

# 基于水环境保护的流域景观格局 优化理念初探

岳隽<sup>1,2</sup>, 王仰麟<sup>1,2</sup>, 李贵才<sup>1,2</sup>, 吴健生<sup>1,2</sup>

(1. 北京大学 环境学院, 北京 100871; 2. 北京大学 深圳研究生院, 深圳 518055)

**摘要:** 流域范围内因水体的联系使得不同类型景观斑块之间的相互作用变得更为紧密, 因而景观格局的变化会显著影响流域内水体质量。着眼于流域尺度上水环境保护的需要, 必须合理考虑景观斑块的类型、格局和空间分异等特征, 尽可能地减少非点源污染输出量, 从而降低水体遭受污染的威胁程度。本研究从水环境保护的角度出发, 以“源”“汇”景观在镶嵌组合和空间分异方面利用的适宜性作为优化依据, 以“源”“汇”景观空间分布的关键地段作为研究战略点, 同时考虑“源”“汇”景观在数量、空间和转换成本等方面的客观约束条件, 将景观数量结构优化和空间结构优化进行有机结合, 最终确定了流域尺度上以调控非点源污染、保护水体质量为目的的景观格局优化研究的概念框架。本研究不仅为解决流域尺度上非点源污染问题提供了一个全新的研究视角, 而且为降低景观类型及其格局对水体质量的威胁程度提供了一个行之有效的优化方案。

**关键词:** 水环境保护; 景观格局优化; “源”“汇”景观; 非点源污染; 流域

## 1 引言

景观的结构、功能和过程总是与一定的空间范围相联系的, 而流域作为由分水线所包围的、具有相对比较明确边界条件的区域逐渐受到了关注。在流域这样的空间尺度上, 由于水流在重力作用下的汇集作用使得不同景观要素之间的物质流和能量流的联系更为紧密, 因而也使得流域下垫面因素比如流域的地形、土壤和植被等均会对流域的水文特征和水质状况产生显著的影响。正是基于这样的关联关系, 使得从景观生态学的角度来研究景观格局变化对水文水质的影响成为极具研究价值的科学问题。

水体受到污染的主要原因不外乎点源污染和非点源污染这两种方式。点源污染主要来自固定位置的废污水排放, 非点源污染主要来自于降雨径流污染。在非点源污染形成和迁移过程中, 地表径流携带污染物的多少主要取决于堆积在地表面的污染量和地表径流的冲刷力(流速、动能等)<sup>[1]</sup>。在非点源污染形成过程中, 流域中一些景观类型起到了“源”的作用, 一些景观类型起到了“汇”的作用, 同时一些景观起到了传输的作用<sup>[2]</sup>, 这样将不同景观类型根据非点源污染形成和削减过程中所起的不同作用可以区分为“源”“汇”两种景观。由于

收稿日期: 2006-11; 修订日期: 2007-04.

基金项目: 国家重点基金资助项目(40635028); 国家自然科学基金资助项目(40471002)。

作者简介: 岳隽(1977-), 女, 甘肃兰州人, 博士生, 主要从事景观生态学研究。E-mail: yuejun163@163.com

通讯作者: 王仰麟, 博士生导师。E-mail: ylwang@urban.pku.edu.cn

“源”景观对污染物输出的贡献较大,而“汇”景观削减非点源污染的能力比较强,不同景观的“源”“汇”特征、组合方式以及空间分布等均会对非点源污染产生影响。由于景观格局的改变对非点源污染的影响十分显著<sup>[3-5]</sup>,因此从景观格局入手来进行非点源污染的防治是非常有效的一种措施。实际上,景观生态学的发展从一开始就与生态对话、管理和恢复等实际问题密切联系,其原理和规律为在实际工作中通过优化景观格局,提高生态系统稳定性提供了理论框架<sup>[6-8]</sup>。结合不同景观在非点源污染输出和削减过程中的“源”“汇”特征,通过景观结构的优化配置和组合设计,不仅可以对污染物的空间分布特征进行调节,而且可以有效阻止污染物的空间扩散。因此通过景观规划的生态学途径<sup>[9,10]</sup>,探讨有利于水环境保护的景观格局优化方案,对于解决降雨径流污染和改善降雨径流水质是非常合适的切入角度。

## 2 流域景观格局优化理念

流域尺度上的景观格局优化研究,必须要关注到流域范围内因为水体的存在使得不同类型景观斑块之间的联系变得更为紧密,景观格局的变化会显著影响流域内水体的质量。着眼于流域尺度上水环境保护的需要,必须合理考虑景观斑块的类型、格局和空间分异等特征,尽可能的减少非点源污染输出量,从而降低水体遭受污染的威胁程度。流域景观格局优化的框架见图 1。

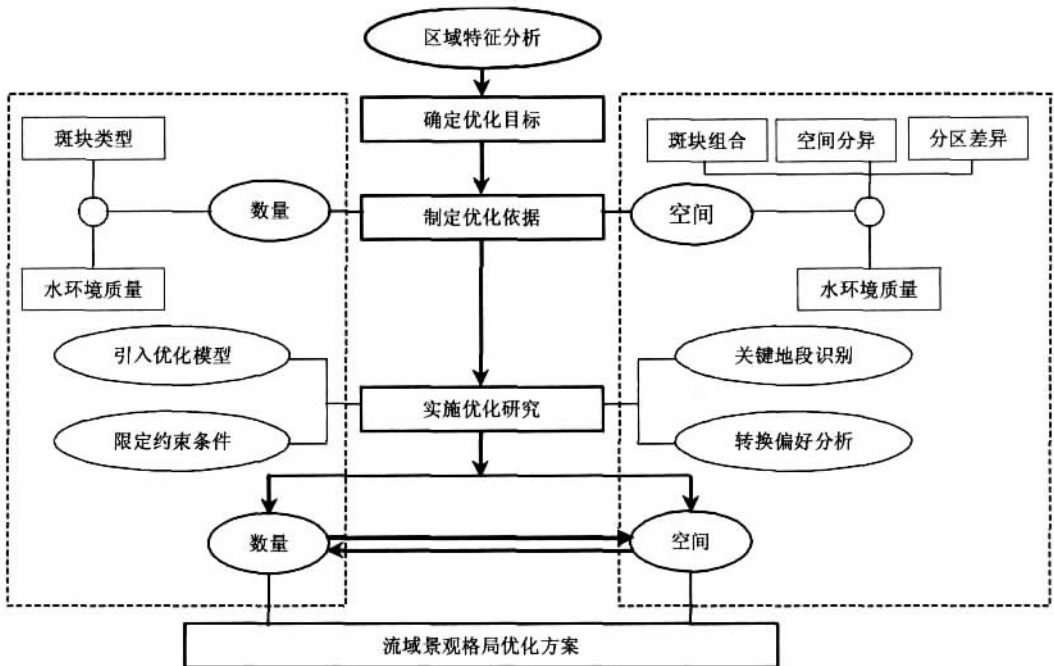


图 1 流域景观格局优化框架

Fig.1 Conceptual framework of watershed landscape optimization concerning water protection

以水环境保护为首要目标的流域景观格局优化,需要在区域特征分析的基础上,通过确定优化目标、制定优化依据、实施优化研究三个主要步骤来进行,其主要研究内容包括数量

结构优化和空间结构优化两部分。在面向水环境保护的流域景观格局优化研究中,最核心的问题包括三个方面:一个是确定进行景观格局优化的依据,一个是明确运行优化模型所需的约束和限制条件,第三个方面就是确定进行空间格局优化的先后次序。

### 2.1 优化依据

优化依据是进行景观格局优化的前提条件,是落实水环境保护要求所应该遵循的基本原则。根据景观格局优化的内容,优化依据需要在数量和空间两个方面确定一定的优化原则。其中,斑块类型与水环境质量之间的关系是进行景观格局数量优化的重要依据。在空间特征方面,由于景观组合特征以及景观空间分异特征均会显著影响水体质量,从这个角度对“源”“汇”景观的分布格局对非点源污染形成和削减方面的影响程度予以考虑,将构成景观格局空间优化的重要依据。

### 2.2 有效约束

流域作为一类典型的复合系统,其中的每一个要素均处于不同要素所交织而成的系统网络中,网络中任一个要素的变化都会关联到其他要素的变化。如果忽略了网络系统的输入输出条件和反馈限制,就很难得出满足不同需求的优化方案。从这个意义来讲,没有限制的优化不是真正意义上的优化,当然不会实现切实的优化目标。在约束条件中,可以将定量和定性分析方法结合起来用于确定数量约束、空间约束、技术约束和成本约束等条件。从景观格局优化角度来看,数量约束条件来自于不同斑块类型的现状数量以及未来可能发展的数量限制,空间约束则主要是指城镇发展规划比如生态控制线、水源保护区等规划要素的限制,技术约束和成本约束分别考虑了对景观格局进行优化时技术操作的可行性以及支付成本的费效比。当然除了这些约束条件以外,还应该考虑国家有关政策、产业发展导向等相关软环境的限制作用。

### 2.3 优先次序

优先次序则是将景观格局优化方案落实到空间上的重要环节。若不能确定需要进行优化的关键地段,就无法将优化方案的数量结构以空间配置的方式落实下来;若没有不同斑块类型之间转换偏好特征的分析,就无法对关键地段多个斑块转换的情况进行合理选择。不论是关键地段的识别,还是转换偏好的分析,都说明了在景观格局优化时必须关注优先次序问题,只有依据有效和有序的规则才能实现景观格局优化目标的最终实现。

在面向水环境保护的景观格局优化框架中,特别强调了景观格局与水体质量之间密切联系的关键地位,同时也突出了通过优化模型确定的数量优化格局和以关键地段识别为基本要求的空间优化格局之间的紧密关联程度。在这样的框架下,必然可以寻找到满足相关限制条件的、同时可以有效保护水环境的景观格局优化方案。

## 3 流域景观格局优化依据

许多研究表明,土地利用/覆被类型与水体的数量和质量之间存在着紧密的相互作用关

系,而且土地利用方式和土地覆被类型的变化可以显著地影响水体的水质和水量<sup>[11-14]</sup>。其中,景观斑块类型、景观斑块组合方式以及景观空间分异特征等与水体质量变化之间存在着紧密的关联关系,这些特征的变化均会对水体质量产生不同程度的影响,因此从斑块类型、景观组合特征以及景观空间分异特征3个方面入手来探讨合理的景观格局优化方案是切实保护水环境的重要依据。

### 3.1 斑块类型

景观斑块类型在物质输出和流失方面具有明显的差异,不同的景观类型可以通过地表径流、入渗、蒸发和溶解物质流等方式对降雨进行分配。如果地表径流经过可能会产生较大污染输出的斑块类型,比如城镇建设用地或农用地等区域,那么地表径流水体中必然会携带较多的污染物质,从而影响水体的质量。在面向水环境保护的景观格局优化中,必须特别关注如何对可能给水体造成严重污染的“源”景观进行优化,同时还要综合考虑如何最大限度的发挥“汇”景观截流和削减污染物的作用。

虽然“源”“汇”景观的作用可能会随着它们在区域中相对位置的变化而发生变化。比如园地和城镇用地相比较而言,其污染输出程度相对较低,如果园地位于城镇用地的下游,那么在某些条件下园地可以起到截流污染物的作用。但是从污染物的输出大小和截流污染物的能力来看,园地产生有机污染物的程度要远远大于林地和草地,而其截流污染物的能力却小于林地和草地。因此,和林地、草地相比,园地依然是一种“源”景观。从污染物削减的角度出发,应尽量增加林地和草地这类“汇”景观的数量,同时减少城镇用地、工业用地、耕地和园地等“源”景观的数量。

### 3.2 景观组合特征

景观的不同组合特征对水质的影响较为复杂。从理论的角度来分析,在景观总面积和“源”“汇”景观面积也就是“源”“汇”景观的优势程度不发生变化的条件下,如果“汇”景观在整个流域尺度上分布的越分散,其截留和削减污染物的几率明显增加,从而可以降低“源”景观对水体质量的威胁程度,起到水环境保护的作用。基于这样的特征,如果不考虑“源”“汇”景观在流域上下游空间位置差异对其功能的影响作用,仅仅从景观空间格局的优化来看,在整个流域尺度上,需要提高“汇”景观的优势程度和分散程度,尽可能充分发挥“汇”景观削减非点源污染负荷的作用。

当然在“汇”景观集中或分散布置的研究中,还应该结合“汇”景观相对于具有方向性的水流过程的空间位置以及“汇”景观在水流方向上相对于“源”景观的空间位置进行综合考虑。“汇”景观在流域上下游分布的差异,使“汇”景观所起的作用表现出不同的特征。如果“汇”景观位于流域的上游,因这一区域内坡度相对较大,那么“汇”景观主要发挥的是水源涵养和降低水土流失的作用;如果“汇”景观位于流域的中下游,它则主要被用来削减非点源污染负荷。一般由于流域的地形约束,流域内相对高度较小、距离水体相对较近的区域均被开发成建设用地,也就是被“源”景观所占据;而流域内相对高度较大、坡度也较大的区域多保留了林地等“汇”景观,这种分布特征使得“汇”景观不能很好的发挥非点源污染削减的作用。从非点源污染防治的角度出发,需要在流域的中下游位置,多布置一些林地等“汇”景观,用

于降低“源”景观对水体质量的威胁程度。

至于“汇”景观在流域中下游的分布以集中为好、还是以分散为好,可以根据 Forman 提出的“集中与分散相结合”的最优景观格局原理<sup>[15]</sup>,对“源”“汇”景观予以合理配置,当然同时还必须结合景观关键地段的识别进行协调。

### 3.3 景观空间分异特征

在景观空间分异特征对水体质量影响的研究中主要通过不同高度、不同坡度以及不同距离这三类空间要素进行分析。一般认为,“源”景观所在的位置相对高度越小、与地表水体的距离越近,而同时坡度越大的话,那么对地表水体质量造成威胁的程度越大。与此相反,“源”景观分布的区域相对高度越大、距离地表水体越远,而坡度越小的情况下,“源”景观输出的污染物对水体质量的影响程度越低<sup>[5,16]</sup>。这样从水环境保护的角度出发,“源”“汇”景观在高度、坡度和距离三个空间要素方面具有一定的利用适宜性,具体结果见表 1。

表 1 流域尺度上“源”“汇”景观利用适宜性  
Tab.1 Feasible usage of ‘source’ ‘sink’ landscape at watershed scale

空间要素	“源”景观	“汇”景观
高度	越高越有利于减少污染威胁	无限制,越低越有利于削减和截流污染物
坡度	越平缓越有利于减少污染威胁	无限制,越陡越有利于发挥涵养水源的作用
与水体距离	越远越有利于减少污染威胁	无限制,越近越有利于削减和截流污染物

高度要素反映了不同景观类型的高度分布对水体的影响作用。一般情况下,“源”景观相对高度越大,对水体污染的威胁程度就越小。但是由于相对高度较大的区域,其土地开发的成本越高。因而在“源”“汇”景观的转换方面,“汇”景观能否向相对高度较小的区域发展受到“源”“汇”景观转换成本的约束限制。

坡度要素反映了可以减小径流过程中土壤流失及其携带的污染物输出的适宜条件。其中,城镇用地和工业用地等“源”景观均应该布置在较为平坦的地区,而林地等“汇”景观则没有坡度的限制。由于林地的植被较好,能够将快速径流转变为慢速流,从而减小土壤侵蚀的危险,所以适宜在较陡的坡度上优先发展林地;同时由于林地具有较强的截流和削减污染物的作用,所以“源”景观下游坡度较为平缓的地区也适宜发展一定林地来削减污染物输出量。

距离要素反映了不同斑块类型与地表水体的距离,实际上反映的是对水体的直接威胁程度。如果“源”景观距离地表水体越近,那么“源”景观所输出的污染物进入水体的路径越短,这显然会增加水体遭受污染的程度。从水源保护的角度出发,划定合理的水源保护范围就是在距离要素上尽可能降低“源”景观的贡献。

## 4 流域景观格局优化关键地段

在优化格局时,一定要注意识别一定的战略点。所谓“战略点”(Strategic points)是指那些对维持景观的生态连续性具有战略意义或瓶颈作用的景观地段<sup>[17]</sup>。在面向水环境保护的景

观格局优化中, 必须关注“源”“汇”景观的一些关键地段, 这些地段的“源”景观可以对污染物输出产生较大的贡献; 与之相反, 这些地段上的“汇”景观则可以更好的发挥削减污染物的作用。对这些地段的判断和分析是进行景观空间要素优化配置的基础工作之一。

图 2 形象地表示了流域尺度上需要识别的三类关键地段。由于这些地段的“源”景观均可能对非点源污染产生较大的贡献, 因而需要在研究中予以重点考虑。

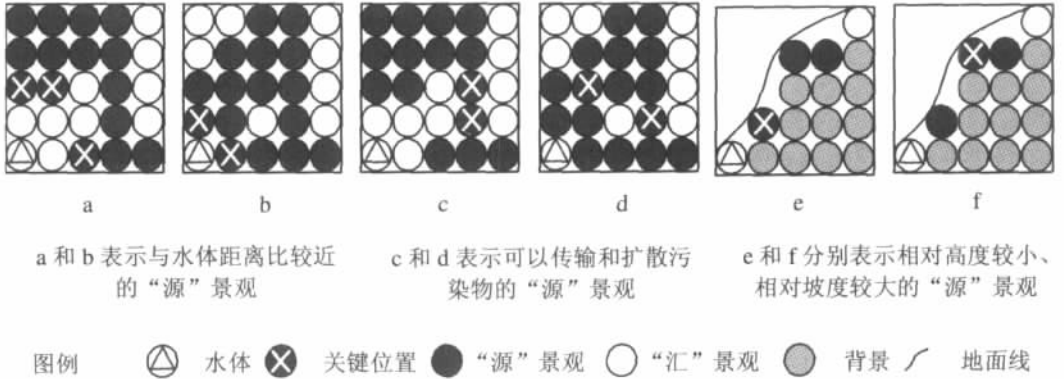


图 2 景观格局优化关键地段识别

Fig.2 Strategic points in landscape pattern optimization

## 5 流域景观格局优化转换方案

由于景观格局的优化必然伴随景观斑块类型和空间位置等特征的变化。从景观斑块变化特征来看, 一种斑块类型向其它斑块类型进行转换时具有不同程度的趋利特征, 这样就需要确定位于关键地段内不同类型“源”“汇”景观进行格局优化时的优先次序, 从而使得优化方案可以更好的实现。

### 5.1 类型转换

在斑块类型转换方面, 不能拘泥于用地现状的限制, 应该从提高斑块利用效益和降低非点源污染输出量的角度予以协调。比如, 在城市建设用地的开发方面, 随着城市的发展以及可建设用地数量的日益减少, 可供城市发展的后备用地主要为适宜城市建设、同时对生态环境不产生影响的用地。虽然对于已建设城区, 将城市建设用地转换为其他类型用地是不大现实的。但是如果考虑截流以及削减非点源污染的需要, 可以在道路两侧以及居住区和工业区靠近水体的一侧布置一定数量的林地, 也就是说为了生态保护的需要可以将一些低密度的城市建设用地转换为林地。从水环境保护的角度来看, 在斑块转换过程中, 不同类型的斑块转换成林地的优先度最高。对于农用地而言, 虽然由于基本农田保护的要求需要保留一些农用地, 但是对于布局不合理的耕地也可以考虑易地开发、低产田改造等方式进行优化。

### 5.2 坡度转换

对于坡度因素来讲, 一些斑块类型需要从较陡的坡度上转换到较平缓的坡度上, 而另外

一些斑块类型则需要从较平缓的坡度上转换到较陡的坡度上。比如,当林地需要转换成其他用地斑块的时候,则优先将较为平缓坡度上的林地进行转换,这样可以降低水土流失。同样的道理,当园地转为林地的时候,则优先将较陡坡度上的园地转为林地;当未利用地转换成城镇用地以及工业用地的时候,应该优先转换的也是那些坡度较小的地区。

### 5.3 距离转换

对距离地表水体这一因素的转换偏好的分析主要是考虑到尽可能降低人类活动的影响程度,减小非点源污染对地表水体的威胁。由于城镇建设用地离水体越近,对水体的影响程度就会越大。因此,城镇用地和工业用地以及交通用地等“源”景观最好距离水体较远一些,这样当园地需要转换成城镇用地或工业用地的时候,则是离水体较远的园地进行优先转换。而当园地转换为林地时,则是距离地表水体较近的园地优先转换为林地,这样可以降低园地等农用地因施肥等对水环境带来的威胁。在距离要素方面,还有一个重要的转换偏好是就近原则。这是因为从土地开发的成本效益来看,土地利用的规模效应有助于提高土地利用的效益。实际上,景观斑块发生变化的位置与具有相同斑块类型的位置越近越好,这实际上也体现了斑块发展变化的自然趋势。

## 6 结论与讨论

本文从水环境保护的需求出发,构建了流域景观格局优化框架。一方面,研究中以“源”“汇”景观在镶嵌组合特征和空间分异特征方面利用的适宜性作为优化依据,以“源”“汇”景观空间分布的关键地段作为研究战略点,同时考虑“源”“汇”景观在数量、空间和转换成本等方面的客观约束条件,最终确定了流域尺度上以调控非点源污染、保护水体质量为目标景观格局优化框架。这不仅为解决流域尺度上非点源污染问题提供了一个全新的研究视角,而且为降低景观类型及其格局对水体质量的威胁程度提供了一个行之有效的处理方案。

另一方面,研究中将景观数量结构优化和景观空间格局优化结合起来进行流域景观格局优化研究。研究中根据“源”“汇”景观格局变化对水体质量影响的特征,确定了景观格局优化的依据以及需要识别的关键地段,将景观格局数量多目标优化的结果分别落实在不同的关键地段,从而保证了景观数量结构优化和空间结构优化的有机结合。这样不仅将流域的经济发展目标和水质保护目标统一到景观格局的优化数量上,而且该数量在空间上的配置也有利于流域经济发展和水质保护目标的更好实现。

当然,仅仅通过景观格局优化来削减污染物的程度是非常有限的。一般情况下在流域的中下游已经建设了大量的城镇和工业用地,而流域用地规模是有限的,不可能按照水质保护目标发展更多的“汇”景观。因此,在对现状景观格局进行优化的基础上,还必须采取有效的景观优化利用对策,对非点源污染产生的源头和扩散的过程均给予积极、有效的防控,从而保障流域的可持续发展。

### 参考文献

- [1] 沈晋,沈冰,李怀恩等. 环境水文学. 安徽:安徽科学技术出版社, 1992.

- [2] Basnyat P, Teeter L D, Flynn KM, et al. Relationships between landscape characteristics and non-point source pollution inputs to coastal estuary. *Environmental Management*, 1999, 23(4): 539-549.
- [3] Leon L F, Soulis E D, Kouwen N, et al. Nonpoint source pollution: A distributed water quality modeling approach. *Water Reserv*, 2001, 35(4): 997-1007.
- [4] 郑一, 王学军. 非点源污染研究的进展与展望. *水科学进展*, 2002, 13(1):105-110.
- [5] 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——景观空间负荷对比指数. *生态学报*, 2003, 23(11): 2406-2413.
- [6] 邬建国. 景观生态学——概念与理论. *生态学杂志*, 2000, 19(1): 42-52.
- [7] 张惠远, 王仰麟. 土地资源利用的景观生态优化方法. *地学前缘*, 2000, 7(增刊): 112-120.
- [8] 张惠远, 倪晋仁. 城市景观生态调控的空间途径探讨. *城市规划*, 2001, 25(7):15-18.
- [9] [美]弗雷德里克·斯坦纳著. 周年兴, 李小凌, 俞孔坚, 等译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.
- [10] 李正国, 王仰麟, 张小飞等. 景观生态区划的理论研究. *地理科学进展*, 2006, 25(5): 10-20.
- [11] Calder I R. Hydrologic effects of land-use change. Chapter 13 in Maidment, D.R., *Handbook of hydrology*. McGraw-Hill, New York, 1993.
- [12] Bhaduri B, Harbor J, Engel B A, et al. Assessing watershed-scale, long-term hydrologic impacts of land use change using a GIS-NPS model. *Environmental Management*, 2000, 26(6): 643-658.
- [13] 魏建兵, 肖笃宁, 解伏菊. 人类活动对生态环境的影响评价与调控原则. *地理科学进展*, 2006, 25(2): 36-45.
- [14] 李锐, 杨勤科, 温仲明等. 区域土地利用变化环境效应研究综述. *水土保持通报*, 2002, 22(2): 65-70.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] Yu K J. Security patterns and surface model in landscape planning. *Landscape and Urban Planning*, 1996, 36(5):1-17.

## The Conceptual Framework of Watershed Landscape Optimization Concerning Water Environmental Protection

YUE Jun<sup>1,2</sup>, WANG Yanglin<sup>1,2</sup>, LI Guicai<sup>1,2</sup>, WU Jiasheng<sup>1,2</sup>

(1. College of Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen 518055, China)

Abstract: Landscape pattern, function and process all have close relationship with certain scale. Watershed with clear boundary and special scale and character becomes a focus region in studying landscape ecological process. For the collection of water by the gravitation at the watershed scale, the change of landscape pattern will heavily influence the water quality. Because the change of landscape pattern will dramatically influence the non-point pollution, it is necessary to control the non-point pollution from the perspective of landscape optimization. Considering the needs of water environmental protection at watershed scale, it is necessary to study how the type, pattern and spatial difference of landscape influence water pollution process. By reason-



able allocation and complex design of landscape pattern, optimal landscape will change the distribution characteristics of pollution and stop the diffusion of pollution at spatial space. This will do good to water environmental protection and non- point pollution decrease.

In order to realize this target, this paper constructs a conceptual framework for landscape pattern optimization concerning water environmental protection. This framework mainly considers four aspects as follows: (1) the feasible usage of 'Source ' and 'Sink ' landscape with spatial differences as optimization rules; (2) the key points in 'Source ' and 'Sink ' landscape pattern optimization; (3) some limits such as quantity, cost and other things that influence the change of 'Source ' and 'Sink ' landscape; and (4) the combination of the landscape quantity optimization with the landscape spacial optimization. On the basis of these results, this paper fulfills a conceptual framework of landscape optimization concerning the water environmental protection and non- point pollution decrease.

According to an optimal combination of these four aspects, we could analyze the studying area characteristics, clear studying aims, confine optimal rules and carry out the research step by step. With some controlling methods of landscape ecology optimization, the landscape pattern optimization and water protection will be also realized. This study supplies not only a new view for resolving non- point pollution problem at watershed scale, but also a valid measure for decreasing the influence of landscape type and pattern on water quality.

Key words: water environmental protection; landscape pattern optimization; 'source ' and 'sink ' landscape; Non- point pollution; watershed