

DOI: 10.5846/stxb202012213238

霍童, 张序, 周云, 陈伟. 基于暴露-敏感-适应性模型的生态脆弱性时空变化评价及相关分析——以中国大运河苏州段为例. 生态学报, 2022, 42(6): 2281-2293.

Huo T, Zhang X, Zhou Y, Chen W. Evaluation and correlation analysis of spatio-temporal changes of ecological vulnerability based on VSD model: A case in Suzhou section, Grand Canal of China. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(6): 2281-2293.

基于暴露-敏感-适应性模型的生态脆弱性时空变化评价及相关分析

——以中国大运河苏州段为例

霍童¹, 张序^{1,*}, 周云^{1,2}, 陈伟³

¹ 苏州科技大学 环境科学与工程学院, 苏州 215011

² 大运河文化带建设研究院苏州分院, 苏州 215000

³ 苏州市文物保护管理所, 苏州 215006

摘要: 为了及时掌握运河流域生态系统脆弱性的真实状况, 以中国大运河苏州段区域为例, 基于 VSD 模型建立生态脆弱评价指标体系, 结合层次分析法-熵权法以及遥感-地理信息系统技术, 以栅格为基础评价单元, 运用空间叠置分析计算生态脆弱度, 揭示其生态脆弱性时空分布格局及演变趋势。通过生态环境脆弱性综合评价及相关分析, 其结果表明: ①2008—2018 十年间研究区生态脆弱度以潜在脆弱和轻微脆弱为主, 合计占比从 62.63% 增长到 68.79%, 非常脆弱区与极度脆弱区占比较小, 合计占比从 22.45% 下降到 15.61%; ②研究区生态恢复情况良好, 根据时空演变趋势将研究区划分为生态修复区、生态持平区和生态退化区, 生态修复率为 37.09%, 生态持平率为 37.93%, 生态退化率为 24.89%; ③对生态修复区与生态退化区进行划分, 各包含四种等级区, 其中生态修复区以 I 级修复区为主, 占比为 13.31%; 生态退化区以 I 级和 II 级退化区为主, 合计占比为 18.80%, IV 级退化区占比仅有 1.50%。

关键词: 生态脆弱性; 层次分析-熵权法; 暴露-敏感-适应性模型; 时空变化; 生态修复

Evaluation and correlation analysis of spatio-temporal changes of ecological vulnerability based on VSD model: A case in Suzhou section, Grand Canal of China

HUO Tong¹, ZHANG Xu^{1,*}, ZHOU Yun^{1,2}, CHEN Wei³

¹ School of Environmental Science and Engineering, Suzhou University of Science and Technology, Suzhou 215011, China

² Suzhou Branch of the Grand Canal Cultural Belt Construction Research Institute, Suzhou 215000, China

³ Suzhou Cultural Relics Protection and Management Office, Suzhou 215006, China

Abstract: Ecosystems are closely related to the external environment, both human and natural factors will affect the ecosystem continuously. Ecological vulnerability research can grasp health of regional ecosystem, which is an important basis for regional ecological environmental restoration and planning and governance. It is necessary to conduct research on ecological vulnerability to effectively comprehend the health of the ecosystem. Many theories and methods were proposed to carry out such research work, but few researches will consider the three factors of humanity, nature, and society at the same time. For the purpose of understanding the real situation of canal ecological vulnerability in time, the evaluation index

基金项目: 苏州市大运河建设类项目 (19SZDYH320)

收稿日期: 2020-12-21; 网络出版日期: 2021-11-26

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xu1960zhang@sina.com

system of ecological vulnerability was established by Vulnerability-Scoping-Diagram (VSD) model based on Suzhou section of the Grand Canal of China. What's more, founded on grid evaluation unit, the spatial overlay analysis was used to calculate the ecological vulnerability and then to reveal the spatio-temporal distribution pattern and evolution trend of ecological vulnerability combined with analytic hierarchy process (AHP) -entropy weight method and remote sensing (RS)-geographic information system (GIS) technology. Through comprehensive evaluation and correlation analysis of ecological vulnerability, the results showed that: ① from 2008 to 2018, the ecological vulnerability of the study area was mainly potentially vulnerable and slightly vulnerable with the total proportion increasing from 62.63% to 68.79%, while the proportion of very vulnerable areas and extremely vulnerable areas was relatively small with the total proportion decreasing from 22.45% to 15.61%; ② The ecological restoration of the study area was favorable. According to the temporal and spatial evolution trend, the study area was divided into ecological restoration area, ecological flat area and ecological degradation area. The ecological restoration rate was 37.09%, the ecological flat rate is 37.93%, and the ecological degradation rate was 24.89%; ③ The ecological restoration area and the ecological degradation area were divided, each including four grade areas, of which the ecological restoration area was mainly Grade I restoration area, accounting for 13.31%; The ecological degradation areas were mainly Grade I and Grade II degradation areas, accounting for 18.80% in total, while Grade IV degradation areas accounted for only 1.50%. As human and social factors have a greater impact on ecological vulnerability than natural factors, future economic growth and regional development should turn to potentially vulnerable areas and slightly vulnerable areas reasonably to reduce the influence of human activities. This study can provide scientific support and research suggestions for the development of ecological restoration and governance for place like Suzhou section, Grand Canal of China.

Key Words: ecological vulnerability; AHP-entropy weight method; VSD model; spatiotemporal variation; ecological restoration

人类社会发展与自然生态环境有着密切的联系,随着全球背景的迅速变化,生物多样性减少、森林面积锐减、生态灾害加重等一系列环境问题^[1]日益突出,生态环境脆弱性^[2]研究愈发重要。科学认识生态环境脆弱性并对其进行针对性的研究^[3],即可有效的对区域生态资源进行管控。

国内外对生态脆弱性尚未有明确的定义,但基本都使用外部因子所带来的影响来表征脆弱性。IPCC等^[4]认为生态脆弱性是生态环境在外部压力下系统倾向受到不利影响,包括敏感性或易受危害、缺乏应对以及适应的能力。生态脆弱性可以从以下几个方面进行表征:(1)生态环境本身和外界所产生的影响,(2)生态环境本身的敏感性^[5],(3)生态环境对各种影响的应变和适应能力^[6]。目前的生态脆弱性研究更为丰富,研究区域从湖泊^[7]到流域^[8]、从市级^[9]到省域尺度^[10]、从地区^[11]到全球变化^[12],研究方法涉及 GIS 空间分析^[13]、聚类分析方法^[14]、模糊评价法^[15]和决策树方法^[16]等等。但目前还存在一些问题,如研究理论方法创新不足、评价指标体系及分析模型难以统一、评价结果的应用研究有待拓展等等。

中国大运河苏州段流域^[17]的生态环境状况十分复杂,所面临的生态环境问题十分严峻。大运河苏州段流域上游、中游和下游生态状况和资源分布差异明显,上游流经地区多为郊外工厂产业园,以第二产业为主要经济产业,主要问题为工农业污染排放较多、人为干扰强度较高,导致了运河周边地区水质变差^[18],从而影响了周边地区的居民生活和农作物的生长;中游地区城镇化比例较高,多为建设用地,以第二、第三产业为主要产业,主要问题为人口密度过高,建设用地比例较高,林地、草地、水域分布较少,土地利用不合理^[19],景观类型单一,一定程度上影响了生物多样性;下游流经地区周围多为农用地、林地、水域等、生态资源充沛,主要问题为生态资源保护不到位,没有进行合理的规划。所以,针对研究区上游地区人为开发强度较高且环保规划及污染治理力度相对不足导致的土地利用不平衡、中游地区人口增长迅速导致对生态资源的过度消耗以及下游地区植被覆盖面积减少且分布不均衡的问题,运用 VSD 模型,根据流域上中下游不同地段选择相对应的评

价指标,建立生态脆弱性评价指标体系,评价分析十年来该区域的生态环境脆弱性时空变化趋势,并根据生态脆弱性时空变化趋势划分生态修复区和生态退化区,从不同维度对大运河苏州段上中下游不同地区的生态环境差异进行针对性评价分析,为其生态修复与治理提供一定的参考依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

大运河苏州段位于苏州市,是其境内极其重要的河流,120°44′—120°60′E,30°86′—31°45′N,主流总长度可达 81.85 km,支流众多,流经苏州市相城区、高新区、姑苏区、吴中区、吴江区,概况图见图 1。研究区地形以平原为主,地势低平,一般高程为海拔 3.5—5 m;属亚热带湿润性季风海洋性气候,年平均气温在 16—18℃,降水量常年保持在 1000—1400 mm 左右。

1.2 数据源及处理

遥感影像数据和数字高程数据来自地理空间数据云(www.gscloud.cn),对遥感影像数据进行去云处理,大气辐射校正、几何校正、画质增强、裁剪拼接及镶嵌融合,得到研究用底图数据;环境质量数据来源于《苏州市环境质量公报》;经济社会数据来源于《苏州市统计年鉴》,具体数据详情见表 1。



图 1 研究区概况图

Fig.1 Sketch map of the distribution of study area

表 1 数据来源及用途

Table 1 Data sources and uses

数据名称 Data name	数据来源 Data sources	数据用途 Data usage
数字高程 Digital elevation	地理空间数据云(分辨率:30 m)	高程、坡度提取,计算地形起伏指数
Landsat 遥感影像 Landsat remote sensing image	地理空间数据云(分辨率:30 m)	制作土地利用现状图,提取 NDVI
气温、降雨量、太阳辐射量、平均散蒸发量 Temperature, rainfall, solar radiation and average evaporation	苏州市气象局(2008 年,2018 年)	计算净初级生产力,计算暴雨强度
空气监测数据、水质监测数据 Air and water quality monitoring data	苏州市监测站(2008 年,2018 年)	计算空气质量综合指数及 V 及劣 V 类水在监测断面中占比
景观类型 Landscape types	苏州市园林局(2008 年,2018 年)	计算景观多样性指数
水资源总量 Total water resources	苏州市水资源状况年报(2008 年,2018 年)	提取单位面积水资源量
工农业污染排放量 Industrial and agricultural pollution emission	苏州市统计年鉴(2008 年,2018 年)	计算工农业污染排放强度
绿化覆盖分布 Green coverage distribution	苏州市生态环境局(2008 年,2018 年)	提取建成区绿化覆盖图

由于不同指标的量级不同,在评价之前首先对数据进行标准化^[20]处理,数据越大越好的正向型指标采用公式(1),越小越好的逆向型指标采用公式(2):

$$S_{ij} = (x_{ij} - x_i^{\min}) / (x_i^{\max} - x_i^{\min}) \tag{1}$$

$$S_{ij} = (x_i^{\max} - x_{ij}) / (x_i^{\max} - x_i^{\min}) \tag{2}$$

式中, S_{ij} 为第 i 行第 j 个指标的标准化数值, x_{ij} 为第 i 行第 j 个数值, $x_i^{\max}$ 和 $x_i^{\min}$ 分别代表第 i 行的最大值和最小值。

将标准化后的属性数据在 ArcGIS 10.2 中利用反距离插值法^[21]转换为空间栅格数据, 得到指标的空间化数据。

1.3 指标评价体系构建

本文根据脆弱性定义参考国内外文献选取暴露-敏感-适应性 (Vulnerability-Scoping-Diagram, VSD) 模型^[22]建立评价指标体系, VSD 模型将生态脆弱性分为 3 个部分, 分别是暴露度、敏感性和适应能力。

生态暴露度是生态系统经历外界压力或冲击的程度, 反映受干扰或胁迫程度的参数。研究区干扰因素主要体现在人类活动方面, 人口密度越高, 经济产业分布就会越广泛, 对生态环境的开发程度就会越高, 会产生更多的工农业污染, 从而使得研究区生态暴露度升高。所以, 根据人口产业分布、土地开发利用及工农业污染排放三个方面选取人口密度、工业产值占比、工业三废排放强度、农用化肥施用强度、农药喷洒强度、空气质量指数^[23]、土地开发程度指数^[24] 9 个指标来表征生态暴露度, 其中, 土地开发程度指数公式如 (3) 所示:

$$L = 100 \times \sum_{i=1}^n X_i \times C_i \quad (3)$$

式中, L 为土地开发程度指数, 其数值越高, 说明开发程度越高, 生态暴露度越高; X_i 为土地等级; C_i 为地形位 i 级土地开发程度所占面积百分比; 根据徐州等^[24]的研究成果和研究区实际情况将土地开发程度分为 5 级, 将建设用地分级为 5, 农用地为 4, 园地、草地为 3, 森林、湿地为 2, 未开发自然地为 1。

生态敏感性是生态系统在特定的时空尺度下相对于外界干扰所具有的敏感性反应和自我恢复能力。研究区水系资源和植被资源丰富, 降雨量充足, 气候宜人, 地势低平, 但是部分地区水质情况较差, 植被资源分布不均, 有时会遭受暴雨、高温、台风、霜冻等灾害, 所以选择自然资源分布、气候变化状况及地形陡峭程度这三个方面来代表生态敏感性, 生态资源越丰富, 气候状态越稳定, 地形越平坦, 生态敏感性就越低。选取归一化植被指数^[25]、景观多样性指数^[26]、净初级生产力^[27]表征植被资源的数量和分布状态, 详细公式见下 (4)、(5)、(6), 其数值越高, 表明植被资源越丰富, 生态敏感性越低; 选取单位面积水资源量和 V 及劣 V 类水在监测断面中占比代表研究区水文资源的数量和质量, 单位面积水资源量越高, V 及劣 V 类水占比越低, 生态敏感性越低; 选择暴雨强度^[28]和低于 -10°C 和高于 35°C 的天数代表研究区的气候状态, 其数值越低, 表明极端天气越少, 生态敏感性越低; 选择地形起伏指数^[29]表征研究区的地形陡峭程度, 其数值越低, 地形越平坦, 受到外界干扰后恢复的速率越快, 生态敏感性越低, 地形起伏指数公式见 (7), 具体公式见下:

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - R) / (\text{NIR} + R) \quad (4)$$

式中, NDVI 为归一化植被指数, 处于 $[-1, 1]$ 之间, 其值越高, 植被覆盖率越高; NIR 为近红外波段反射值; R 为红光波段反射值。

$$H = - \sum_{i=1}^n P_i \ln P_i \quad (5)$$

式中, H 为景观多样性指数, 其值越高, 景观多样性越丰富; P_i 为第 i 种景观类型所占的面积比例; n 为景观类型数量。

$$\text{NPP} = \text{APAR} \times \varepsilon \quad (6)$$

式中, NPP 为净初级生产力, 根据贾艳红等^[27]的研究成果, NPP 越高, 植被覆盖率更高, 光照更加充足, 生态敏感性越低; APAR 为光合有效辐射; ε 为实际光能利用率。

$$T = \ln [E / (\bar{E} + 1) \times S / (\bar{S} + 1)] \quad (7)$$

式中, T 为地形起伏指数, 根据殷丽婷等^[29]的研究成果, 随着坡度和高差的上升, 一定程度后会抑制植被的生长, 从而导致生态敏感性的上升; E 代表高程; S 代表坡度; $\bar{E}$ 代表平均高程; $\bar{S}$ 代表平均坡度。

生态适应能力是系统能够处理、适应胁迫以及从胁迫造成的后果中恢复的能力。研究区适应能力主要体现在对自然环境的保护和对污染排放的治理上。选取湿地保护率、森林保护区数、人均公园绿地面积、建成区绿化覆盖率、污水处理率、环境污染治理资金投入以及每万元 GDP 用水量这 7 个指标来体现人为因素对自然

环境的正面影响,指标数值越高,说明环境保护力度越大,生态适应能力越强,从干扰中恢复的速率越快。

1.4 指标权重的确立及分类

本文将层次分析法^[30]与熵权法^[31]相组合,分别计算主观和客观权重,根据最小信息熵原理^[32]结合拉格朗日中值定理求出综合权重。

经过(1)和(2)公式标准化后,使用 Yaahp 10.5 软件计算各个指标的主观权重 φ_i ,使用 Excel 软件计算客观权重 μ_i ,再根据公式(8)、(9)、(10)求出组合权重 ω_i ,并运用自然断裂点分类法^[33]将其分为潜在、轻微、一般、非常和极度脆弱 5 个等级,详情见表 2。自然断裂点分类法会对分类间隔加以识别,将大量数据进行最恰当的分组,并可使各个类之间的差异最大化,要素将被划分为多个类,对于这些类,会在数据值的差异相对较大的位置处设置其边界。

表 2 生态脆弱性评价指标权重分级表

Table 2 Classification of ecological vulnerability assessment indicators

评价指标 Evaluation index	潜在脆弱 Potentially	轻微脆弱 Slightly	一般脆弱 Generally	非常脆弱 Very	极度脆弱 Extremely	权重 Weight
(-)人口密度 Population density/(万人/km ²)	[0.02,0.13]	[0.13,0.27]	[0.27,0.45]	[0.45,0.58]	[0.58,0.72]	0.05
(-)工业产值占比 Proportion of industrial output value/%	[32.15,37.64]	[37.64,42.95]	[42.95,47.30]	[47.30,50.81]	[50.81,55.34]	0.05
(-)工业废气排放强度 Industrial waste gas emission intensity/(亿 m ³ /km ²)	[0.02,0.18]	[0.18,0.31]	[0.31,0.62]	[0.62,0.78]	[0.78,1.21]	0.04
(-)工业废水排放强度 Industrial wastewater discharge intensity/(万 t/km ²)	[0.31,1.49]	[1.49,3.36]	[3.36,4.97]	[4.97,6.38]	[6.38,9.24]	0.04
(-)工业固体废物排放强度 Industrial solid waste emission intensity/(t/km ²)	[0.01,0.05]	[0.05,0.08]	[0.08,0.12]	[0.12,0.15]	[0.15,0.21]	0.03
(-)农用化肥施用强度 Fertilizer application intensity/(t/km ²)	[0.21,1.32]	[1.32,3.24]	[3.24,5.87]	[5.87,7.99]	[7.99,10.02]	0.02
(-)农药喷洒强度 Pesticide spraying intensity/(t/km ²)	[0.03,0.12]	[0.12,0.23]	[0.23,0.39]	[0.39,0.57]	[0.57,0.82]	0.02
(-)空气质量指数 Air quality index	[0,50]	[50,100]	[100,150]	[150,200]	200 及以上	0.06
(-)土地开发程度指数 Land development index	[92.6,157.8]	[157.8,181.4]	[181.4,243.1]	[243.1,299.5]	[378.9,299.5]	0.09
(+)归一化植被指数 Normalized Difference Vegetation Index	(0.32,0.41]	(0.26,0.32]	(0.19,0.26]	(0.15,0.19]	[0.08,0.15]	0.07
(+)景观多样性指数 Landscape diversity index	(437.6,587.1]	(254.1,437.6]	(135.9,254.1]	(66.7,135.9]	[12.3,66.7]	0.05
(+)净初级生产力 Net Primary Production/(g m ⁻² a ⁻¹)	(382.4,513.8]	(275.3,382.4]	(196.5,275.3]	(113.1,196.5]	[27.8,113.1]	0.08
(+)单位面积水资源量 Water resources per unit area/(亿 L/km ²)	(6.44,8.25]	(5.33,6.44]	(3.15,5.33]	(1.34,3.15]	[0.67,1.34]	0.03
(-)V及劣V类水在监测断面中占比 Proportion of class V and inferior class V water in monitoring section/%	[0,12.4)	[12.4,26.2)	[26.2,53.8)	[53.8,65.4)	[65.4,78.9]	0.03
(-)暴雨强度 Rainstorm intensity/(0.01 L s ⁻¹ m ⁻²)	[1.50,2.36)	[2.36,3.91)	[3.91,4.67)	[4.67,5.83)	[5.83,7.39)	0.04
(-)低于-10℃和高于35℃的天数 Days below -10 °C and above 35 °C/d	[52,57)	[57,65)	[65,68)	[68,74)	[74,78]	0.02
(-)地形起伏指数 Topographic relief index	[0.14,1.34)	[1.34,2.47)	[2.47,3.35)	[3.35,3.81)	[3.81,4.68)	0.02
(+)湿地保护率 Wetland conservation rate/%	(84.10,89.25]	(78.67,84.10]	(74.22,78.67]	(70.43,74.22]	[66.98,70.43]	0.04
(+)森林保护区数 Number of forest reserves/个	(32,37]	(29.32]	(22,29]	(18,22]	[15,18]	0.05

续表

评价指标 Evaluation index	潜在脆弱 Potentially	轻微脆弱 Slightly	一般脆弱 Generally	非常脆弱 Very	极度脆弱 Extremely	权重 Weight
(+)污水处理率 Sewage treatment rate/%	(89.16, 97.21]	(85.35, 89.16]	(81.89, 85.35]	(76.61, 81.89]	[72.38, 76.61]	0.04
(-)每万元 GDP 用水量 Water consumption per 10000 yuan GDP/(m ³ /万元)	[7.1, 15.4)	[15.4, 31.7)	[31.7, 68.9)	[68.9, 87.5)	[87.5, 114.9]	0.02
(+)人均公园绿地面积 Per capita park green area/(m ² /人)	(15.17, 16.75]	(11.62, 15.17]	(9.87, 11.62]	(7.24, 9.87]	[4.12, 7.24]	0.02
(+)环境污染治理资金投入 Investment in environmental pollution control/亿元	(28.71, 32.20]	(22.72, 28.71]	(13.75, 22.02]	(5.47, 13.75]	[1.98, 5.47]	0.06
(+)绿化覆盖率 Green coverage/%	(43.15, 43.84]	(42.52, 43.15]	(41.39, 42.52]	(40.44, 41.39]	[39.77, 40.44]	0.03

-表示为逆向型指标,数值越大,脆弱性越大;+表示为正向型指标,数值越大,脆弱性越小

$$\min F = \sum_{i=1}^n \omega_i (\ln \omega_i - \ln \varphi_i) + \sum_{i=1}^n \omega_i (\ln \omega_i - \ln \mu_i) \quad (8)$$

$$s.t. \sum_{i=1}^n \omega_i = 1 \quad (9)$$

$$\omega_i = (\varphi_i \mu_i)^{0.5} / \sum_{i=1}^n (\varphi_i \mu_i)^{0.5} \quad (10)$$

式中, φ_i 为主观权重; μ_i 为客观权重; ω_i 为组合权重。

生态脆弱性在空间格局上可能会对某一项或多项指标形成趋势,从而产生依赖性,故运用生态脆弱性指标空间格局指数^[34]公式(11)反映各项指标的空间依赖性,对指标的正逆性进行验证:

$$R = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega} \times \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{ij} \times (x_i - \bar{x}) \times (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (11)$$

式中, R 为地理空间依赖值,分布在 $[-1, 1]$ 之间, R 值小于 0, 地理空间相关性为负相关,为逆向型指标,指标数值越小,脆弱性越低,反之,则为正相关,为正向型指标; n 为样本总数; x_i 和 x_j 分别为位置 i 和 j 处的样本值; $\bar{x}$ 为样本平均值; ω 为该指标的权重; Q_{ij} 为决策矩阵的元素。

1.5 生态脆弱度的计算

根据付刚等^[35]生态脆弱度计算方法,运用 ArcGIS 10.2 软件的栅格计算器和栅格重分类模块,计算研究区域每个栅格的生态暴露度指数(Ecological Exposure Index, EEI)、生态敏感性指数(Ecological Sensitivity Index, ESI)及生态适应能力指数(Ecological Adaptability Index, EAI),最后使用 ArcGIS 10.2 软件的空间镶嵌融合功能将三个指数的计算结果相融合,得出生态脆弱性指数(Ecological Vulnerability Index, EVI),并使用自然断裂点分类法将其分为潜在、轻微、一般、非常和极度脆弱 5 个等级,计算公式见(12),详细分类见下表 3。

$$EVI = EEI + ESI + EAI = \sum_{i=1}^n W_{E_i} F_{E_i} + \sum_{i=1}^n W_{S_i} F_{S_i} + \sum_{i=1}^n W_{A_i} F_{A_i} \quad (12)$$

式中, EVI 为生态脆弱性指数, EEI 为生态暴露度指数, ESI 为生态敏感性指数, EAI 为生态适应能力指数; W_{E_i} 为生态暴露度第 i 个评价指标的权重, F_{E_i} 为生态暴露度第 i 个评价指标的等级; W_{S_i} 为生态敏感性第 i 个评价指标的权重, F_{S_i} 为生态敏感性第 i 个评价指标的等级; W_{A_i} 为生态适应能力第 i 个评价指标的权重, F_{A_i} 为生态适应能力第 i 个评价指标的等级。

假设有 n 个生态脆弱区,最多则有 $n(n-1)$ 种生态脆弱区变化,每一种可能发生的生态脆弱区变化,就会对生态脆弱性产生一定程度上的影响,负值说明该脆弱区变化会降低生态脆弱性,正值则会增加生态脆弱性,将其归一至区间 $[-1, 1]$ 。为确保生态脆弱性评价公式的合理性,运用公式(13)计算生态脆弱度变化等级加

表 3 生态脆弱度分级表

Table 3 Classification of Ecological vulnerability

脆弱度指数 Vulnerability index	潜在脆弱 Potentially	轻微脆弱 Slightly	一般脆弱 Generally	非常脆弱 Very	极度脆弱 Extremely
(-)生态暴露度指数 Ecological Exposure Index	[1.01,1.32)	[1.32,1.58)	[1.58,1.81)	[1.81,2.13)	[2.13,2.39)
(-)生态敏感性指数 Ecological Sensitivity Index	[0.62,0.79)	[0.79,1.11)	[1.11,1.34)	[1.34,1.49)	[1.49,1.67)
(+)生态适应能力指数 Ecological Adaptability Index	(0.95,1.03]	(0.82,0.95]	(0.74,0.82]	(0.59,0.74]	[0.41,0.59]
(-)生态脆弱度指数 Ecological Vulnerability Index	[2.66,3.06)	[3.06,3.51)	[3.51,3.97)	[3.97,4.36)	[4.36,4.65)

-表示为逆向型指标,数值越大,脆弱性越大;+表示为正向型指标,数值越大,脆弱性越小

权值 (grade weighted value of ecological vulnerability change) :

$$EVCGVW = \sum_1^{n(n-1)} EVCNGV_i \times (SC_i / S_{\text{区域}}) \quad (13)$$

式中, EVCGVW 为生态脆弱度变化等级加权值; EVCNGV_i (ecological vulnerability change normalization grade value) 为第 *i* 个生态脆弱区变化归一化的等级值; SC_{*i*} 为第 *i* 个生态脆弱区所变化的面积; S_{区域} 为研究区总面积。

使用 SPSS 25 软件对 17 个生态脆弱区变化等级加权值与生态脆弱性指数变化值进行相关性分析, 分析结果见图 2 和表 4, 生态脆弱度变化等级加权值与生态脆弱性指数变化值景观类型变值 Pearson 相关系数为 0.874, 两者极强相关, 验证了生态脆弱性指数构建的合理性。

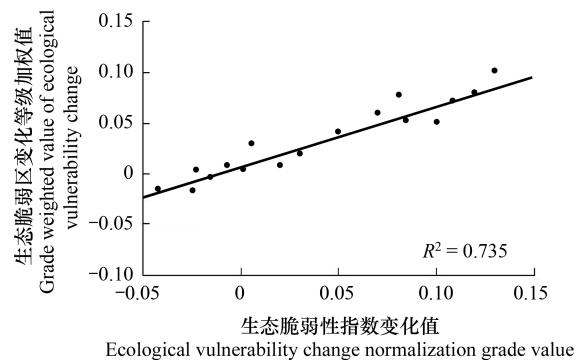


图 2 生态脆弱区类型变化等级加权值与生态脆弱性指数变化值相关性散点图

Fig.2 Scatter Plot of Correlation between EVCGVW and ecological vulnerability change normalization grade value

表 4 生态脆弱区变化等级加权值与生态脆弱性指数变化值 Pearson 相关系数

Table 4 Pearson Coefficient between grade weighted value of ecological vulnerability change and ecological vulnerability change normalization grade value

		生态脆弱区变化 等级加权值 Grade weighted value of ecological vulnerability change	生态脆弱性指数变化值 Ecological vulnerability change normalization grade value
生态脆弱区变化等级加权值	Pearson 相关性	1	0.874
Grade weighted value of ecological vulnerability change	显著性(双侧)		0.000
	N	17	17
生态脆弱性指数变化值	Pearson 相关性	0.874	1
Ecological vulnerability change	显著性(双侧)	0.000	
normalization grade value	N	17	17

2 结果与分析

2.1 单维度生态脆弱性分析

2.1.1 生态暴露度

2008 年生态暴露度主要以轻微脆弱区为主, 面积为 1923.02 km², 占比 41.33%, 其非常和极度脆弱区占比

较高,合计占比 26.21%。其中生态暴露度主要集中在大运河苏州段上半段流经的高新区及相城区,中段流经的姑苏区以及下半段流经的吴江区暴露度相对较低;2018 年生态暴露度轻微脆弱区占比为 44.44%,较 2018 年提高了 3.11%,非常脆弱区和极度脆弱区相比 2008 年分别下降了 5.02%和 3.51%,分布结果见图 3,详细具体占比见表 5。

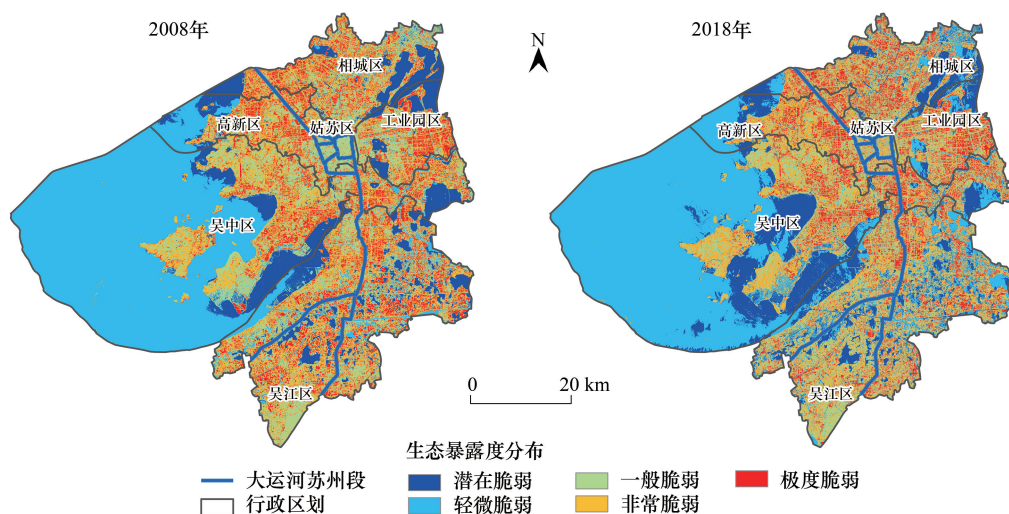


图 3 研究区生态暴露度分布

Fig.3 Distribution of ecological exposure in the study area

2.1.2 生态敏感性

2008 年研究区生态敏感性主要以潜在和轻微脆弱区为主,其合计占比为 64.73%,共有 3011.78 km²。植被覆盖度高且较为均匀,降水量充沛,水资源充足且极端天气天数较少,多数地区为潜在脆弱区域和稍微脆弱区域,高脆弱性区域较少且较为分散,分布在大运河苏州段上游的高新区、相城区及下游的吴江区。2018 年生态敏感性进一步下降,植被覆盖度的提升以及年降水量的增多是明显的诱因,多数区域为潜在脆弱性区域和一般脆弱性区域,高脆弱性区域较 2008 年也大幅度减少,总体生态敏感性分布较 2008 年更加均衡,分布结果见图 4,详细具体占比见表 5。

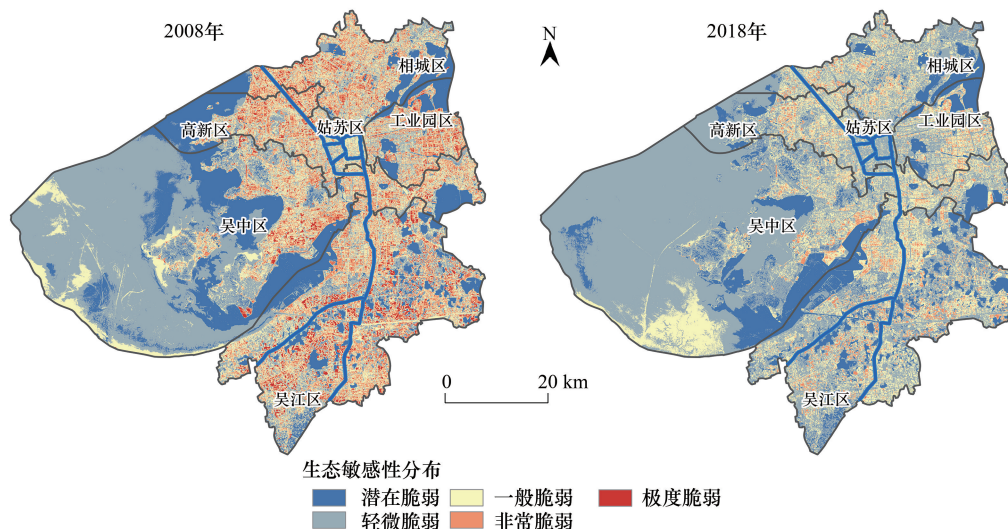


图 4 研究区生态敏感性分布

Fig.4 Distribution of ecological sensitivity in the study area

2.1.3 生态适应能力

2008 年研究区生态适应能力主要以轻微脆弱区为主,占比 41.52%,共有 1932.32 km²,低等脆弱区主要分布在下游,上游段相城区和高新区生态适应力较低,环境污染治理资金投入较少。2018 年,生态环保建设力度加大,经济可持续发展进一步推进,总体生态适应力逐渐提高,生态适应能力提高明显,重度脆弱区逐渐向中低等脆弱区转变。分布结果见图 5,详细具体占比见表 5。

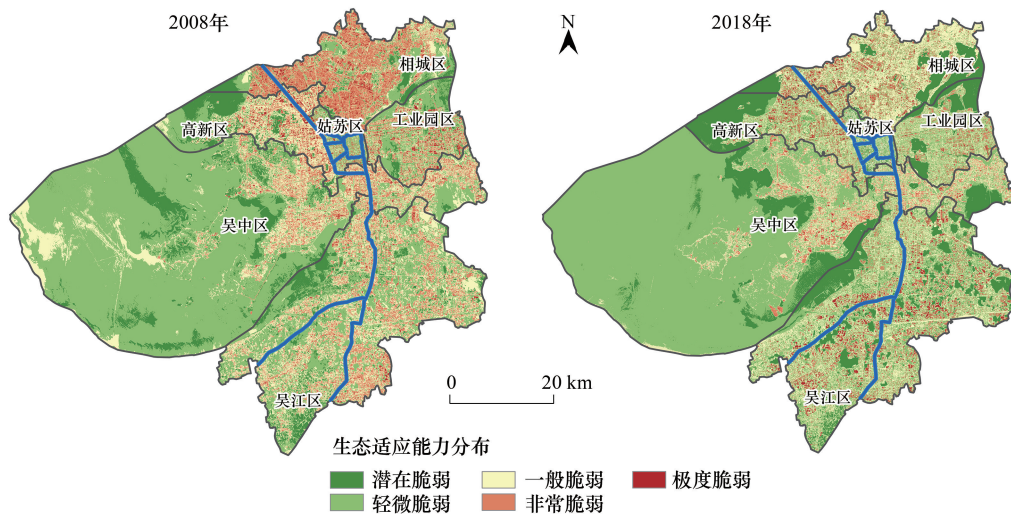


图 5 研究区生态适应能力分布

Fig.5 Distribution of ecological adaptability in the study area

2.2 生态环境脆弱性综合评价分析

2.2.1 生态脆弱度时空分布变化及相关评价分析

使用 ArcGIS 10.2 软件的栅格计算器和栅格重分类结合空间叠置分析功能,根据公式(12)将 EEI、ESI 及 EAI 的计算结果相叠加,计算每个栅格的 EVI,并制作出研究区生态脆弱性空间分布图,具体结果见图 6,详细具体占比见表 5。

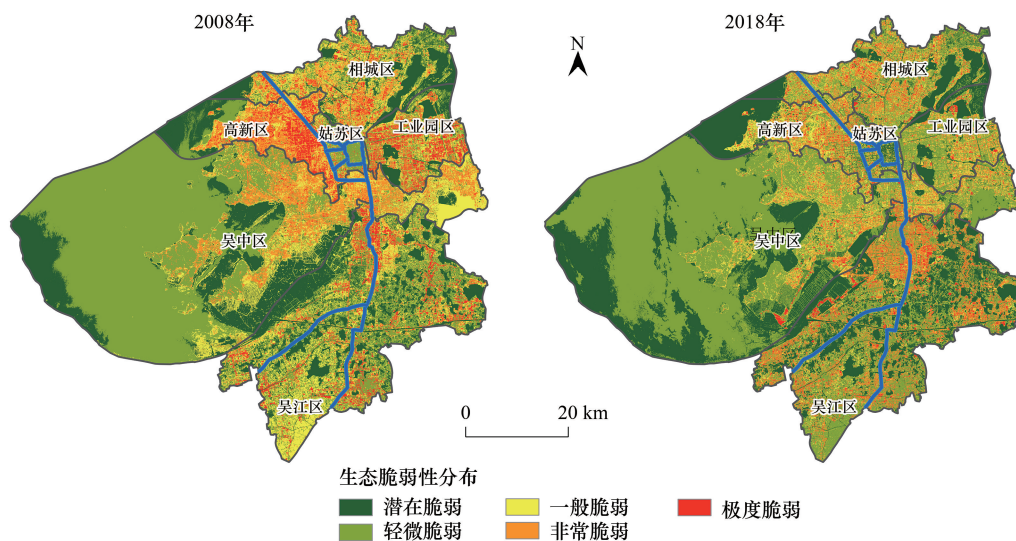


图 6 研究区生态脆弱性分布

Fig.6 Distribution of ecological vulnerability in the study area

表 5 生态脆弱区占比和面积统计

Table 5 Percentage and area statistics of ecological vulnerable areas

年 Year	类别 Category	潜在脆弱 Potentially		轻微脆弱 Slightly		一般脆弱 Generally		非常脆弱 Very		极度脆弱 Extremely	
		占比	面积	占比	面积	占比	面积	占比	面积	占比	面积
		Percent/%	Area/km ²	Percent/%	Area/km ²	Percent/%	Area/km ²	Percent/%	Area/km ²	Percent/%	Area/km ²
2008	暴露度	19.19	892.88	41.33	1923.02	13.27	617.43	14.83	690.02	11.38	529.49
	敏感性	21.86	1017.11	42.87	1994.67	14.72	684.90	12.54	583.47	8.01	372.69
	适应力	21.51	1000.83	41.53	1932.32	15.16	705.37	11.97	556.94	9.83	457.37
	脆弱性	20.59	958.02	42.05	1956.52	14.91	693.74	13.32	619.76	9.13	424.80
2018	暴露度	23.17	1078.06	44.44	2067.72	14.81	689.09	9.81	456.44	7.77	361.53
	敏感性	24.29	1130.17	46.59	2167.76	16.50	767.72	7.70	358.27	4.92	228.92
	适应力	23.34	1085.97	45.51	2117.51	13.74	639.30	10.33	480.64	7.08	329.42
	脆弱性	23.84	1109.24	44.95	2091.45	15.60	725.84	9.21	428.53	6.40	297.78

2008 年,由于经济处于高速发展阶段,人为活动对生态环境影响较大,资源利用率较低,生态脆弱度格局较不均衡。到了 2018 年,提倡绿色生态可持续发展,人为建设因素影响力下降,极度脆弱区与非常脆弱区合计占比来到了 15.61%,而潜在脆弱区与轻微脆弱区进一步增加,占区域总面积的 68.79%,可见研究区生态环境脆弱性较 10 年前有明显提升。

结合表 5 的占比结果来看,研究区生态环境脆弱度有所波动,但基本以潜在脆弱区与轻微脆弱区为主,流域内整体生态环境脆弱度处于良好的格局。2008 年,流域内以轻微脆弱区为主,占比 42.05%,共计 1956.52 km²。上中下游体现出了不同的脆弱性分布,上游中度和重度脆弱区分布较为密集,日益发达的第二产业与较低的环保力度是其主要诱因;中游以中度脆弱区为主,这一部分生态资源和人为影响力度较少;下游水资源和植被资源丰富,且环境保护力度较大,是研究区生态系统最为健康的一部分。2018 年,国家倡导生态经济绿色可持续发展,研究区规划管理方式日渐成熟,生态环境质量明显有所提升,生态环境脆弱度呈良好的下降趋势,较 2008 年相比,除了一般脆弱区面积占比几乎不变,非常脆弱区与极度脆弱区占比为 15.61%,降低了 6.84%,潜在脆弱区与轻微脆弱区占比为 68.79%,上升了 6.15%,流域内重度脆弱区正逐步向轻度脆弱区转变,各区生态环境脆弱度分布差异进一步减小。

2.2.2 生态脆弱分区变化及相关评价分析

基于生态脆弱性空间分布结果,制作研究区生态脆弱变化区分布,分别为生态脆弱区变化空间分布、生态脆弱区具体变化分区、生态修复区空间分布以及生态退化区空间分布,结果如图 7 和表 6 所示。

结合表 6 来看,十年间研究区生态环境脆弱恢复情况较为良好,生态修复区占比为 37.08%,其中 I 级修复区占比最高为 13.31%,IV 级修复区占比最低为 4.95%;生态持平区占总面积的 37.93%;生态退化区占比较小,为 24.89%,II 级退化区占比最高为 9.54%,IV 级退化区占比最低,为 1.50%。重度脆弱区向中轻度脆弱区的转变十分明显,从研究区十年来生态修复分布来看,退化区主要分布在流域上游的高新区和相城区的人口产业密集处及流域中游吴中区的城区,以 I 级和 II 级退化区为主,合计占比为 18.60%,其中上游的相城区和中游的吴中区的生态退化率较高,城市化进度低、不合理的土地开发以及过分依赖第二产业,工农业污染排放无法降低,导致生态修复进展相对缓慢。I 级和 II 级退化区合计占比都超过了 20%,修复区多分布在中游高度城市化的姑苏区、工业园区和下游生态资源丰富、人为开发力度较小的吴江区,其中姑苏区的 I 级、III 级和 IV 级修复区占比分别为 20.70%、11.45%和 8.29%,皆为最高,而 II 级生态修复率最高为工业园区的 18.21%,流域中游地区的人口转移和产业升级,是其生态修复良好的重要原因。

3 讨论

研究区生态脆弱变化趋势较为明显,大运河苏州段流域上游相城区和高新区周边地区的生态退化区密度

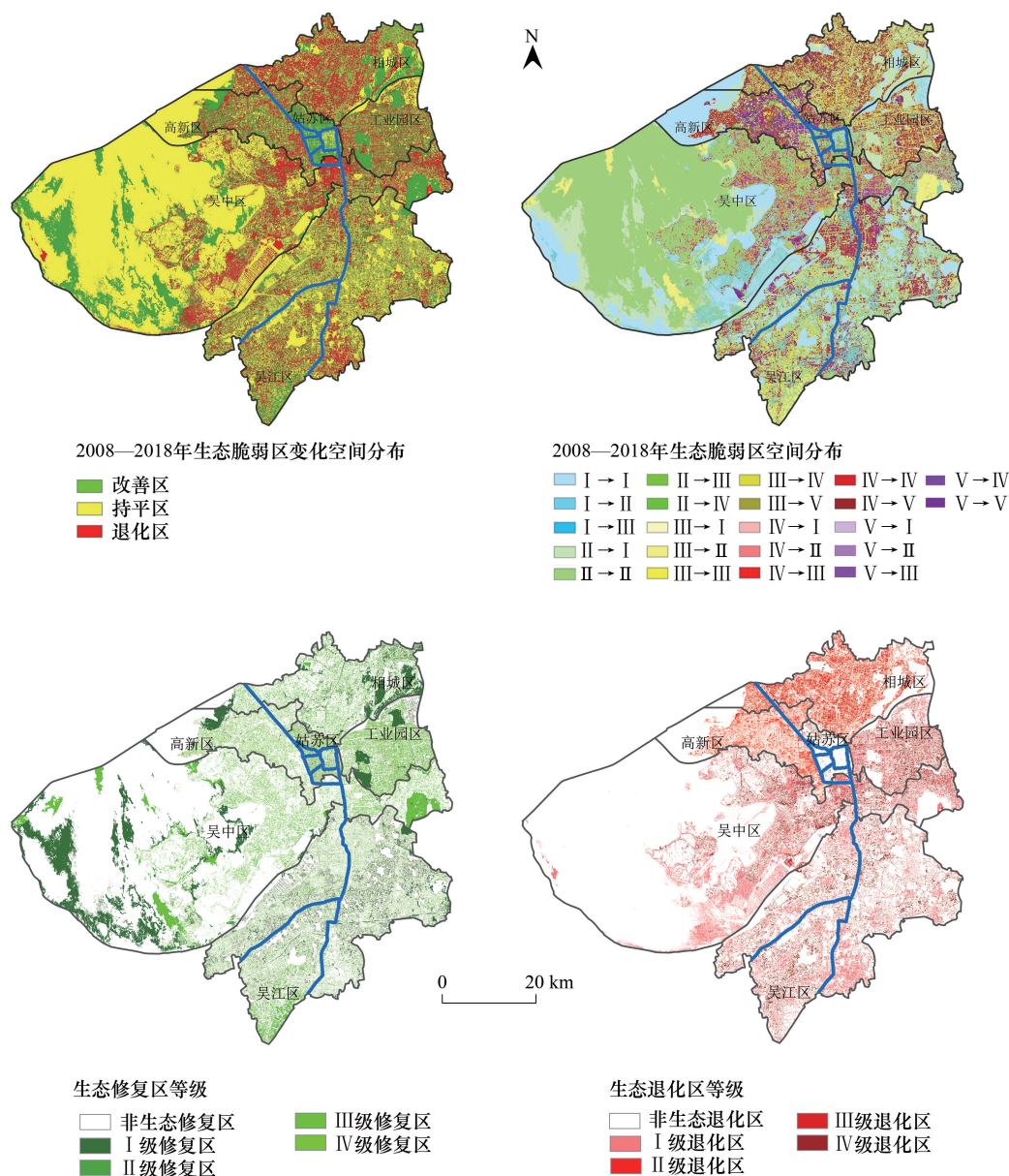


图7 研究区生态脆弱变化区分布

Fig.7 Distribution of ecological vulnerability change areas in the study area

I: 潜在脆弱区; II: 轻微脆弱区; III: 一般脆弱区; IV: 非常脆弱区; V: 极度脆弱区

较高且分布集中,该地区人口密度从2008年的0.09万人/km²上升到了2018年的0.25万人/km²,建设用地占比涨幅达到了15.39%,较高的人口压力使得人地关系更为紧张,且当地产业以第二产业为主,2008年和2018年的工业污染排放总量分别占研究区总体的47.61%和42.34%,但是,上游地区环境污染治理资金投入的金额仅从7.37亿元上涨到15.13亿元,导致2008年和2018年的污水处理率分别仅有78.77%和87.23%,V及劣V类水在监测断面中的占比也低于研究区平均水平,分别为31.23%和19.80%,使得上游地区的生态暴露度指数从2008年的1.70增长到了2018年的2.01,污染排放强度较高以及环保力度较低是该区域生态退化区分布较为密集的主要诱因。流域中游姑苏区和工业园区的周边地区生态修复情况优秀,该区域高污染高排放高能耗企业较少,第三产业发达,工业废水、废气、固废的排放强度从2008年的3.57万t/km²、0.35亿m³/km²、0.09t/km²降低到2018年的0.28万t/km²、0.04亿m³/km²、0.01t/km²,空气质量指数从2008年的84.34下降到了2018年的46.19,中游地区生态暴露度指数从2008年的1.59下降到2018年的1.31;中游周边地区

表 6 生态修复分区统计

Table 6 Statistics of the proportion of ecological restoration zones

修复分区 Restoration zones	相城区 占比/% Proportion of xiangcheng	高新区 占比/% Proportion of gaoxin	姑苏区 占比/% Proportion of gusu	工业园区 占比/% Proportion of gongyeyuan	吴中区 占比/% Proportion of wuzhong	吴江区 占比/% Proportion of wujiang	研究区 总体/% Proportion of study area
I 级修复区 Grade I restoration area	14.49	11.32	20.70	13.34	14.34	9.26	13.31
II 级修复区 Grade II restoration area	10.76	9.94	12.94	18.21	10.39	10.69	11.25
III 级修复区 Grade III restoration area	7.35	5.66	11.45	7.49	6.89	7.12	7.67
IV 级修复区 Grade IV restoration area	4.47	4.77	8.29	4.72	7.85	5.06	4.95
生态持平区 Ecological flat area	30.44	46.70	24.23	41.15	31.61	49.98	37.93
I 级退化区 Grade I degraded area	10.22	8.14	11.69	7.78	13.50	8.91	9.26
II 级退化区 Grade II degraded area	10.66	7.43	6.92	4.12	7.99	3.64	9.54
III 级退化区 Grade III degraded area	8.65	4.97	2.44	2.67	6.47	3.91	4.59
IV 级退化区 Grade IV degraded area	2.96	1.59	1.34	0.52	0.96	1.43	1.50

I 级修复区: 潜在脆弱区以上脆弱区变化为潜在脆弱区的区域; II 级修复区: 轻微脆弱区以上脆弱区变化为轻微脆弱区的区域; III 级修复区: 一般脆弱区以上脆弱区变化为一般脆弱区的区域; IV 级修复区: 非常脆弱区以上脆弱区变化为非常脆弱区的区域; I 级退化区: 轻微脆弱区以下脆弱区变化为轻微脆弱区等级的区域; II 级退化区: 一般脆弱区以下脆弱区变化为一般脆弱区等级的区域; III 级退化区: 非常脆弱区以下脆弱区变化为非常脆弱区等级的区域; IV 级退化区: 极度脆弱区以下脆弱区变化为极度脆弱区等级的区域

生态资源分布较为分散但利用程度较高,十年间土地综合利用程度指数、归一化植被指数、景观多样性指数分别提升了 135.6、0.15、154.96,生态敏感性指数从 2008 年的 1.17 下降到 2018 年的 0.75,该区域严格控制污染排放、合理规划土地利用、大力投入环境保护,使得生态暴露度指数和生态敏感性指数大幅度降低,成功将部分重度脆弱区转变轻微脆弱区,生态脆弱度有明显的下降,生态修复情况优秀。流域下游的人口密度较低且自然资源充沛,暴雨强度较低,十年间单位面积水资源量涨幅达到了 2.89 亿 L/km²,丰富的水文资源使得该区域的植被面积十分充沛,其林地、草地及园地合计占比从 2008 年的 25.39% 提高到了 2018 年的 38.90%,2008 年和 2018 年下游地区极端天气出现的天数仅为 58 天和 52 天,生态敏感性指数从 2008 年的 1.26 下降到 2018 年的 0.63。不过,下游地区近年来人为干扰力度加大,工业污染排放增多,农用地的不合理扩张影响了水域等自然地的生态质量,农用化肥施用强度、农药喷洒强度分别从 2008 年的 2.76、0.15 t/km² 增长到了 3.81、0.28 t/km²,人为干扰强度的增大使得生态暴露度指数从 1.60 增长到 1.71;下游地区生态适应能力指数从 2008 年的 0.87 下降到 2018 年的 0.73,自然植被覆盖率较高,但建成区植被覆盖率较低,环保建设投入金额较少,污水处理率不高是下游周边地区生态适应能力指数增长缓慢的主要原因,环保建设力度无法匹配上人为干扰强度阻碍了大运河下游生态环境的进一步修复。

从总体修复情况上看,下游地区修复区面积最多,中游地区修复率最高,上游地区退化区占比最高,上游地区是大运河苏州段流域未来生态治理和保护的重点区域。对于上游地区,加强对三高企业污染排放的监督管理,大力促进产业升级,加大污染治理资金的投入,同时退耕还林,重点保护区域内的森林、湿地资源;对于中游地区,加强该区域的景观绿化方面的工作,强化绿色环保方面的宣传,同时对该区域的自然生态资源进行规划,开设专门的保护区,形成一个植被资源保护体系;对于下游地区,对国家规定的基本农田进行严格保护,扩大植被覆盖面积,提高建成区绿化覆盖率,合理利用土地资源。

4 结论

运用 VSD 模型根据大运河苏州段流域不同地区的生态环境状况,针对性地选取外部压力、自然因素、环境保护相关的 24 个指标,可以有效地评估研究区生态环境的健康状况,识别威胁生态环境的因素,而且生态脆弱区变化图示可以清晰地反映出研究区每个区域的生态脆弱性变化情况。然而,生态脆弱性评价只能对生态环境进行静态评价或者一定时间间隔的相对动态评价,无法对生态环境变化的动态过程进行解析,且不能对未来生态环境的健康状况以及出现的问题进行合理预测。因此,运用更合适的模型进一步对运河生态环境状况进行定性与定量相结合的分析,并且对其进行合理预测评价,是接下来所要进行的重点。

参考文献 (References):

- [1] Demirkesen A C, Evrendilek F. Compositing climate change vulnerability of a Mediterranean region using spatiotemporally dynamic proxies for ecological and socioeconomic impacts and stabilities. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017, 189(1): 29.
- [2] Okey T A, Aghayani S, Alidina H M. Mapping ecological vulnerability to recent climate change in Canada's Pacific marine ecosystems. *Ocean & Coastal Management*, 2015, 106: 35-48.
- [3] Lavorel S, Flannigan M D, Lambin E F, Scholes M C. Vulnerability of land systems to fire: interactions among humans, climate, the atmosphere, and ecosystems. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 2007, 12(1): 33-53.
- [4] IPCC. Summary for policymakers//Field C B, Barros V R, Dokken D J, Mach K J, Mastrandrea M D, Bilir T E, Chatterjee M, Ebi K L, Estrada Y O, Genova R C, Girma B, Kissel E S, Levy A N, MacCracken S, Mastrandrea P R, White L L (eds.). *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2014: 1-32.
- [5] 张珊珊, 陈继军, 周忠发, 孙小涛, 陈全. 基于格网 GIS 的重点生态功能区生态系统敏感性研究: 以贵州省雷山县为例. *环境工程*, 2017, 35(4): 139-143.
- [6] 李晓伟, 付超, 刘健, 刘宇, 封志明, 于秀波. 基于生态系统的适应(EBA)——概念、工具和案例. *地理科学进展*, 2014, 33(7): 931-937.
- [7] 张德君, 高航, 杨俊, 席建超, 李雪铭. 基于 GIS 的南四湖湿地生态脆弱性评价. *资源科学*, 2014, 36(4): 874-882.
- [8] 安芬, 李旭东, 程东亚. 贵州省乌江流域生态脆弱性评价及其空间变化特征. *水土保持通报*, 2019, 39(4): 261-269.
- [9] 马子惠, 马书明, 张树深. 大连市生态脆弱性评价及其不确定性分析. *水土保持通报*, 2019, 39(3): 237-242, 262-262.
- [10] 姚昆, 余琳, 刘光辉, 刘汉湖. 基于 SRP 模型的四川省生态环境脆弱性评价. *物探化探计算技术*, 2017, 39(2): 291-295.
- [11] 张殿发, 王世杰, 李瑞玲. 贵州省喀斯特山区生态环境脆弱性研究. *地理学与国土研究*, 2002, 18(1): 77-79.
- [12] 於琰, 曹明奎, 李克让. 全球气候变化背景下生态系统的脆弱性评价. *地理科学进展*, 2005, 24(1): 61-69.
- [13] 徐庆勇, 黄玫, 刘洪升, 闫慧敏. 基于 RS 和 GIS 的珠江三角洲生态环境脆弱性综合评价. *应用生态学报*, 2011, 22(11): 2987-2995.
- [14] 类延忠, 冯颖, 周宝同, 左太安. 基于主成分分析及聚类分析法的岩溶区生态脆弱性评价——以毕节岩溶区为例. *广东农业科学*, 2013, 40(2): 169-172.
- [15] 姚建, 王燕, 雷蕾, 苏维, 罗佩宁. 岷江上游生态脆弱性的模糊评价. *国土资源科技管理*, 2006, 23(2): 90-92.
- [16] Pham B T, Khosravi K, Prakash I. Application and comparison of decision tree-based machine learning methods in landside susceptibility assessment at Pauri Garhwal Area, Uttarakhand, India. *Environmental Processes*, 2017, 4(3): 711-730.
- [17] 杨昀. 大运河遗产廊道的保护传承与活态利用——以苏州段运河为例. *中国名城*, 2020, (4): 76-81.
- [18] 程中华, 邓义祥, 卓小可, 代丹, 于涛. 京杭大运河中下游段天然水化学变化特征及驱动因素. *环境科学*, 2021, 42(5): 2251-2259.
- [19] 林国添, 成羿, 王长林, 聂跃平. 基于 RS 和 GIS 的大运河沿岸土地利用/覆被变化分析. *安徽农业科学*, 2009, 37(9): 4144-4146.
- [20] 贾艳红, 赵军, 南忠仁, 赵传燕, 王胜利. 基于熵权法的草原生态安全评价——以甘肃牧区为例. *生态学杂志*, 2006, 25(8): 1003-1008.
- [21] 刘慧, 师学义. 静乐县生态脆弱性时空演变与分区研究. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(1): 34-43.
- [22] Polsky C, Neff R, Yarnal B. Building comparable global change vulnerability assessments: the vulnerability scoping diagram. *Global Environmental Change*, 2007, 17(3/4): 472-485.
- [23] 杨云云, 罗书华. 环境空气质量指数模型加权分析. *低碳世界*, 2017, (24): 6-8.
- [24] 徐州, 林孝松, 何浪. 基于地形梯度的巫山县土地利用空间分布特征研究. *中国农机化学报*, 2019, 40(10): 193-199.
- [25] 李一静, 曾辉, 魏建兵. 基于归一化植被指数变化分级的深圳市植被变化. *应用生态学报*, 2008, 19(5): 1064-1070.
- [26] 傅伯杰. 景观多样性分析及制图研究. *生态学报*, 1995, 15(4): 345-350.
- [27] 贾艳红, 牛博颖, 钱骏宸. 基于 CASA 模型的海州湾生态系统 NPP 估算. *地理空间信息*, 2020, 18(3): 41-44, 71-71.
- [28] 姜友蕾, 陆敏博. 苏州市中心城区暴雨强度公式评估与分析. *城市道桥与防洪*, 2016, (8): 149-151.
- [29] 殷丽婷, 郑伟, 高猛, 路景飏. 庙岛群岛北五岛生态系统净初级生产力与景观格局时空分布异质性研究. *海洋学报*, 2020, 42(6): 110-118.
- [30] 黄超, 殷建国, 张军, 张洪波, 王婷. 层次分析法计算风险评估指标权重. *中国公共安全: 学术版*, 2018, (2): 19-22.
- [31] 高金花, 高晓珊, 廉冀宁, 柏宇, 王莉. 基于 AHP-熵权法的农业节水技术综合效益评价. *农机化研究*, 2019, 41(12): 58-63.
- [32] 姚昆, 周兵, 李小菊, 何磊, 李玉霞. 基于 AHP-PCA 熵权模型的大渡河流域中上游地区生态环境脆弱性评价. *水土保持研究*, 2019, 26(5): 265-271.
- [33] 李乃强, 徐贵阳. 基于自然间断点分级法的土地利用数据网格化分析. *测绘通报*, 2020, (4): 106-110, 156-156.
- [34] Fan C, Myint S. A comparison of spatial autocorrelation indices and landscape metrics in measuring urban landscape fragmentation. *Landscape and Urban Planning*, 2014, 121: 117-128.
- [35] 付刚, 白加德, 齐月, 闫冰, 贺婧, 肖能文, 李俊生. 基于 GIS 的北京市生态脆弱性评价. *生态与农村环境学报*, 2018, 34(9): 830-839.