

# 基于“源-汇”生态过程的长江上游农业非点源污染

刘 芳, 沈珍瑶\*, 刘瑞民

(北京师范大学环境学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 北京 100875)

**摘要:**景观空间格局是农业非点源污染的主要影响因素之一, 关于二者的相互关系缺乏定量研究。针对长江上游的农业非点源污染问题, 应用基于“源-汇”生态过程理论提出的景观空间负荷对比指数, 选取9个典型的行政单元, 探讨了长江上游流域景观空间格局和非点源污染之间的定量关系。结果表明, 景观空间负荷对比指数对非点源污染负荷有显著的响应关系, 说明景观空间负荷对比指数可作为非点源污染空间风险评价的有用方法之一。在此基础上, 进一步分析了长江上游典型行政单元景观空间负荷对比指数时空演变规律。探讨了指数演变时空差异原因, 认为该指数主要受到区域景观的坡度、与污染出口相对距离、高程、土地利用类型比重和农业与农村经济政策的影响。最后提出了长江上游非点源污染空间风险控制与管理的对策。

**关键词:**长江上游流域; 景观空间结构; 非点源污染; 景观空间负荷对比指数

文章编号:1000-0933(2009)06-3271-07 中图分类号:X171 文献标识码:A

## The agricultural non-point sources pollution in the upper reaches of the Yangtze River based on source-sink ecological process

LIU Fang, SHEN Zhen-Yao\*, LIU Rui-Min

School of Environment; State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control: Beijing Normal University, Beijing 100875, China  
*Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 3271 ~ 3277.

**Abstract:** Landscape pattern is one of the main influence factors of agricultural non-point sources (NPS) pollution. The study of the relation of landscape and NPS is scarce and steadily become one of the key research areas now. Aimed at the agricultural NPS pollution problem, a study is carried out in the nine typical districts of the upper reaches of the Yangtze River using the location-weighted landscape contrast index (LCI) which is a landscape pattern evaluation method constructed on the base of the source and sink ecological processes theory. The result showed that LCI responded to NPS pollution load significantly, so LCI can be a good indicator in the evaluation of NPS pollution. Then the spatio-temporal characteristics of the LCIs are analyzed, and the reasons of these characteristics are explored. The slope degree, relative distance to the pollution outlets, elevation and the percentages of different land-use patterns are considered as the main reasons of these characteristics. So a new thinking of controlling NPS pollution is provided, that is, controlling the future spatial risk of NPS pollution by planning and managing the landscape spatial pattern. Finally the countermeasures for the control and management of the NPS spatial risk in the upper reaches of the Yangtze River are discussed: (1) strengthen the management and the improvement tillage of the hillside field; (2) strengthen the management of the agricultural spatial landscape pattern, minimize the NPS pollution load in the outlets from the “source” and “sink” point of view; (3) strengthen the construction of the demonstration areas which control the agricultural NPS pollution spatial risk to perfect the theory and the practice of controlling NPS pollution from the landscape pattern point of view.

**Key Words:** upper reaches of the Yangtze River; landscape pattern; non-point sources pollution; location-weighted landscape contrast index

基金项目:国家教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目(NCET-06-0130); 国家重点基础研究发展规划(973)课题资助项目(2003CB415204)

收稿日期:2008-03-20; 修订日期:2008-06-30

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zyshen@bnu.edu.cn

非点源污染是目前人类关注的主要生态过程之一<sup>[1,2]</sup>。长江作为我国第一大河流,其上游的非点源污染已成为影响长江水质的重要因素<sup>[3]</sup>。非点源污染的产生和迁移与景观的空间格局密切相关<sup>[4~9]</sup>。由于土地利用方式和人类活动强度的差异,不同类型景观中产生和输出的非点源污染负荷有很大的差异<sup>[4,9~11]</sup>。有文献<sup>[12]</sup>指出在对某个生态过程进行考察的前提下,将景观结构与生态过程相结合的格局分析是未来景观格局研究的主要发展方向之一。目前虽然利用小区的观测试验结果来推断大尺度上景观格局对非点源污染过程的影响仍是景观格局研究的热点,由于随着尺度增大,非点源污染的发生机制发生明显的改变<sup>[9,12~17]</sup>,在研究大尺度上的景观格局影响下的非点源污染生态过程时,跨越空间尺度的非点源污染景观格局识别方法研究开始备受关注<sup>[18,19]</sup>。

本研究针对长江上游非点源污染这一突出的水环境问题<sup>[3]</sup>,应用跨越空间尺度的非点源污染景观格局识别方法(景观空间负荷对比指数法<sup>[18]</sup>)来表征景观空间分布格局,通过分析长江上游不同景观空间分布格局与非点源污染程度的相关性,对该识别方法进行了评价,为依据景观空间格局来评估非点源污染空间风险,从而采取有效的非点源污染防治措施探索了适用的方法;通过分析长江上游典型行政单元景观空间负荷对比指数的演变,讨论了行政单元之间和年份之间的差异,分析了影响长江上游非点源污染空间风险的主要景观空间因素,有助于开展更有针对性的长江上游非点源污染防治对策措施研究,如政策导向措施、土地利用规划措施等。

## 1 研究方法概述

### 1.1 景观空间负荷对比指数法

景观空间格局是生态系统或系统属性空间变异程度的具体表现,是景观性状最直观的表现形式,制约着各种生态过程<sup>[19,20]</sup>。依据“源-汇”景观理论<sup>[21]</sup>,如果区域中“源”、“汇”景观在空间分布上达到平衡状态,形成合理的空间分布格局,将会输出较少的非点源污染物;反之则会输出较多的非点源污染物。对于非点源污染生态过程来说,在不同时空尺度下,建立格局与过程之间相互联系的首要问题便是如何将景观格局量化。

陈利顶、傅伯杰等<sup>[18]</sup>基于“源-汇”景观理论提出了景观空间负荷对比指数,它借用洛伦兹曲线来定量刻画景观空间格局与非点源污染生态过程之间的关系,并且不受研究尺度的约束。索安宁等<sup>[22]</sup>通过在黄土高原泾河流域12个子流域进行实证研究,说明景观空间负荷对比指数对流域水土流失具有一定的指示作用,可作为水土流失等非点源污染生态过程评价的一个有用方法。本文采用该指数来进行景观空间格局演变对非点源污染风险影响的定量评价,模型如下:

$$LCI = \log \left\{ \sum_{i=1}^m S_{ODBC} \times W_i \times P_{ci} \times R_i / \sum_{j=1}^n S_{OFBC} \times W_j \times P_{cj} \times R_j \right\} \quad (1)$$

式中,LCI(landscape contrast index)为景观空间负荷对比指数(距离、相对高度和坡度); $i$ 表示第*i*种“源”景观类型, $j$ 表示第*j*种“汇”景观类型; $m$ 表示有*m*种“源”景观类型, $n$ 表示有*n*种“汇”景观类型; $S_{ODBC}$ 、 $S_{OFBC}$ 分别表示由“源”、“汇”景观面积累积曲线组成的不规则三边形面积,见图1; $W_i$ 、 $W_j$ 表示各景观类型对养分流失或截留作用能力的权重值; $R_i$ 、 $R_j$ 表示各景观类型的降雨量权重值; $P_{ci}$ 、 $P_{cj}$ 表示景观类型的面积百分比。

### 1.2 非点源污染负荷指标的计算方法

非点源污染负荷指标数据通过改进的输出系数法<sup>[23~25]</sup>计算得到,模型如下:

$$L_i = \sum_{j=1}^n E_{ij} [A_j(I_j)] + P \quad (2)$$

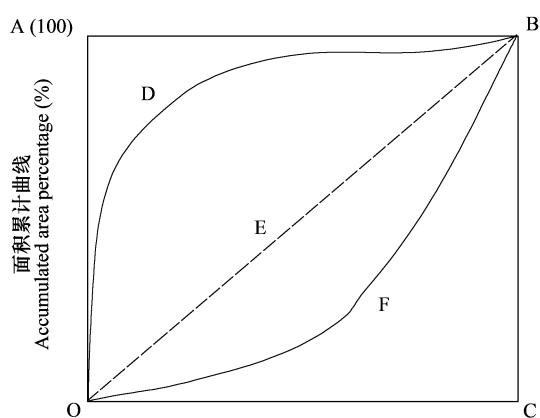


图1 “源”、“汇”景观空间分布示意图

Fig. 1 Scheme figure of the spatial distribution of source-sink Landscape

式中, $i$ 为污染物类型,主要考虑TN、TP 2种; $j$ 为区域中营养源的种类,主要考虑土地利用、人口数量以及大牲畜、猪、羊、家禽数量共6种; $L_i$ 为非点源污染出口处第*i*种污染物流失量( $\text{kg} \cdot \text{km}^{-2}$ ); $E_{ij}$ 为第*j*种营养源的营养物输出系数( $\text{kg} \cdot \text{km}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ); $A_j$ 为第*j*种营养源的数量; $I_j$ 为第*j*种营养源营养物输入量(kg); $P$ 为降雨输入的营养物量(kg)。

## 2 研究区选取及数据来源

### 2.1 研究区选取

长江上游流域面积约100万 $\text{km}^2$ ,生态战略地位突出。近年来,土壤流失和水体污染日益严重,而非点源污染成为影响长江水质的重要因素之一<sup>[3,7,8]</sup>。长江上游所跨行政区域较大,不同行政单元社会经济条件各异,同时长江上游地形复杂多样,不同地理条件下的自然资源条件不同。本研究主要从非点源污染综合管理的角度出发,更多地考虑政策宏观管理的完整性,以行政区划为主、自然条件为辅选取了昌都地区等9个研究单元;结合景观空间负荷对比指数对“非点源污染出口”的定义和张水龙等针对农业非点源污染管理和数学模拟提出的空间单元划分方法<sup>[26]</sup>,选取各行政单元内的最高级水道的出口作为该行政单元的非点源污染出口,见图2。

### 2.2 “源”和“汇”景观类型划分

结合陈利顶,傅伯杰等基于“源-汇”理论,针对非点源污染生态过程所划分的“源”、“汇”景观<sup>[18,26]</sup>和所获取的长江上游土地利用类型数据的特点,耕地是主要的“源”景观,而城镇和荒地由于没有地表植被容易造成营养物质的流失,因此也划分为“源”景观,由于草地和林地由于植被覆盖比较好,对径流有滞留作用,因此认为是“汇”景观。

### 2.3 数据来源

研究中用到的数据主要包括地形、土地利用、水质水量及社会经济(人口、家禽、猪、牛、羊等数量)数据,数据的来源及尺度如表1所示。在时间跨度上,选取2000年、1990年、1980年和1970年作为研究样本的年份,以期在典型的时期跨度里形成较好的对比。

表1 基础数据来源及说明

Table 1 Source and description of basic data

数据类型 Date types	空间尺度 Spacial scale	来源 Sources
DEM	1:250 000	国家基础地理信息中心 The national Geomatics center of China
土地利用 Landuse	1:100 000	中科院地理所 Institute of Geographis Sciences and National Resources Researd, CAS
行政区划 District	1:1 000 000	国家基础地理信息中心 Tha National Geomatics center of China
水质水量 Water quality and quantity	小流域 Small watershed	水利部长江委员会 Changjiang Water Resources Committee, MWR
社会经济 Social Economy	行政区 Administrative districts	国家和地方统计局 National and Local Bureau of Statistics

## 3 结果与分析

### 3.1 相关性分析及检验

在计算景观空间负荷对比指数和非点源污染负荷指数的基础上,运用SPSS软件对各研究年份的TN、TP景观空间负荷对比指数与TN、TP污染负荷强度指标进行相关性分析和计算,采用Pearson相关。相关性分析

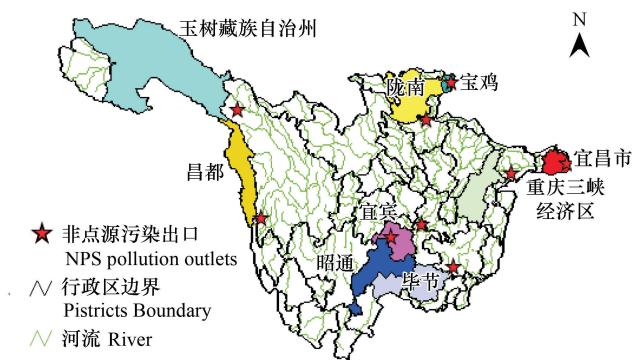


图2 研究区域和非点源污染出口选取结果示意图

Fig. 2 Scheme figure of the chosen research areas and the outlets of NPS pollution

结果见表2。

从结果可以看出,在0.01显著水平上,TN、TP景观空间负荷对比指数与TN、TP污染负荷指标具有显著相关性。说明景观空间负荷对比指数对于发生非点源污染的空间风险具有很好的指示作用,可以作为非点源污染空间风险评价的有用方法。

### 3.2 非点源污染空间风险的区域差异和演变趋势分析

景观空间负荷对比指数和非点源污染负荷指数的计算结果见图3。

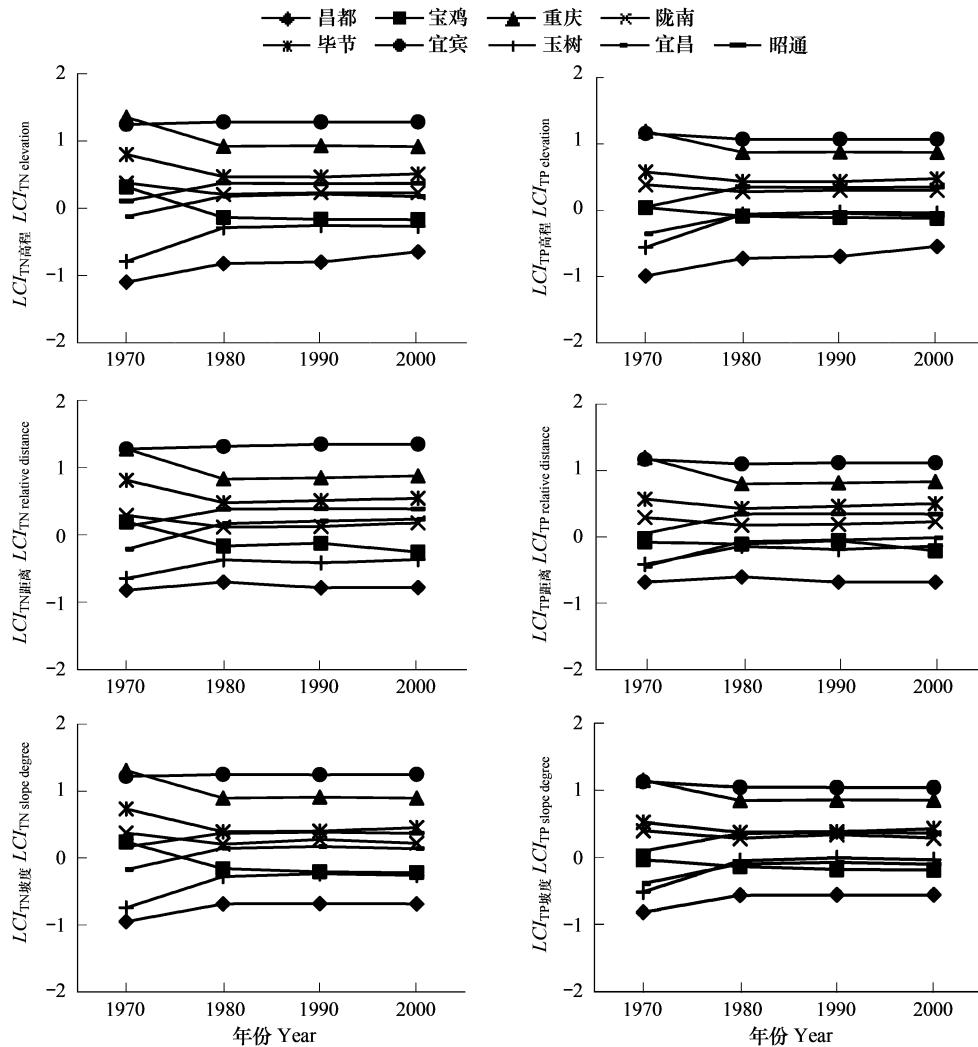


图3 不同年份不同地区的景观空间负荷对比指数

Fig. 3 LCIs in different years and different areas

从多年平均水平来看,对于TN,昌都和玉树在各年份的各项指数值都小于零,表明区域内“源”景观对区域的贡献要小于“汇”景观,从而说明区域发生非点源污染的空间风险小;宝鸡和宜昌在各年份的各项指数值在零值附近波动,说明区域内“源”、“汇”景观的非点源污染贡献比较均衡;陇南、昭通、毕节、重庆和宜宾在各年份的各项指数值都大于零,说明区域内“源”景观对区域的贡献要大于“汇”景观,区域发生非点源污染的空间风险大。对于TP,除了1970年的宝鸡 $LCI_{TP}$ ,昌都、玉树、宝鸡和宜昌在各年份的各项指数值都小于零,表

表2 相关性分析结果

Table 2 Result of the Pearson correlation analysis

	$LCI_{高程}$	$LCI_{相对距离}$	$LCI_{坡度}$
	$LCI_{elevation}$	$LCI_{relative\ distance}$	$LCI_{slope\ degree}$
$L_{TN}$	0.905 **	0.919 **	0.912 **
$L_{TP}$	0.885 **	0.911 **	0.881 **

\* \* 在0.01水平上显著相关 Significance level 0.01

明区域内“源”景观对区域的贡献要小于“汇”景观,区域发生非点源污染的空间风险小;陇南、昭通、毕节、重庆和宜宾在各年份的各项指数值都大于零,说明区域内“源”景观对区域的贡献要大于“汇”景观,区域发生非点源污染的空间风险大。

从时间尺度上来看,对于 TN, 指数的变化主要出现在 1970 ~ 1980 年间,而后逐渐趋于稳定。其中昌都、玉树、昭通和宜昌的非点源污染空间风险呈现先增大后稳定的趋势,重庆、陇南、毕节和宝鸡的非点源污染空间风险呈现先降低后稳定的趋势。对于 TP, 指数的变化幅度没有 TN 那么剧烈,比较平稳,变化也主要出现在 1970 ~ 1980 年间。其中,昌都、玉树、昭通和宜昌的非点源污染空间风险呈现先升高后稳定的趋势,而宝鸡、重庆、陇南、毕节和宜宾则的非点源污染空间风险呈现先降低后稳定的趋势。

从区域之间来看,宜宾、重庆和毕节的  $LCI$  值普遍较高,表明宜宾、重庆和毕节的非点源污染空间风险相对较高;昌都和玉树的  $LCI$  值普遍较低,表明昌都和玉树的非点源污染空间风险相对较低。

### 3.3 讨论

从坡度的角度来看,改革开放后,长江上游土地利用结构急剧变化,25°以上的陡坡地显著增加,其中目前处在川、滇、渝三省市内研究区的坡耕地占总耕地面积的 2/3 以上,25°以上的陡坡地占 30% 以上<sup>[27]</sup>,这些陡坡耕地,在建国初大都是林地或草山草坡。相应地,昌都、玉树各年份的  $LCI_{坡度}$  都小于零,陇南、昭通、毕节、重庆和宜宾各年份  $LCI_{坡度}$  都大于零。

从高程的角度来看,高程是影响气候特征的主要客观因素之一,而气候直接影响着农牧业的发达程度,从而影响非点源污染。昌都地区和玉树州海拔相对较高,重庆、毕节和宜宾海拔相对较低。相应地,昌都地区和玉树州的  $LCI_{高程}$  指数值普遍较低,重庆、毕节和宜宾  $LCI_{高程}$  指数值普遍较高。

从相对距离的角度来看,昌都和玉树境内“源”景观斑块多分散在占主导地位的“汇”景观之中,由于“汇”景观斑块的阻隔效应,“源”景观斑块与区域非点源污染出口的距离相对较远;重庆和宜宾“源”景观斑块占据主导地位,其与非点源污染出口的距离相对较近。相应地,昌都和玉树的  $LCI_{相对距离}$  指数值较小,重庆和宜宾的较大。同时 1970 ~ 2000 年间,各区域“源”景观斑块数量和面积比例均有所增大,表现为  $LCI_{相对距离}$  的普遍增大。

从土地利用类型比重的角度来看,依据解译的土地利用面积数据,近几十年以来,各区域的“源”景观比重逐步增大,表现为各区域  $LCI$  逐步增大,非点源污染风险逐步增大。但在整个时期内部,变化情况有一定的反复,如重庆耕地面积比重一度减小,后急剧增大。

### 3.4 控制与管理非点源污染空间风险的建议

从以上的分析可见,长江上游非点源污染空间风险呈现出一定的变化规律,它主要受到高程、景观单元与非点源污染出口的距离、坡度、土地利用面积比重的影响,并且其演变过程响应于农业与农村经济政策的阶段性的演变过程。相应地提出长江上游非点源污染空间风险的防治对策如下:(1)加强对于坡耕地的管理、加大对坡耕地整治力度;(2)加强对于农业景观空间结构的规划管理,通过土地利用结构的优化,从“源”、“汇”2 个角度来减少非点源污染出口的污染物输出量;(3)建议开展农业非点源污染空间风险控制的示范区建设,来完善通过控制与管理景观空间结构来防治非点源污染的理论和实践。

## 4 结论

本文以行政区划为主、自然条件为辅选取了昌都地区等 9 个研究单元,在时间跨度上,选取 2000 年、1990 年、1980 年和 1970 年作为研究样本的年份,采用基于“源-汇”景观理论的景观空间负荷对比指数来进行景观空间格局演变对非点源污染风险影响的定量评价,研究结果表明,在 0.01 显著水平上,TN、TP 景观空间负荷对比指数与 TN、TP 污染负荷指标具有显著相关性。说明景观空间负荷对比指数对于发生非点源污染的空间风险具有很好的指示作用,可以作为非点源污染空间风险评价的有用方法。

对于 TN,昌都和玉树区域内“源”景观对区域的贡献要小于“汇”景观,区域发生非点源污染的空间风险小;宝鸡和宜昌区域内“源”、“汇”景观的非点源污染贡献比较均衡;陇南、昭通、毕节、重庆和宜宾区域内

“源”景观对区域的贡献要大于“汇”景观,区域发生非点源污染的空间风险大。从时间轴上来看,指数的变化主要出现在1970~1980年间,而后逐渐趋于稳定。其中昌都、玉树、昭通和宜昌的非点源污染空间风险呈现先增大后稳定的趋势,重庆、陇南、毕节和宝鸡的非点源污染空间风险呈现先降低后稳定的趋势。

对于TP,昌都、玉树、宝鸡和宜昌区域内“源”景观对区域的贡献要小于“汇”景观,区域发生非点源污染的空间风险小;陇南、昭通、毕节、重庆和宜宾区域内“源”景观对区域的贡献要大于“汇”景观,区域发生非点源污染的空间风险大。从时间轴上来看,指数的变化幅度比较平稳,主要出现在1970~1980年。其中,昌都、玉树、昭通和宜昌的非点源污染空间风险呈现先升高后稳定的趋势,而宝鸡、重庆、陇南、毕节和宜宾则的非点源污染空间风险呈现先降低后稳定的趋势。

研究结果表明,长江上游各研究区域的坡度、相对距离和高程景观空间负荷对比指数的演变情况与各区域的坡度、“源”、“汇”景观类型与出口的相对距离、高程的演变过程具有非常好的响应关系。为从景观空间角度、更有针对性地长江上游非点源污染防治提供了新的思路,即可以通过规划和管理区域的景观空间结构来控制和管理未来发生非点源污染的空间风险。

#### References:

- [1] Huang H, Zhou C W, Chen X G. Review of the researches on non-point source pollution in China. *Ecology and Environment*, 2004, 13(2): 255–257.
- [2] Guo H Y, Wang X R. Quantification and index of non-point source pollution in Taihu Lake Region with GIS. *Environmental Geochemistry and Health*, 2004(26), 147–156.
- [3] Shen T. Yangtze River water resources protection and sustainable development. *Water Resources Protection*, 2002, 3: 64–67.
- [4] Nandish M, Mattikalli L, Keith S. Richards. Estimation of surface water quality changes in response to land use change: application of the export coefficient model using remote sensing and geographical information system. *Journal of Environmental Management*, 1996(48): 263–282.
- [5] Naveh Z. *Landscape Ecology: Theory and Application*. Second Edition, NewYork: Springer-verlag, 1993.
- [6] Gao C, Zhu J Y, Dai Y J, et al. Landscape management practices for the control of non-point source pollution method and principals. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(1): 109–116.
- [7] Liu R M, Yang Z F, Ding X W, et al. Effect of land use/cover change on pollution load of non-point source in upper reach of Yangtze River Basin. *Environmental Science*, 2006, 27(12): 2709–2714.
- [8] Zhang D F, Wang S J, Li R L. Effect of land use/land cover changes on aquatic environment in Yangtze River Basin. *Areal Research and Development*, 2003, 22(1): 69–72.
- [9] Chen L D, Fu B J, Zhang S R. Comparative study on the dynamics of non-point source pollution in a heterogeneous landscape. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(6): 808–816.
- [10] Neill R V, Riitters K H, Wickham J D, et al. Landscape pattern metrics and regional assessment. *Ecosyst Health*, 1999, 5(4): 225–233.
- [11] Li J R, Chen L D, Guo X D. Effects of land use structure on non-point source pollution. *China Environmental Science*, 2000, 20(6): 506–510.
- [12] Zhang Q J, Fu B J, Chen L D. Several problems about landscape pattern change research. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, 23(3): 264–271.
- [13] Apmand, D D. *Landscape Science* (translated by Li S F). Beijing: The Commercial Press, 1992.
- [14] Farina A. *Principles and Methods in Landscape Ecology*. Chapman&Hall, London, 1998.
- [15] Fisher C, Heiling O K. Population momentum and demand on land use and water resource. Laxenbury Austria: International institute for Applied Systems Analysis, 1996.
- [16] Huslshoff R M. Landscape indices describing a Dutch landscape. *Landscape Ecol.*, 1995, 10(2): 101–111.
- [17] Zheng Y, Wang X J. Advances and prospects for nonpoint source pollution studies. *Advances in Water Science*, 2002, 13(1): 105–110.
- [18] 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): 2407–2413.
- [19] O’Neill R V. Theory of landscape ecology. Chinese Association of International Association of Landscape Ecology. *Forum of Landscape Ecology*. O Neill R V. Changsha: Hunan Science and Technology Publishing House, 2000. 1.
- [20] Huslshoff R M. Landscape indices describing a Dutch landscape. *Landscape Ecol.*, 1995, 10(2): 101–111.
- [21] Chen L D, Fu B J, Zhao W U, et al. Source-sink landscape theory and its ecological significance. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1444–1449.

- [22] Suo A N, Wang T M, Wang H, et al. Empirical study on non-point sources pollution based on landscape pattern & ecological processes theory: A case of soil water loss on the Loess Plateau in China. *Environmental Science*, 2006, 27(12):2415~2420.
- [23] Johnes P J. Evaluation and management of the impact of landuse on the Nitrogen and Phosphorus load delivered to surface waters: the export coefficient modeling approach. *Journal of Hydrology*, 1996, 183~197.
- [24] Ding X E, Liu R M, Shen Z Y. Method for obtaining parameters of export coefficient model using hydrology and water quality data and its application. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2006, 42(5):534~539.
- [25] Cheng H G, Hao F H, Ren X Y, et al. The study of the rate loss of nitrogenous non-point source pollution loads in different precipitation levels. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2006, 26(3):392~397.
- [26] Zhang S L, Zhuang J P. A Method for plotting watershed unit of non-point source pollution from agriculture. *Agro-environmental Protection*, 2001, 20(1):34~37.
- [27] Ma Z L. The problem of ecological environment and the counter measures of ecological agriculture construction in the major soil Erosion Region of the Upper Reaches of Yantze River. *Agro-Environmental Protection*, 1999, 18(1):42~45.

#### 参考文献:

- [1] 黄虹,邹长伟,陈新庚.中国非点源污染研究评述. *生态环境*, 2004, 13(2):255~257.
- [3] 沈泰. 长江水资源保护与可持续发展. *水资源保护*, 2002, 3:64~67.
- [6] 高超,朱继业,窦贻俭,等. 基于非点源污染控制的景观格局优化方法与原则. *生态学报*, 2004, 24(1):109~116.
- [7] 刘瑞民,杨志峰,丁晓雯,等. 土地利用/覆盖变化对长江上游非点源污染影响研究. *环境科学*, 2006, 27(12):2709~2714.
- [8] 张殿发,王世杰,李瑞玲. 土地利用/土地覆被变化对长江流域水环境的影响研究. *地域研究与开发*, 2003, 22(1):69~72.
- [9] 陈利顶,傅伯杰,张淑荣. 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.
- [11] 李俊然,陈利顶,郭旭东,等. 土地利用结构对非点源污染的影响. *中国环境科学*, 2000, 20(6): 506~510.
- [12] 张秋菊,傅伯杰,陈利顶. 关于景观格局演变研究的几个问题. *地理科学*, 2003, 23(3):264~271.
- [13] Apmand D D. *景观科学*·李世玢译. 北京:商务印书馆, 1992.
- [17] 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.
- [18] 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): 2407~2413.
- [21] 陈利顶,傅伯杰,赵文武,等. “源-汇”景观理论及其生态学意义. *生态学报*, 2006, 26(5): 1444~1449.
- [22] 索安宁,王天明,王辉,等. 基于格局-过程理论的非点源污染实证研究:以黄土丘陵沟壑区水土流失为例. *环境科学*, 2006, 27(12): 2415~2420.
- [24] 丁晓雯,刘瑞民,沈珍瑶. 基于水文水质资料的非点源输出系数模型参数确定方法及其应用. *北京师范大学学报*, 2006, 42(5): 534~539.
- [25] 程红光,郝芳华,任希岩. 不同降雨条件下非点源污染氮负荷入河系数研究. *环境科学学报*, 2006, 26(3): 392~397.
- [26] 张水龙,庄季屏. 农业非点源污染的流域单元划分方法. *农业环境保护*, 2001, 20(1): 34~37.
- [27] 马智利. 长江上游重点水土流失区生态环境问题及生态农业建设对策. *农业环境保护*, 1999, 18(1): 42~45.