

大连市生态脆弱性评价及其不确定性分析

马子惠, 马书明, 张树深

(大连理工大学 环境学院, 工业生态与环境工程教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: [目的] 分析大连市生态脆弱性总体结果和空间分布特征, 并识别分析评价体系的敏感性特征。[方法] 基于生态敏感性—生态恢复力—生态压力度(SRP 模型)构建城市生态脆弱性指标体系评估模型; 采用 OAT(one-at-a-time)方法评估指标权重不确定性下的结果变异程度。[结果] 大连市极度脆弱、重度脆弱、中度脆弱、轻度脆弱、微度脆弱 5 个等级面积比例分别是 4.17%, 22.97%, 41.00%, 23.69%, 8.16%; 脆弱性最高的地区位于市中心及甘井子区东部, 脆弱性最低的地区位于大连市北部地区、甘井子区与旅顺区交界处。土壤有机碳含量指标对结果影响最大, 区域绝对平均变化率的最大值及最大像元变化率分别为 11.49% 和 17.27%。[结论] 大连市整体生态脆弱性处于中等脆弱水平, 对于土壤有机碳含量指标权重应慎重考虑以减少评估结果不确定性。

关键词: 生态脆弱性; SRP 模型; OAT 方法; 敏感性分析

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)03-0237-06

中图分类号: X171.1

文献参数: 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[J]. 水土保持通报, 2019, 39(3): 237-242. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.03.039; Ma Zihui, Ma Shuming, Zhang Shushen. Ecological vulnerability assessment and its uncertainty analysis of Dalian City[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(3): 237-242.

Ecological Vulnerability Assessment and Its Uncertainty Analysis of Dalian City

Ma Zihui, Ma Shuming, Zhang Shushen

(Key Laboratory of Industrial Ecology and Environmental Engineering (MOE), School of Environmental Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China)

Abstract: [Objective] The objectives of the study were to analyze the overall spatial distribution characteristics of the ecological vulnerability of Dalian City and identify the sensitivity characteristics of the evaluation index system. [Methods] We constructed an urban ecological vulnerability index system based on sensitivity-recovery-pressure model (SRP), and the one-at-a-time method (OAT) was used to estimate the sensitivity of results under uncertainty of index weights. [Results] The vulnerability of Dalian City was classified into five levels: extreme vulnerability, high vulnerability, moderate vulnerability, light vulnerability and slight vulnerability, with an area proportion of 4.17%, 22.97%, 41.00%, 23.69%, and 8.16%, respectively. The areas with the highest vulnerability distributed in the city center and the east area of Ganjingzi District, while areas with the lowest vulnerability distributed in the northern part of Dalian and the junction of Ganjingzi District and Lushun District. The soil organic carbon showed the greatest impact on the evaluation results. The maximum absolute average change rate and the maximum pixel change rate was 11.49% and 17.27%, respectively. [Conclusion] The overall ecological vulnerability of Dalian City is at a moderate vulnerability level. The weight of soil organic carbon index should be carefully considered to reduce the uncertainty of evaluation results.

Keywords: ecological vulnerability; SRP model; OAT method; sensitivity analysis

收稿日期: 2018-11-19

修回日期: 2018-12-07

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于不确定情景构建和挖掘的区域突发环境事件风险分析与应对策略研究”(71801030); 大连理工大学基本科研业务专项项目(DUT18RC(4)045)

第一作者: 马子惠(1994—), 女(汉族), 山西省运城市人, 硕士研究生, 研究方向为生态系统服务价值, 生态脆弱性评价。E-mail: 1063250171@qq.com.

通讯作者: 马书明(1983—), 男(汉族), 山东省平度市人, 博士, 讲师, 研究方向为环境影响评价、环境规划。E-mail: shumingma@dlut.edu.cn.

人类活动及全球变化的加剧,对生态系统产生了巨大影响,生态脆弱性问题日益严峻。生态脆弱性是指在特定时间和空间的尺度下,生态系统在外界因素扰动下所产生的敏感性和恢复力,由其自身属性和外界人为因素共同决定^[1]。

目前,国内外学者针对生态脆弱性开展了大量的研究^[2-3]。生态脆弱性最早源于 20 世纪初美国生态学家 Clements 提出的“生态过渡带”概念^[4]。国外早期大多以气候变化和社会经济两方面为出发点进行生态脆弱性评价,涵盖农、林、牧、渔等多个部门^[4];21 世纪后,针对自然生态系统和社会经济系统的综合研究趋于全面,并广泛应用于经济学、工程学、地质学等领域;近年来,出现了融合多种特征的人地耦合系统脆弱性概念^[5]。国内生态脆弱性评价经历了从早期的脆弱带分区及理论探讨定性评价,定量评价到耦合系统脆弱性探讨的阶段^[5]。

在生态脆弱性评价方面,已有很多评价体系,但并未形成一套公认的模型,评价指标及计算方法也各不相同^[5]。前人研究提出了压力—状态—响应(PSR)模型^[6],暴露—敏感—适应(VSD)模型^[7],生态敏感性—生态恢复力—生态压力度(SRP)模型^[8],成因及结果表现评价体系^[9],压力—敏感—弹性(PSE)模型^[10]等评估指标模型,层次分析法^[11],模糊数学法^[12],主成分分析法^[1],神经网络法^[13],熵权法^[8],景观生态学法^[14]等评价计算方法。

SRP 模型涵盖脆弱性评价中的各个要素,可较全面的对地区生态脆弱性进行评估。在评价方法方面,层次分析法可将专家建议定量化,简单易算^[11]。使用专家打分法和层次分析法计算指标权重时,由于不同专家对同一问题的认知各不相同,将给指标体系带来一定的不确定性,每个指标和变量的不确定性会传播累积,可能对评价结果产生一定影响^[15]。但现有研究对生态脆弱性评价中的权重敏感性关注较弱,因此对权重进行敏感性分析非常重要。

本研究拟以大连市为例,基于 SRP 模型构建城市生态脆弱性评估指标体系模型,并基于此分析研究区域生态脆弱性总体结果和空间分布特征;采用 OAT(one-at-a-time)方法来评价指标权重不确定性下的结果变异程度,识别敏感指标。

1 研究区概况

大连市地处欧亚大陆东岸,辽宁半岛最南端,位于东经 120°58′—123°31′、北纬 38°43′—40°10′之间。总面积约 12 574 km²,总人口约 5.90×10⁶ 人。大连

多山地丘陵,少平原低地且坡度较大;季风盛行,沿海地区每年 6 级及 6 级大风天数达到 90~140 d;降雨分布极不均匀,地表植被保水能力差,淡水资源相对稀缺;自然资源多样丰富,但湿地、森林、绿地等资源分布不均;土地资源相对缺乏;随着城市化格局渐成体系,产业和人口迅速聚集,区域内污染物排放强度加大,环境问题突出;同时,大连市处于全国沿海经济重要节点。因此对大连市进行生态脆弱性评价十分重要。

2 指标体系与研究方法

2.1 生态脆弱性指标体系构建

从生态敏感性、生态恢复力和生态压力度 3 方面共选取 19 个指标构建指标体系(表 1)。生态敏感性是指在外界影响下生态系统产生环境问题的可能性^[16],本研究从气候、地形、地表、灾害 4 方面讨论。气候是生态脆弱性形成的重要原因^[9],选择年均温度、年均降雨、年均湿度、年均风速代表气候状况;选取高程、坡度、起伏度反映地形地貌脆弱情况;土地利用类型、增强型植被系数反映人类对自然干扰程度^[9],降雨侵蚀力反映水土流失特征;在灾害指标方面,选取暴雨、大风、雷电 3 种气象灾害,选取崩塌、滑坡、泥石流、地表塌陷代表地质灾害。生态恢复力是指生态系统在外界干扰下适应环境的能力^[16],从功能、活力和结构 3 个方面讨论。土壤有机碳含量可反映土壤健康状态^[17];植被总初级生产力反映植被生长情况;景观多样性指数体现景观的复杂程度^[18]。生态压力度是指对生态系统稳定性产生扰动的外部因素^[16],采用人口密度、GDP 密度分别表示人口压力和经济压力,是人类活动的直接体现。

2.2 评价指标预处理及标准化

由于各指标物理意义及量纲不同,需进行标准化处理^[9, 15, 17]并进行空间展示。各指标数据处理方法如表 1 所示,其中“+/-”分别表示正向指标和负向指标,“*”表示采用分等级赋值法。

(1) 极差法。将各指标按照与生态脆弱性的关系分为正向指标和负向指标。对于正向指标,随着值的增加,脆弱性增强,对于负向指标,随着值的增加,脆弱性减小,分别采用公式(1)—(2)进行标准化,将其映射到 0—1 之间,0 表示脆弱性最低,1 表示脆弱性最高。

$$\text{正向指标: } P_i = (P - P_{\min}) / (P_{\max} - P_{\min}) \quad (1)$$

$$\text{负向指标: } P_i = 1 - (P - P_{\min}) / (P_{\max} - P_{\min}) \quad (2)$$

式中: P_i ——某指标的标准化值; P_{\min} , P_{\max} ——对应指标最小值和最大值。

表1 大连市生态脆弱性评价指标体系

准则层	指标层	要素层	数据说明	数据来源	作用方向	W_i
A_1 生态敏感性	B_1 气候	C_1 年均温度	2000—2012 年年平均温度	2000—2012 年全国气温和降水 1 km 网格空间插值数据集 ^[19]	-	0.034 2
		C_2 年均降雨	2000—2012 年年平均降水量	2000—2012 年全国气温和降水 1 km 网格空间插值数据集 ^[19]	-	0.089 3
		C_3 年均湿度	1952—2017 年各气象站点月平均湿度	中国气象数据网	-	0.014 4
		C_4 年均风速	50 m 高空处模拟风速	全球风速数据集	*	0.009 9
	B_2 地形	C_5 高程	30 m 分辨率数字高程	地理空间数据云	+	0.015 5
		C_6 坡度	地表单元陡缓程度	数字高程模型提取	+	0.028 2
		C_7 起伏度	单位区域内最高海拔高度与最低海拔高度之差	数字高程模型提取	+	0.025 3
	B_3 地表	C_8 土地利用类型	分城乡用地、耕地、林地、草地、水域、裸地 6 类	地理国情监测云平台	*	0.061 3
		C_9 增强型植被系数	2015 年中国 250 m 分辨率 EVI 句合成产品	地理空间数据云	+	0.060 0
		C_{10} 降雨侵蚀力	采用章文波等提出的降雨侵蚀力计算方法 ^[20]	中国气象数据网	+	0.036 9
B_4 灾害	C_{11} 多年平均暴雨日数	1960—2010 年各地区年均暴雨日数	大连市气象志 ^[21]	*	0.058 9	
	C_{12} 多年平均大风日数	近 60 年内大连各地区年均大风日数(≥ 8 级)	大连市气象志 ^[21]	*	0.014 2	
	C_{13} 多年平均雷电日数	1960—2010 年大连各地区年均雷电日数	大连市气象志 ^[21]	*	0.011 5	
	C_{14} 地质灾害密度	大连各地区地质灾害密度	大连市地质灾害评价研究 ^[22]	*	0.053 0	
A_2 生态恢复力	B_5 功能	C_{15} 土壤有机碳含量	2018 年全球土壤有机碳含量地图	联合国粮农组织	-	0.095 7
	B_6 活力	C_{16} 植被总初级生产力	2015 年植被总初级生产力数据	国家地球系统科学数据共享服务平台	-	0.132 4
	B_7 结构	C_{17} 景观多样性指数	反映景观复杂程度	基于土地利用类型,使用 Fragstats 软件计算所得	+	0.084 6
A_3 生态压力度	B_8 人口压力	C_{18} 人口密度	2010 年单位面积人口数量	2010 年中国公里网格人口分布数据集 ^[23]	+	0.094 8
	B_9 经济压力	C_{19} GDP 密度	2010 年单位面积 GDP	2010 年中国公里网格 GDP 分布数据集 ^[24]	+	0.080 0

(2) 分等级赋值法。对 C_4, C_8, B_4 采用分等级赋值处理。本研究依据《GB/T 28591-2012》提出的风力等级划分表,将 C_4 小于 5.5 m/s 和大于 5.5 m/s 的区域分别赋值 0.4 和 0.6;根据马骏等^[17] 研究结果对 C_8 赋值,按脆弱性排序依次为林地和水域、草地、耕地、城乡用地、裸地,分别赋值 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1;对 C_{11}, C_{12}, C_{13} 这 3 个指标按照灾害频率采用自然间断法分为 3 类,分别赋值为 0.33, 0.66 和 1;对 C_{14} 按照各地区地质灾害密度采用自然间断法分为 3 类,分别赋值 0.33, 0.66 和 1。

2.3 指标权重及生态脆弱性指数计算

采用专家打分法与层次分析法相结合计算指标权重,指标权重数据见表 1。在确定指标权重的基础上,根据公式(3)计算脆弱性评估结果:

$$EVI = \sum_{i=1}^{19} W_i \times P_i \quad (3)$$

式中: EVI ——生态脆弱性指数; W_i ——各指标权重; P_i ——指标值。

为反映大连市脆弱性评估结果空间分布特征,参考研究^[15, 25] 对评价结果按照自然间断法分为 5 类,以保证组间差异最大,组内差异最小,体现不同脆弱程度区域差别,计算及空间分类利用软件 ArcGIS 10.4 实现。

2.4 权重敏感性分析

本文采用 OAT 法^[26-28] 分析指标权重敏感性, OAT 法简单可操作,每次选定一个主变化因子改变

其权重,其余因子权重发生相应改变,该方法通过计算像元变化率(C_k)和区域绝对平均变化率(mean of the absolute change rate, MACR)两个指标来分析权重敏感性。具体计算过程如下:

首先需设置两个参数:权重变化范围(range of percent change, RPC)与权重变化步长(increment of percent change, IPC)。

主变化因子 C_m 的权重采用公式(4)计算:

$$W(C_m, P_c) = W(C_m, 0) + W(C_m, 0) \times pc \quad (4)$$

$$RPC_{\min} < P_c < RPC_{\max}$$

式中: $W(C_m, P_c)$ ——计算的 C_m 模拟权重值; $W(C_m, 0)$ —— C_m 初始权重值; P_c ——权重变化率。

其余指标模拟权重值按照公式(5)计算:

$$W(C_i, P_c) = [1 - W(C_m, P_c)] \times \frac{W(C_i, 0)}{[1 - W(C_m, 0)]} \quad (i \neq m; 1 \leq i \leq n) \quad (5)$$

式中: $W(C_i, P_c)$ ——计算的 C_i 模拟权重值; $W(C_i, 0)$ —— C_i 初始权重值。

依次选择每个因子为主变化因子且当 P_c 在 RPC 范围内变化时,就会产生一系列模拟结果。综合评价计算公式(6)为:

$$EVI(C_m, P_c) = W(C_m, P_c) \times A_m + \sum_{i=1}^n W(C_i, P_c) \times A_i \quad (i \neq m; 1 \leq i \leq n) \quad (6)$$

式中: $EVI(C_m, P_c)$ ——计算的模拟生态脆弱性值, A_m, A_i ——指标值。

针对评价结果中第 k 个像元, C_k 采用公式 (7) 计算:

$$C_k(C_m, P_c) = \frac{EVI(C_m, P_c) - EVI_0}{EVI_0} \times 100\% \quad (7)$$

式中: C_k ——模拟结果与初始结果相比较计算所得值, EVI_0 ——初始 EVI 值。

整个区域的 MACR 采用公式 (8) 计算:

$$MACR = \sum_{k=1}^N \frac{1}{N} \times \left| \frac{EVI(C_m, P_c) - EVI_0}{EVI_0} \right| \times 100\% \quad (8)$$

式中: $MACR$ ——区域内 C_k 绝对值的平均值; N ——栅格总数。

3 结果与分析

3.1 大连市生态脆弱性分析

根据前述评价模型对大连市生态脆弱性进行计算, 结果如附图 14 所示。其中极度脆弱、重度脆弱、中度脆弱、轻度脆弱、微度脆弱 5 个区域面积占比分别是 4.17%, 22.97%, 41.00%, 23.69% 和 8.16%。

从空间分布上看, 极度脆弱区主要分布在市中心

及甘井子区东部; 微度脆弱区主要分布在甘井子区与旅顺区交界处及大连市北部, 该区域生态系统稳定; 其他脆弱等级区域分布较分散。对大连市各区县的生态脆弱性分布进行计算, 西岗区生态脆弱性最强, 庄河市生态脆弱性最弱, 在非建成区域中, 长海县及长兴岛极度脆弱区域与重度脆弱区域面积之和比例达 92.25% 和 89.16%。

3.2 指标权重敏感性分析

设置 RPC 变化范围为 -100% 至 100% , $IPC = 5\%$, 将本文选取的 19 个指标依次作为主变化因子共产生 779 组权重值, 每组权重值可产生一个新的脆弱性评价结果。

大连市 $MACR$ 模拟结果如图 1 所示, 随着权重变化率 P_c 的增加, 各指标有不同的 $MACR$ 值, 当权重改变相同的程度时, 对结果的敏感性相同, 且生态脆弱变化率空间分布基本一致。指标斜率越大, 对结果的影响程度就越大, 土壤有机碳含量 C_{15} 对评价结果影响最大, 当 C_{15} 权重改变 100% 时, 所对应 $MACR$ 值为 11.49% , 远小于权重改变的程度。

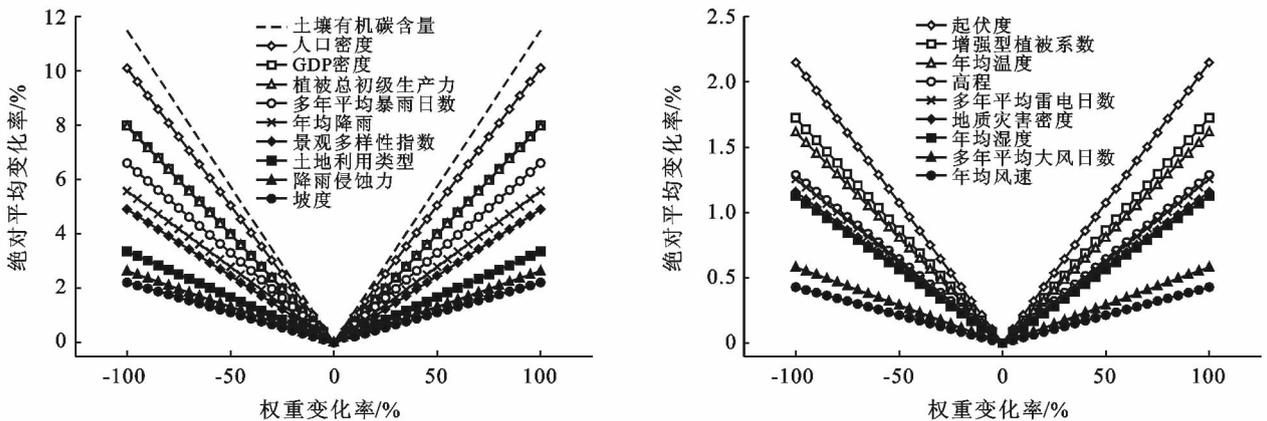


图 1 生态脆弱性 $MACR$ 模拟结果

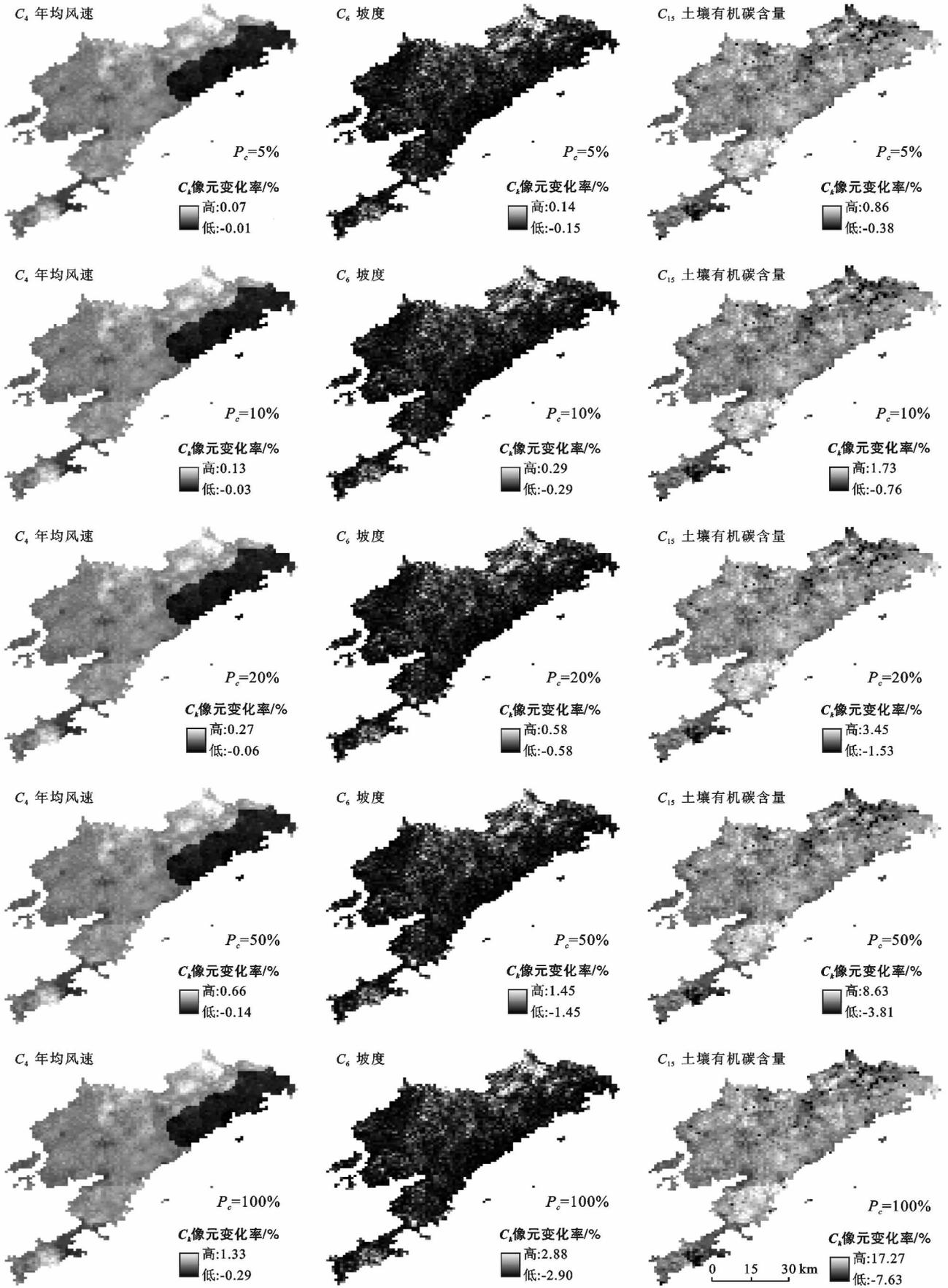
将所有指标按对结果影响程度进行排序, 选取排序分别位于第 1, 第 10, 第 19 位的土壤有机碳含量 C_{15} , 坡度 C_6 , 年均风速 C_4 进行分析。将 3 个指标依次作为主变化因子且 P_c 分别为 5% , 10% , 20% , 50% , 100% 时生成的评价结果与初始评价结果相比较, 计算生态脆弱变化率及生态脆弱区域分布, 结果如图 2 和附图 15 所示。对于同一指标, P_c 越大不确定区域面积占比越大, P_c 相同时, 指标斜率越大不确定区域面积占比越大, 具体信息如表 2 所示, 不确定区域面积占比最大为 22.84% 。随着指标 P_c 成倍增加, 该指标所对应的 C_k 值及 $MACR$ 值也成倍变化, 以 C_6 为例, 当其 $P_c = 10\%$, $P_c = 20\%$ 时所对应的 C_k

值分别为 $-0.29\% \sim 0.29\%$, $-0.58\% \sim 0.58\%$, 所对应的 $MACR$ 值分别为 0.22% , 0.44% , 远小于对应的 P_c 。另外, 生态脆弱变化率分布与所对应的主变化因子空间分布相关, 以 C_4 为例, 大连市东北部区域风速较小, C_k 也较小。

表 2 各指标不同 P_c 下不确定区域面积比例

P_c	5%	10%	20%	50%	100%
C_4	0.03%	0.08%	0.23%	0.49%	1.45%
C_6	0.26%	1.27%	1.97%	7.02%	9.40%
C_{15}	1.94%	2.85%	3.13%	8.03%	22.84%

注: P_c 为权重变化率; C_4 为年均风速; C_6 为坡度; C_{15} 为土壤有机碳含量。



注: C_k 为模拟结果与初始结果相比较计算所得的值。

图 2 大连市不同权重变化率 P_c 下各生态脆弱性指标变化率

4 讨论与结论

总体来看,大连市生态脆弱性处于中等脆弱水平,分布规律为:植被覆盖良好、人口经济压力较小的区域生态脆弱性较低,人类活动扰动大的区域生态脆弱性较高。市中心及甘井子区东部生态脆弱性高,主要是因为生态压力大,人口经济密度高,在土地利用类型上以城乡用地为主,植被覆盖少,土壤有机碳含量及植被总初级生产力低;大连市北部及甘井子区与旅顺区交界处植被覆盖良好,林地草地多,生态脆弱性低。另外,坡度、起伏度较大的区域生态脆弱性较低,主要是因为该区域开发利用难度大,人类活动少。该脆弱性评估结果与前人研究^[1,29]有一定的一致性,整体分布规律相似,微度脆弱区域与极度脆弱区域具有较好的重合度。

权重变化对脆弱性评价结果有一定的影响,不同权重值计算结果具有一定空间差异性,说明在评价过程中对权重进行不确定分析十分重要。通过 OAT 法计算各指标 MACR 排序可识别评价体系中的敏感指标,本文所构建的指标体系中最敏感指标为 C_{15} (土壤有机碳含量),所对应的最大 MACR 值为 11.49%, C_6 最大值为 17.27%,此时不确定区域面积占比 22.84%,对于该指标的权重应慎重考虑,以降低评估结果不确定性。各指标的 MACR 排序与权重具有一定的相关性但不完全一致($r=0.841$, $p<0.01$),例如 C_{15} (土壤有机碳含量)权重排序第 2,其 MACR 值最大, C_4 (年均风速)权重最小,其对应的斜率值最小,该结论与前人研究一致^[27-28]。另外,通过比较各指标生态脆弱分布图可知高脆弱区域评价结果相对稳健,主要是因为该区域 EVI 值较大,受单一指标影响的程度较小。

综上所述,通过不确定分析可识别评价指标体系中的敏感指标,通过对敏感指标权重的慎重考虑可以加强评估结果的稳健性。本研究以大连市为例,构建生态脆弱性评价指标体系模型,并采用 OAT 方法对指标体系敏感指标进行识别分析,得到如下结论:

(1) 大连市整体脆弱性处于中等脆弱水平,中度脆弱面积占比最高,市中心及甘井子区东部脆弱性最高,大连市北部地区、甘井子区与旅顺区交界处脆弱性最低。

(2) 所构建的指标体系中最敏感指标为 C_{15} (土壤有机碳含量),对该指标权重的确定应重点考虑,增强评价结果可靠性。

总体来看,本文将 OAT 不确定分析法与生态脆

弱性评价相结合,具有一定的理论和实践意义。但也存在一些不足,在敏感指标识别上,仅采用 MACR 一个指标,具有一定的局限性,后续可以选取更多指标进一步分析。

[参 考 文 献]

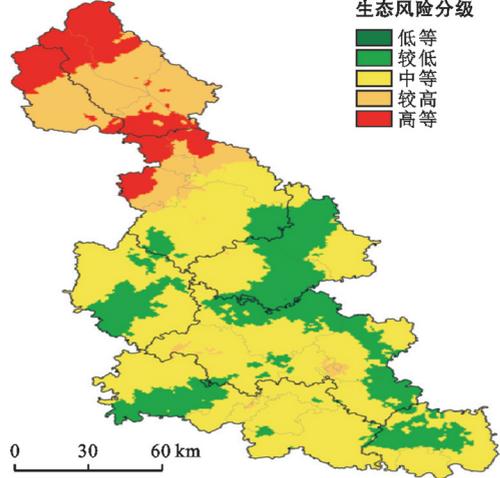
- [1] 卢亚灵,颜磊,许学工. 环渤海地区生态脆弱性评价及其空间自相关分析[J]. 资源科学,2010,32(2):303-308.
- [2] Thiault L, Marshall P, Gelcich S, et al. Mapping social-ecological vulnerability to inform local decision making[J]. Conservation Biology, 2018, 32(2): 447-456.
- [3] Dzoga M, Simatele D, Munga C. Assessment of ecological vulnerability to climate variability on coastal fishing communities: A study of Ungwana Bay and Lower Tana Estuary, Kenya[J]. Ocean & Coastal Management, 2018,163:437-444.
- [4] 徐君,李贵芳,王育红. 生态脆弱性国内外研究综述与展望[J]. 华东经济管理,2016,30(4):149-162.
- [5] 田亚平,常昊. 中国生态脆弱性研究进展的文献计量分析[J]. 地理学报,2012,67(11):1515-1525.
- [6] Xue Lianqing, Wang Jing, Zhang Luo Chen, et al. Spatio-temporal analysis of ecological vulnerability and management in the Tarim River Basin, China[J]. Science of the Total Environment, 2019,649:876-888.
- [7] 魏晓旭,赵军,魏伟,等. 中国县域单元生态脆弱性时空变化研究[J]. 环境科学学报,2016,36(2):726-739.
- [8] 张莹,张学玲,蔡海生. 基于地理探测器的江西省万安县生态脆弱性时空演变及驱动力分析[J]. 水土保持通报,2018,38(4):207-214.
- [9] 邓伟,袁兴中,孙荣,等. 基于遥感的北方农牧交错带生态脆弱性评价[J]. 环境科学与技术,2016,39(11):174-181.
- [10] 孙平军,修春亮,王忠芝. 基于 PSE 模型的矿业城市生态脆弱性的变化研究:以辽宁阜新为例[J]. 经济地理,2010,30(8):1354-1359.
- [11] He Li, Shen Jing, Zhang Yang. Ecological vulnerability assessment for ecological conservation and environmental management[J]. Journal of Environmental Management, 2018,206:1115-1125.
- [12] 冉圣宏,金建君,薛纪渝. 脆弱生态区评价的理论与方法[J]. 自然资源学报,2002,17(1):117-122.
- [13] 付博,姜琦刚,任春颖,等. 基于神经网络方法的湿地生态脆弱性评价[J]. 东北师大学报:自然科学版,2011,43(1):139-143.
- [14] 封建民,郭玲霞,李晓华. 基于景观格局的陕北资源富集区生态脆弱性评价:以陕西省神木县为例[J]. 水土保持通报,2015,35(4):271-276.

(下转第 262 页)

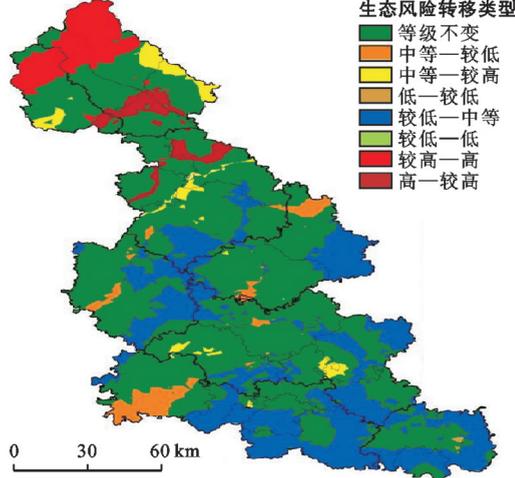
- 调性分析:以环渤海地区 27 个城市为例[J]. 生态经济, 2017,33(5):25-28.
- [3] Ullah K M, Mansourian A. Evaluation of land suitability for urban land-use planning: Case study Dhaka City[J]. Transactions in GIS, 2016,20(1):20-37.
- [4] Nobel M, Imran B H. Changes of land use with urban growth: A study on Cox's Bazar, Bangladesh[J]. Scientific & Engineering Research, 2017,8(4):1321-1326.
- [5] 蔚霖. 河南省建设用地集约利用与城镇化耦合协调关系分析[J]. 干旱区资源与环境, 2016,30(2):20-25.
- [6] 李佳佳, 罗能生. 城镇化进程对城市土地利用效率影响的双门槛效应分析[J]. 经济地理, 2015,35(7):156-162.
- [7] 李平光, 李松, 郭路明, 等. 新疆地区城市土地集约利用与城镇化耦合协调性分析[J]. 浙江农业学报, 2014,26(6):1688-1695.
- [8] 陈永林, 谢炳庚, 李晓青, 等. 2003—2013 年长沙市土地利用变化与城市化的关系[J]. 经济地理, 2015,35(1):149-154.
- [9] 王晋良. 大连城市化进程与土地利用的关系[J]. 中国人口·资源与环境, 2009,19(1):59-63.
- [10] 吕越, 陈忠清. 浙江省城镇化与生态—经济—环境耦合发展与动态计量[J]. 水土保持通报, 2016,36(5):261-265.
- [11] 田雨, 张彬. 呼包鄂城市群府际合作问题研究[J]. 内蒙古社会科学: 汉文版, 2016,37(1):187-192.
- [12] 钱宏胜, 岳汉秋, 梁亚红, 等. 河南省城市土地集约利用与城市化耦合协调性评价[J]. 水土保持研究, 2015,22(4):348-353.
- [13] 王伟娜, 宋戈, 孙丽娜. 哈尔滨市土地利用效益耦合关系研究[J]. 水土保持研究, 2012,19(2):116-120.
- [14] 席娟, 张毅, 杨小强. 陕西省城市土地利用效益与城市化耦合协调发展研究[J]. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2013,47(1):117-123.
- [15] 王芳萍, 师燕, 姚步青, 等. 西宁市土地利用效益与新型城镇化耦合协调度研究[J]. 水土保持研究, 2016,23(6):253-259.
- [16] 张明斗, 莫冬燕. 城市土地利用效益与城市化的耦合协调性分析: 以东北三省 34 个地级市为例[J]. 资源科学, 2014,36(1):8-16.
- [17] 左乃先, 白永平, 左京平, 等. 城市土地利用效益与城市化耦合协调发展研究: 以陕甘宁 27 个城市为例[J]. 水土保持研究, 2015,22(6):267-272.
- [18] 白硕, 杨永春, 史坤博, 等. 中国西部河谷型城市土地利用效益与城市化耦合协调发展研究[J]. 世界地理研究, 2016,25(6):87-95.

(上接第 242 页)

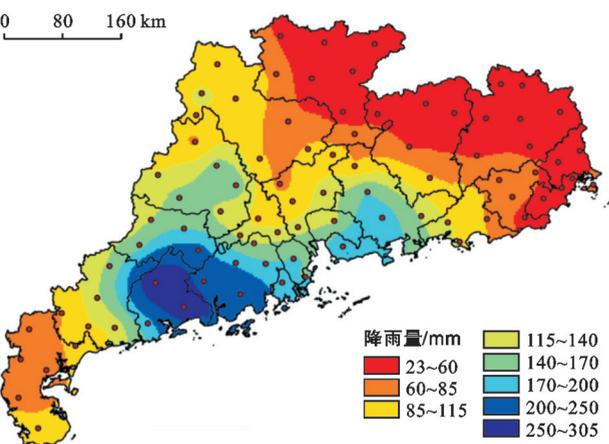
- [15] Song Guobao, Chen Yu, Tian Meirong, et al. The Ecological Vulnerability Evaluation in Southwestern Mountain Region of China Based on GIS and AHP Method[J]. Procedia Environmental Sciences, 2010(2):465-475.
- [16] 齐姗姗, 巩杰, 钱彩云, 等. 基于 SRP 模型的甘肃省白龙江流域生态环境脆弱性评价[J]. 水土保持通报, 2017,37(1):224-228.
- [17] 马骏, 李昌晓, 魏虹, 等. 三峡库区生态脆弱性评价[J]. 生态学报, 2015,35(21):7117-7129.
- [18] 李永化, 范强, 王雪, 等. 基于 SRP 模型的自然灾害多发区生态脆弱性时空分异研究: 以辽宁省朝阳县为例[J]. 地理科学, 2015,35(11):1452-1459.
- [19] 王军邦, 王居午, 叶辉, 等. 2000—2012 年全国气温和降水 1 km 网格空间插值数据集[J]. 中国科学数据, 2017,2(1):73-80.
- [20] 王耕, 韩冬雪. 1964—2014 年大连市降雨侵蚀力时空演变分析[J]. 中国水土保持, 2017(11):54-56, 67.
- [21] 赵国卫, 赵大庆, 大连市气象志编纂委员会. 大连市气象志[M]. 北京: 气象出版社, 2014:109-151.
- [22] 蒋玉玲, 张戈. 大连市地质灾害评价研究[J]. 国土与自然资源研究, 2018(2):13-18.
- [23] 付晶莹, 江东, 黄耀欢. 中国公里网格人口分布数据集 [DB/OL]. 全球变化科学研究数据出版系统, 2014. DOI:10.3974/geodb.2014.01.06.V1.
- [24] 黄耀欢, 江东, 付晶莹. 中国公里网格 GDP 分布数据集 [DB/OL]. 全球变化科学研究数据出版系统, 2014. DOI:10.3974/geodb.2014.01.07.V1.
- [25] 郭宾, 周忠发, 苏维词, 等. 基于格网 GIS 的喀斯特山区草地生态脆弱性评价[J]. 水土保持通报, 2014,34(2):204-207.
- [26] Chen Yun, Yu Jia, Khan S. Spatial sensitivity analysis of multi-criteria weights in GIS-based land suitability evaluation[J]. Environmental Modelling & Software, 2010, 25(12): 1582-1591.
- [27] Xu Erqi, Zhang Hongqi. Spatially-explicit sensitivity analysis for land suitability evaluation [J]. Applied Geography, 2013,45:1-9.
- [28] 赵小娟, 叶云, 周晋皓, 等. 珠三角丘陵区耕地质量综合评价及指标权重敏感性分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(8):226-235.
- [29] 黎敏. 耦合系统下的城市脆弱性评价研究[D]. 辽宁大连: 辽宁师范大学, 2018.



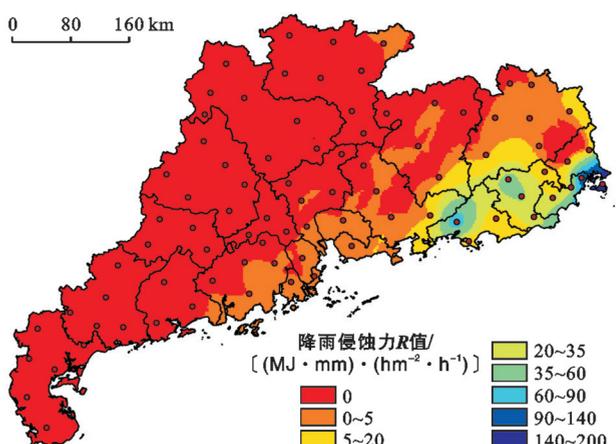
附图7 2015年沱江流域生态风险等级分布(第228页)



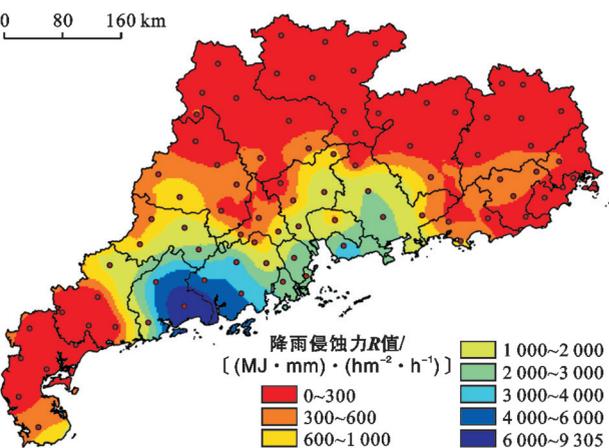
附图8 2005—2015年沱江流域生态风险转移特征(第228页)



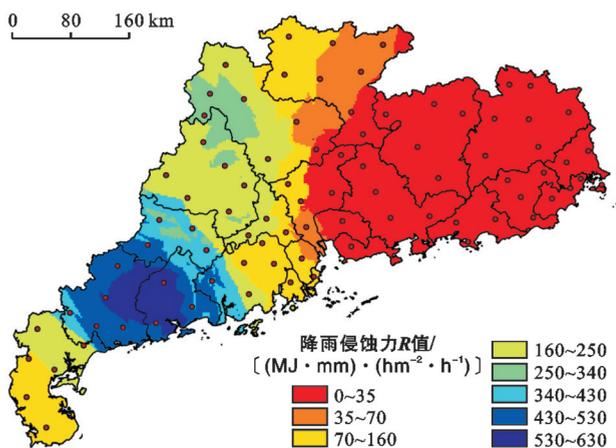
附图9 2018年“山竹”台风期间广东省降雨分布特征(第233页)



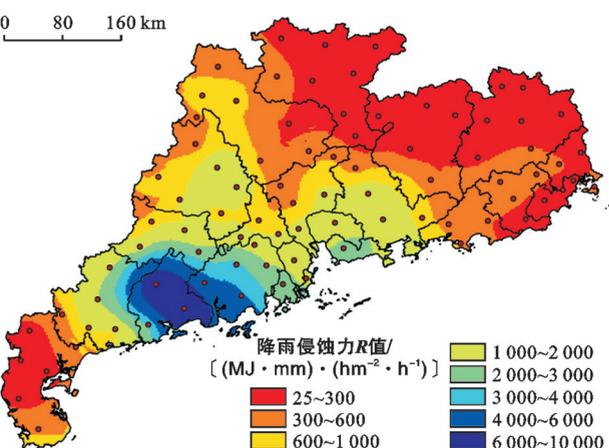
附图10 20180915广东省降雨侵蚀力分布特征(第233页)



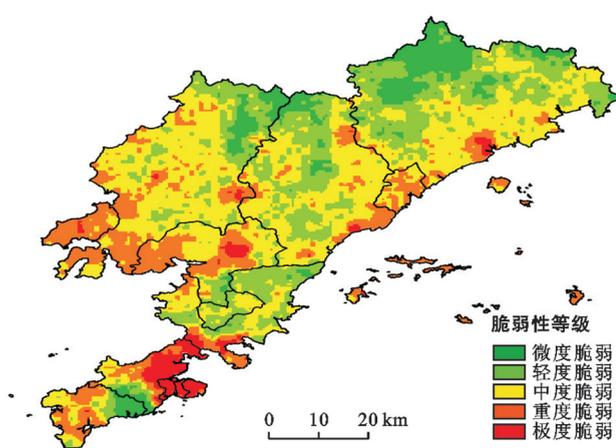
附图11 20180916广东省降雨侵蚀力分布特征(第234页)



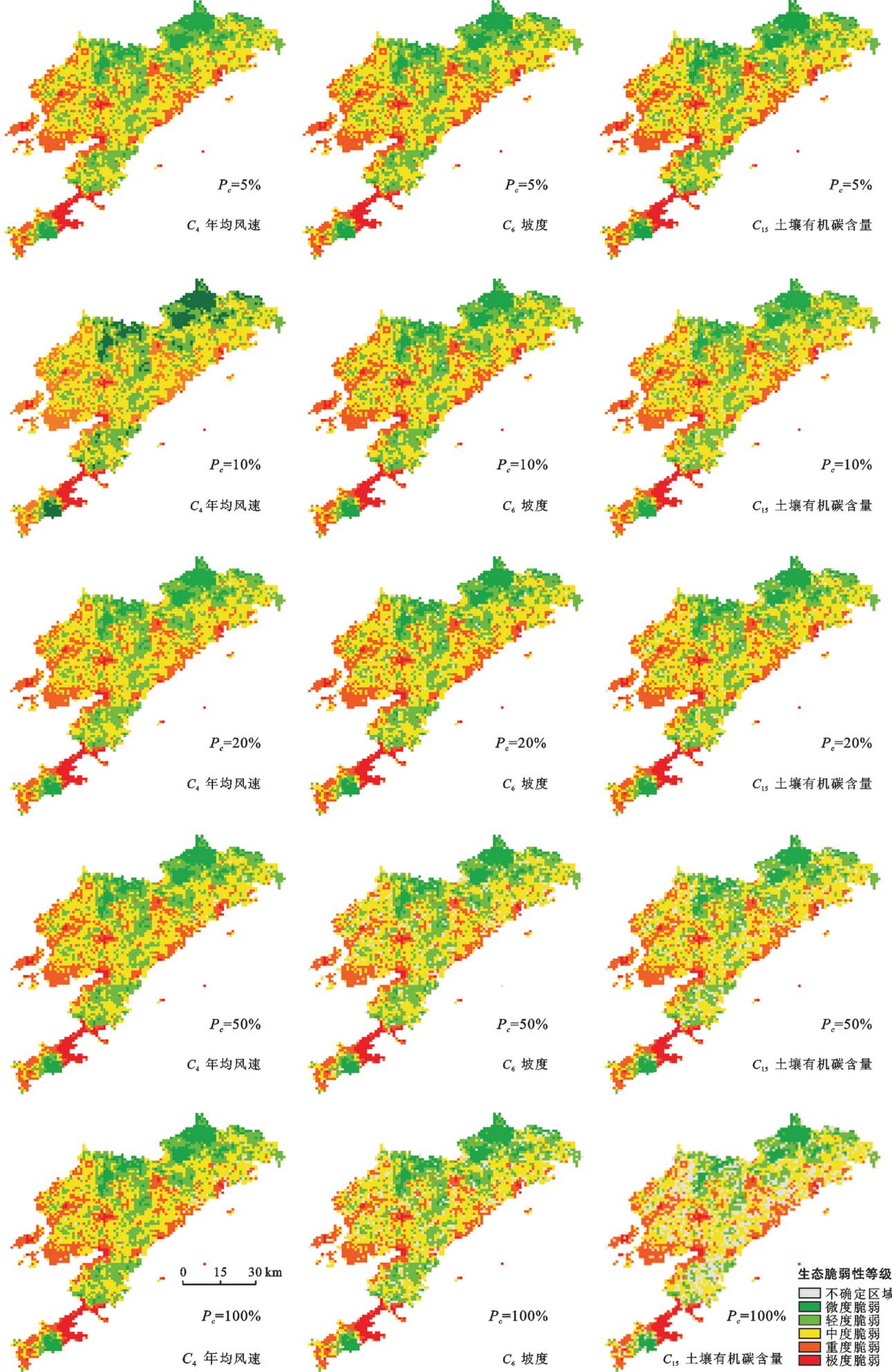
附图12 20180917广东省降雨侵蚀力分布特征(第234页)



附图13 20180915—17广东省降雨侵蚀力分布特征(第234页)



附图14 大连市生态脆弱性空间分布(第240页)



注： P_c 为权重变化率。

附图15 大连市生态脆弱性区域分布(第240页)