

DOI: 10.5846/stxb201406161248

柏龙, 田呈明, 洪承昊, 康峰峰, 陈京元, 宋德文, 刘红高. 湖北宜昌松林景观格局与松材线虫流行的关系及驱动力. 生态学报, 2015, 35(24): - .
Bai L, Tian C M, Hong C H, Kang F F, Chen J Y, Song D W, Liu H G. The relationship between pine forest landscape patterns and pine wilt disease in Yichang, Hubei province. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(24): - .

湖北宜昌松林景观格局与松材线虫流行的关系及驱动力

柏 龙¹, 田呈明^{1,*}, 洪承昊², 康峰峰¹, 陈京元³, 宋德文⁴, 刘红高⁴

1 北京林业大学林学院, 北京 100083

2 中国林业科学院森林生态环境与保护研究所, 北京 100091

3 湖北省林业科学研究院, 武汉 430075

4 湖北省宜昌市夷陵区森防站, 宜昌 443100

摘要: 景观格局对能量流、物质流和物种流等生态学过程影响显著。为了探究区域生境差异对病虫害发生及扩散的影响, 论文以湖北省宜昌市夷陵区松材线虫病为对象, 结合区域森林资源二类清查矢量数据和松材线虫病普查资料, 运用景观生态学的原理和方法, 探究景观格局对松材线虫病发生的影响。研究结果表明: 1) 松林景观类型百分比、平均斑块面积、自然连接度和聚合度与松材线虫病的发病率成正相关; 2) 松林斑块的粒度结构分析表明, 中、小斑块能抑制松材线虫病的发生, 巨斑块、超大斑块对松材线虫的发生有利; 3) 从景观干扰上分析显示人类活动强度与松材线虫病发病率成正相关; 4) 在景观尺度水平上, 景观的破碎度大、多样性指数高、蔓延度指数小、斑块形状简单、受人类活动影响大的乡镇松材线虫病发病率高。通过斑块类型尺度和景观尺度两个水平上的分析可知, 在夷陵区乡镇尺度上, 由小斑块松林组成且斑块聚集度低、景观破碎化程度低的景观格局对松材线虫病有一定的抑制作用。研究结论对当地松材线虫病的防治就有较好的参考价值。

关键词: 松材线虫病; 景观格局; 人类活动; 湖北宜昌

The relationship between pine forest landscape patterns and pine wilt disease in Yichang, Hubei province

BAI Long¹, TIAN Chengming^{1,*}, HONG Chenghao², KANG Fengfeng¹, CHEN Jingyuan³, SONG Dewen⁴, LIU Honggao⁴

1 College of Forest, Beijing Forest University, Beijing 100083, China

2 Research Institute of Forest Ecological Environment and Protection, Beijing 100091, China

3 Hubei Academy of Forestry, Wuhan 430075, China

4 Station of Pest and Disease Control and Quarantine of Yiling District, Yichang city, Yichang 443100, China

Abstract: Landscape patterns have significant and complex effects on a variety of ecological processes, including the flow of matter and nutrients and the distribution and movement of species. To explore the impacts of regional habitat differences on the occurrence and spread of forest diseases and insect pests, we focused on the pine wood nematode in Yichang in the Yiling district of Hubei Province. Using forest inventory vector data collected by the Forestry Survey and Planning Institute of Hubei and census data of pine wilt disease in the Yiling district from 2007 to 2012, collected by the Station of Pest and Disease Control and Quarantine, we examined the effects of forest landscape patterns on pine wilt disease, as predicted by

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项(201204501)

收稿日期: 2014-06-16; 网络出版日期: 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chengmt@bjfu.edu.cn

landscape ecology theory. Seven towns continuously infected with pine wilt disease from 2007 to 2012 were selected as the research area. The landscape of the Yiling district were classified into 10 types by ArcGis10 according to the intensity of human activities, the land use classification, and the dominant tree species group. To characterize the research area at the level of patches within a class, we calculated the landscape patch area, mean patch area, percentage of landscape patch area, patch cohesion index, aggregation index, geometric mean nearest neighbor distance, and the interspersed-juxtaposition index. And the pine forest landscape were classified into 5 grades by patches' area size (A_{patch}): the small patch ($A_{\text{patch}} < 10 \text{ hm}^2$), the middle patch ($10 \leq A_{\text{patch}} < 50 \text{ hm}^2$), the large patch ($50 \leq A_{\text{patch}} < 100 \text{ hm}^2$), the super patch ($100 \leq A_{\text{patch}} < 200 \text{ hm}^2$), the huge patch ($A_{\text{patch}} \geq 200 \text{ hm}^2$). At the landscape level, we calculated the edge density, Shannon's diversity index, the contagion index, and the area-weighted mean patch fractal dimension. Landscape pattern indices were calculated using FRAGSTATS3.4. Morbidity was determined as the ratio of the annual average area infected with pine wilt disease compared with the total pine forest area of any one town. Correlation analysis between landscape pattern indices and morbidity was performed using SPSS18 software. The main results were as follows: 1) The percentage of pine forest landscape patch area, the average patch size, and the degree of natural connection and polymerization of patches were all positively correlated with pine wilt disease morbidity; 2) Analysis of the granularity of the pine forest landscape showed that the proportion of area composed of small- and middle-patch sizes was negatively correlated with pine wilt disease morbidity, while the proportion of huge-patch and super-patch sizes was positively correlated; 3) The intensity of human activity, which can interfere with the landscape, was also positively correlated with pine wilt disease morbidity; and 4) At the landscape level, as edge density and Shannon's diversity index increased, pine wilt disease morbidity increased. The contagion index, in contrast, was negatively correlated with pine wilt disease morbidity, as was the area-weighted mean patch fractal dimension. These results suggest that fragmentation of the entire landscape will facilitate the spread of pine wilt disease. Thus, using the analysis of landscape patterns at the patch and landscape level, we can infer that, in the Yiling district, a forest landscape composed of small pine forest patches with a low aggregation index and low degree of fragmentation of the entire landscape can somewhat prevent the spread of pine wilt disease. The findings of this study can be used as a guide to aid the prevention and control of pine wilt disease in the Yiling district.

Key Words: pine wilt disease; landscape pattern; human activities; Hubei Yichang

松材线虫病(Pine Wilt Disease)是一种由松材线虫(*Bursaphelenchus xylophilus*)引起的对松树(*Pinus* spp.)有致命危害的松树流行病^[1],因其具有发病致死速度快、传播蔓延迅速、防治难度大等特点,被称为“松树癌症”。其自然传播媒介昆虫为墨天牛属(*Monochamus* spp.),在亚洲,松墨天牛(*Monochamus alternates*)是其关键传媒,但松墨天牛的自然扩散距离有限,其长距离蔓延主要借助人传播^[2-3]。

景观格局一般是指景观组成单元的类型、数目以及空间分布与配置,它是自然因素和人类经营活动综合作用下景观异质性在空间上的具体表现,决定着资源地理环境的分布形成和组分,制约着各种生态功能,能够影响景观中物质和养分的流动,生物种的存在、分布和运动,群落的演替,干扰的传播等生态学过程^[4-8]。森林病虫害的扩散蔓延是景观生态学上典型的生态学过程。在森林景观系统中,植被空间格局是景观特征的代表因子之一,而植被是森林病虫害发生的主体。植被的分布特征如土壤因素、地形因素、气象因素、林分基本特征等环境因子和植物种类组成及其空间格局如植被斑块大小、形状、密度、分布构型等会直接影响林中病原的发生、扩散及传播。森林生物多样性和景观尺度的异质性相结合有可能成为未来森林病虫害生态调控的安全策略^[9]。

目前,国内有关景观格局对病虫害的影响的研究多见于农业研究,发现景观结构能影响生物间的相互作用^[10],不同农业景观格局对麦蚜和寄生蜂种群影响不同^[11-12]。从农田景观的角度,在大时空尺度范围内合理规划农业生态景观格局,合理安排种植结构和农事活动,进行农田生境管理,是控制农田病虫害的新途径,也

能够为农业景观生物多样性保护、实施害虫区域性生态控制提供思路 and 手段,是实现害虫种群控制的可持续性的有效手段^[13-15]。有关景观格局对森林病虫害的影响的研究,特别是关于景观格局对松材线虫病的影响的研究比较罕见。研究发现人为干扰、寄主优势度、地形和寄主生长势是影响松墨天牛种群分布的主要环境因子^[16],同时寄主树种的抗性等级及松树所占的比例严重影响群落对松材线虫病的抵抗力^[17]。对受害马尾松林的时空格局的分析表明聚集指数逐渐增强,反映出受害程度加重^[18]。王娟等和习妍认为景观的破碎化、多样性和异质性越高越有利于松材线虫病的发生,但王娟认为松林景观的聚集度和连通性能阻碍松材线虫病的发生,习妍则认为松林斑块的聚集度越高、距离越短,越有利于松材线虫病的发生^[19-20]。

国外学者就景观格局对生物多样性格局、种群动态、生态功能特征选择、生物保护策略的影响提出了一系列理论假说,认为景观结构对调节生物多样性格局和生态学过程有重要影响,但是这些影响十分复杂,需要田间试验和理论模型的进一步研究^[21]。进一步的研究发现生态系统中的物种多样性可以缓和传染病的流行^[22],对于多寄主病害,森林物种多样性可以降低病害的发病风险,因为替代寄主可以作为病害的缓冲区^[23]。对松干蚧的研究表明寄主生境的开放性和连接度会加快森林虫害的入侵,景观多样性可以减缓森林虫害的入侵速度^[24]。

本文在前人研究的基础上,研究松林景观格局的特征对松材线虫病发病特征的影响,并深入分析松林斑块粒级结构和在景观生态学角度上的人类活动强度对松材线虫病的影响,为制定防御松材线虫病的安全景观格局打下理论基础。

1 研究区概况

宜昌市夷陵区地处长江中、上游结合部,位于东经 110°51'58"—111°39'30",北纬 30°32'33"—31°28'30",地势西北高,东南低,差异较大,有山地、丘陵、河谷等多种地貌,中低山构成地貌的主体,山地占全区土地总面积的三分之二以上。该区属于中亚热带季风气候,气候适宜,雨量充沛,全区平均降水量在 997—1370 mm 之间,年平均气温 16.6℃。全区河网密布,长江葛洲坝水利枢纽工程和举世瞩目的三峡大坝均在夷陵区境内。夷陵区土地总面积约 3358.87 km²,其中林业用地约 2683.40 km²,约占全区总面积的 79.89%。植物种类繁多,以松柏科、樟科、冬青科等为主要用材树种,以柑桔、板栗、茶叶等为主要经济树种,松属植物主要是马尾松,面积达 586.67 km²,为松材线虫病的发生发展提供了良好条件。

夷陵区所辖 11 个乡镇,1 个街道办事处,1 个国有林场,1 个经济开发区,总人口 51.7 万人(2010 年)。全区交通发达,经济活跃,人为干扰对森林景观的影响较大。本文选取自 2007 年起连续发病,调查资料翔实的太平溪镇、乐天溪镇、三斗坪镇、小溪塔街道办事处(包括经济开发区)、黄花乡、龙泉镇、鸦鹊岭镇共 7 个乡镇作为研究区域,如图 1。



图 1 研究区地理位置

Fig. 1 Location of the research area

2 数据来源与研究方法

2.1 景观数据和松材线虫病历史数据来源

湖北省林业勘察规划院提供的基于森林资源二类清查(2009—2010 年)的小班调查数据,经过 ArcInfo10

处理得到的矢量数据;夷陵区森防站提供的 2007 年至 2012 年的松材线虫病秋季普查资料。

2.2 研究方法

2.2.1 景观分类及制图

根据森林景观生态学分类原则和方法^[25],参考《湖北省森林资源规划设计调查操作细则》,以土地利用类型、森林群落优势树种(组)和人类影响强度为主要依据^[8,26],将研究区景观分为松林(主要是马尾松林)、其它针叶林、阔叶林、针阔混交林、竹林、灌木林、农业景观(农田、旱地、果园、茶园、苗圃地)、水域、人工景观(城乡居民建设用地、工矿建设用地、交通建设用地和其它建设用地)和其它无林地共 10 种景观类型。

将研究区矢量数据导入 ArcGis10 软件包,经过提取图层、合并同类型小班等相关步骤,得到太平溪镇等 7 个乡镇的景观图,见图 2。

2.2.2 景观指数的计算

景观指数是为了测定景观格局对生态过程的影响而选择的描述复杂景观格局的简单数字^[27]。通过景观指数可以对景观的组成特征、空间配置、动态变化等进行定量的研究^[28]。

将研究区 7 个乡镇的景观图在 ArcGis10 软件支持下栅格化(栅格大小选定 100 m×100 m),之后导入 FragStats3.4 软件包计算景观指数。影响基本生态过程的空间格局指数包括:(1)斑块大小,影响单位面积的生物量、生产力、养分储存、物种多样性、内部种的移动和外来种的数量;(2)斑块形状,影响生物种的发育、扩散、收缩和迁移;(3)斑块密度,影响通过景观的“流”的速率;(4)斑块的分布构型,影响干扰的传播和扩散^[8]。本文在斑块层次上选择斑块类型面积 CA(Total Class Area)、景观类型百分比 PLAND(Percentage of Landscape Patch Area)、平均斑块面积 AREA_MN(Mean Patch Size)、周长面积分维数 PAFRAC(Perimeter-area Fractal Dimension)、斑块内聚力指数 COHESION(Patch Cohesion Index)、散布与并列指数 IJI(Interspersion-juxtaposition Index)、聚合度 AI(Aggregation Index)、平均几何最邻近距离 ENN_MN(Mean Nearest Neighbor Distance);在景观层次上选择边界密度 ED(Edge Density)、面积加权平均分维数 FRAC_AM(Area-weighted Mean Patch Fractal Dimension)、蔓延度指数 CONTAG(Contagion Index)、香农多样性指数 SHDI(Shannon's Diversity Index)。各指数的计算公式和描述及生态学意义见文献^[4,28-30]。

2.2.3 松材线虫病发病指标的确定

以各乡镇松材线虫病发病率(Morbidity)即年均发病面积 Area($A_{病}$)与松林面积($A_{松}$)之比($A_{病}/A_{松}$)(%)作为衡量各乡镇发病程度的指标。发病面积是以小班为单位进行统计,由当地林业部门每年秋末进行统计,如果一个松林小班中发现松针呈红黄色且不落针枯死的松树,则认为该小班受松材线虫病危害。

2.2.4 数据分析方法

分别以斑块类型尺度和景观类型尺度上的各景观格局指数作自变量,各乡镇松材线虫病发病率作因变量,通过 SPSS18.0 软件进行 Pearson 相关性分析,并作线性拟合,探求各乡镇景观格局指数、松林粒级结构与松材线虫病的相关关系。

3 结果与分析

3.1 研究区景观类型组成分析

研究区包含 7 个乡镇,总面积约 168798 hm²。7 个乡镇的各景观类型面积大小和各景观类型面积总和及

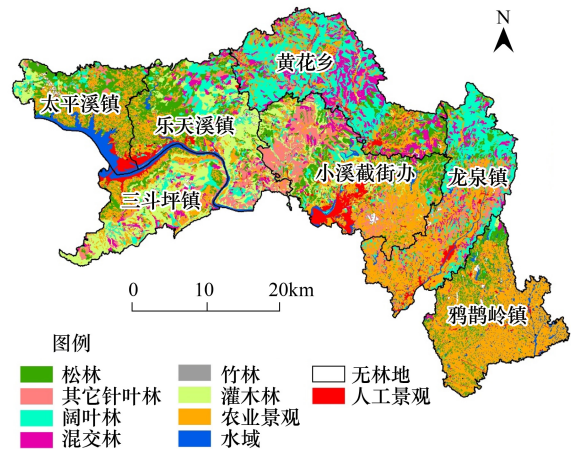


图 2 研究区各乡镇景观类型图

Fig. 2 Landscape type map of 7 towns

其所占研究区总面积比例见表 1。可以看出,松林在 7 个乡镇都有大面积分布,龙泉镇最小,为 1502 hm²,乐天溪镇最大,为 5938 hm²,总共 25021 hm²,占研究区总面积的 14.82 %。各景观类型所占研究区总面积从大到小依次为:农业景观>阔叶林>松林>灌木林>针阔混交林>其他针叶林>水域>人工景观>无林地>竹林。其中农业景观面积所占比例最大,达到 34.32 %,人工景观占 3.64 %,说明研究区农林业比较发达,城市发展较好,景观受人类干扰严重;林地(松林、针叶林、阔叶林、针阔混交林、竹林、灌木林)占 56.83 %,说明研究区森林覆盖率较高,森林保护较好;无林地和竹林分别占 0.65 %和 0.02 %,对研究区影响较小。

表 1 研究区景观类型组成

Table 1 The area of landscape components of 7 towns and its total area proportion in the research area

景观类型 Landscape type	乡镇 Town							合计 Total	面积比/% Percentage of area
	鸦鹊岭镇	龙泉镇	三斗坪镇	黄花乡	太平溪镇	小溪塔街办	乐天溪镇		
松林 Pinewood Forest	3773	1502	1617	2537	5197	4457	5938	25021	14.82
针叶林 Coniferous Forest	18	2370	1009	930	517	5345	2013	12202	7.23
阔叶林 Broad-leaved Forest	365	7602	1378	11578	922	2400	3174	27419	16.24
针阔混交林 Mingled Forest	185	2103	1103	6482	100	1759	1548	13280	7.87
竹林 Bamboo Forest	0	0	18	1	7	9	0	35	0.02
灌木林 Shrub wood	115	13	6841	126	1014	4072	5797	17978	10.65
水域 Water	1843	680	923	386	2018	831	1012	7693	4.56
无林地 Non-forest Land	218	121	83	67	225	236	147	1097	0.65
农业景观 Farming Landscape	17393	10570	4278	6044	4677	10230	4743	57935	34.32
人工景观 Artificial Landscape	399	757	581	732	735	2187	747	6138	3.64

3.2 斑块尺度上景观组分格局与松材线虫病发病程度的关系

3.2.1 松林景观格局与松材线虫病发病程度的关系

由图 3 可知,松林斑块面积百分比指数与松材线虫病发病率成正相关,但相关性低, $P=0.324$, $R^2=0.193$ 。由松林平均斑块面积可以看出各乡镇松林景观斑块破碎化程度差异较大,与松材线虫病发病率极显著正相关, $P<0.01$, $R^2=0.815$ 。斑块内聚力指数在 79.65—96.65 之间,各乡镇松林景观的物理连通度都较好,与松材线虫病发病率成正相关,但相关性不显著, $P=0.195$, $R^2=0.310$ 。聚合度指数与松材线虫病发病率显著正相关, $P<0.05$, $R^2=0.670$ 。7 个乡镇的平均几何最近邻距离,最大值 356.72 m,最小值 218.85 m,变化不大,在该尺度范围内,斑块之间的距离对松材线虫病的发生发展影响较小(图 3 E), $P=0.721$, $R^2=0.028$ 。周长面积分维数的取值范围是 $1 \leq \text{PAFRAC} \leq 2$,除了鸦鹊岭镇(1.66)外的 6 个乡镇的周长面积分维数取值变化为 1.50—1.56,变化很小,说明各乡镇的松林斑块的复杂程度比较接近,且与松材线虫病发病率相关性较低(图 3 F)。

3.2.2 松林斑块的粒级结构与松材线虫病发病程度的关系

斑块粒级结构是指不同大小级别的斑块数量、面积组成状况。为进一步探究不同斑块大小的松林对松材线虫病的影响,将各乡镇松林景观类型斑块按斑块面积分为 5 个规模等级,分别称为:小斑块($< 10 \text{ hm}^2$)、中斑块($10\text{—}50 \text{ hm}^2$)、大斑块($51\text{—}100 \text{ hm}^2$)、超大斑块($101\text{—}200 \text{ hm}^2$)、巨斑块($> 200 \text{ hm}^2$)。用各等级斑块的面积占各乡镇松林景观总面积的比例来描述各乡镇松林斑块的粒级结构^[31-32]。相关性分析发现松材线虫病发病率与小斑块、中斑块、大斑块、超大斑块、巨斑块的面积百分比由负相关逐渐变为正相关, P 值分别为 0.017、0.382、0.951、0.787、0.278,拟合优度 R^2 分别为 0.71、0.155、 8.42×10^{-4} 、0.016、0.228,大斑块对松材线虫病的发病率有促进作用,而小斑块对松材线虫病的发病率有抑制作用,特别是小斑块面积百分比与松材线虫病发病率显著负相关($P<0.05$)(图 4)。

3.2.3 人工景观格局与松材线虫病发病程度的关系

由图 5 可以看出,7 个乡镇的人工景观百分比分布在 1.64 %—6.94 %,与松材线虫病发病率成正相关, $P=0.368$,拟合优度 $R^2=0.164$ 。各乡镇人工景观散布与并列指数变化很大,在 35.06 %—89.05 %之间,人工景

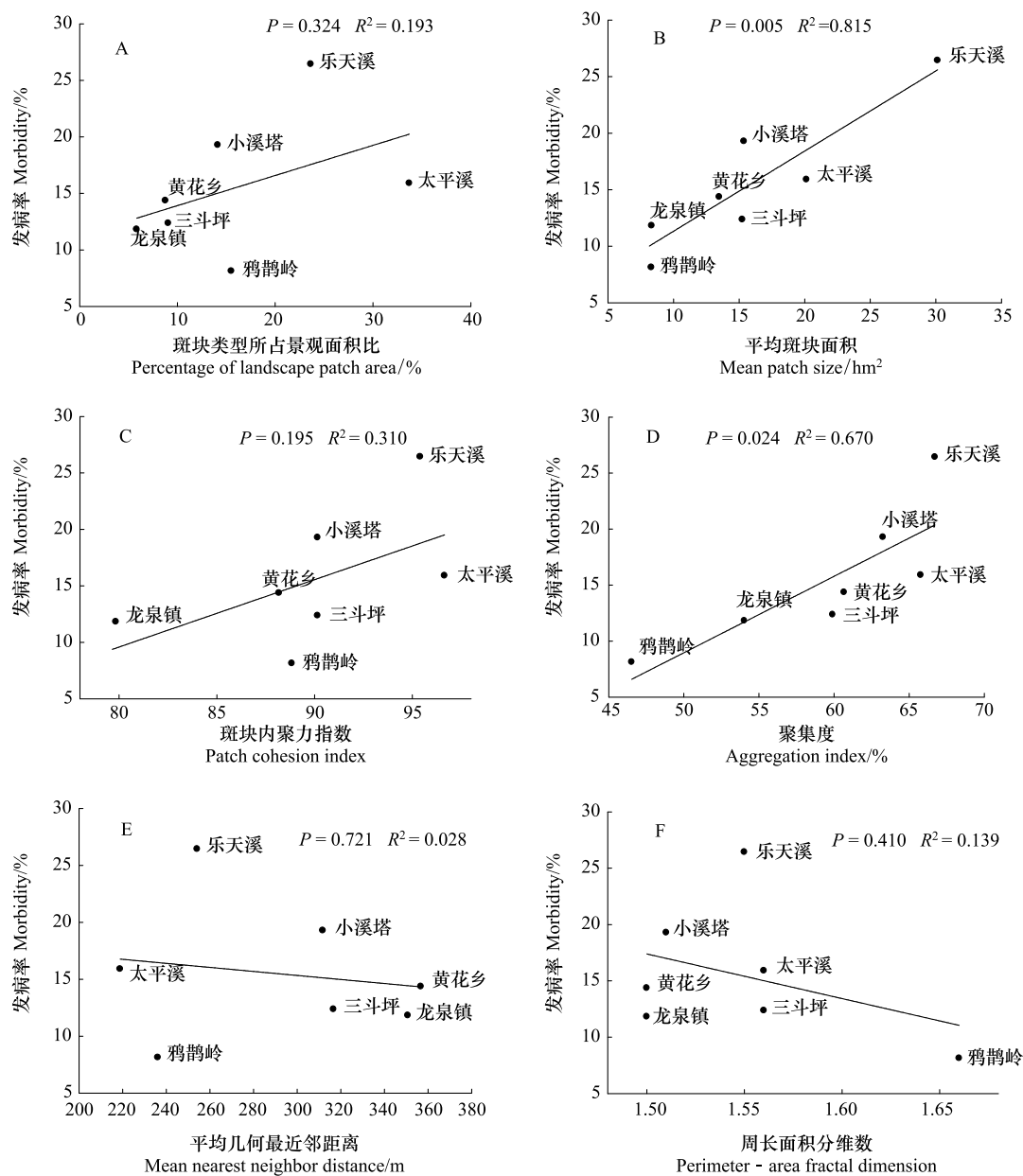


图3 各乡镇松林景观指数与松材线虫病发病率的关系

Fig. 3 The relationship of pine forest landscape index and morbidity of pine wilt disease of 7 towns

观分散情况差异很大,与松材线虫病发病率极显著正相关, $P < 0.01$,拟合优度 $R^2 = 0.874$ 。

3.3 景观尺度上景观格局指数与松材线虫病发病程度的关系

如图6所示,7个乡镇的边界密度指数在59.24—71.74之间,与松材线虫病发病率成正相关,但不显著, $P = 0.170$, $R^2 = 0.339$ 。香农多样性指数和蔓延度指数变化较大,说明7个乡镇的景观差异较大。香农多样性指数与松材线虫病发病率显著正相关, $P < 0.05$, $R^2 = 0.589$ 。蔓延度指数与松材线虫病发病率显著负相关, $P < 0.05$, $R^2 = 0.663$ 。各乡镇的面积加权的平均分维数变化比较接近,在1.18—1.28之间,但与松材线虫病发病率显著负相关, P 值为0.023, $R^2 = 0.676$ 。

4 结论和讨论

(1) 松林景观的总面积与松材线虫病的发病率呈少量的正相关。景观斑块类型面的大小直接制约着以

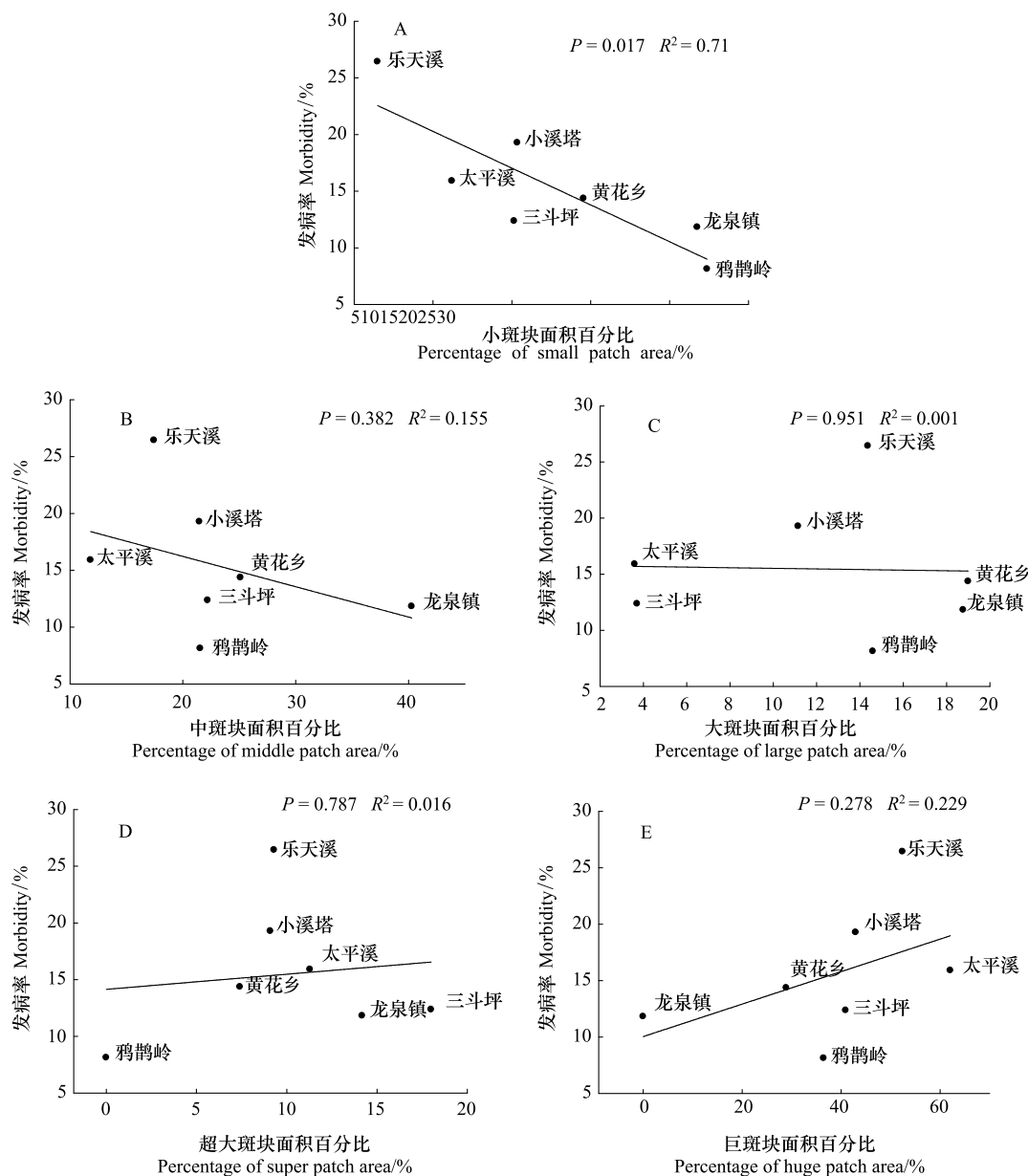


图 4 各乡镇松林景观粒级结构面积比例与松材线虫病发病率的关系

Fig. 4 The relationship of area proportion structure of pine landscape patches size and morbidity of pine wilt disease of 7 towns

此类型斑块作为栖息地的物种的丰度、数量及此生物种的繁殖等。松材线虫病以松林为生境,其发病率必然与松林面积的多少有关。松林景观平均斑块面积与松材线虫病的发病率极显著正相关。平均斑块面积是对生境破碎化的简单度量,值越小,破碎度越大,而一个地区的生境破碎化程度影响着该地区的生物可入侵性^[33]。同时,斑块的大小直接影响单位面积的生物量、生产力、养分储量及物种组成和多样性^[28],大斑块的松林能够为松材线虫病提供更好的生境。松林景观的聚合度与松材线虫病的发病率正相关。聚合度表示同质景观类型的聚集性和连通性特征^[28],生境的聚集程度和连通性影响着生物入侵后的传播扩散速度^[19]。松林景观的连接度与松材线虫病的发病率正相关,但是不显著。松林斑块的最邻近距离、周长面积分维数与松材线虫病的发病率相关性很低。习妍认为松林斑块的距离越近,越有利于松材线虫病的发生^[20],本文没有得出这样的结论,但有斑块之间距离越远,发病程度越低的趋势。可能原因是本研究区,松林斑块之间的距离相比于松墨天牛的最大扩散距离(3.3 km)^[3]和人为传播距离,显得微不足道。关于斑块之间的距离对松材线虫病的影响还需要更进一步的研究。

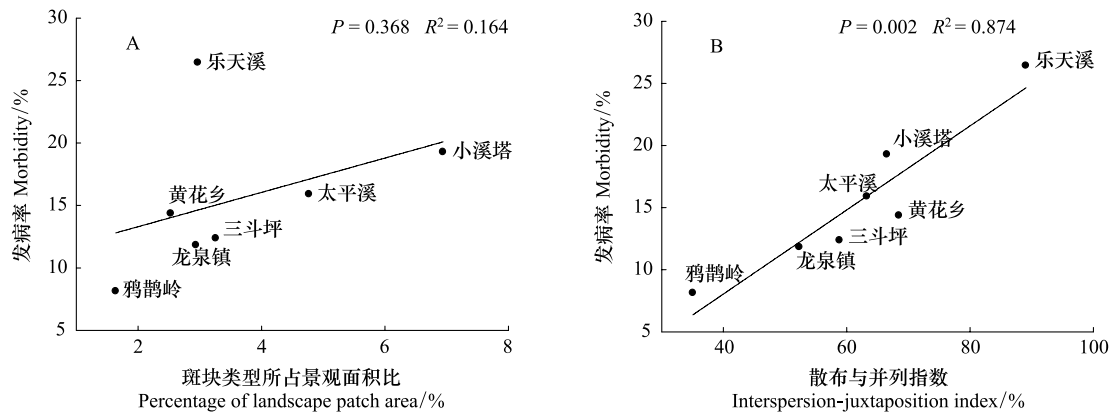


图5 人工景观格局与松材线虫病发病率的关系

Fig. 5 The relationship of human-made landscape index and morbidity of pine wilt disease

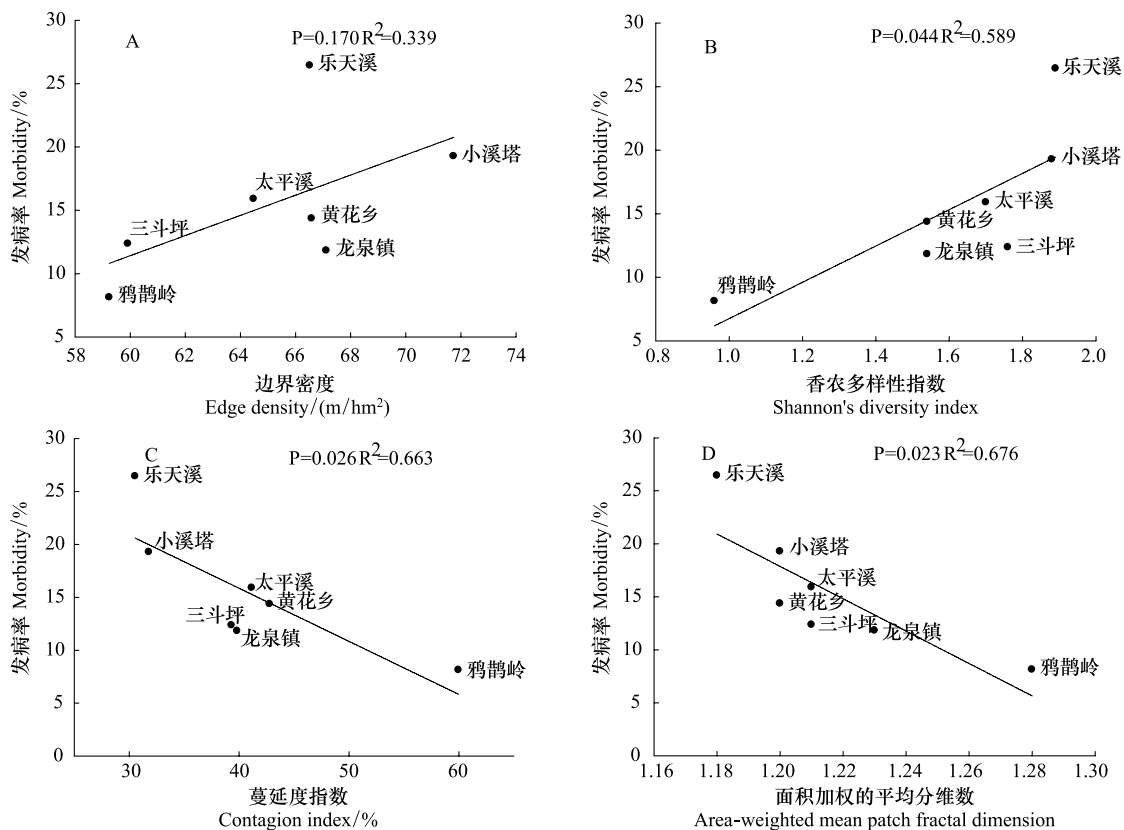


图6 总体景观指数与松材线虫病发病率的关系

Fig. 6 The relationship of landscape index and morbidity of pine wilt disease at landscape-level

(2) 松林斑块的粒级结构能影响松材线虫病的发病率,随着粒级结构的升高,各级斑块所占面积百分比与松材线虫病的发病率由负相关逐渐变为正相关。作者分析造成这一现象原因有二:一是一般来说,一个斑块中能量和矿物养分的总量与其面积成正比,大斑块能为松材线虫提供更多的能量和养分,同时大斑块所占面积比例越大,松林景观的连通性越好,聚合度越大,破碎度越小,越利于松材线虫病的发生发展;二是在对松材线虫病枯死松树择伐过程中,在小斑块的松林中显然更容易做到彻底清除病疫木且不造成传染,而大斑块中则很难以做到这一点。

(3) 景观尺度上,总体景观的边界密度与松材线虫病的发病率正相关,但是不显著。边缘密度是决定景

景观破碎化程度的主要指标,揭示了景观或景观类型边界被分割的程度,是景观破碎化程度的直接反映^[34]。总体景观的香农多样性指数与松材线虫病的发病率显著正相关。香农多样性指数反映了景观的异质性程度。景观破碎化和异质性受自然因素、生物因素和人为因素的影响^[4]。景观破碎化程度越高,异质性越高,受人类干扰越严重,侧面反映人类活动与松材线虫病有关。另外,王娟等认为,生境破碎化和景观异质性造成松材线虫这种适应能力强、传播速度快的外来入侵种的爆发,且生境破碎化导致风的影响增强,导致通过斑块间的能流物流增加,利于松墨天牛的飞行,从而促进了松材线虫病的扩散^[19]。总体景观的蔓延度指数与松材线虫病的发病率显著负相关。蔓延度指数是描述景观中不同景观类型的分配均匀程度或度量景观中不同斑块类型的非随机性或聚集程度,取值越大,代表景观由少数团聚的大斑块组成,取值越小,代表景观由许多小斑块组成,从另一个方面反映了景观的破碎化程度^[28]。总体景观的面积加权的平均分维数与松材线虫病发病率显著负相关。分维数与人类管理有密切关系,小的分维数意味着人类对景观的干扰大或地理条件单一,景观斑块形状趋于简单,故通过分维数大小可以判定景观要素受人类活动影响的大小^[35-37]。由此分析,受人类活动影响越大的乡镇,松材线虫病发病越严重。

景观空间格局与生态学过程的关系是景观生态学研究的核心和热点。景观的空间格局影响能量、物质以及生物在景观中的运动,能量、物质和生物的主要运动方式有扩散、物流和携带运动^[4],景观破碎化和人类活动无疑会加快这些运动。森林病虫害是一种常见的生态学过程,如何在景观尺度上将森林病理学原理与景观异质性对森林病虫害发生过程的综合影响有机地结合,是森林保护学研究领域所面临的挑战^[38]。探究景观空间格局与森林病虫害的相互关系在理论上可以定量分析景观空间格局、人为干扰、环境变化对病害传播的影响,在实践上则有助于规划土地利用方式、制定森林病虫害可持续治理的决策。

参考文献 (References):

- [1] 肖刚柔. 中国森林昆虫 (第二版). 北京: 中国林业出版社, 1992: 3-91.
- [2] 宁眺, 方宇凌, 汤坚, 孙江华. 松材线虫及其关键传媒墨天牛的研究进展. 昆虫知识, 2004, 41(2): 97-104.
- [3] 来燕学. 松墨天牛的飞行特性与防治松材线虫病的指导思想. 浙江林学院学报, 1998, 15(3): 320-323.
- [4] 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: 13-125.
- [5] Turner M G. Landscape ecology: The effect of pattern on process. Annual Review of Ecology and Systematics, 1989, 20: 171-197.
- [6] Gustafson E J, Gardener R H. The effect of landscape heterogeneity on the probability of patch colonization. Ecology, 1996, 77(1): 94-107.
- [7] Kitzberger T, Verblen T T. Fire-induced changes in northern Patagonian landscapes. Landscape Ecology, 1999, 14(1): 1-15.
- [8] 肖笃宁, 李秀珍, 高峻, 常禹, 张娜, 李团胜. 景观生态学 (第二版). 北京: 科学出版社, 2010: 1-37.
- [9] 梁军, 张星耀. 森林有害生物的生态控制技术与措施. 中国森林病虫, 2004, 23(6): 1-8.
- [10] 贺达汉, 赵紫华, 张大治. 草原景观下昆虫群落及种群对生境破碎化的反应. 草业学报, 2009, 18(6): 235-241.
- [11] 赵紫华, 石云, 贺达汉, 杭佳, 赵映书, 王颖. 不同农业景观结构对麦蚜种群动态的影响. 生态学报, 2010, 30(23): 6380-6388.
- [12] 赵紫华, 王颖, 贺达汉, 关晓庆, 辛明. 麦蚜和寄生蜂对农业景观格局的响应及其关键景观因子分析. 生态学报, 2012, 32(2): 472-482.
- [13] 段美春, 刘云慧, 张鑫, 曾为刚, 宇振荣. 以病虫害控制为中心的农业生态景观建设. 中国生态农业学报, 2012, 20(7): 825-831.
- [14] 赵紫华, 欧阳芳, 门兴元, 刘军和, 贺达汉, 戈峰. 生境管理—保护性生物防治的发展方向. 应用昆虫学报, 2013, 50(4): 879-889.
- [15] 郑云开, 尤民生. 农业景观生物多样性与害虫生态控制. 生态学报, 2009, 29(3): 1508-1518.
- [16] 朱彦鹏. 松墨天牛种群空间格局特征研究 [D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2009.
- [17] 石娟. 浙江松林生态系统对松材线虫入侵的抵御和恢复机制 [D]. 北京: 北京林业大学, 2005.
- [18] 王蕾. 基于“3S”技术的松材线虫入侵前后马尾松林动态变化研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2005.
- [19] 王娟, 牛树奎, 骆有庆, 梁丽壮. 浙江省富阳市森林景观格局与松材线虫病发病程度的关系. 科学技术与工程, 2006, 6(19): 3047-3052, 3206-3206.
- [20] 习妍. 浙江省舟山市定海区松材线虫病发生蔓延影响因素的初步研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2009.
- [21] Tschamtké, T, Tylianakis J M, Rand T A, Didham R K, Fahrig L, Batúry P, Bengtsson J, Clough Y, Crist T O, Dormann C F, Ewers R M, Fründ J, Holt R D, Holzschuh A, Klein A M, Kleijn D, Kremen C, Landis D A, Laurance W, Lindenmayer D, Scherber C, Sodhi N, Steffan-Dewenter I, Thies C, van der Putten W H, Westphal C. Landscape moderation of biodiversity patterns and processes-eight hypotheses. Biological Reviews, 2012, 87(3): 661-685.

- [22] Keesing, F, Holt R D, Ostfeld R S. Effects of species diversity on disease risk. *Ecology Letters*, 2006, 9(4): 485-498.
- [23] Haas, S E, Hooten M B, Rizzo D M, Meentemeyer R K. Forest species diversity reduces disease risk in a generalist plant pathogen invasion. *Ecology Letters*, 2011, 14(11): 1108-1116.
- [24] Rigot T, van Halder I, Jactel H. Landscape diversity slows the spread of an invasive forest pest species. *Ecography*, 2014, 37(7): 648-658.
- [25] 王仰麟. 景观生态分类的理论方法. *应用生态学报*, 1996, 7(增): 121-126.
- [26] 肖笃宁, 胡远满, 李秀珍. 环渤海三角洲湿地的景观生态学研究. 北京: 科学出版社, 2001: 1-20.
- [27] 布仁仓, 胡远满, 常禹, 李秀珍, 贺红土. 景观指数之间的相关分析. *生态学报*, 2005, 25(10): 2764-2775.
- [28] 郑新奇, 付梅臣. 景观格局空间分析技术及其应用. 北京: 科学出版社, 2010: 1-181.
- [29] 蔡亮, 郭烁. 基于面向对象方法的汶川大地震灾害土地覆盖变化. *生态学报*, 2008, 28(12): 5927-5937.
- [30] 黎聪, 李晓文, 郑钰, 宋晓龙, 曾桢. 衡水湖国家级自然保护区湿地景观格局演变分析. *资源科学*, 2008, 30(10): 1571-1578.
- [31] 郭晋平, 薛俊杰, 李志强, 田荣善. 森林景观恢复过程中景观要素斑块规模的动态分析. *生态学报*, 2000, 20(2): 218-223.
- [32] 郭晋平. 森林景观生态研究. 北京: 北京大学出版社, 2001: 82-88, 172-173.
- [33] 高增祥, 季荣, 徐汝梅, 谢宝瑜, 李典谟. 外来种入侵的过程、机理和预测. *生态学报*, 2003, 23(3): 559-570.
- [34] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 王仰麟. 景观生态学原理及应用 (第二版). 北京: 科学出版社, 2010: 86-91.
- [35] O'Neill R V, Krummel J R, Gardner R H, Sugihara G, Jackson B, DeAngelis D L, Milne B T, Turner M G, Zygmunt B, Christensen S W, Dale V H, Graham R L. Indices of landscape pattern. *Landscape Ecology*, 1988, 1(3): 153-162.
- [36] Hulshoff R M. Landscape indices describing a Dutch landscape. *Landscape Ecology*, 1995, 10(2): 101-111.
- [37] 陈文波, 肖笃宁, 李秀珍. 景观空间分析的特征和主要内容. *生态学报*, 2002, 22(7): 1135-1142.
- [38] 孙志强, 张星耀, 肖文发, 梁军, 张兆欣. 景观病理学: 森林保护学领域的新视角. *林业科学*, 2010, 46(3): 139-145.