媛,王兆林. 基于正态云模型的三峡库区土地利用生态风险评价. 农业工程学报, 2014, 30(23): 289-297.
- [21] 许学工,林辉平,付在毅,布仁仓. 黄河三角洲湿地区域生态风险评价. 北京大学学报:自然科学版, 2001, 37(1): 111-120.
- [22] 康紫薇,张正勇,位宏,刘琳,宁珊,赵贵宁,王统霞,田浩. 基于土地利用变化的玛纳斯河流域景观生态风险评价. 生态学报, 2020, 40(18): 6472-6485.
- [23] 张晓媛,周启刚,张建军. 基于综合模糊评价的三峡库区屏障带重庆段土地利用生态风险评价. 水土保持研究, 2013, 20(6): 262-266, 301-301.
- [24] 范小杉,何萍,徐杰,任颖,侯利萍. 我国生态环境预警研究进展. 环境工程技术学报, 2020, 10(6): 996-1006.
- [25] 臧淑英,梁欣,韩冬冰,冯仲科. 基于 3S 技术的大庆市生态风险预警与管理对策. 北京林业大学学报, 2008, 30(S1): 152-156.
- [26] 李杨帆,林静玉,孙翔. 城市区域生态风险预警方法及其在景观生态安全格局调控中的应用. 地理研究, 2017, 36(3): 485-494.
- [27] 李振兴,李绥,石铁矛,韩碧君. 城镇化生态风险预警系统设计与关键技术研究. 安全与环境工程, 2017, 24(2): 113-120.
- [28] 崔馨月,方雷,王祥荣,康俊锋. 基于 DPSIR 模型的长三角城市群生态安全评价研究. 生态学报, 2021, 41(1): 302-319.
- [29] 张凤太,王腊春,苏维词. 基于物元分析-DPSIR 概念模型的重庆土地生态安全评价. 中国环境科学, 2016, 36(10): 3126-3134.
- [30] Zhu J, Yu Y N, Zhou S L, Wang X, Lv L G. Simulating sustainable urban development by incorporating social-ecological risks into a constrained CA model. Chinese Geographical Science, 2018, 28(4): 600-611.
- [31] 吴楠,陈红枫,匡丕东,冯朝阳,蒋洪强,吴文俊,李岱青,赵洋尘. 生态保护红线区干扰退化风险评价——以安徽省为例. 生态学报, 2020, 40(16): 5571-5578.
- [32] 潘翔,石培基,吴娜. 基于生态系统服务均衡性视角的生态风险评估及管控优先区识别——以兰州市为例. 环境科学学报, 2020, 40(2): 724-733.
- [33] 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. 干旱区资源与环境, 2012, 26(5): 169-174.
- [34] 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. 水资源保护, 2019, 35(2): 74-79.
- [35] 官冬杰,殷博灵. 重庆市渝东北生态红线区域生态环境质量评估. 重庆交通大学学报:自然科学版, 2020, 39(10): 105-117.
- [36] Yanes A, Botero C M, Arrizabalaga M, Vásquez J G. Methodological proposal for ecological risk assessment of the coastal zone of Antioquia, Colombia. Ecological Engineering, 2019, 130: 242-251.
- [37] 卢亚灵,徐丽芬,马宗文,颜磊,许学工. 环渤海五省市生态风险评价. 生态学杂志, 2012, 31(1): 227-234.
- [38] 欧阳晓,朱翔,贺清云. 基于生态系统服务和生态系统健康的生态风险评价——以长株潭城市群为例. 生态学报, 2020, 40(16): 5478-5489.