

DOI: 10.5846/stxb201801110087

徐秋阳,王巍巍,莫罹.京津冀地区景观稳定性分析与评价.生态学报,2018,38(12): - .

Xu Q Y, Wang W W, Mo L. Analysis and evaluation of landscape stability in Beijing-Tianjin-Hebei region. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(12): - .

京津冀地区景观稳定性分析与评价

徐秋阳, 王巍巍, 莫 罹*

中国城市规划设计研究院, 北京 100044

摘要:景观稳定性是景观生态学中的一个复杂又重要的论题,其在景观生态学的不同研究中,研究与表征方法各异,但京津冀地区景观稳定性的研究相对较少。以京津冀地区为研究范围,以斑块密度(PD)、总边缘对比度指数(TECI)、香农多样性指数(SHDI)等6项景观指数,通过ArcGIS 10.2和Fragstats软件处理遥感影像解译数据;计算其1980、2000和2010年份的景观稳定性,并对不同年份的计算结果进行分析、评价与对比。研究表明,从1980年至2010年,京津冀地区水域湿地、耕地及林草的总面积在波动,但显然这30年间其分布呈破碎化趋势;景观极稳定及极不稳定的区域面积在不断扩大;河北南部、西北部和东北部景观极不稳定区域和北京、天津、河北西南及河北东部的极稳定区域面积在增加;北京、天津、唐山等城市景观稳定性逐步增强,而涿鹿县、文安县、宣化县等城市景观稳定性逐步降低。本文对景观稳定性的表征方式、分析与对比的方法做了探索,以期在今后大尺度景观稳定性的定量分析与时空对比提供参考。

关键词:京津冀地区;土地利用;景观稳定性;景观指数

Analysis and evaluation of landscape stability in Beijing-Tianjin-Hebei region

XU Qiuyang, WANG Weiwei, MO Li*

China Academy of Urban Planning and Design, Beijing 100044, China

Abstract: Landscape stability is a complex and important topic in landscape ecology, and the research and characterization methods in different landscape ecology studies vary considerably. However, there are relatively few studies on the landscape stability in Beijing-Tianjin-Hebei region. Therefore, the present study characterized, analyzed, evaluated, and compared the landscape stability of Beijing-Tianjin-Hebei region in 1980, 2000, and 2010 using six landscape indexes, such as Patch Density (PD), Total Edge Contrast Index (TECI), and Shannon's Diversity Index (SHDI). Remote sensing image interpretation data were processed and analyzed using ArcGIS 10.2 and Fragstats. The results showed that the total area of water and wetland, cultivated land and forest, and grassland fluctuated in Beijing-Tianjin-Hebei region, and their distribution was apparently more fragmented over the past 30 years. The areas of extremely stable and unstable regions have been expanding continuously, e.g., the extremely unstable areas in the South, Northwest, and Northeast Hebei Province, and extremely stable areas in Beijing, Tianjin, and eastern Hebei Province have increased. The landscape stability of Beijing, Tianjin, and Tangshan gradually improved, but the landscape stability of Zhuolu, Wen'an, and Xuanhua counties gradually decreased. By enhancing the methods of characterizing, analyzing, and comparing landscape stability, this study could provide a reference for quantitative analyses and spatio-temporal comparisons of large-scale landscape stability in the future.

Key Words: Beijing-Tianjin-Hebei region; land use; landscape stability; landscape index

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0503001)

收稿日期:2018-01-11; 修订日期:2018-05-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 807661943@qq.com

景观稳定性在景观生态学中是一个复杂与重要的论题,其缘起于生态稳定性,但具体的概念、研究与表征方式在学界并不统一^[1]。Forman 用抗性、持续性、惰性、弹性^[2],邬建国用抗变性、复原性、持续性和变异性^[3],徐化成用持久性、恢复力和抵抗力等属性来总结生态系统的稳定性^[4]。

由于景观稳定性尚没有统一的概念,其研究与表征方法也各异,因此近年来国内外与景观稳定性相关的研究呈现出多种研究方式、研究对象、研究尺度及计算公式。由于景观平衡中的干扰和恢复在时间、空间尺度上关系十分复杂^[5],Skopek^[6]、Ivan^[7]、Gobattoni^[8]等对生态稳定性、景观稳定性的评价方式进行了探索。一些研究将景观稳定性应用于城市或某类生态系统的景观生态质量、景观格局的分析与评价中,采用的研究方法多为选取衡量景观稳定性的各类指标,通过主成分分析法来确定各指标的权重,构建景观稳定性评价模型。然而,各个研究的景观稳定性评价模型中所采用的各类指标、指数或因子都不尽相同,朱永恒等选取土地利用结构指数、自然景观多度指数、农业土地利用多样性等指数^[9];彭保发等选取斑块数、形状指数、优势度等 12 个景观指数^[10];彭建等采用景观多样性、景观破碎度、景观聚集度及景观分维度 4 个景观指数^[11]来评价城市的景观稳定性;Crews-Meyer 采用斑块散布于并列指数 (IJI, Interspersion/Juxtaposition Index)、景观面积比例 (PCT, Percentage landscape area)、平均斑块分维数 (MPFD, Mean Patch Fractal Dimension) 等指标在不同年代间的差异大小来衡量景观稳定性^[12];王旭丽等构建山地基质的比例稳定性及斑块特征稳定性公式来表征景观稳定性^[13];罗格平等则认为绿洲景观的稳定性与香农多样性指数和均匀性指数密切相关^[14];胡文英等则用景观斑块面积和比例的变化来评价梯田的景观稳定性^[15];崔文举等选取边缘密度、景观形状指数、最大斑块密度等 10 个景观指数;肖化顺等选取森林生态系统的 12 个景观指数,张洪云等选取湿地生态系统的温度、水文、人类居住农业活动、香农多样性等因子,同样通过主成分分析得到各指数、因子权重,构建表征热带森林、森林和湿地景观的稳定性的模型^[16-18]。此外,一些研究将景观指数的分析应用到区域规划、生态功能区划定中,根据等级斑块动态理论,以及认为景观破碎化程度越高,景观稳定性越差,选取蔓延度 (CONTAG, Contagion Index)、斑块密度 (PD, Patch Density) 和总边缘对比度指数 (TECI, Total Edge Contrast Index) 构建景观稳定性的指数表达式^[19-20]。

目前,国内虽然已经对城市、小区域及某一特定生态系统等进行了景观稳定性的研究,但京津冀区域景观稳定性的研究相对较少,因此,本文将研究范围选定在尺度较大的京津冀地区,探究如何利用景观指数构建景观稳定性计算公式,以及如何对不同年份的景观稳定性分析、对比与评价,以期为今后相似尺度的景观稳定性定量分析与时空对比提供参考。

1 研究区概况

京津冀地区包含两市一省,即北京市、天津市两个直辖市和河北省,是我国最重要的政治和文化中心,大部分地区属于海河流域,随着城市化的快速发展,区域内部资源、环境、与生态问题也日益凸显^[21]。在京津冀协同发展的背景下,京津冀城市群迅速发展,在区域层面研究环境、生态问题是具有现实意义的。本文以京、津、冀三者行政区边界为研究范围,研究 1980、2000 和 2010 三个年份的景观稳定性。

2 研究方法

2.1 数据处理

基础数据为经过 ArcGIS 10.2 校核纠正的中科院遥感所解译的 1980、2000 和 2010 三年的京、津、冀土地利用数据,数据精度为 30 m,总面积为 21.6 万 km²。由于数据来源与解译方式一致,能够保证各期数据包含同样的水田、旱地、有林地等 24 种地类(图 1),便于横向、纵向对比。京津冀地区耕地类(水田、旱地)与林草类(有林地、灌木林地、高中低覆盖度草地等)面积占比较高,其次为建设用地(城镇建设用地、农村居民点及其他建设用地)及水域湿地类(河渠、湖泊、水库坑塘等)。

2.2 景观稳定性模型构建

由于景观指数能够高度浓缩景观格局信息,定量反映其结构组成和空间配置^[22],因此,本文也同样选择

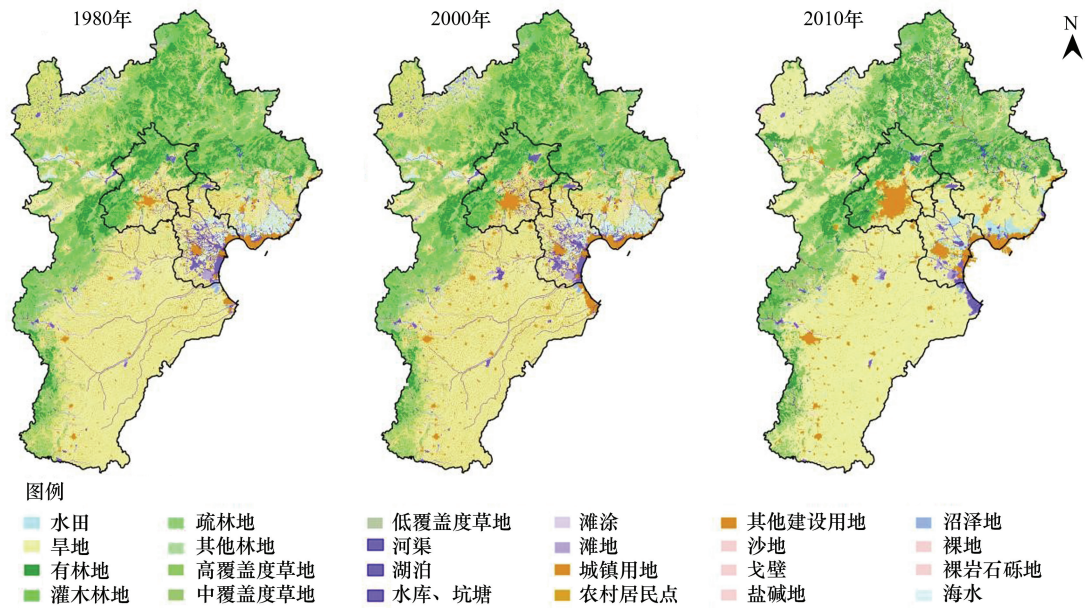


图 1 三期京津冀土地利用图

Fig.1 Land use of Beijing-Tianjin-Hebei region in three times

景观指数来构建衡量景观稳定性的模型。

由于很多景观指数之间不满足相互独立的统计性质^[23],且大多指数之间有极高的相关性^[24],因此,在选择景观指数时,单个景观指数应当能较好地描述景观格局,反映景观格局与过程之间的联系,指数体系中的各个景观指数应当具有相互独立性,实际应用时景观指数应具有较强的纵向和横向比较能力^[25]。此外,模型的构建不是越复杂越冗余越好^[24-26],此外,由于尽管指数作为描述性量度不能直接用于统计检验,在整个景观需要作为一个样本分析时,需要景观所属变量总体的特征数(平均数和方差)^[22]。故结合京津冀实际情况,选择景观镶嵌体层面的密度指标——斑块密度(PD)、形状指标——面积加权平均形状指数(AWMSI, Area-Weighted Mean Shape Index)、边缘指标——总边缘对比度指数(TECI)、多样性指标——香农多样性指数(SHDI, Shannon's Diversity Index)、聚散性指标——聚集度指数(AI, Aggregation Index)、蔓延度指数(CONTAG)六种相关性相对较小的指数来表征景观稳定性^[19],其中,景观稳定性的计算公式为:

$$S = \frac{C}{P \times T} \quad [19, 24]$$

式中, S 代表景观稳定性(Landscape Stability), C 代表蔓延度指数(CONTAG), P 代表斑块密度(PD), T 代表总边缘对比度指数(TECI)。景观镶嵌体的蔓延度越高,斑块密度、总边缘对比度越小,则景观稳定性越高,当前的景观系统土地类型越不容易因干扰或扰动发生改变。其余三种景观指数的总体特征数(即平均数、极值、方差等)可作为比较不同时期景观稳定性是否发生显著变化的依据。

2.3 分析过程

首先,以京津冀行政边界为研究范围,利用 ArcGIS 10.2 的 Fishnet 工具将其划分为 $20 \text{ km} \times 20 \text{ km}$ 的网格,裁去研究范围以外的多余网格,最终形成 629 个采样方格,并为其编号。然后,利用 ArcGIS 10.2 的分析工具中的提取分析将土地利用的矢量数据按方格批量分割,利用转换工具批量将分割的矢量数据转为栅格数据,形成 629 个 TIF 格式的栅格数据。接着,将栅格数据批量导入 Fragstats 4.2 中,输入类别描述(Class description)及边缘对比度(Edge Contrast, 表 1)文件,选择所需的景观镶嵌体层面的 6 项景观指数进行批量分析,得到 LAND 文件形式的分析结果,导入 Excel 表中进行综合分析,得到景观稳定性的矢量结果。最后,利用渔网格生成网格点,将景观稳定性归一化后的数值连接进入网格点,通过样条函数(Spline)插值法得到京

表 1 边缘对比度权重设置

Table 1 Edge contrast settings																								
地类名称 Land type	水田 Paddy field	旱地 Dry field	有林地 Closed forest	灌木林 Shrubs	疏林地 Open forest	其他林地 Other forest	高覆盖 度草地 High coverage grass	中覆盖 度草地 Mode- rate coverage grass	低覆盖 度草地 Low cover- age grass	河渠 River and canals	湖泊 Lake	水库坑塘 Reser- voir and pond	滩涂 Shoals	滩地 Tidal flat	城镇 用地 Urban land	农村 居民点 Rural resid- ential area	其他建 设用地 Other const- ruction land	沙地 Sand land	戈壁 Gobi desert	盐碱地 Saline hland	沼泽地 Marshland	裸地 Bare land	裸岩石 砾地 Bare rock gravel	海水 Sea
地类代码 Land code	11	12	21	22	23	24	31	32	33	41	42	43	45	46	51	52	53	61	62	63	64	65	66	99
11	0	0.1	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
12	0.1	0	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
21	0.3	0.3	0	0.1	0.1	0.1	0.3	0.3	0.3	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.9	0.9	0.9	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.5
22	0.3	0.3	0.1	0	0.1	0.1	0.3	0.3	0.3	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.9	0.9	0.9	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.5
23	0.3	0.3	0.1	0.1	0	0.1	0.3	0.3	0.3	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.9	0.9	0.9	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.5
24	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1	0	0.3	0.3	0.3	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6	0.9	0.9	0.9	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.5
31	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0	0.1	0.1	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.9	0.9	0.9	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4
32	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.1	0	0.1	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.9	0.9	0.9	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4
33	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.1	0.1	0	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.9	0.9	0.9	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.4
41	0.3	0.3	0.6	0.6	0.6	0.6	0.4	0.4	0.4	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.8	0.8	0.8	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.2
42	0.3	0.3	0.6	0.6	0.6	0.6	0.4	0.4	0.4	0.1	0	0.1	0.1	0.1	0.8	0.8	0.8	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.2
43	0.3	0.3	0.6	0.6	0.6	0.6	0.4	0.4	0.4	0.1	0.1	0	0.1	0.1	0.8	0.8	0.8	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.2
45	0.3	0.3	0.6	0.6	0.6	0.6	0.4	0.4	0.4	0.1	0.1	0.1	0	0.1	0.8	0.8	0.8	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.2
46	0.3	0.3	0.6	0.6	0.6	0.6	0.4	0.4	0.4	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0.8	0.8	0.8	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.2
51	0.3	0.3	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0	0.1	0.1	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
52	0.3	0.3	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.1	0	0.1	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
53	0.3	0.3	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.1	0.1	0	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
61	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.9	0.9	0.9	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
62	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.9	0.9	0.9	0.1	0	0.1	0.1	0.1	0.1	0.2
63	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.9	0.9	0.9	0.1	0.1	0	0.1	0.1	0.1	0.2
64	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.9	0.9	0.9	0.1	0.1	0.1	0	0.1	0.1	0.2
65	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.9	0.9	0.9	0.1	0.1	0.1	0	0.1	0.1	0.2
66	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.4	0.4	0.4	0.4	0.4	0.9	0.9	0.9	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0.1	0.2
99	0.3	0.3	0.5	0.5	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.9	0.9	0.9	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0

津冀景观稳定性的渐变曲面分布图。

渔网分割方格选择 20 km×20 km 的大小有三种考虑:研究面积的大小,基础数据的精度,以及每个方格内包含数量适中的各类斑块,以使得后期利用 Fragstats 4.2 分析各网格栅格时能够较为准确、充分地分析景观镶嵌体层面的密度、形状、边缘、多样性及聚散性。

因斑块具有不同的边界类型:曲线或直线、渐变或突变、硬或软,具有直线、突变和硬的边界的斑块与其他斑块之间具有较高的对比度^[27],即具有相对整齐边界的人工斑块(例如旱地、城镇用地)与其他斑块之间具有较高的对比度。据此,在设置不同地类斑块间的边缘对比度时,遵循以下原则:硬边界(建设用地、水田、旱地等)与软边界(各类林地与草地等)之间>硬边界与中性硬度边界(河渠、湖泊、水库坑塘等)之间>软边界与软边界之间。此外,生态功能相似的地类之间,例如湖泊与水库坑塘之间的边缘对比度相对较低(表 1)。

3 结果与分析

综合 1980、2000 和 2010 年 3 期的土地利用类型变化(图 2),将 629 个栅格方格作为 6 项景观指数的总体而统计特征数的表格(表 2),以及三期景观稳定性分布图(图 3),分析京津冀地区景观稳定性。

近三十年京津冀建设用地不断增加,水域、湿地和耕地先减少后上升,而林草经历了先增加后减少。从景观指数上来看,PD 和 AWNSI 的平均数上升、PD 方差的小幅上升都表明地类斑块更加破碎,形状更加不规则;而 TECI 平均数、方差皆持续上升表明人工的高对比度“硬边界”增加;CONTAG 平均数的上升和 AI 平均数的下降表明地类斑块的聚集度在下降,更加趋于分散、扩展和蔓延,栅格内斑块之间聚集及蔓延程度的差异在逐步减小;SHDI 平均数的不断上升表明栅格内的斑块丰富度上升,分布更加均匀。虽然水域湿地、耕地及林草的总面积在波动,但显然这三十年间它们的分布呈现更加破碎化的状态。

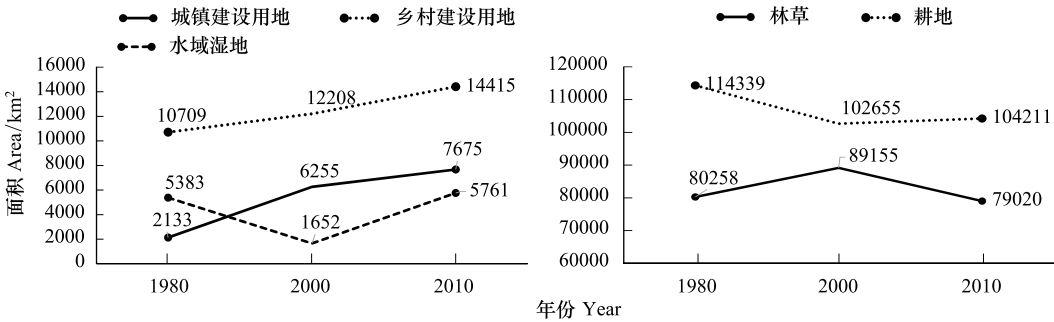


图 2 三期京津冀土地利用变化图
Fig.2 Land use change of Beijing-Tianjin-Hebei region in three times

表 2 三期京津冀景观指数统计特征

Table 2 Landscape index statistical characteristics of Beijing-Tianjin-Hebei region in three times		1980	2000	2010	趋势 Trend
斑块密度 PD	平均数	1.05	1.05	1.19	先持平后上升→↑
Patch Density	方差	42.77	42.79	44.41	持续上升↑
面积加权平均形状指数 AWMSI	平均数	5.91	5.96	6.14	持续上升↑
Area-Weighted Mean Shape Index	方差	4.77	4.69	4.47	持续下降↓
总边缘对比度指数 TECI	平均数	25.85	26.15	27.02	持续上升↑
Total Edge Contrast Index	方差	16.57	16.71	22.82	持续上升↑
蔓延度指数 CONTAG	平均数	69.17	68.62	68.98	持续上升↑
Contagion Index	方差	110.98	97.10	89.30	持续下降↓
香农多样性指数 SHDI	平均数	1.13	1.15	1.17	持续上升↑
Shannon's Diversity Index	方差	0.24	0.22	0.22	下降后持平→↓
聚集度指数 AI	平均数	96.20	96.18	96.17	持续下降↓
Aggregation Index	方差	4.64	4.41	4.15	持续下降↓

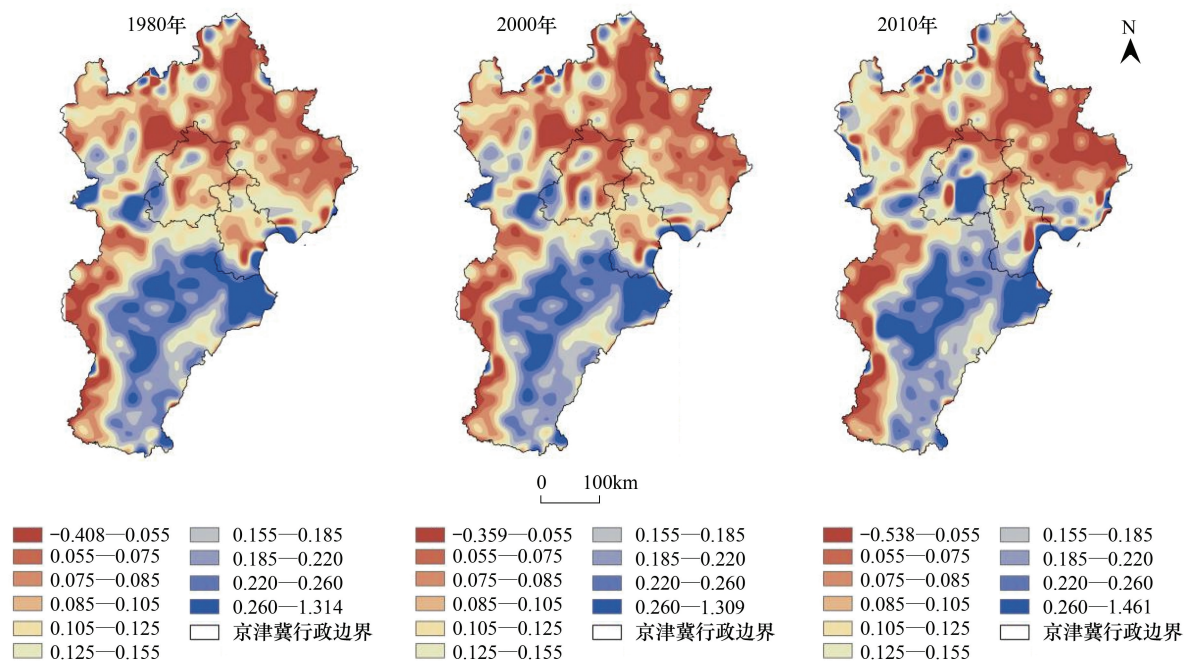


图3 三期京津冀景观稳定性分布图

Fig.3 Landscape stability of Beijing-Tianjin-Hebei region in three times

从景观稳定性分布图来看,地类斑块相对完整、边界清晰的区域景观稳定性更高。山地至平原,林、草、田、水、城等多种地类交错分布的过渡地带景观稳定性较低,如河北东北部、西北部和西南部;而河北中部及东南部主要为平原,地类主要为田与城,其景观稳定性相对较高。

从1980年至2010年,极稳定及极不稳定的区域面积在不断扩大,例如河北南部、西北部和东部景观极不稳定区域和北京、天津、河北西南及河北东部的极稳定区域面积在增加。尤其北京、天津、唐山等城市随城市建成区面积的不断增加,人工边界越发明显,其中心城区的景观稳定性逐步增强;而河北西北部(万全县、怀安县、阳原县、涞水县、涿鹿县等)、东北部(宽城满族自治县、遵化市、昌黎县等)与南部(武安市、宁晋县、故城县等)部分区域处于林、草、耕地、城市交界的位置处,因城镇建设用地的不断扩张,或林、草、耕地的破碎化,导致地类斑块聚集度下降,蔓延度上升,边界愈发复杂,景观稳定性逐步降低(图4)。

4 讨论与应用

从景观稳定性变化的结果来看,城市等级较高,建设用地相对集中连片发展的城市的总体景观稳定性在提高,典型城市为北京和天津;而城市等级较低,建设用地相对分散布局与发展的县级市、县城总体景观稳定性在降低,典型县城为文安县、涿鹿县。城市集约存量的发展有助于周边森林、水系、耕地等的完整保护与修复,减少人工干预,使得区域景观斑块相对完整,提高景观稳定性;而县城内分散的城乡用地在用地扩张过程中更易干扰周边完整的森林、水系、耕地斑块,发生斑块破碎化,降低区域景观稳定性。

因此,从提高京津冀景观稳定性,增强区域抗干扰能力的角度,建议城乡在未来发展中采用以下建设、保护与修复方式:

在城乡建设过程中,集约紧凑布局建设用地,存量发展,控制城市开发边界,划定“三区三线”,避免城市无序蔓延;

严格保留林、草、水域湿地等相对完整的斑块,划定生态红线,同时修补破碎的斑块,加强水系连通,使其构成相对稳定的生态系统;同时构建生态廊道加强斑块之间的联系,促进生物的迁徙、物质与能量的交换;整理、集中破碎化的耕地;

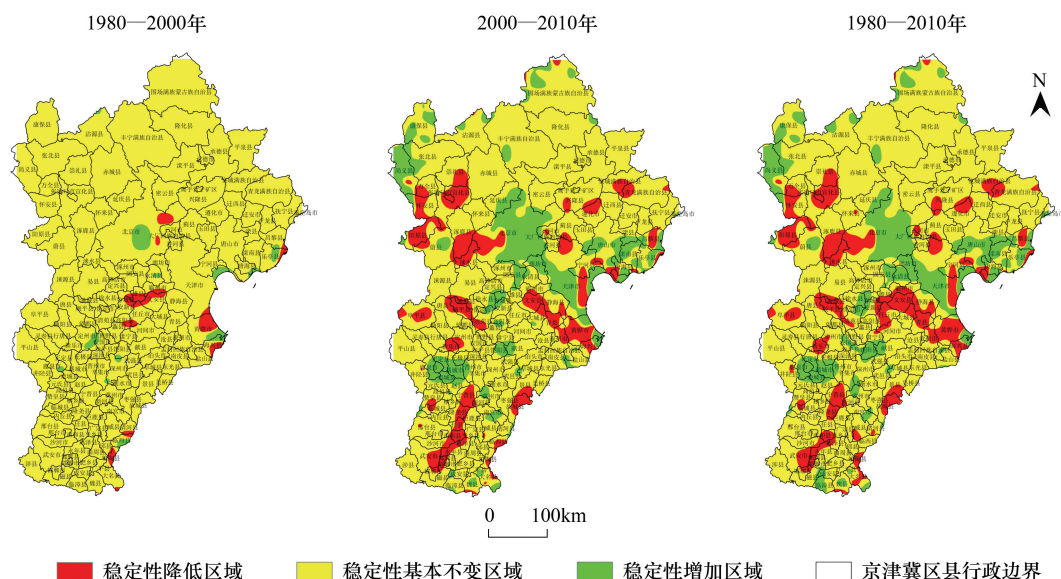


图4 三期京津冀景观稳定性变化图

Fig.4 Landscape stability change of Beijing-Tianjin-Hebei region in three periods

针对景观稳定性较差或持续变差的区域,形成流域修复、治理方案。

5 结语

尽管景观指数在景观生态学中已经广泛应用,但是其不同分析尺度上对景观特征的反映及与生态学的过程联系在很大程度上尚未得到解答,因此,准确地解释景观指数、分析结果,并建立格局指数与生态过程之间的联系,以及确定同一研究范围内不同时期的景观特征是否存在统计学和生态学上的显著差异并不总是很容易的^[22,26]。这需要通过紧密结合研究对象的实际情况,合理筛选景观指数构建模型进行表征。此外,后期可通过实地调研辅以多样的研究方法以验证其准确性。

参考文献(References):

- [1] 刘惠明,林伟强,张璐. 景观动态研究概述. 广东林业科技, 2004, 20(1): 67-70.
- [2] Forman R T T, Godron M. Landscape Ecology. New York: John Wiley & Sons, 1986.
- [3] 邬建国. 生态学范式变迁综论. 生态学报, 1996, 16(5): 449-460.
- [4] 徐化成. 景观生态学. 北京: 中国林业出版社, 1996.
- [5] Turner M G, Romme W H, Gardner R H, O'Neill R V, Kratz T K. A revised concept of landscape equilibrium: disturbance and stability on scaled landscapes. Landscape Ecology, 1993, 8(3): 213-227.
- [6] Skopek V, Sterbacek Z, Vachal J. A method of approach to landscape stability. Part 2: Ecooptimization of experimental territorial landscape segment in Bohemian forest. Environmental Management, 1991, 15(2): 215-225.
- [7] Ivan P, Macura V, Belcakova I. Various Approaches to evaluation of ecological stability // Proceedings of the 14th SGEM GeoConference on Ecology, Economics, Education and Legislation. Sofia: STEF92 Technology, 2014, 2: 799-806.
- [8] Gobattoni F, Lauro G, Monaco R, Pelorosso R. Mathematical models in landscape ecology: stability analysis and numerical tests. Acta Applicandae Mathematicae, 2013, 125(1): 173-192.
- [9] 朱永恒, 濮励杰, 赵春雨. 景观生态质量评价研究——以吴江市为例. 地理科学, 2007, 27(2): 182-187.
- [10] 彭保发, 陈端吕, 李文军, 王亚力. 土地利用景观格局的稳定性研究——以常德市为例. 地理科学, 2013, 33(12): 1484-1488.
- [11] 彭建, 王仰麟, 刘松, 吴健生, 李卫锋. 海岸带土地持续利用景观生态评价. 地理学报, 2003, 58(3): 363-371.
- [12] Crews-Meyer K A. Agricultural landscape change and stability in northeast Thailand: historical patch-level analysis. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2004, 101(2/3): 155-169.
- [13] 王旭丽, 刘学录. 基于RS的祁连山东段山地景观稳定性分析. 遥感技术与应用, 2009, 24(5): 665-669.

- [14] 罗格平, 陈嘻, 周可法, 叶民权. 三工河流域绿洲时空变异及其稳定性研究. 中国科学(D 辑), 2002, 32(6): 521-528.
- [15] 胡文英, 沈琼. 元阳哈尼梯田景观稳定性评价. 云南地理环境研究, 2011, 23(1): 11-17.
- [16] 崔文举, 舒清态, 刘满宾, 师静. 西双版纳热带森林景观稳定性研究. 云南地理环境研究, 2010, 22(2): 29-33.
- [17] 肖化顺, 付春风, 张贵. 流溪河国家森林公园森林景观稳定性评价. 中南林业科技大学学报, 2007, 27(1): 88-92.
- [18] 张洪云. 基于控制—干扰—响应机制的湿地景观稳定性分析与评价[D]. 哈尔滨: 哈尔滨师范大学, 2016.
- [19] 刘茜, 王文懿, 林生, 曾维华. 景观格局分析在区域规划中的应用研究. 安徽农业科学, 2012, 40(15): 8587-8590.
- [20] 刘茜, 曾维华, 陈栋, 周耀中. 基于景观生态学的生态功能区划研究——以重庆市长寿区为例. 环境科学与技术, 2009, 32(7): 170-174, 189-189.
- [21] 王少剑, 方创琳, 王洋. 京津冀地区城市化与生态环境交互耦合关系定量测度. 生态学报, 2015, 35(7): 2244-2254.
- [22] 邬建国. 景观生态学——格局、过程、尺度与等级(第二版). 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [23] O'Neill R V, Riitters K H, Wickham J D, Jones K B. Landscape pattern metrics and regional assessment. Ecosystem Health, 1999, 5(4): 225-233.
- [24] 何鹏, 张会儒. 常用景观指数的因子分析和筛选方法研究. 林业科学研究, 2009, 22(4): 470-474.
- [25] 陈文波, 肖笃宁, 李秀珍. 景观指数分类、应用及构建研究. 应用生态学报, 2002, 13(1): 121-125.
- [26] Riitters K H, O'Neill R V, Hunsaker C T, Wickham J D, Yankee D H, Timmins S P, Jones K B, Jackson B L. A factor analysis of landscape pattern and structure metrics. Landscape Ecology, 1995, 10(1): 23-39.
- [27] Forman R T T, Moore P N. Theoretical foundations for understanding boundaries in landscape mosaics // Hansen A J, Di Castri F, eds. Landscape Boundaries. New York: Springer, 1992: 236-258.