

“源”“汇”景观理论及其生态学意义

陈利顶¹, 傅伯杰¹, 赵文武²

(1. 中国科学院生态环境研究中心系统生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 北京师范大学资源学院 资源管理研究所, 北京 100875)

摘要:格局与过程的关系是景观生态学研究中的核心内容。景观格局指数是定量分析景观格局与生态过程的主要方法,但由于许多景观格局指数难以将格局与过程有机融合在一起而陷入困境,探讨景观格局分析中有效表征生态过程的理论与方法,对于景观生态学的发展具有积极意义。基于大气污染中的“源”“汇”理论,在已有研究基础上,提出了“源”“汇”景观的概念和理论。认为根据不同景观类型的功能,可以将他们划分为“源”“汇”两种景观类型,从而将过程的内涵融于景观格局分析中。该理论认为:(1)在格局与过程研究中,异质景观可以分为“源”“汇”景观两种类型,其中“源”景观是指那些能促进过程发展的景观类型,“汇”景观是那些能阻止或延缓过程发展的景观类型;(2)“源”“汇”景观的性质是相对的,对于某一过程的“源”景观,可能是另一过程的“汇”景观,“源”“汇”景观的分析必须针对特定的过程;(3)“源”“汇”景观区分的关键在于判断景观类型在生态过程演变中所起的作用,是正向推动作用还是负向滞缓作用;(4)不同类型“源”(或者“汇”)景观对于同一种生态过程的贡献是不同的,在分析景观格局对生态过程的影响时需要考虑这种作用的差异;(5)“源”“汇”景观理论可以应用于非点源污染、生物多样性保护、城市热岛效应等不同领域。“源”“汇”景观理论提出的主要目的是探究不同景观类型在空间上的动态平衡对生态过程影响,从而找到适合一个地区的景观空间格局。这一理论的提出有助于推动景观格局与生态过程研究的深入,希望以此为基础,通过大量的实证研究,丰富和完善“源”、“汇”景观的理论和方法。

关键词:“源”“汇”景观理论; 景观格局; 生态过程; 景观生态学**文章编号:**1000-0933(2006)05-1444-06 **中图分类号:**Q149 **文献标识码:**A

Source-sink landscape theory and its ecological significance

CHEN Li-Ding¹, FU Bo-Jie¹, ZHAO Wen-Wu² (1. Key Lab of Systems Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. Institute of Resources Management, College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1444 ~ 1449.

Abstract: Exploring the relationships between landscape pattern and ecological processes is the key topic of landscape ecology, for which, a large number of indices were developed, as well as landscape pattern analysis model. However, one problem faced by landscape ecologists was that landscape indices were hardly to be linked with the ecological processes. How to link landscape pattern and ecological processes become a big challenge for landscape ecologists.

“Source” and “sink” are a common concept used in air pollution research, by which the movement direction and pattern of different pollutants in air can be clearly identified. As for any ecological processes, it can be considered as the balance between the source and the sink. Thus, the concepts of “source” and “sink” could be employed to the research of landscape pattern and ecological processes. In this paper, a theory of source-sink landscape was proposed. The main contents includes: (1) In the research of pattern and process, different landscape types can be divided into two kinds of landscape, “source” landscape and “sink” landscape. “Source” landscape is a landscape type which contributes positively to the development of the ecological

基金项目:国家基金委创新群体项目(40321101);国家自然科学基金项目(40371115)**收稿日期:**2005-11-24; **修订日期:**2006-02-10

作者简介:陈利顶(1965~),男,河南辉县人,博士,研究员,主要从事景观格局与生态过程、土地利用变化的环境效应与区域土地可持续利用研究. E-mail: Liding@rcees.ac.cn; chenliding@sohu.com

Foundation item: The project was supported by National Natural Science Foundation of China (No. 40321101; 40371115)**Received date:** 2005-11-24; **Accepted date:** 2006-02-10

Biography: CHEN Li-Ding, Ph. D., Professor, mainly engaged in landscape pattern and ecological processes, land use change and its environmental effect, and sustainable land use. E-mail: liding@rcees.ac.cn; chenliding@sohu.com

process, while a “sink” landscape is one which is unhelpful to the development of the ecological process. (2) “Source” landscape and “sink” landscape are recognized with regard to the special ecological process. If the studied ecological process were changed, “source” landscape could become “sink” landscape. Therefore, the ecological process should be clarified before “source” or “sink” landscape were defined. (3) The key point to distinguish “source” landscape from “sink” landscape is to identify the effect of landscape on ecological process. The positive effect is made by “source” landscape, and the negative effect is made by “sink” landscape. (4) For the same ecological process, different “source” landscapes have different positive effects, and different “sink” landscapes have different negative effects. It is required to determine the weight of different landscape types on ecological processes. (5) Source-sink principle could be applied to non-point source pollution control, biologic diversity protection, heat island effect of city, and so on. For the different study area, the landscape evaluation models need be built respectively, because different ecological process is corresponding with different source-sink landscape and evaluation model. The source-sink principle will be helpful for the further study of landscape pattern and ecological process, and can give a base for designing landscape indices.

Key words: source-sink landscape theory; landscape pattern; ecological process; landscape ecology

景观生态学是一门新兴的、实用性很强的交叉学科,它与土地利用规划、城市生态规划、生物多样性保护、生态系统管理紧密联系在一起^[1-5]。强调尺度在研究生态格局和过程中的重要性是景观生态学研究特色之一,尤其是研究宏观尺度上人类活动对区域生态系统的影响,揭示景观格局与生态过程之间的关系更是景观生态学研究的一个重要方面^[6-10]。自景观生态学概念提出以来,景观格局指数与定量评价方法得到了迅速发展^[11-15],为了促进景观生态学的发展和定量化研究,各种各样的指数和景观格局分析模型应运而生^[16-19]。但是大多数研究工作停留在景观格局指数的计算与分析,对于这些格局指数的内涵重视不够。由于景观格局指数受到不同景观类型空间分布的影响,仅仅从数量关系上计算出来的指数往往无法真正反映格局的生态效应。这是因为生态过程往往是一个很难把握的对象,而景观格局指数简单,容易计算,将两者有机地联系在一起困难较大,由此,随着景观生态学的不断发展,似乎陷入了景观指数计算与分析的死胡同。尽管景观生态学重视格局和过程的关系,但是在景观格局指数的实际研究中往往缺乏深入探讨。问题的关键在于这些景观格局指数往往难以较好地反映过程的作用^[20,21]。“源”“汇”是大气污染研究中常用的方法,清楚地反映了大气污染物的来源和去向。景观生态学中研究格局与过程的关系时,可以借用“源”“汇”的观念,来达到将格局和过程有机结合在一起的目的。本文基于大气污染中的“源”“汇”的基本理念,在有关研究的基础上,提出了“源”“汇”景观概念和理论,以期为景观格局与生态过程的定量化分析提供基础。

1 “源”、“汇”景观的概念及其识别方法

“源”、“汇”是全球变化和大气污染研究中的概念。对于大气污染来说,大气污染物的来源,如工厂废气排放、居民生活废气排放、交通尾气排放等均被认为大气污染的源。相对于大气污染的源,“汇”是指可以吸收大气污染物的一些地区或生态系统类型。“源”“汇”概念的提出为解析大气污染物的来龙去脉提供了非常有用的手段。研究景观格局与过程时,由于对过程理解上的模糊,导致格局与过程的研究停滞不前。引入“源”“汇”景观的概念,将有助于理解格局与过程的关系。

1.1 “源”、“汇”景观的概念

“源”,是指一个过程的源头,“汇”是指一个过程消失的地方。在景观生态学中,如何区分“源”景观和“汇”景观,应该结合具体的过程进行分析。“源”景观是指在格局与过程研究中,那些能促进生态过程发展的景观类型;“汇”景观是那些能阻止延缓生态过程发展的景观类型。然而,由于“源”、“汇”景观是针对生态过程而言,在识别时,必须和待研究的生态过程相结合。只有明确了生态过程的类型,才能确定景观类型的性质。例如,对于非点源污染来说,一些景观类型起到了“源”的作用,如山区的坡耕地、化肥施用量较高的农田、城镇居民点等;一些景观类型起到了汇的作用,如位于“源”景观下游方向的草地、林地、湿地景观等,但同时一些景观类型起到了传输的作用。对于水土(养分)流失来说,“源”景观将是径流、土壤和养分流失的地方,如果在“源”

景观下游缺少“汇”景观,那么由“源”景观流失的水土和养分将会直接进入地表或地下水体,形成非点源污染。对于大气温室气体排放来说,释放 CO_2 、 CH_4 等温室气体的景观类型,如城镇居民地区,可以称为 CO_2 的“源”景观;对于城镇地区具有吸收 CO_2 的草地、城市林地等绿地景观,应该是城市地区 CO_2 的“汇”景观。对于生物多样性保护来说,能为目标物种提供栖息环境、满足种群生存基本条件,以及利于物种向外扩散的资源斑块,可以称为“源”景观;不利于物种生存与栖息、以及生存有目标物种天敌的斑块可以称为“汇”景观。“源”“汇”景观是相对的,但对于特定生态过程而言是明确的。

1.2 “源”、“汇”景观比较

比较“源”、“汇”景观,可以发现以下特点:

(1) “源”、“汇”景观在概念上是相对的。只有融合了过程的研究,景观格局分析才有意义。“源”、“汇”景观理论的提出就是针对目前景观生态学研究中过程考虑不足,结合特定生态过程,通过对不同景观类型赋予过程的内涵。因此,在分析一种景观类型是“源”景观,还是“汇”景观时,必须首先明确需要研究的生态过程。对于同一种景观类型,针对某一种过程可能是“源”景观,对于另外一种生态过程,可能就是“汇”景观。判断它是“源”景观,还是“汇”景观类型,关键在于对所研究过程的作用,是正向的,还是负向的?对于农田生态系统类型,由于有大量化肥和农药投入,相对于非点源污染来说,就是一种“源”景观类型;但由于作物生长可以从大气中吸收大量的 CO_2 ,那么它在陆地碳循环过程中,就起到了“汇”景观的作用。

(2) “源”、“汇”景观的识别需要与研究的过程相关联。“源”、“汇”景观的根本区别在于,“源”景观对于研究的生态过程起到了正向推动作用,“汇”景观类型对研究的过程起到了负向滞缓作用。“源”、“汇”景观的定义对于不同的研究过程可能发生转变。在进行景观格局分析中,如果没有明确生态过程,“源”、“汇”景观将无法确定。

(3) “源”、“汇”景观对生态过程中的贡献是有区别的。对于不同类型“源”(或“汇”)景观,在研究格局对过程的影响时,需要考虑他们的作用大小。对于“源”(“汇”)景观来说,即使是同一类“源”(“汇”)景观类型,也需要进一步考虑他们对过程的不同贡献。如农田、菜地、果园,对于农业非点源污染来说,均是“源”景观类型,但是他们在非点源污染形成过程中的贡献不同;同样对于林地和草地,尽管对于非点源污染均是“汇”景观类型,他们在截留养分方面的作用也不同。

2 “源”“汇”景观研究的生态学意义

“源”“汇”景观理论的提出主要是基于生态学中的生态平衡理论,从格局和过程出发,将常规意义上的景观赋予一定的过程含义,通过分析“源”“汇”景观在空间上的平衡,来探讨有利于调控生态过程的途径和方法。“源”“汇”景观理论可以应用于以下研究领域。

2.1 “源”“汇”景观格局设计与非点源污染控制

根据“源”“汇”景观理论,在地球表层存在的物质迁移运动中,有的景观单元是物质的迁出源,而另一些景观单元则是作为接纳迁移物质的聚集场所,被称为汇。同样,对于污染物来说,不同的农田景观类型也可以被看作不同的“源”、“汇”景观。如果能够在流域生态规划中合理地设置这些“源”、“汇”景观的空间格局,就可以使非点源污染物质在异质景观中重新分配,从而达到控制非点源污染的目的。

非点源污染,尤其是水体的富营养化,归根结底是养分在时空过程上的“盈”“亏”不平衡造成的。降低非点源污染形成危险的最可靠方法是控制污染物(养分物质)来源,将非点源污染物的排放控制在最低限度。控制养分进入水体的途径有两个方面:其一是力求使养分在每一个景观单元上达到收支平衡,如此将不会产生富余的营养污染物;其二是让养分元素在空间上(进入水体之前)达到平衡状态,这样可以通过景观合理布局有效地截留进入水体的养分元素。陈利顶等研究发现“源”“汇”景观类型的空间分布与面源污染的形成具有密切的关系^[12]。因此,可以通过探讨不同景观类型在空间上的组合来控制养分流失在时空尺度上的平衡,从而降低非点源污染形成的危险性^[13,14]。

非点源污染研究的对象是要保护水体,如湖泊、河流、海洋等,涉及到的关键过程是养分的流失。因此在

进行水体非点源污染危险性评价时,首先需要以水体作为研究对象,通过评价水体上游各种景观类型在养分流失中的作用,进行“源”“汇”景观分类,并通过建立相应的评价方法,分析区域“源”“汇”景观空间分布格局对水体的影响。

2.2 “源”“汇”景观格局设计与生物多样性保护

生物多样性的保护关键在于对濒危物种栖息地的保护,只有保护好物种生存的栖息地,才能有效地保护目标物种。如果将物种栖息斑块与周边的资源斑块看作是目标物种的“源”景观,那么在区域中不适合目标物种生存的斑块,如人类活动占据的斑块、天敌占用的斑块等,在一定意义上可以认为是目标物种的“汇”景观。评价一个地区景观格局是否有利于目标物种的生存和保护,可以通过评价目标物种生存斑块与周边斑块的之间的空间关系。如果目标物种的栖息地周边分布有更多的资源斑块,那么这种景观格局应该更有利于目标物种的生存;如果周边地区分布有较多的“汇”景观,那么这样的景观格局将不利于目标物种的保护和生存。由此,可以通过“源”“汇”景观评价模型,通过分析不同景观类型相对于目标物种的作用,评价景观空间格局的适宜性。

由于“源”“汇”景观的理论是根据大气中的“源”和“汇”的概念提出的,因此,在进行生物多样性保护中的“源”“汇”景观格局评价时,也应该针对具体的“源”(如栖息地或资源斑块),评价时源斑块将被看作一个点。实际上,“源”“汇”景观评价模型是分析周边景观类型空间分布对“源”(一个点)的作用,研究这种作用是有利,还是不利目标物种的生存。

2.3 “源”“汇”景观格局设计与城市热岛效应控制

城市生态系统是一个人类高度胁迫下的生态系统类型。随着城市规模的不断扩大,像城市热岛效应、交通拥挤等城市病日益严重,其根本原因在于城市景观格局的不合理。城市热岛效应和交通拥挤的出现,在一定程度上可以认为是城市景观中“源”“汇”景观空间分布失衡造成的。城市景观类型包括灰色景观(人工建筑物,如大楼、道路等)、蓝色景观(如河流、湖泊等)、绿色景观(如城市园林、草坪、植被隔离带等),不同的景观类型在城市的城市热岛效应中所起的作用明显不同。城市热岛效应主要是由于灰色景观过渡集中分布引起的,可以看作热岛效应的“源”,而蓝色景观、绿色景观可以起到缓解城市热岛效应的作用;但是由于城市土地资源的有限性,蓝色景观和绿色景观的发展受到较大限制,为了减少城市热岛效应,如何在有限的土地资源条件下,合理布置各种景观类型空间格局将至关重要。

对于一个城市来说,当然是蓝色景观和绿色景观的面积越大越好,但是当蓝色和绿色景观面积一定时,如何进行各种景观的科学布局达到最佳功效将十分重要。在实际中,人们会常常感觉到,一些蓝色景观集中分布的地区气温肯定比灰色景观地区低出许多。尽管可以为城市居民提供一个舒宜的休闲环境,但是却未能对其他地区的热岛效应起到减缓作用。在研究城市热岛效应时,应根据热岛效应的“源”与“汇”特征,从空间上调控灰色景观、蓝色景观和绿色景观,将会有效地降低城市热岛效应的形成。

3 “源”“汇”景观格局评价模型与应用

“源”“汇”景观理论假设是从景观格局的角度,调控生态过程的平衡。“源”“汇”景观判断时必须明确研究的对象。不同的研究对象,景观类型的“源”“汇”性质将会发生变化。“源”“汇”景观理论的基本前提是在确定研究对象的基础上,分析不同景观类型在过程中所起的作用,进行“源”“汇”景观的辨识,之后判断不同性质的景观类型对生态过程的贡献。陈利顶等提出了基于过程的景观空间负荷对比指数^[25]。通过比较研究不同景观类型在流域非点源污染形成过程中的作用,借用罗伦兹曲线的理论和方法,通过比较不同“源”、“汇”景观类型对生态过程的贡献进行赋值,在此基础上,从距离、坡度和相对高度3个方面提出了“源”“汇”景观空间负荷对比指数,指数的大小可以反映景观空间格局对生态过程的影响^[15]。该模型充分考虑了格局与过程的关系,从而为研究景观格局与生态过程提供了一个新的思路。

3.1 “源”“汇”景观格局评价的概念模型

陈利顶等在提出景观空间负荷对比指数时,重点是从研究水土流失和非点源污染出发,具有较强的针对

性^[15]。对于一般的生态过程,“源”“汇”景观评价模型可以概括为:

$$LLI = \log \left\{ \sum_{i=1}^M \int_{x=0}^D S_{xi} \cdot \omega_i \cdot dx / \sum_{j=1}^N \int_{x=0}^D H_{xj} \cdot \omega_j \cdot dx \right\} \quad (1)$$

式中, LLI 表示景观空间负荷对比指数, D 表示研究地区至目标斑块(或者是一监测点、流域出口)的最大距离(也可以是坡度或者相对高度等指标), M 、 N 分别表示区域所有“源”、“汇”景观的类型总数; S_{xi} 、 H_{xj} 分别表示“源”、“汇”景观类型随着距离增加形成的面积累计曲线^[15]; ω_i 、 ω_j 分别表示第 i 种“源”景观类型的权重、第 j 种“汇”景观类型的权重。计算结果取对数主要是为了将计算结果控制在 0 附近。如果 LLI 的值大于零, 那么表明这种景观格局有利于研究过程的发展, 否则, 景观格局不利于生态过程的发展。在针对土壤流失这一生态过程研究中, 可以将有助于增加土壤侵蚀的坡耕地看成“源”景观; 将有助于减少土壤侵蚀的林地、草地等看成“汇”景观, 而不同景观类型对土壤侵蚀影响的贡献(可以看作一种“权重”)可以用土壤侵蚀通用方程中的作物覆盖与管理因子(C 值)来表征。

3.2 “源”“汇”景观评价与传统景观格局分析的区别

陈利顶等人以于桥水库流域 4 个典型小流域作为研究对象, 以非点源污染作为研究目标, 比较分析不同流域景观空间负荷对比指数与流域出口非点源污染监测值之间的关系。较好地计算出景观格局指数和流域出口的非点源污染物浓度联系在一起, 评价不同景观空间格局对流域出口地表水质的影响。此处提出的景观空间负荷对比指数是一个相对值, 尤其适合于环境背景相似的流域。一般认为, 景观空间对比指数越大, 流域出口监测点的非点源污染物的浓度(或径流、泥沙值)越大, 相反, 非点源污染物的浓度(或径流、泥沙值)越小。如果环境背景差异较大, 不同流域之间景观空间负荷对比指数不具有可比性, 需要对其他环境因子进行校正, 再计算景观空间负荷对比指数。

在传统的景观格局分析中, 一般是在统计各种景观类型面积的基础上, 选取一些景观格局指数, 如斑块平均面积、分维数、分离度、景观多样性、景观优势度、景观相邻指数、景观聚集度, 等等。但对于这些格局指数的生态学意义往往讨论不多。在格局与过程研究中, 目前有 3 个特点: ① 通过野外实验观测, 研究不同斑块形状、空间组合关系对生态过程的影响; ② 通过一些径流小区的观测实验, 研究不同景观类型及其空间组合对径流泥沙过程的影响; ③ 在较大尺度上, 利用数学模型模拟研究景观格局变化对一些过程的影响^[26-30]。前两者研究侧重于具体的实验观测结果, 研究的结论很难上推到较大的区域尺度上; 第三种研究由于缺乏不同尺度上格局-过程的定量观测结果, 模拟出来的结果常常与实际情况不符。所建立的“源”“汇”景观理论, 由于在研究格局——过程关系时, 考虑了不同景观类型对生态过程的影响(权重), 建立的景观格局评价指数本身就具有生态学意义。

4 结语

研究格局与过程的关系是景观生态学研究的核心内容, 针对生态过程探讨景观格局表征的理论与方法是目前景观生态学研究的难点与问题热点。基于大气污染中的“源”“汇”表示方法, 在已有研究基础上提出了“源”“汇”景观理论, 该理论能够为分析景观格局与生态过程的关系提供有益的科学支持, 在非点源污染、生物多样性保护、城市热岛效应等领域均有较好的应用前景。

“源”“汇”景观理论在具体的应用中, 必须要针对特定的生态过程, 分析相应的景观格局特征, 才能为景观格局的设计与分析提供科学的指导意义。因而, 在这个意义上, 所建立的“源”“汇”景观格局评价模型往往具有特定的应用领域。文中所论述的景观空间负荷对比指数是针对非点源污染与土壤侵蚀而构建的。若应用到其它领域, 尚需考虑生态过程的特征来建立相应的评价模型。目前, “源”“汇”景观理论处于构建初步阶段, 需要更多的案例研究和应用来进一步丰富, 因而欢迎读者针对该理论开展讨论与研究。

References:

- [1] Fu B J, Chen L D, Ma K M, et al. The principle and application of landscape ecology. Beijing: Science Press, 2001.

- [2] Xiao D N, Li X Z, Gao J, *et al.* Landscape Ecology. Beijing: Science Press, 2003.
- [3] Wu J G. Landscape Ecology—pattern, processes, scale and level. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [4] Opdam P, Foppen R, Vos C. Bridging the gap between ecology and spatial planning in landscape ecology. *Landscape Ecology*, 2002, 16: 767 ~ 779.
- [5] Haase D and Halle L. Development and Perspectives of Landscape Ecology. *Landscape Ecology*, 2004, 19: 567 ~ 569.
- [6] Li H B and Wu J G. Use and misuse of landscape indices. *Landscape Ecology*, 2004, 19(4): 389 ~ 399.
- [7] Johnson C J, Boyce M S, Mulders R, *et al.* Quantifying patch distribution at multiple spatial scales: applications to wildlife-habitat models. *Landscape Ecology*, 2004, 19(8): 869 ~ 882.
- [8] Nassauer J I, Corry R C. Using normative scenarios in landscape ecology. *Landscape Ecology*, 2004, 19(4): 343 ~ 356.
- [9] Zeng H, Jiang Z Y, Kong N N and Gao L Y. Auto-correlation analysis of landscape pattern for a fast urbanization area—a case study of Longhua area, Shenzhen City. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2000, 36(6): 824 ~ 831.
- [10] Dorner B, Lertzman K, Fall J. Landscape pattern in topographically complex landscapes: issues and techniques for analysis. *Landscape Ecology*, 2002, 17(7): 729 ~ 743.
- [11] Stevens V M, Polus E, Wesselingh R A, *et al.* Quantifying functional connectivity: experimental evidence for patch-specific resistance in the Natterjack toad (*Bufo calamita*). *Landscape Ecology*, 2004, 19(8): 829 ~ 842.
- [12] O'Neill R V, Krumme J R, Gardner R H, *et al.* Indices of landscape pattern. *Landscape Ecology*, 1988, 1(1): 153 ~ 162.
- [13] Turner M G, Garder R H. Quantitative Methods in Landscape Ecology: An Introduction. In: Turner M G ed. *Quantitative Methods in Landscape Ecology*. New York: Springer-Verlag, 1991. 13 ~ 14.
- [14] Haines-Young R, Chopping M. Quantifying landscape structure: a review of landscape indices and their application to forested landscapes. *Progress in Physical Geography*, 1996, 20(4): 418 ~ 445.
- [15] Cook E A. Landscape structure indices for assessing urban ecological networks. *Landscape and Urban Planning*, 2002, 58: 269 ~ 280.
- [16] Raines G L. Description and comparison of geologic maps with FRAGSTATS—a spatial statistics program. *Computers & Geoscience*, 2002, 28: 169 ~ 177.
- [17] Apan A A, Raine S R, Paterson M S. Mapping and analysis of changes in the riparian landscape structure of the Lockyer Valley catchment, Queensland, Australia. *Landscape and Urban Planning*, 2002, 59: 43 ~ 57.
- [18] Baker W L, Cai Y. The rule programs for multiscale analysis of landscape structure using the Grass geographical information system. *Landscape Ecology*, 1992, 7: 291 ~ 302.
- [19] Pearson D M. The application of local measures of spatial autocorrelation for describing pattern in north Australian landscapes. *Journal of Environmental Management*, 2002, 64: 85 ~ 95.
- [20] With K A, Crist T O. Critical thresholds in species responses to landscape structure. *Ecology*, 1995, 76: 2446 ~ 2459.
- [21] Tischendorf L. Can landscape indices predict ecological processes consistently? *Landscape Ecology*, 2001, 16(3): 235 ~ 254.
- [22] Chen L D, Li J R, Guo X D, *et al.* Temporal and Spatial Characteristics of Surface Water Quality in Jiyun River. *Environmental Science*, 2000, 21(6): 61 ~ 64.
- [23] Chen L D, Fu B J, Zhang S R, *et al.* A Comparative Study on the Dynamics of Non-point Source Pollution in a Heterogeneous Landscape. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(6): 808 ~ 816.
- [24] Chen L D, Fu B J, Zhang S R, *et al.* Seasonal change of solvable nitrogen in surface water of Yuqiao reservoir basin. *China Environmental Science*, 2003, 23(2): 210 ~ 214.
- [25] Chen L D, Fu B J, Xu J Y, *et al.* Location-weighted landscape contrast index: a scale independent approach for landscape pattern evaluation based on “Source-Sink” ecological processes. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(11): 2406 ~ 2413.
- [26] Nearing M A, Jetten V, Baffaut C, *et al.* Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover. *Catena*, 2005, 61(2 ~ 3): 131 ~ 154.
- [27] Hessel R, Messing I, Chen L D, *et al.* Soil erosion simulations of land use scenarios for a small Loess Plateau catchment. *Catena*, 2003, 54(1-2): 289 ~ 302.
- [28] Cooper C B and Walters J R. Independent effects of woodland loss and fragmentation on Brown reecreeper distribution. *Biological Conservation*, 2002, 105(1): 1 ~ 10.
- [29] Deckers B, Herym M, Muys B. Factors affecting plant species composition of edgerows: relative importance and hierarchy. *Acta Oecologica*, 2004, 26: 23 ~ 37.
- [30] Evans R. Monitoring water erosion in lowland England and Wales—a personal view of its history and outcomes. *Catena*, 2005, 64(2): 142 ~ 161.

参考文献:

- [1] 傅伯杰, 陈利顶, 马克明, 等. 景观生态学原理及应用. 北京: 科学出版社, 2001.
- [2] 肖笃宁, 李秀珍, 高峻, 等. 景观生态学. 北京: 科学出版社, 2003.
- [3] 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.
- [9] 曾辉, 江子瀛, 等. 快速城市化景观的空间自相关特征分析. 北京大学学报(自然科学版). 2000, 36(6): 824 ~ 831.
- [22] 陈利顶, 李俊然, 郭旭东, 等. 蓟运河流域地表水质时空变化特征分析. 环境科学, 2000, 21(6): 61 ~ 64.
- [23] 陈利顶, 傅伯杰, 张淑荣, 等. 异质景观中非点源污染动态变化比较研究. 生态学报, 2002, 22(6): 808 ~ 816.
- [24] 陈利顶, 傅伯杰, 张淑荣, 等. 于桥水库流域地表水中水溶性氮季节变化特征. 中国环境科学, 2003, 23(2): 210 ~ 214.
- [25] 陈利顶, 傅伯杰, 徐建英, 等. 基于“源-汇”生态过程的景观格局识别方法. 生态学报, 2003, 23(11): 2406 ~ 2413.