

边缘效应的空间尺度与测度

周 婷, 彭少麟*

(中山大学有害生物控制与资源利用国家重点实验室, 广东 广州 510275)

摘要:综述了边缘效应的空间尺度类型以及在不同尺度上的测度方法。基于大量的研究整合,认为边缘效应空间尺度的划分,可以根据空间尺度的不同以及边缘效应形成和维持因素,分为大中小 3 个尺度类型,即大尺度的生物群区交错带、中尺度的景观类型之间的生态交错带和小尺度的斑块(生态系统)之间的群落交错区。大尺度主要是以植被气候带为标志的生物群区间的边缘效应,这种地带性的交错区主要受大气环境条件的影响。中尺度类型主要包括城乡交错带、林草交错带、农牧交错带等类型,是不同生态系统要素的空间交接地带,在物质能量等相互流动的作用下变得更为复杂。小尺度水平上是指斑块之间的交错所形成的边缘效应,受小地形等微环境条件及生物非生物等因子的制约,研究主要集中在群落边缘、林窗边缘和林线交错带等方面。对边缘效应测度的定量化研究有助于更加深入理解边缘效应。在大尺度水平上,边缘效应测度的研究主要是应用数量生态学等方法,研究不同气候带之间界线的划分及其物种分布的梯度规律性。中尺度水平上应用景观生态学的 3S 技术等方法,侧重于研究交错带的动态变化趋势及位置宽度的判定。小尺度水平上通过对距离边缘的长度,各群落中种群的数量、结构、多样性等定量指标的测定来构建测度公式,从而对边缘效应的强度进行量化,并反映边缘对群落的正负效应。总体上看,主要集中于中小尺度上,未来应该强化大尺度边缘效应测度的研究。

关键词:边缘效应;空间尺度;测度;交错带;边缘区

文章编号:1000-0933(2008)07-3322-12 中图分类号:Q143 文献标识码:A

Spatial scale and measurement of edge effect in ecology

ZHOU Ting, PENG Shao-Lin*

State Key Laboratory of Biocontrol, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, Guangdong, China

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(7): 3322 ~ 3333.

Abstract: Classification of spatial scale and the measurement of edge effect in ecology were reviewed in this paper. The spatial scales can be classified into large-scale (biome ecotone), meso-scale (ecological ecotone) and small-scale (community ecotone) through the formation and maintenance of edge effect in ecology based on the synthetic analysis of published literatures. The biome ecotone is influenced by climate, regional dominant vegetation, and terrain environment. The ecological ecotone usually distributed in the transitional region with remarkable habitat heterogeneity, which connects adjacent ecosystems and affects the flow of the energy and nutrient. Presently, the study of edge effect in ecology mainly focus on boundaries sensitivity which associate with the urban-rural ecotone, the forest-grassland ecotone, the agro-pastoral ecotone, the forest-farmland ecotone, the water-land ecotone, and the forest-swamp ecotone. As to the community ecotone which link with different patches in the internal of community, the previous studies focused on community edge, gap edge,

基金项目:国家自然科学基金资助项目(30670385, U0633002); 中山大学张宏达科学研究基金资助项目

收稿日期:2007-12-12; **修订日期:**2008-04-16

作者简介:周婷(1984~),女,山西晋城人,博士生,主要从事恢复生态学研究. E-mail: zhouting0606@126.com

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lsspsl@mail.sysu.edu.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 30670385, U0633002); the Scientific Research Fund, Hongda Zhang, Sun Yat-sen University

Received date:2007-12-12; **Accepted date:**2008-04-16

Biography: ZHOU Ting, Ph. D. candidate, mainly engaged in restoration ecology. E-mail: zhouting0606@126.com

and treelines. The borderlines of the different biome ecotones and the gradients of species distribution in the biome ecotone have been investigated through the method of the quantitative ecology. The dynamic change, location and width of the ecological ecotone have been studied using the Geographic Information System (GIS), Remote Sensing (RS) and Global Positioning System (GPS) technology and landscape ecology theory. As important indicators, the distance from edge, population, structures diversity determined for establishing models which can be applied to measure the intensity of edge effect and to decide the positive or negative impact on community. Although the study for the edge effect in ecology most reported in the meso-scale and the small-scale, however, the study on large-scale should be pay more attention as it's potential value in ecology and global change fields.

Key Words: edge effect; spatial scale; measurement; ecotone; edge zone

边缘效应的研究始于对群落的边缘长度和鸟类种群密度关系的研究^[1],随着认识的逐渐深入,边缘效应的概念和研究领域也在不断完善和扩展。一般认为,在两个或多个不同性质的生态系统(或其它系统)交互作用处,由于某些生态因子(可能是物质、能量、信息、时机或地域)或系统属性的差异和协合作用而引起系统某些组分及行为(如种群密度、生产力、多样性等)的较大变化,称为边缘效应^[2]。边缘效应作为重要的生态过程与物种保护、生境保护、群落动态、生态恢复^[3]和农林业生产等密切相关^[4~8]。

尺度问题已成为现代生态学的核心问题之一,这一观点已得到广泛认同^[9~11]。景观格局是空间相关、尺度依赖性的,理解景观的结构和功能需要多尺度信息^[12]。边缘效应导致景观水平上生态系统的改变,是景观生态学热点研究内容,在决定生态斑块的结构和动态方向上起到决定性作用^[13~15]。从由物种构成的群落,到不同群落组成的生态系统,以及多个生态系统形成的景观,不同的空间尺度之间是密切相关的^[16],但是,在不同的时间和空间尺度上占主导地位的生态学格局和过程是不同的^[17],区分时空尺度是研究的重要基础之一。同样,边缘效应在不同尺度上的机理及相关研究方法都有所不同,只有在明确尺度的基础上,结合相对应的研究方法,才能使研究结果更具科学性,从而对其进行合理的比较和评价。然而,迄今为止,有关边缘效应的空间尺度类型有所探索^[18]但尚未见系统论述。周婷等^[19]提出了边缘效应的空间尺度可分为3个尺度来研究,本文进一步对不同空间尺度上的边缘效应进行综述。

长期以来,边缘效应的研究主要集中在定性描述方面。显而易见,定性的研究并不能完全解释边缘效应的特点,对其测度的量化研究极为重要。但是由于边缘效应本身的复杂性,定量评价边缘效应目前还缺乏有效的方法,对其强度的测定以及边缘区域范围的确定一直处于不断的探索中。本文就各个尺度水平上的边缘效应测度也进行了论述,以期对边缘效应的量化研究提供理论参考。

1 大尺度类型:生物群区交错带(biome ecotone)

1.1 大尺度水平边缘效应研究

在全球的大尺度水平上,能够清晰区分对象单元的要害就是气候。在这个尺度上,植被的区域划分是以气候为指导原则的^[20],并形成生物群区的植被区划,与各个气候带相对应产生植被的地带性分布,主要包括纬向性、经向性的植被地带性分布,而由于海拔上升也会造成的相应的植被分异,称为海拔性植被分布。生物群区之间的交错区体现了大尺度水平上的边缘效应。

纬向性地带植被分布主要是气候的热量驱动的。我国东部的森林即体现出从北向南明显的纬度地带性。海拔性地带植被分布主要等效于纬向性地带植被分布。经向地带性植被分布主要是气候的水分驱动的,反映了由海洋性湿润气候向大陆性干燥气候的变化。如热带区域的热带雨林-热带季雨林-热带稀树草原-热带草原-热带荒漠就是典型的经向地带性植被分布。黄土高原处在东南季风与西北大陆性气候的过渡地带,黄土高原的植被在气候、地貌等因素共同作用下,自东南向西北,从湿润的森林植被区过渡到干旱的荒漠半荒漠植被区^[21]。其植被与气候梯度表现出明显的经向分布规律性。

气候带之间的界线并非是泾渭分明、一成不变的,而是过渡性的,渐变的,活动的,其差别之处在中间区域

变得模糊。生物群区之间的过渡区内,一种地带性的植被逐渐被另一种地带性植被所替代,在该相对较短的距离内,植被变化剧烈,这种过渡性得以广泛研究。例如北热带和南亚热带就是热带和亚热带的过渡带,而北亚热带和暖温带就是亚热带与温带的过渡类型,其气候特征、植被结构及土壤性质等都具有明显的过渡性。位于我国暖温带的河南宝天曼国家自然保护区,其植被有强烈的过渡性质。植物组成主要是温带类型,但也有少量亚热带地带性植被的常绿阔叶林植被,具有暖温带向亚热带过渡的性质,生物多样性较高^[22]。

在这个尺度上主要是进行区域的划分,选择关键界线(暖温带/北亚热带、南亚热带/边缘热带、中温带半湿润/半干旱)进行深入研究^[23]。大尺度上生物群区过渡带的边缘效应主要是由于非生物效应所引起的,包括来源于不同结构基质的自然环境条件的变化^[24]。然而,地域分异中的交错带迭加了两类或多类景观的共同作用,具有相邻两侧或多侧地域单元各自的特征,是一种交汇,并从植被个体、群落组成及土壤成分等方面都表现出显著的边缘效应。

1.2 大尺度水平边缘效应测度研究

对生物群区交错带边缘效应的测度方法主要有物种多样性的定量测定及其量化的梯度规律性,地理信息系统技术的应用,数量区划的方法,定量判定植被带间的区系关联性,并通过构造指数如热量综合指数来反映其效应。

由于区系分界线和交错区的边缘效应,使得生物群区过渡地带表现出高的物种多样性^[25]。交错带物种多样性的变化具有一定的规律性,这些规律性反映了环境因子的梯度变化特征^[26]。植被水平地带性的分布规律可通过植被数量分类、排序的方法和相关指标等方法进行研究^[27]。

不同气候带的划分可以认为是对边缘效应定量研究的一个方面,其方法多种多样。区系地理成分中两个地带性成分的比率可作为划分区域的一个标准,如秦岭地区作为亚热带与暖温带的分界线,某区域热带成分越多,越可能属于亚热带,反之亦然^[28]。另外,利用地区的生态指标如热量^[29]等构建指数表达式来确定气候带界线的具体位置、宽度和特征,是一种定量测定边缘效应的方法。

生物多样性的海拔梯度格局多数表现为偏峰或单峰分布格局,即随着海拔的升高,物种多样性先增加后减少,中海拔地区达到最高,同时峰值偏向低海拔。在中东地区 Herman 山的研究结果表明,在生态过渡带物种多样性达到峰值^[30]。对各垂直植被带的区系成分进行聚类分析,可以综合定量评判各带之间的区系关联程度,是一种分析植被区系垂直分布的方法。如沈泽昊等^[31]分别利用全部科、全部属的种数构成和种的区系成分构成数据,对各带进行聚类分析,得出其海拔分布格局。

除了植被本身,其环境因子也可作为判定的一个指标,马建华等^[32]调查了伏牛山南坡的野外土壤并于室内进行了土壤理化分析,在此基础上,论述了伏牛山南坡土壤组成和性质的垂直分异。而地理信息系统技术结合典范对应分析和数量区划的方法可用于研究植被与气候之间的关系,也不失为一种很好的手段^[21]。

2 中尺度类型:生态交错区(ecological ecotone)

生态交错区是指不同景观类型之间的过渡区^[10],属于中尺度类型。生态交错区并不是两个生态实体的机械迭加和混合,它是两个相对均质的生态系统相互过渡耦合而构成的有别于该两种生态系统的转换区域,其显著特征为生境的异质化,界面上的突变性和对比度^[33]。关键的特征之一就是边缘效应。

2.1 中尺度水平边缘效应研究

交错区是生态系统要素间的过渡带,具有过滤膜的作用,影响能流等生态流及生物有机体的流动,因而它通常是生物多样性出现较高的场所。在过渡带中,由于景观要素间的相互作用直接影响景观的功能与结构,过渡带又直接反映出某些物种的独特生境,所以易导致种群遗传型的统一或特化,林边人们常可见到的鸟类聚集,即属于一种边际特化现象^[5]。目前对生态交错带的研究主要集中在与人类关系较为密切的几种类型以及对环境变化较为敏感的生态脆弱区。

2.1.1 城乡交错带

城乡交错带就是城市向乡村地区推进或乡村向城市逐渐转变的过渡区域,且边缘效应明显、功能互补强

烈的中间地带。但它绝不是城乡的连续,而是城乡系统中的一个特殊构成部分,有着自己的结构、功能以及演变规律,是城乡系统的一个子系统^[34]。

城乡交错带具有城市与乡村在时空上相互作用所形成的典型生态边缘效应。越来越多的研究表明,城乡交错带具有相对较高的生物多样性水平,随着城市化进程的加快,经济高速增长、人口密集度高而流动频繁、威胁了野生生物的生存^[35]。要保护生物多样性,不仅要关注面积较大的自然栖息地,城乡交错带地区也要得到重视^[36]。

对其边缘效应的研究融入了人类社会的因素,研究目的更侧重于其应用性,以期合理开发利用城乡交错带,使城市化的进程得以稳定、可持续发展。但由于本身的复杂性,其中的物质和能量的流动亦十分复杂,有待我们花费更大的精力去研究它^[37]。

2.1.2 林草交错带

林草交错带是地处森林带和草原带之间的过渡区,森林和草原两种植被共存为特色,具有高的生物多样性。鸟类群落表现出明显的边缘效应,并随着边缘距离的增加而减弱^[38]。Luczaj 等人^[39]在森林-草地的边缘效应区对菌类植物、苔藓植物和灌木的丰富度的研究证实,边缘表现出明显的正效应。

在森林-草原交错带,森林群落和草原群落的多样性不同。森林群落从森林带到草原带依次降低;而草原群落则是在森林-草原交错带高,特别是森林草甸区最明显,其最高值也偏向森林带一侧^[40]。

2.1.3 农牧交错带

农牧交错带具有独特的由农牧两个相邻系统相互作用所决定的一系列如植被覆盖,动物分布,土壤成分等方面的特性^[41]。

农牧交错带一方面可起到生态屏障的作用,另一方面在人为干预失控的农牧交错带,则成为生态环境破坏的受害者,成为“生态环境脆弱带”。澳大利亚西部的凯勒贝林(Kellerberrin)是典型的小麦区域(wheatbelt),由于放牧和其他的干扰,使得该地区严重退化,快速形成的广泛的空旷地,植被退化成残存的斑块^[42]。

2.1.4 林农交错带

在森林-农田的边缘效应带中,同时体现着自然性较强的森林和人工化较强的农田两个系统的特点,物种组成及群落结构与相邻生态系统内部差异很大,并且物种的密度和丰富度也比邻近群落要高,边缘效应非常明显^[43,44]。交错带的资源利用性随时间的改变而有所改变,如农田生态系统的播种期、生长期、收获期造成了物种分布的动态特征^[45]。

林农交错带也是生态脆弱系统。一些地区通过砍伐森林来增加农作物的种植面积,农业生产逐渐淘汰了原始植被群落及其优势物种,实行单一种植,导致农田生态系统多样性降低^[46]。林农交错带的边缘效应原理广泛应用于农业生产,如复合农林业生态系统,则是应用边缘效应的典型实例。

2.1.5 水陆交错带

水陆交错带是水生生态系统和陆地生态系统之间的界面区,在能流、物流方面具有特殊地位,具有明显的边缘效应,交错带中生物多样性、初级生产力、次级生产力、土壤中腐殖质含量、对有机物质的降解速率都比较高^[47]。

水陆交错带既作为生物多样性的潜在危险区,也可作为连接分散生境斑块的廊道^[48],为水陆提供足够的生境和通道,形成了一个连接度很高的生态网络^[49],影响整个流域的持续发展,其重要性不言而喻。但是,由于液相物质与固相物质的互相交接,受力方式及强度的特殊性,以及频繁的侵蚀与堆积等,使之呈现不稳定的特征^[50]。

2.1.6 森林沼泽交错带

在沼泽到森林之间,由于干湿度及微地形变化形成了一定的环境梯度,依次出现了沼泽、木本沼泽、沼泽化森林、森林群落^[51]。森林-沼泽交错区作为一类湿地交错区,具有高的物种多样性,多样性分布具有一定的

变化规律。

牟长城研究^[51,52]发现,随着交错区环境梯度的变化、群落发育程度提高,森林-沼泽交错区植物多样性沿着沼泽至森林方向的环境梯度呈现递增趋势。

2.2 中尺度水平边缘效应的测度研究

生态交错带是生态系统中的敏感带和脆弱带,对其进行量化的研究具有重大理论及实际意义。以下从几个方面论述常用的方法。

2.2.1 景观生态学方法

景观生态学方法是研究宏观生态学的重要方法,尤其是随着地理信息系统技术的发展,其方法的科学性也得以逐步提升,在论述景观格局的动态变化等方面发挥着举足轻重的作用,景观指数使一系列的生态过程得以量化。

以航空遥感图像为主要信息源,在地理信息系统软件的支持下,建立交错带地区的景观数据库,通过量化的景观指数及其时空变化,可以反映交错带景观的结构、功能和发展特征及其所处的生态演化阶段,进而可通过模型对未来的发展加以预测,为管理提供有益建议。

遥感图像处理分析手段及其数据的多时相性,有助于定量分析交错带的演变趋势。通过构造景观指标,可定量地描述景观的结构、功能和发展特征及其所处的生态演化阶段,从而确立交错带在各类生态系统协同发展中地位和作用的重要性^[53~55]。城乡梯度结构是研究城乡交错带的有效手段,一系列的景观指数被用来表示人口模式,自然结构以及景观结构功能等,如对 17 个常用的城市化指标进行主成分分析,得出 4 个因子,从而对墨尔本的城乡梯度进行定量化研究^[56]。除了遥感影像所反映出的土地覆盖利用信息,也可以通过一些手段提取感兴趣问题,问青春等^[44]应用地理信息系统从遥感影像中提取岷江上游林农边界上的植被 NDVI,用 NDVI 来反映植被生物量。并应用移动窗口法对生物量的边界效应进行了定量判定。

2.2.2 游动分割窗技术

游动分割窗技术对定量判定交错带的位置和宽度提供了一个特别有效和客观的方法,于大炮等^[57]以海拔梯度上的群落重要值和二元数据为指标,采用游动分割窗技术辨析了长白山北坡各植被带群落交错区的位置和宽度。石培礼^[58]以样带上样方间的距离系数为指标,采用游动分割窗技术辨析了岷江冷杉林线附近交错带的位置和宽度。常禹等^[59]运用地理信息系统和多变量分析方法分别对样线数据和 TM 遥感影像数据进行分析,定量判定长白山北坡苔原和岳桦景观边界的宽度和位置。

2.2.3 生物多样性测定

生物多样性是反映边缘效应的一个重要指标,对其定量化的研究是测定边缘效应的一个主要手段^[50~52]。生态交错带的生物多样性有一定的变化规律,王庆锁等^[40]以水分生态梯度为主线,对河北北部、内蒙古东部森林草原交错带天然植被的生物多样性(森林斑块多样性、植物群落物种多样性)进行了定量研究,探讨了生态交错带的生物多样性变化规律。

由以上的论述我们可以看出,对于交错带边缘效应的定量化研究方法主要有景观生态学的 3S 技术,生物多样性的测度,定量判定交错带位置和宽度的游动分割窗技术等,以及各种方法的综合运用。

3 小尺度水平:群落交错区(community ecotone)

相对均质的生态系统内部存在着不同的斑块,如森林生态景观中的针叶林和阔叶林,草地生态景观中的草地和裸地等类型斑块,由于不同群落的相互渗透^[60],它们之间同样存在边缘效应,我们将其称为小尺度水平上边缘效应。目前最为关注的是森林片段化引起的边缘效应,边缘效应对森林生态系统的生物与非生物过程的影响是多样且重要的^[61]。对其测度的研究多集中在模型公式的构建方面。

3.1 小尺度水平边缘效应研究

3.1.1 群落边缘

群落的边缘区(带)是群落与外界交流的主要场地,尤其是种类渗透、物质流动、以及其它信息交流。自

然群落所形成的边缘结构和边缘区的发展与变化动态,反映了在特定的生境下,群落间的相互作用过程中群落间的扩散特性,决定着景观斑块或景观元素的动态;而群落的边缘扩散,又常常是演替与发展的结果;群落边缘效应的研究具有重要的理论意义^[6]。

由于人类过度活动的结果,片断化或破碎化的森林代替了大面积的自然森林,群落边缘更为广泛存在^[6]。在美国大陆,估计有 44% 的树木分布在距离边缘不超过 90m 的区域^[62]。森林片段化导致森林总面积减少、森林斑块距离增加以及斑块物理性质的改变^[63]。

在一定程度上,边缘效应依赖于景观的性质^[64]及所研究边缘两边斑块的对比度^[65],景观格局的改变和栖息地的片段化成为全球物种丧失的关键驱动力^[66]。景观破碎化还影响生物的行为^[67]、种子扩散^[68]以及加剧病原体的传播^[69]。而片段化后斑块的形状与物种组成之间的对应关系非常复杂^[70]。同时,斑块的动态变化折射出生态系统的时空演替,利用群落的边缘效应可促进森林的片断化恢复^[3,6]。

3.1.2 林窗边缘

林窗边缘效应是指在森林林窗的边缘地带,由于环境梯度的急变以及物种的相互渗透作用,而导致的林窗边缘地带具有物种丰富和结构配置特化的现象。林窗的不断形成以及边缘效应机制的制约,使得林窗成为保持和恢复森林群落物种多样性的具体地段和主要场所^[71]。

林窗是动态变化的,随着林窗的发育,其物种多样性、生态优势度和边缘效应强度均有动态变化;在边缘效应强度渐弱的同时,各种类型和大小的林窗之间的边缘效应强度差异也趋于减小^[72,73]。

从森林群落内部到林窗,光、热、水等环境因素存在显著而迅速的梯度变化,这种边缘效应在很大程度上影响和控制了森林物种多样性的维持和群落的更新过程^[74]。因而,对林窗及其边缘效应的研究,无疑具有重要的生态学意义,它构成森林生态管理理论探讨与实践的核心问题之一。

3.1.3 林线

林线是指天然森林垂直分布的上限,林线以上即为高山灌丛和草甸,是山地垂直带亚高山和高山植被的分界线和生长型发生急剧变化的地段。林线的物种组成有其特殊性。

林线地带与亚高山低海拔地带植被类型在生物量、生产量及其分配上表现出较大的差别^[75]。林线交错带的形状也与林线的动态及群落组成结构等有关,石培礼^[76]研究发现,林缘形状对本植物向苔原侵展具有强有力的控制作用。林缘形状引起的“凹凸逆转”的生态效应可能是林线上升的一种机制。

3.2 小尺度水平边缘效应测度研究

小尺度水平上,对边缘效应测度的探讨经历了几个阶段,涉及斑块(群落)形状,种群数量结构等方面的研究,通过公式模型来表示边缘效应的强度。

3.2.1 周长与面积比

起初,人们用破碎化景观的周长与面积比 p/a 来表示边缘效应^[77,78]。周长与面积比即 p/a 比越小,在一定程度上边缘的影响越小。在所有的形状中,圆形的 p/a 比最小,故可使森林边缘和森林内部的比例降至最低^[78]。

这种仅仅基于景观或斑块形状特征的边缘效应分析方法显然是不全面的,而且没有给出边缘效应的空间分布特征^[79]。

3.2.2 核心面积模型

后来,为了计算特定面积或形状的片断中未受边缘影响的核心面积, p/a 被核心面积模型所代替。该模型用从林缘开始,以进入林内的距离 d 来表示。边缘效应即随进入林内距离的改变而改变,并且受边缘所处地势和方位的影响^[80]。如 Laurance^[81]研究了亚马逊热带雨林片段化后的森林动态,将核心面积模型应用于两个不同的边缘距离,60m 和 100m,结果表明在 60m 处具有强烈的边缘效应,并且边缘效应与斑块面积及形状相关。

边缘效应随着距边缘距离的变化并非单调增减。Murcia^[23]假设了边缘效应的双峰模型模式,她认为这

是两个或多个生物或非生物因子相互作用的结果。Didham^[82]的认识则更进一步,他认为,林内某位置形成边缘内部的生态交错带,在边界两边物种重叠,产生了高的物种丰富度和多度,这一观点揭示了发生在边缘内部交错面上的某些动态过程。

3.2.3 群落边缘效应强度

通过度量群落中种群数量和结构的定量指标(如种丰富度、个体多度、群落物种多样性等),探讨植物群落边缘效应强度。令由 m 个群落所形成的交错区的这一指标为 Y , m 个群落的这一指标为 y_i ($y_i = 1, 2, 3, \dots, m$)。令边缘效应强度为 E , 组建边缘效应强度的测度模式:

$$E = mY / \sum_{i=1}^m y_i$$

若 E 值大于 1, 可以认为是正效应, 若小于 1, 则说明是负效应。此公式很好地反映了群落交错区的种群数量和结构上的效应强度^[83]。

3.2.4 边缘效应值

边缘效应(E) 是环境因子作用于系统而引起状态变化的反应^[84]。生物系统边缘部分的状态值(V_e) 与内部状态值(V_i) 之代数差称为边缘效应值(E_q):

$$E_q = V_e - V_i$$

状态指标可以用数量和重量、高度、粗度以及生物量、质量、生物多样性指标等表示。

3.2.5 基于分割线段模型的边缘效应测度公式

黄世能等^[14]对海南岛尖峰岭热带山地雨林采伐迹地次生林及周围的保留林进行了群落调查, 组建了一个基于分割线段模型的边缘效应测度公式:

$$Y = a + e_0 [1 - (D/D_{\max})]$$

式中, Y 为与边缘垂直距离 D 处的测定指标值, e_0 为边缘效应强度的最大值, $D_{\max}$ 为边缘效应作用的最大距离, a 为常数。此公示很好地描述热带山地雨林采伐迹地次生林和保留林群落的边缘效应。

3.2.6 景观适宜性负荷值模型

陈利顶等^[80]借用地理信息系统中滤波功能, 以一定的窗口大小计算中心单元的景观适宜性负荷值, 通过比较每一个单元景观适宜性负荷值的大小, 来确定该单元受到边缘效应影响的程度。根据适宜性负荷值与临界点的比较来判断其是否是边缘效应的影响范围。该评价方法的一个突出特点是考虑了斑块周边景观性质和斑块自身形状对边缘效应的影响, 可以比较精确地评价边缘效应的影响范围和程度, 为自然保护区的合理规划和正确使用野外的环境观测数据提供基础。

4 小结

从以上的综述可以看出, 边缘效应的尺度类型主要包括大尺度的生物群区交错带、中尺度的生态交错带和小尺度的群落交错区 3 种类型。对不同尺度上的研究有所侧重, 其中大尺度主要是以植被气候带为标志的生物群区间的边缘效应, 地带性植被的渐变性使其界线变得模糊不清, 而在大气环境尤其是在当今全球变化的综合作用下, 这类交错区的特性及时空动态变化更具理论和实际意义, 值得深入研究; 中尺度类型主要包括城乡交错带、林草交错带等类型, 研究侧重于不同生态系统间的物质交换, 能量流动, 生态演替等等。作为一类生态敏感区, 其所体现出来的边缘效应反映了两类或多类生态系统的共同作用, 如何利用边缘效应使其为多个生态系统的协调有序发展起到正面推动作用, 是研究目的所在; 小尺度主要指景观内部斑块之间的边缘区, 研究的重点是群落边缘、林窗边缘和林线交错带等类型, 是物种动态变化的效应区, 但是目前多集中在静态的空间区域研究, 在时间动态效应方面尚有缺乏, 对其进行整体系统的研究是有必要同时是可行的。

全球区域范围内, 不管是在大空间尺度的气候带间, 还是微小的群落间, 边缘效应现象无所不有。在当今全球气候变化和人类社会过度活动对自然生态系统严重干扰的双重胁迫下, 生态系统分布格局在变化, 交错带/边缘区的敏感性, 使边缘效应成为观察与监测生态系统格局动态过程的一种良好的研究对象, 透过现状预

测未来变化趋势,其重要性不言而喻。另外,边缘效应的研究还具有实践意义,边缘作为动态变化的起始区域,对生态恢复具有推动作用,在生态恢复的过程中,通过合理的构造边缘可以加速恢复的进程。

可以看到,对边缘效应进行量化的测度已经有一些研究。大尺度水平上主要是应用数量生态学方法,从而研究不同气候带之间界线的划分及其物种分布的梯度规律性;中尺度水平上应用景观生态学的 3S 技术等方法,侧重于研究交错带的动态变化趋势及位置宽度的判定;小尺度水平上通过距离边缘的长度,各群落中种群的数量、结构、多样性等定量指标,并利用一些模型来构建测度公式,从而测定边缘效应的强度及其对群落的正负效应。正确理解边缘效应的内涵及其定量化评价具有重要的理论及现实意义。

对边缘效应的量化研究是未来的发展趋势。但是我们必须看到,目前还缺乏一致的行之有效的方法对其进行评价,尤其在大尺度及中尺度水平上,故有待于加强这方面的研究。未来可利用遥感信息的多时相性及空间的大区域可达性,结合地理信息系统强大的综合分析能力,融入生态学理论,探讨切实可行的测度方法。

References:

- [1] Beecher W J. Nesting birds and the vegetation substrate. Chicago: Chicago Ornithological Society, 1942. 68—69.
- [2] Wang R S, Ma S J. Edge effect and its application in economic ecology. *Journal of Ecology*, 1985, 2:38—42.
- [3] Fonseca C R, Joner F. Two-sided edge effect studies and the restoration of endangered ecosystems. *Restoration Ecology*, 2007, 15 (4): 613—619.
- [4] Woodroffe R, Ginsberg J R. Edge effects and the extinction of populations inside protected areas. *Science*, 1998, 280(5372):2126—2128.
- [5] Ma S J. The perspective of modern ecology. Beijing: China Science and Technology Press, 1990. 43—45.
- [6] Peng S L. Studies on edge effect of successional communities and restoration of forest fragmentation in low sub-tropics. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(1):1—8.
- [7] Gu L, Jiang X X, Chen Z H. The application of edge effect in ecology. *Journal of Southwest University for Nationalities(Natural Science Edition)*, supplement: 6—10.
- [8] Yu X X, Niu J Z, Guan W B, *et al.* Landscape ecology. Beijing: Higher Education Press, 2006. 94—95.
- [9] Zhang N. Scale issues in ecology: concepts of scale and scale analysis. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(7):2340—2355.
- [10] Wu J G. Landscape Ecology-Pattern, Process, Scale and Grade. Beijing: Higher Education Press, 2000. 11—13.
- [11] Crawley M J, Harral J E. Scale dependence in plant biodiversity. *Science*, 2001, 291(2):864—868.
- [12] Wu J G. Effects of changing scale on landscape pattern analysis: scaling relations. *Landscape Ecology*, 2004, 19: 125—138.
- [13] Clemente F, Francisco J A, Gerardo A, *et al.* Complex edge effect fields as additive processes in patches of ecological systems. *Ecological Modelling*, 2002, 149(3):273—283.
- [14] Huang S N, Wang B S, Li Y D. Edge effects in two secondary tropical montane rain forests at Jianfengling. *Hainan Island of China Forest Research*, 2004, 17(6): 693—699.
- [15] Xiao D N, Li X Z, Gao J, *et al.* Landscape Ecology. Beijing: Science Press, 2004. 47—50.
- [16] Franklin J F. Preserving biodiversity: Species, ecosystem, or landscapes? *Ecological Applications*, 1993, 3(2):202—205.
- [17] Turner M G, O'Neill R V, Gardner R H, *et al.* Effects of changing spatial scale on the analysis of landscape pattern. *Landscape Ecology*, 1989, 3(3/4): 153—162.
- [18] Wang Q S, Wang X P, Luo J C, *et al.* Ecotones and biodiversity. *Biodiversity Science*, 1997, 5(2):126—131.
- [19] Zhou T, Peng S L. The spatial scale type of edge effect. *World Forestry Research(Special)*, 2007:11—15.
- [20] Ni J. Plant functional types and biomes of China at a regional scale. *Acta Botanica Sinica*, 2001, 43(4):419—425.
- [21] Li B, Zhang J T. Analysis of relationships between vegetation and climate variables in Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(1):82—89.
- [22] Liu S R, Jiang Y X, Shi Z M, *et al.* A Study on the biological diversity in warm temperate forest in China. Beijing: China Science and Technology Press, 1998. 53—57.
- [23] Yang Q Y, Zheng D, Wu S H. The systemical study of eco-geographical regions of China. *Progress in Natural Science*, 2002, 12(3):287—291.
- [24] Murcia C. Edge effects in fragmented forests: implications for conservation. *Trends in Ecology and Evolution*, 1995, 10(2):58—62.
- [25] Gong Z D, Zhang L Y, Duan X D, *et al.* Species richness and fauna of fleas along a latitudinal gradient in the three parallel rivers landscape, China. *Biodiversity Science*, 2007, 15 (1): 61—69.
- [26] Huang J H, Gao X M, Ma K P, *et al.* A comparative study on species diversity in zonal forest communities. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, 17(6):

611—618.

- [27] Ma X Y, ShangGuang T L, Zhang F. Ecological studies of vegetation in the ecotone between temperate grassland and warm-temperate deciduous broad-leaved forest of Hengshan Mountains, Shanxi. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 (10): 3371—3379.
- [28] Kang M Y, Zhu Y. Discussion and analysis on the geo-ecological boundary in Qinling range. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(7): 2774—2784.
- [29] Zhang Y C, Tan K Y. The studies of the northern boundary of subtropical zone and its transitional zone in China. *Geographical Research*, 1991, 10(2): 85—91.
- [30] Tang Z Y, Fang J Y. A review on the elevational patterns of plant species diversity. *Biodiversity Science*, 2004, 12 (1): 20—28.
- [31] Shen Z H, Liu Z L, Wu J. Altitudinal pattern of flora on the eastern slope of Mt. Gongga. *Biodiversity Science*, 2004, 12 (1): 89—98.
- [32] Ma J H. Laws of soil vertical variations on southern slope of Funiu Mt. ; Simultaneous study on north boundary of subtropical zone. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(6): 998—1011.
- [33] Wang J F, Lei R D. On progress of theoretical research on ecotone. *Journal of Northwest Forestry University*, 2002, 17(4): 24—28.
- [34] Wang B S, Peng S L. The edge effect of urban and rural. *Ecologic Science*, 1986, (1): 84—85.
- [35] Riley, Seth P. D. Spatial ecology of bobcats and gray foxes in urban and rural zones of a national park. *Journal of Wildlife Management*, 2006, 70 (5): 1425—1435.
- [36] Alvey A A. Promoting and preserving biodiversity in the urban forest. *Urban Forestry and Urban Greening*, 2006, 5(4): 195—201.
- [37] Fu B J, Chen L D, Ma K M, *et al.* The theory and application of landscape ecology. Beijing: Science Press, 2003. 66—70.
- [38] Wang W, Wang N X, Yuan L, *et al.* Edge effect on Avian community structure in steppe-forest ecosystem of Honghuaerji in Summer. *Journal of Northeast Forestry University*, 2007, 35(3): 64—67.
- [39] Luczaj L, Sadowska B. Edge effect in different groups of organisms: Vascular plant, bryophyte and fungi species richness across a forest-grassland border. *Folia Geobot Phytotaxonom*, 1997. 32(4): 343—353.
- [40] Wang Q S, Feng Z W, Luo J C. Biodiversity of a forest-steppe ecotone in northern Hebei Province and eastern inner Mongolia. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, 24(2): 141—146.
- [41] Cheng X. Frontier issue of modern ecology in the study of ecotone between agriculture and animal husbandry. *Resources Science*, 1999, 21(5): 1—8.
- [42] Saunders D A, Hobbs R J, Arnold G W. The Kellerberrin project on fragmented landscapes: A review of current information. *Biological Conservation*, 1993, 64(3): 185—192.
- [43] Lian Z M, Yu G Z. Edge effect and biodiversity. *Biodiversity Science*, 2000, 8(1): 120—125.
- [44] Wen Q C, Li X Z, He H S, *et al.* The influence of edge effect on vegetation biomass of forest-farm land boundary in the upper Min River. *Acta Scientiarum Naturalium Universities Sun yat-sen*, 2007, 46(2): 87—91.
- [45] Rand T A, Tylianakis J M, Tscharntke T. Spillover edge effects: the dispersal of agriculturally subsidized insect natural enemies into adjacent natural habitats. *Ecology Letters*, 2006, 9(5): 603—614.
- [46] Benton T G, Vickery J A, Wilson J D. Farmland biodiversity: is habitat heterogeneity the key? *Trends in Ecology and Evolution*, 2003, 18 (4): 182—188.
- [47] Yin C Q. The ecological function protection and utilization of land/inland water ecotones. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, 15(3): 331—335.
- [48] Burger J. Landscapes, tourism and longervation. *The Science of the Total Environment*, 2000, 249: 39—49.
- [49] Zhang J C, Peng B Z. Study on riparian zone and the restoration and rebuilding of its degraded ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(1): 56—63.
- [50] Niu W Y. The discriminatory index with regard to the weakness, overlapness, and breadth of ecotone. *Acta Ecologica Sinica*, 1989, 9(2): 97—105.
- [51] Mou C C, Luo J C, Wang X P, *et al.* Plant diversity of ecotone community between forest and marsh in Changbai Mountain. *Biodiversity Science*, 1998, 6(2): 132—137.
- [52] Mou C C, Han S J, Luo J C, *et al.* Analysis of environmental gradient and community of forest-swamp ecotone in Changbai Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(1): 1—7.
- [53] Li Z, Liu J Y, Zhang B C. Ecoevolutionary analysis of Guangzhou suburban landscape. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, 8(6): 633—638.
- [54] Gao J, Song Y C. On landscape dynamics of the urban-rural ecotone based on remote sensing and GIS: a case study of southwest Shanghai. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(4): 806—815.
- [55] Tashpolat T, Ren F W. Quantitative research on the change of land cover based on the fractal theory and remote sensing. *Journal of Xinjiang*

- University(Natural Science Edition), 2004,21(3):225—231.
- [56] Amy K H, Mark J M. Selecting independent measures to quantify Melbourne's urban-rural gradient. *Landscape and Urban Planning*, 2006, 78 (28): 435—448.
- [57] Yu D P, Tang L N, Wang S X, *et al.* Quantitative methodologies for ecotone determination on north slope of Changbai Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15 (10): 1760—1764.
- [58] Shi P L, Liu X L. The application of moving split-window technique in determining ecotone: A case study of *Abies faxoniana* timberline in Baling mountain in Sichuan province. *Acta Phytocologica Sinica*, 2002, 26(2): 189—194.
- [59] Chang Y, Bu R C, Hu Y M, *et al.* Quantitative determination of landscape boundary between Mountain Birch and Tundra in the northern slope of Changbai Mountains. *Geographical Science*, 2003, 23(4): 477—483.
- [60] Wang B S, Peng S L. Analysis on the forest communities of Dinghushan Guangdong X. Communities edge effect. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatsen*, 1986, (4): 52—56.
- [61] Laurence W F, Lovejoy T E, Vasconcelos H L, *et al.* E. Ecosystem decay of Amazonian forest fragments: A 22-year investigation. *Conservation Biology*, 2002, 16: 605—618.
- [62] Riitters K H, Wickham J D, O'Neill R V, *et al.* Fragmentation of continental United States forests, *Ecosystems*, 2002, 5: 815—822.
- [63] Robert I M, Dean L U. Edge effects on species composition and exotic species abundance in the North Carolina Piedmont. *Biological Invasions*, 2006, 8: 1049—1060.
- [64] Donovan T M, Jones P W, Annand E M, *et al.* Variation in local-scale edge effects: mechanisms and landscape context. *Ecology*, 1997, 78(7): 2064—2075.
- [65] Lopez-Barrera F, Manson R H, Gonzalez-Espinosa M, *et al.* Effects of the type of montane forest edge on oak seedling establishment along forest-edge-exterior gradients. *Forest Ecology and Management*, 2006, 225: 234—244.
- [66] Fischer J, Lindenmayer D B. Landscape modification and habitat fragmentation: a synthesis. *Global Ecology and Biogeography*, 2007, 16(3): 265—280.
- [67] Zharikov Y, Lank D B, Huettnann F, *et al.* Habitat selection and breeding success in a forest-nesting Alcid, the marbled murrelet, in two landscapes with different degrees of forest fragmentation. *Landscape Ecology*, 2006, 21(1): 107—120.
- [68] Restrepo C, Gomez N, Heredia S. Anthropogenic edges, treefall gaps, and fruit-frugivore interactions in a neotropical montane forest. *Ecology*, 1999, 80(2): 668—685.
- [69] Holdenrieder O, Pautasso M, Weisberg P J, *et al.* Tree diseases and landscape processes: the challenge of landscape pathology. *Trends in Ecology and Evolution*, 2004, 19(8): 446—452.
- [70] Hill J L, Curran P J. Fragment shape and tree species composition in tropical forests: a landscape level investigation. *African Journal of Ecology*, 2005, 43(1): 35—43.
- [71] Xi W M, Zhong Z C, Bi R C. The Study of Edge Effect of the Forest Communities in Jinyun mountain, *Acta Phytocologica et Geobotanica Sinica*, 1993, 17(3): 232—242.
- [72] Liu J F, Hong W, Li J Q, *et al.* Gap edge effect of *Castanopsis kawakamii* community. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(9): 1421—1426.
- [73] Zang R G, Liu J Y, Dong D F. Gap dynamics and forest biodiversity. Beijing: China Forestry Publishing House, 1999. 33—37.
- [74] Peng S L. The forest communities dynamics in low sub-tropics. Beijing: Science Press, 1996. 343—350.
- [75] Deng K M, Shi P L, Yang Z L. Biomass allocation and net primary productivities and treeline ecotone on the Changbai Mountains. Northeast China. *Journal of Natural Resources*, 2006, 21(6): 942—948.
- [76] Shi P L, Li W H. Boundary form effects of timberline ecotone on colonization of woody plants and timberline dynamics in Changbai Mountain. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(4): 573—580.
- [77] Schonewald-Cox C, Bayless J W. The boundary model: A geographical analysis of design and conservation of nature reserves. *Biological Conservation*, 1986, 38(4): 305—322.
- [78] Marybeth B. Conservation in insular parks: Simulation models of factors affecting the movement of animals across park boundaries. *Biological Conservation*, 1987, 41(1): 57—76.
- [79] Qu C M, Han X G, Su B. Edge effects in fragmented forests: Implications for design and management of natural reserves. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(1): 160—167.
- [80] Chen L D, Xu J Y, Fu B J, *et al.* Quantitative assessment of patch edge effects and its ecological implications. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24 (9): 1827—1832.

- [81] Laurance W F, Ferreira L V, Merona J M R, *et al.* Rain forest fragmentation and the dynamics of Amazonian tree communities. *Ecology*, 1998, 79(6):2032—2040.
- [82] Didham R K. The influence of edge effects and forest fragmentation of leaf litter invertebrates in Central Amazonia. In: Laurance W F. and Bierregaard R O. Jr. eds. *Tropical Forest Remnants: Ecology, Management, and Conservation of Fragmented Communities*. The University of Chicago Press, London, 1997. 55—70.
- [83] Peng S L. The research on the edge effect of forest communities. Essays on the first youth science annual meeting of China Association for Science and Technology. Beijing: China Science Press, 1992. 17(2):220—223.
- [84] Wei L, Gao L, Du X T, *et al.* The law of edge effects in bio-system and its application for agriculture. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2003, 19(5):99—102.

参考文献:

- [2] 王如松, 马世骏. 边缘效应及其在经济生态学中的应用. *生态学杂志*, 1985, 2: 38~42.
- [5] 马世骏. 边际效应与边际生态学. 见: 马世骏主编. *现代生态学透视*. 北京: 科技出版社, 1990. 43~45.
- [6] 彭少麟. 南亚热带演替群落的边缘效应及其对森林片段化恢复的意义. *生态学报*, 2000, 20(1): 1~8.
- [7] 顾磊, 江晓霞, 陈智华. 边缘效应在生态学中的应用. *西南民族大学学报: 自然科学版, 增刊*: 6~10.
- [8] 余新晓, 牛健植, 关文彬, 等编. *景观生态学*. 北京: 高等教育出版社, 2006. 94~95.
- [9] 张娜. 生态学中的尺度问题: 内涵与分析方法. *生态学报*, 2006, 26(7): 2340~2355.
- [10] 邬建国. *景观生态学——格局、过程、尺度与等级*. 北京: 高等教育出版社, 2000. 11~13.
- [14] 黄世能, 王伯荪, 李意德. 海南岛尖峰岭次生热带山地雨林的边缘效应. *林业科学研究*, 2004, 17(6): 693~699.
- [15] 肖笃宁, 李秀珍, 高峻, 等编著. *景观生态学*. 北京: 科学出版社, 2004. 47~50.
- [18] 王庆锁, 王襄平, 罗菊春, 等. 生态交错带与生物多样性. *生物多样性*, 1997, 5(2): 126~131.
- [19] 周婷, 彭少麟. 边缘效应的空间尺度. *世界林业研究(特刊)*, 2007: 11~15.
- [20] 倪健. 区域尺度的中国植物功能型与生物群落. *植物学报*, 2001, 43(4): 419~425.
- [21] 李斌, 张金屯. 黄土高原地区植被与气候的关系. *生态学报*, 2003, 23(1): 82~89.
- [22] 刘世荣, 蒋有绪, 史作民, 等著. *中国暖温带森林生物多样性研究*. 北京: 中国科学技术出版社, 1998. 53~57.
- [23] 杨勤业, 郑度, 吴绍洪. 中国的生态地域系统研究. *自然科学进展*, 2002, 12(3): 287~291.
- [25] 龚正达, 张丽云, 段兴德, 等. 中国“三江并流”纵谷地蚤类丰富度与区系沿纬度梯度的水平分布格局. *生物多样性*, 2007, 15(1): 61~69.
- [26] 黄建辉, 高贤明, 马克平, 等. 地带性森林群落物种多样性的比较研究. *生态学报*, 1997, 17(6): 611~618.
- [27] 马晓勇, 上官铁梁, 张峰. 山西恒山温带草原与暖温带落叶阔叶林交错区植被生态研究. *生态学报*, 2006, 26(10): 3371~3379.
- [28] 康慕渲, 朱源. 秦岭山地生态分界线的论证. *生态学报*, 2007, 27(7): 2774~2784.
- [29] 张养才, 谭凯炎. 中国亚热带北界及其过渡带. *地理研究*, 1991, 10(2): 85~91.
- [30] 唐志尧, 方精云. 植物物种多样性的垂直分布格局. *生物多样性*, 2004, 12(1): 20~28.
- [31] 沈泽昊, 刘增力, 伍杰. 贡嘎山东坡植物区系的垂直分布格局. *生物多样性*, 2004, 12(1): 89~98.
- [32] 马建华. 试论伏牛山南坡土壤垂直分异规律——兼论亚热带北界的划分. *地理学报*, 2004, 59(6): 998~1011.
- [33] 王健锋, 雷瑞德. 生态交错带研究进展. *西北林学院学报*, 2002, 17(4): 24~28.
- [34] 王伯荪, 彭少麟. 城乡边缘效应. *生态科学*, 1986, (1): 84~85.
- [37] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 等编著. *景观生态学原理及应用*. 北京: 科学出版社, 2003. 66~70.
- [38] 王文, 王宁侠, 袁力, 等. 红花尔基草原——森林生态系统边缘效应对夏季鸟类群落结构影响. *东北林业大学学报*, 2007, 35(3): 64~67.
- [40] 王庆锁, 冯宗炜, 罗菊春. 河北北部、内蒙古东部森林——草原交错带生物多样性研究. *植物生态学报*, 2000, 24(2): 141~146.
- [41] 程序. 农牧交错带研究中的现代生态学前沿问题. *资源科学*, 1999, 21(5): 1~8.
- [42] 廉振民, 于广志. 边缘效应与生物多样性. *生物多样性*, 2000, 8(1): 120~125.
- [44] 问青春, 李秀珍, 贺红土, 等. 岷江上游林农边界效应对植被生物量的影响. *中山大学学报(自然科学版)*, 2007, 46(2): 87~91.
- [47] 尹澄清. 内陆水——陆地交错带的生态功能及其保护与开发前景. *生态学报*, 1995, 15(3): 331~335.
- [49] 张建新, 彭补拙. 河岸带研究及其退化生态系统的恢复与重建. *生态学报*, 2003, 23(1): 56~63.
- [50] 牛文元. 生态环境脆弱带 ECTONE 的基础制定. *生态学报*, 1989, 9(2): 97~105.
- [51] 牟长城, 罗菊春, 王襄平, 等. 长白山林区森林/沼泽交错群落的植物多样性. *生物多样性*, 1998, 6(2): 132~137.
- [52] 牟长城, 韩士杰, 罗菊春, 等. 长白山森林/沼泽生态交错带群落和环境梯度分析. *应用生态学报*, 2001, 12(1): 1~7.

- [53] 李贞,刘静艳,张宝春. 广州市城郊景观的生态演化分析. 应用生态学报,1997,8(6): 633 ~ 638.
- [54] 高峻,宋永昌. 基于遥感和 GIS 的城乡交错带景观演变研究——以上海西南地区为例. 生态学报,2003,23(4):806 ~ 815.
- [55] 塔西甫拉提·特依拜,任福文. 利用分形理论对土地覆盖变化趋势的遥感定量研究. 新疆大学学报(自然科学版), 2004,21(3):225 ~ 231.
- [57] 于大炮,唐立娜,王绍先,等. 长白山北坡植被垂直带群落交错区的定量判定. 应用生态学报, 2004,15(10):1760 ~ 1764.
- [58] 石培礼,刘兴良. 游动分割窗技术在生态交错带定量判定中的应用:以四川巴郎山岷江冷杉林线为例. 植物生态学报,2002,26(2): 189 ~ 194.
- [59] 常禹,布仁仓,胡远满,等. 长白山北坡苔原/岳桦景观边界的定量检测. 地理科学,2003,23(4):477 ~ 483.
- [60] 王伯荪,彭少麟. 鼎湖山森林群落分析——边缘效应. 中山大学学报,1986,4:52 ~ 56.
- [71] 奚为民,钟章成,毕润成. 四川缙云山森林群落林窗边缘效应研究. 1993,17(3):232 ~ 242.
- [72] 刘金福,洪伟,李俊清,等. 格氏栲群落林窗边缘效应研究. 应用生态学报,2003,14(9):1421 ~ 1426.
- [73] 臧润国,刘静艳,董大方著. 林隙动态与森林生物多样性. 北京:中国林业出版社, 1999. 33 ~ 37.
- [74] 彭少麟. 南亚热带森林群落动态学. 北京:科学出版社, 1996. 343 ~ 350.
- [75] 邓坤枚,石培礼,杨振林. 长白山树线交错带的生物量分配和净生产力. 自然资源学报, 2006, 21(6): 942 ~ 948.
- [76] 石培礼,李文华. 长白山林线交错带形状与木本植物向苔原侵展和林线动态的关系. 生态学报,2000,20(4):573 ~ 580.
- [79] 渠春梅,韩兴国,苏波. 片段化森林的边缘效应与自然保护区的设计管理. 生态学报,2000,20(1):160 ~ 167.
- [80] 陈利顶,徐建英,傅伯杰,等. 斑块边缘效应的定量评价及其生态学意义. 生态学报,2004,24(9):1827 ~ 1832.
- [83] 彭少麟. 森林群落边缘效应之研究. 中国科协首届青年学术年会论文集. 北京:中国科学出版社,1992. 17(2):220 ~ 223.
- [84] 卫丽,高亮,杜心田,等. 生物系统边缘效应定律及其在农业生产中的应用. 中国农学通报,2003,19(5):99 ~ 102.