

土地利用/覆盖变化对长江上游非点源污染影响研究

刘瑞民, 杨志峰, 丁晓雯, 沈珍瑶, 伍星, 刘芳

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

摘要: 在国内外相关研究的基础上, 利用输出系数模型, 结合 RS 和 GIS 技术, 对长江上游的非点源污染负荷进行了空间模拟和负荷估算。模拟结果表明, 在不考虑流域损失的前提下, 由于土地利用造成的非点源污染负荷 TN 总量从 20 世纪 70 年代的 123 万 t 下降至 2000 年的 116 万 t, 基本呈逐年减少的趋势, 由土地利用造成的 TP 的变化趋势与 TN 基本相同, 从 70 年代的 3.7 万 t 下降到 2000 年的 3.5 万 t 左右。就省份、土地利用类型和水系而言, 四川省、种植用地和草地以及金沙江水系和嘉陵江水系对长江上游的非点源污染贡献较大。在非点源污染负荷强度上, 重庆市和嘉陵江水系单位面积负荷最高, 是今后应重点治理的地区。结果表明, 该模型可以对长江上游这样的超大尺度空间的非点源污染进行较好的空间模拟。

关键词: 输出系数模型; 非点源污染; 长江上游; 土地利用/覆盖变化; 地理信息系统

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2006)12-2407-08

Effect of Land Use/ Cover Change on Pollution Load of Non-Point Source in Upper Reach of Yangtze River Basin

LIU Ruimin, YANG Zhifeng, DING Xiaowen, SHEN Zhenyao, WU Xing, LIU Fang

(State Key Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: On the basis of other scholars' researches, utilizes export coefficient model, adopts RS and GIS techniques, estimates the nonpoint source (NPS) pollution load of upper reach of Yangtze River Basin, and simulates its special distribution. The results indicates that the total nitrogen load caused by land use drop from 1.23×10^6 tons in 1970s' to 1.16×10^6 tons in 2000 on the premise of taking no account of basin loss. It reduced year by year basically in the past several decades and so did TP load which decreased from 3.7×10^4 tons in 1970s' to 3.5×10^4 tons in 2000. As far as province, land use and water system are considered, Sichuan province, crop land grass, Jinsha river and Jialing river are important contributories of NPS pollution load in study area. Intensity analysis shows the region of Chongqing municipality and the watershed of Jialing River are two highest NPS pollution load areas, and these areas should be gained more attention in the future. Using the method put forward in this paper, NPS pollution space simulation is carried out in large scale basin such as upper reach of Yangtze River Basin precisely basically.

Key words: export coefficient model; nonpoint source pollution; upper reach of Yangtze River Basin; land use/cover change; geographic information system (GIS)

影响非点源污染的因素非常多, 包括土地利用方式、降水、地形地貌等。一方面, 由于几乎所有的非点源污染来源都和土地利用/覆盖变化紧密联系; 同时在这些因素中, 土地利用/覆盖变化又和人类的生产、生活密切相关, 可以通过改变土地利用方式达到控制非点源污染的目的, 而其他很多因素都是自然形成的, 人类无法改变, 因此土地利用方式是最关键的因素之一。

长江流域, 特别是长江中上游地区是我国水土流失的重点地区之一, 长江上游因植被破坏和陡坡开垦引起的水土流失及非点源污染已成为影响长江水质的重要因素^[1]。虽然目前针对长江流域的研究很多, 但土地利用/覆盖变化对长江流域非点源污染及其水质的影响却一直没有引起人们足够的重视^[2]。深入认识和研究土地利用/覆盖变化对长江

流域非点源污染的影响, 并在此基础上进行时空模拟和变化趋势分析, 对维持流域生态平衡, 特别是三峡库区的生态安全具有重要意义。

目前, 应用模型对非点源污染进行时空模拟是非点源污染研究的重要方向, 但现有模型往往只是对小区域的精细模拟, 很难适用于大尺度区域的负荷估算。因此, 大尺度流域的非点源污染负荷估算一直是非点源污染研究中的薄弱环节^[3]。英国学者 Johns 等提出的输出系数模型, 避开了非点源污染发生的复杂过程, 所需参数少, 操作简便, 又具有一定的精度, 在我国大尺度流域的非点源污染负荷研究时表现出独特的优越性^[4]。Mattikalli 等利用该方法

收稿日期: 2005-11-15; 修订日期: 2006-01-24

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2003CB415204)

作者简介: 刘瑞民(1975~), 男, 博士, 主要研究方向为环境信息系统、遥感和 GIS 应用、水环境模型等。

对英国 Glen 河流在 1931 年至 1989 年近 60a 的 N、P 负荷进行了估算,并对化肥施用量和土地利用单个因子变化时的非点源污染负荷进行了情景分析^[5]. Ierodiconou 等在土地利用/覆盖变化研究的基础上,应用该模型估算了澳大利亚 Glenelg-Hopkins 地区的 TN、TP 负荷^[6]. 我国的蔡明等利用该模型对渭河临潼断面以上 3.12 万 km² 流域的 TN 负荷进行了估算,是较大尺度的非点源污染负荷时空分布模拟,并且考虑了降雨、流域损失等因素的影响^[7].

本文在参考相关研究的基础上,通过选定的输出系数,估算了长江流域上游地区从 20 世纪 70 年代至 2000 年期间由土地利用/覆盖变化造成的非点源污染负荷总量,并进行了空间模拟和变化趋势分析.

1 研究区概况

长江上游地处我国西南部,流域面积达 100 万 km²,占全流域总面积的 58.9%. 流域涉及四川等 9 省、市、自治区,人口 1.63 亿,占全流域人口的 35%^[8]. 从水系来讲,长江上游包括金沙江水系等 5 部分. 位于长江上游地段的主要是青藏高原东缘的高原地区和四川盆地,绝大多数都是山地,耕地只占 15%,但耕地中坡耕地却占到 55%^[9]. 特殊的地理环境和长期不合理的开发利用,导致了长江上游严重的水土流失以及非点源污染^[11].

2 输出系数模型

2.1 模型结构

20 世纪 70 年代初期,北美地区首先提出了输出系数模型,主要用来估算土地利用和湖泊富营养之间的关系^[10-12]. 早期的模型假定所有土地利用类型的输出系数固定不变,这种假设和现实状况差异很大,因而限制了模型的应用^[4]. Johns 等人对模型进行了不断的改进,使其得到了进一步完善和广泛应用^[13-15]. 模型的一般表达式为:

$$L_j = \sum_{i=1}^m E_{ij} A_i + p$$

式中: j 为污染物类型; i 为流域中的土地利用类型,共 m 种; L_j 为污染物 j 在流域的总负荷量 (kg/a); E_{ij} 为污染物 j 在流域第 i 种土地利用类型中的输出系数 [kg/(km²·a)]; A_i 为第 i 种土地利用类型的面积 (km²); p 为由降雨输入的营养物数量 (kg).

该方法虽不能预测单场降雨所产生的非点源污染,但其为大、中型流域的长期非点源污染研究提供了 1 种新的途径,因而在国内外得到了广泛应用.

2.2 输出系数值的选取

在输出系数模型中,确定合理的输出系数是关键所在. 影响流域非点源污染物输出系数的因素很多,主要包括流域内地形地貌、水文、气候、土地利用、土壤类型和结构、植被、管理措施以及人类活动等^[16,17]. 对于输出系数,国外已积累了大量成果,并进行了整理,相对来说,国内在这方面的研究才刚刚起步. 参照国内外的相关研究,本文确定的长江上游非点源污染负荷的土地利用的输出系数如表 1 所示. 从表 1 可以看出,不同土地利用方式的输出系数差别非常明显,其中耕地最大,而林地和草地比较小,这和耕地化肥施用量最多、土质松软以及草地、耕地对水土流失具有一定的滞留作用密切相关. 因此,所选输出系数有一定的合理性.

表 1 长江上游输出系数表

土地利用类型	TN/t·(km ² ·a) ⁻¹	TP/t·(km ² ·a) ⁻¹
耕地	2.900	0.090
森林	0.238	0.015
草地	1.000	0.020
城镇	1.100	0.024
荒地	1.490	0.051

3 数据获取及处理

研究中用到的数据主要包括长江上游土地利用图, 1:25 万 DEM 图, 1:100 万全国行政区图. 通过解译卫星遥感图片获得长江上游土地利用图^[18-20]. 首先利用 ArcGIS 软件通过 DEM 图生成长江上游轮廓图、河流图以及长江上游水系图. 然后将全国行政区图数字化,结合上游轮廓图,生成长江上游的省区图. 最后利用 ArcGIS,结合土地利用图,对长江上游非点源污染负荷状况进行分析. 在结果分析中,重庆市的统计结果按现行的直辖市计算. 在空间分析中,各空间单元的负荷按百分比给出,负荷总量为 1.

4 结果与分析

4.1 非点源污染负荷空间模拟

根据长江上游输出系数表和土地利用图,在 GIS 软件的支持下,得出长江上游由土地利用造成非点源污染的 TN、TP 空间分布图(图 1、图 2).

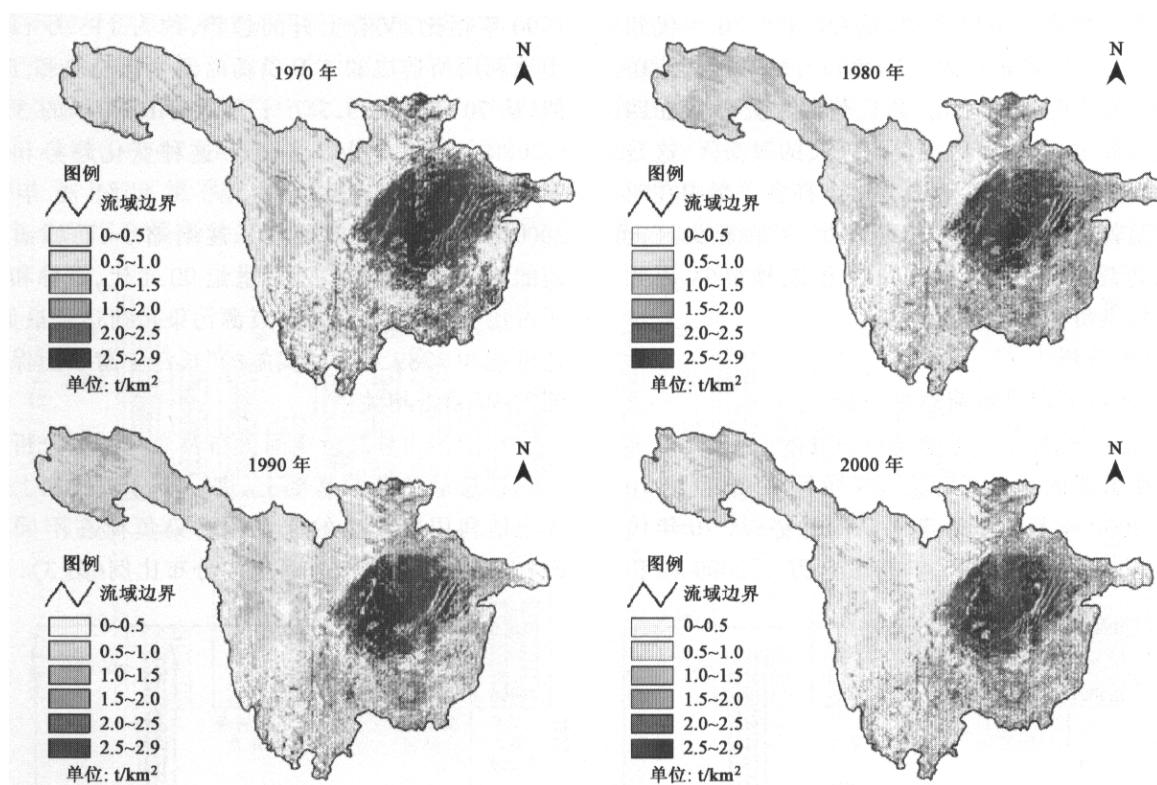


图 1 长江上游非点源污染负荷总氮空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of NPS pollution load in upper reach of Yangtze River Basin(TN)

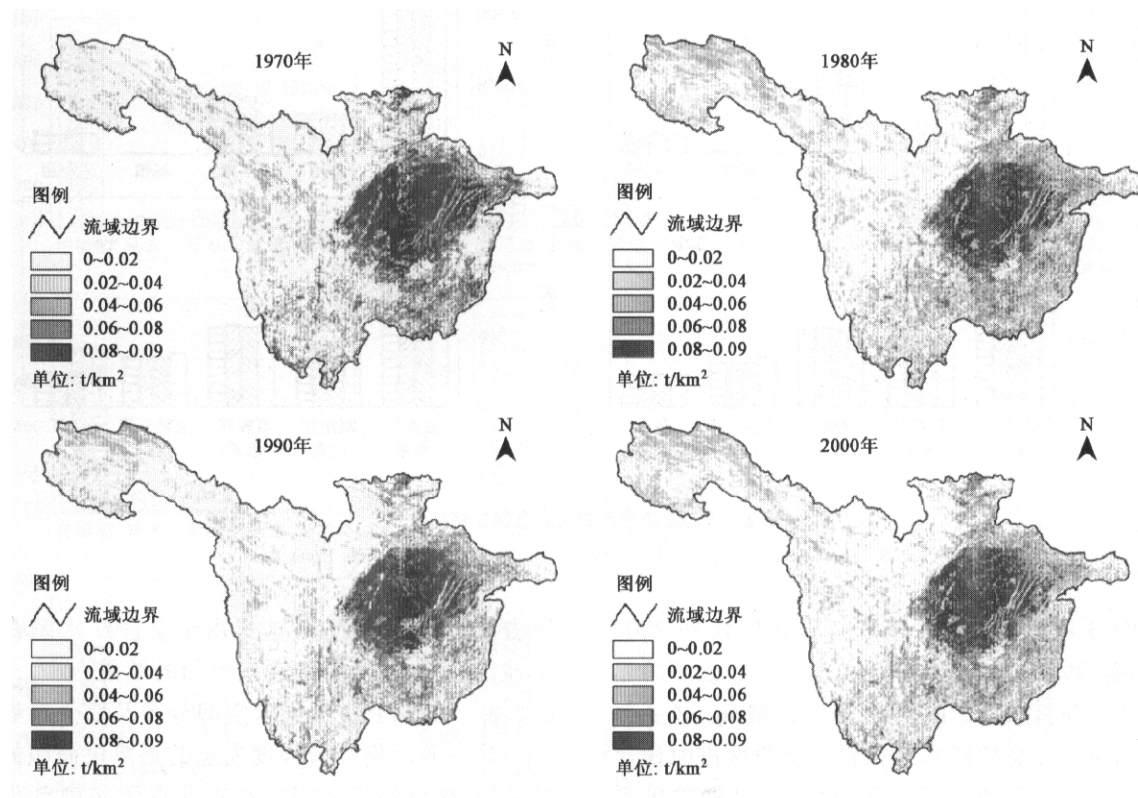


图 2 长江上游非点源污染负荷总磷空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of NPS pollution load in upper reach of Yangtze River Basin(TP)

从图 1 和图 2 可以看出,从 20 世纪 70 年代到 2000 年,长江上游非点源污染负荷 TN 和 TP 分布状况没有发生明显的变化,高负荷区主要分布在四川盆地的周围,低负荷区主要为广大的源头区.这是由于长江上游的农业活动一直以来都主要集中在四川盆地及其周围的平原和丘陵地带,而在源头区土地利用类型由于主要是草地和林地,耕地很少,因此非点源污染负荷相对较低.

4.2 结果分析

4.2.1 非点源污染负荷总量分析

在长江上游,在不考虑流域损失的前提下,由土地利用所造成的非点源污染 TN 负荷从 20 世纪 70 年代至 2000 年基本呈逐渐下降的趋势,从 70 年代的 123 万 t 下降到 1990 年的 115 万 t,2000 年和

1990 年相比,又有上升的趋势,约为 116 万 t.由于土地利用所造成的 TP 负荷时间变化趋势和 TN 类似,从 70 年代的 3.7 万 t 下降到 1995 年的 3.4 万 t,2000 年又上升为 3.5 万 t.这种变化趋势和土地利用/覆盖变化密切相关,从 20 世纪 70 年代到 2000 年,长江上游耕地面积逐渐缩小,而城镇和荒地的面积逐渐变大.在 20 世纪 90 年代,森林和草地所占比例最高,造成了非点源污染负荷达到最低值,这可能和 1989 年开始实施的“长江上游水土保持防治工程”紧密相关.

4.2.2 TN、TP 总量空间分布及变化趋势分析

在总量估算的基础上,进一步分析长江上游由于土地利用所产生的非点源污染负荷在不同的省份、土地利用类型和水系上的分布比例(图 3).

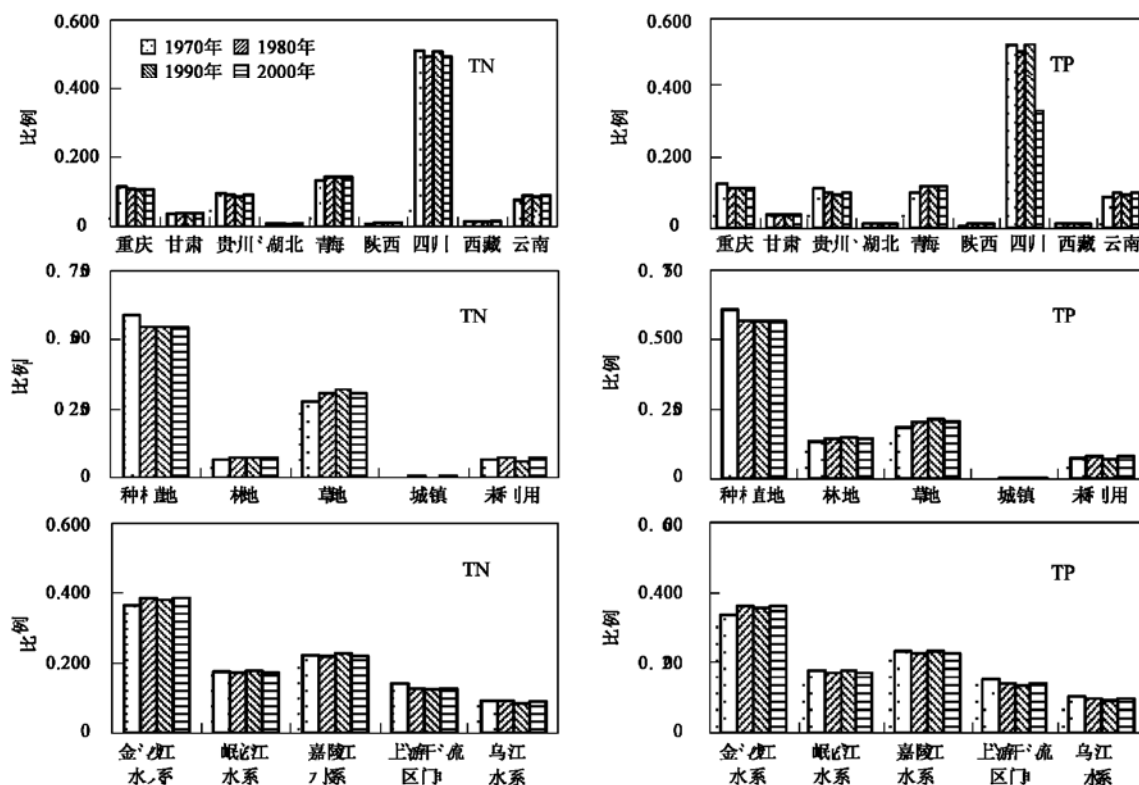


图 3 长江上游非点源污染负荷比例柱状图

Fig. 3 Proportion histogram of NPS load in upper reach of Yangtze River Basin

从图 3 可以看出,从 20 世纪 70 年代到 2000 年,四川省、种植地以及金沙江水系对长江上游的非点源污染负荷 TN、TP 的贡献率一直最高.这主要是由于四川省和金沙江水系在长江上游所占面积比例要远远大于其它省份和水系,而种植地的输出系数远远地大于其它土地利用类型所致.变化趋势上,四川省和种植地所占比例逐渐下降,而金沙江水系

所占比例却逐渐上升.这是由于金沙江水系森林和草地逐渐减少,而荒地逐渐增加的结果.

4.2.3 TN、TP 负荷强度空间分布及变化趋势分析

非点源污染负荷强度表示的是单位面积的污染负荷量,能够消除面积大小对非点源污染负荷的影响,是污染分析的重要指标之一.结合非点源污染总量和土地利用图,可得到非点源污染 TN、TP 在长

江上游不同省份及水系上的负荷强度图(图4)。

从空间分布来看,就行政区而言,重庆市单位面积所产生的非点源 TN、TP 最多,平均为 $1.714 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 和 $0.054 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$;就水系而言,嘉陵江水系和上游干流区间单位面积所产生的 TN、TP 最多,2 个水系综合平均为 $1.597 \text{ t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 和 0.051

$\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})$ 。重庆市和嘉陵江水系土地利用类型中,种植地一直都占有很大的比重,重庆市多年平均超过 50%,嘉陵江水系多年平均超过 45%,土地利用的不合理造成了该地区非点源污染的高强度负荷。从时间上看,重庆、贵州、四川等省份的非点源污染负荷强度逐渐降低,而青海、陕西等省份的非点源

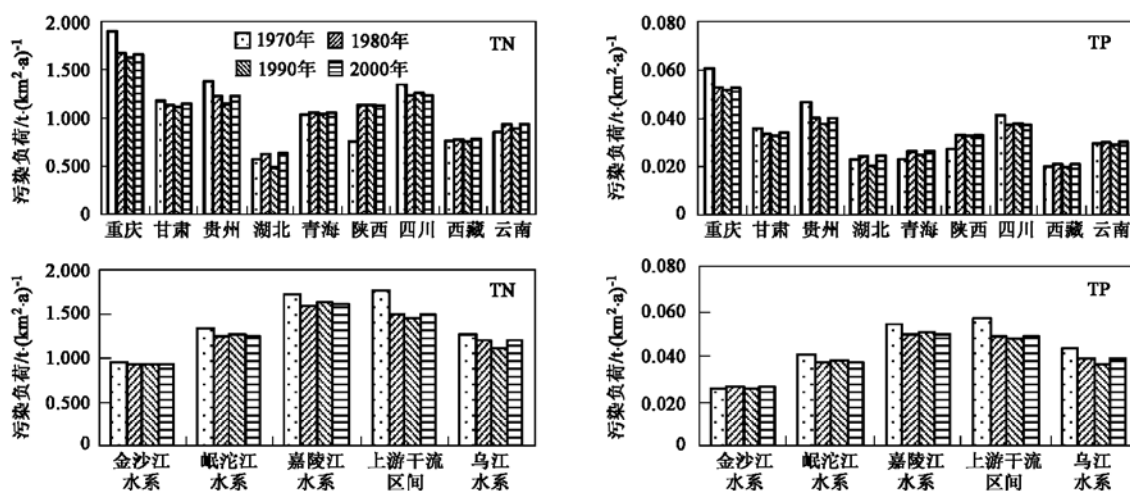


图4 长江上游非点源污染负荷强度柱状图

Fig. 4 Intensity histogram of NPS load in upper reach of Yangtze River Basin

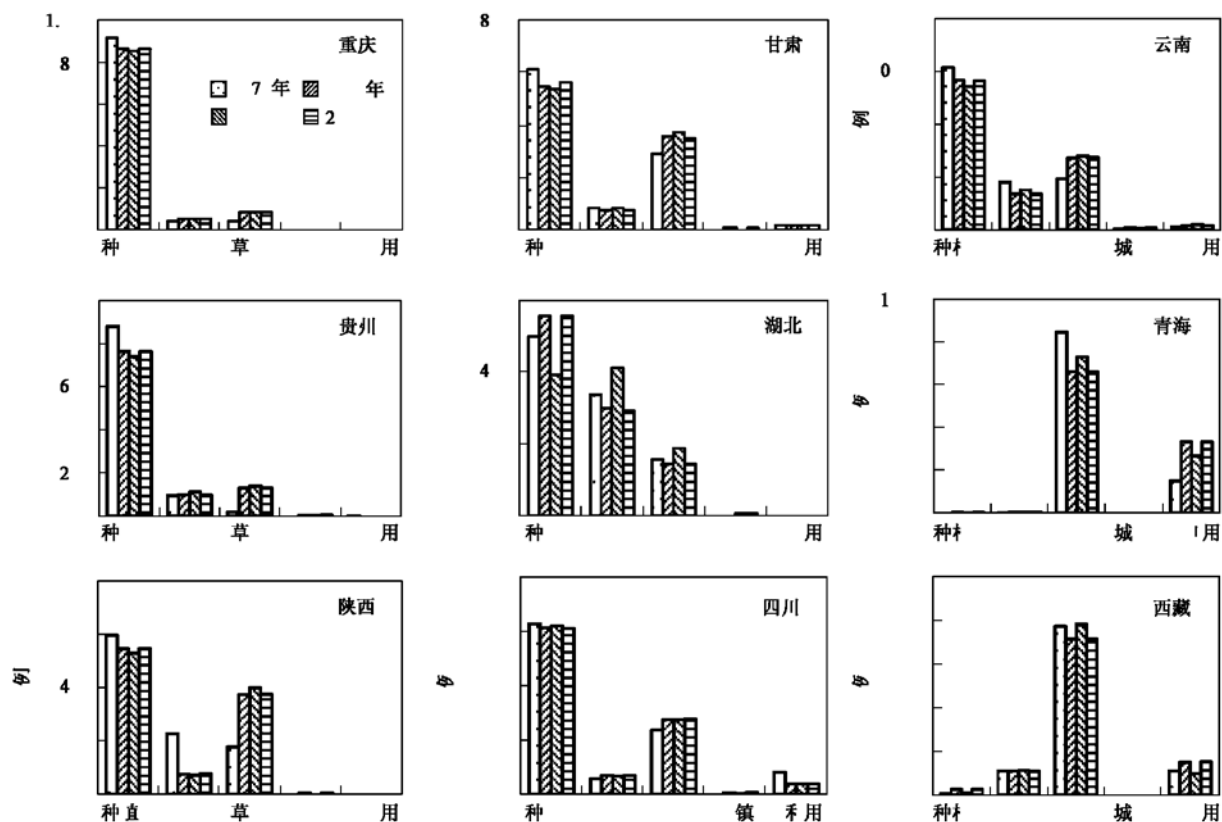


图5 长江上游非点源污染总氮在不同省份的比例柱状图

Fig. 5 Proportion of NPS load in different districts of upper reach of Yangtze River Basin(TN)

污染负荷强度逐渐增强. 在不同水系中, 除了金沙江基本没有变化外, 其它各水系的非点源污染负荷强度都在逐渐降低.

4.2.4 不同省份内 TN、TP 分析

长江上游地形复杂, 不同省份内土地利用类型差别很大, 需要进一步分析土地利用/覆盖变化对各省(市)内非点源污染 TN、TP 的影响, 分析结果见图 5 和图 6.

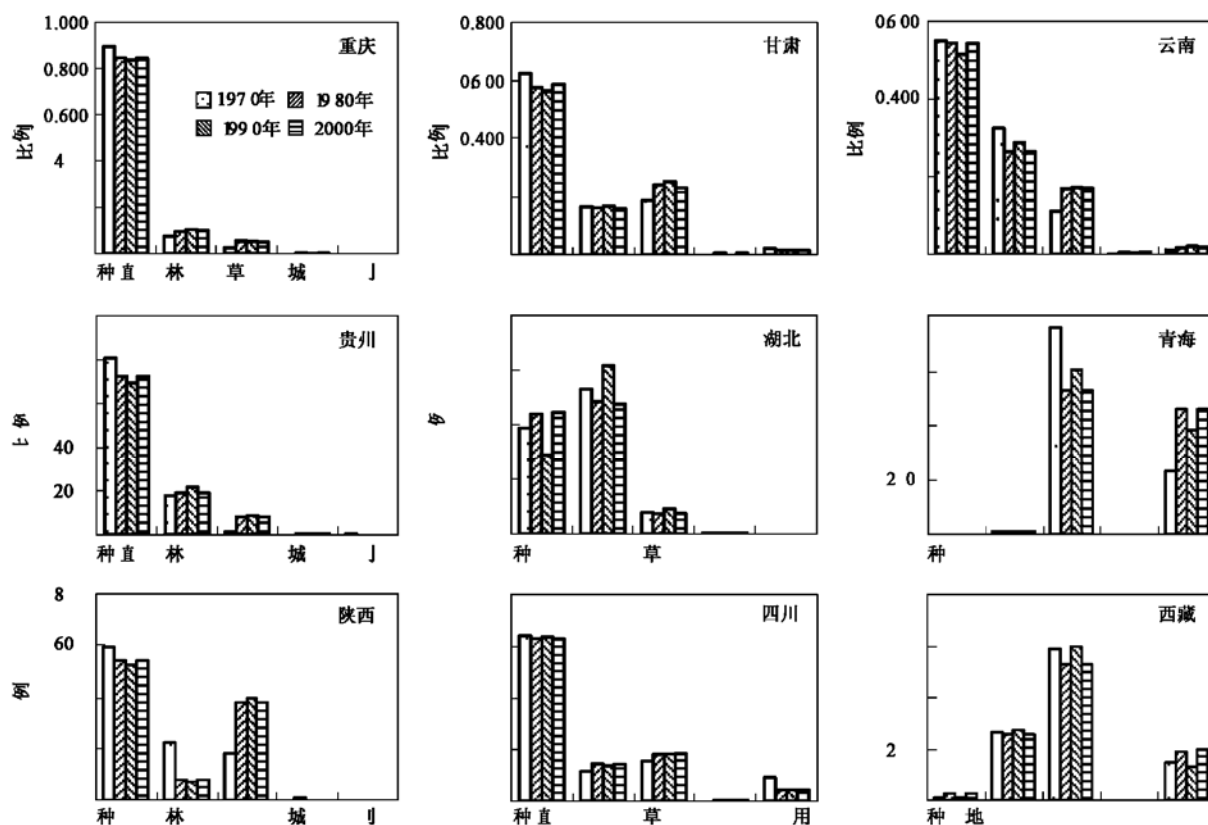


图 6 长江上游非点源污染总磷在不同省份的比例柱状图

Fig. 6 Proportion of NPS load in different districts of upper reach of Yangtze River Basin (TP)

从图 5 和图 6 可以看出, 由于土地利用的差别, 长江上游不同省份内非点源污染负荷差别非常大. 在重庆、甘肃、贵州、湖北、陕西、四川和云南省(市)内, 由于种植地所占比例大, 造成了非点源污染负荷 TN、TP 主要受种植地影响(重庆、贵州高达 80% 以上); 而在青海、西藏(自治区)内, 由于草地所占比例比较大, 造成了非点源污染负荷 TN、TP 主要受草地影响(高达 60%~70%); 除在湖北省内, 林地所产生的非点源污染负荷比例较高外, 其它省内所占比例均较低. 对照图 4 可以发现, 由于重庆等省(市)内种植用地所造成的非点源污染负荷所占比重比较大, 导致了这些省(市)内负荷强度的增加. 湖北省单位面积所产生的非点源污染负荷比较低的原因是由于林地所产生的非点源污染负荷占了很大比例的缘故.

图 5 和图 6 中的青海、西藏(自治区)内, 草地所产生的非点源污染负荷比例有逐渐下降的趋势, 而由荒地所产生的非点源污染负荷所占比例有逐渐上升的趋势. 这种变化反映了这 2 个省(自治区)内土地利用结构的变化.

4.2.5 不同水系内 TN、TP 分析

长江上游面积有 100 多万 km^2 , 不同水系内土地利用类型差别很大, 需要进一步分析土地利用/覆盖变化对各水系本身非点源污染 TN、TP 的影响, 分析结果见图 7.

从图 7 可以看出, 金沙江水系由于草地所占比例比较大, 造成了非点源污染负荷 TN、TP 主要受草地的影响(TN 超过了 50%, TP 超过了 40%). 而其它 4 个水系中, 由于种植地所占比例比较大, 造成了非点源污染负荷 TN、TP 主要受种植地的影响.

(约为 60%~80%). 尤其在嘉陵江水系和上游干流区间 2 个水系中, 结合图 4, 由于林地和草地所造成的非点源污染负荷只占到 6%~8%, 导致了该地区非点源污染负荷强度比较高. 在图 7 中, 金沙江水系草地产生的非点源污染负荷所占比例有逐渐下降的趋势(从 20 世纪 70 年代的 TN 约 56.9% 和 TP 约

41.2% 下降为 2000 年的 TN 约 52.9% 和 TP 约 36.7%), 而由荒地产生的非点源污染所占比例有逐渐下降的趋势(从 20 世纪 70 年代的 TN 约 13.5% 和 TP 约 16.8% 上升为 2000 年的 TN 约 17.3% 和 TP 约 21.1%). 结合图 5 和图 6, 金沙江水系的这种变化与青海、西藏的变化一致.

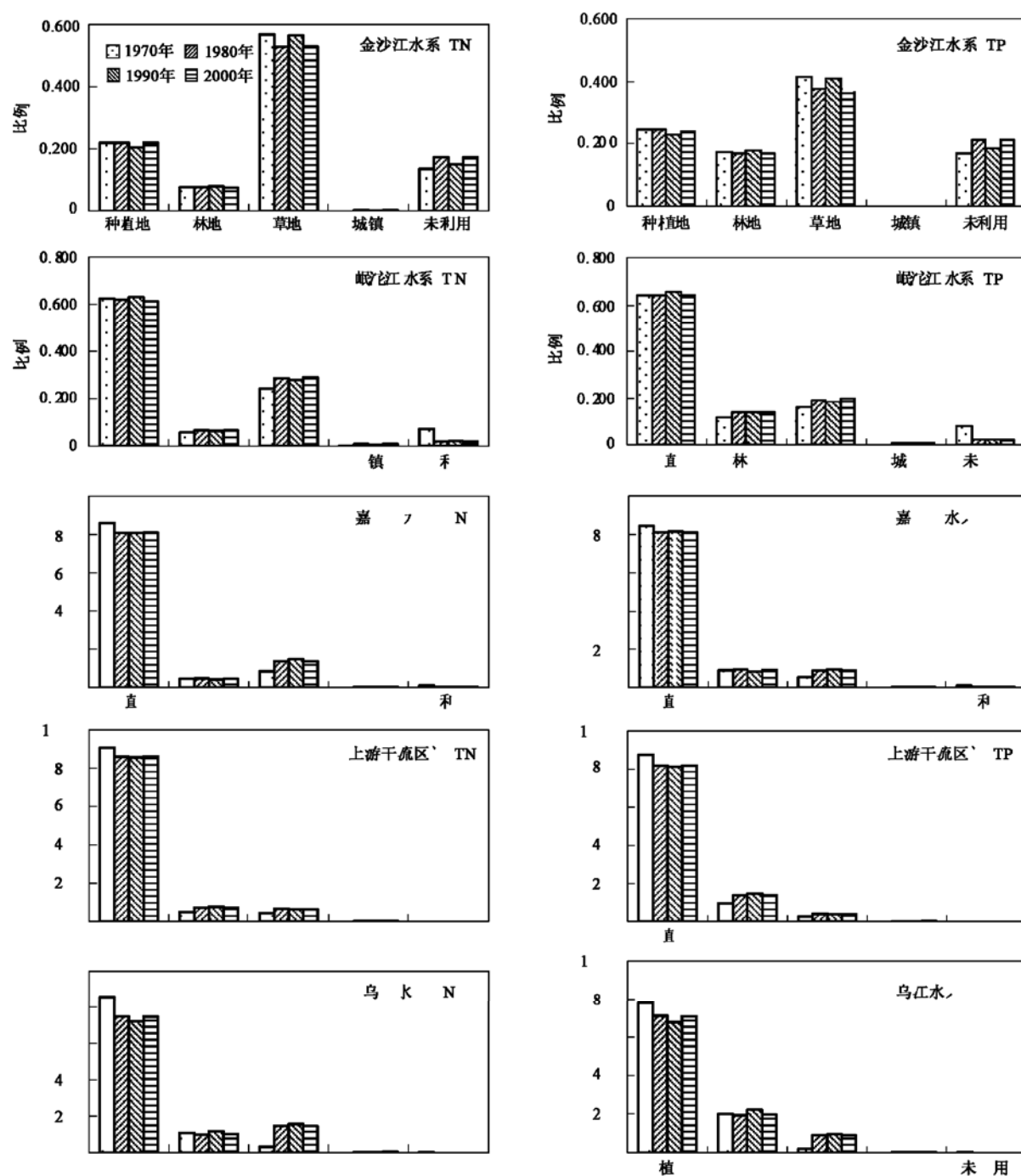


图 7 长江上游非点源污染在不同水系内的比例柱状图

Fig. 7 Proportion of NPS load in different watersheds of upper reach of Yangtze River Basin

5 结论

由于土地利用所造成的非点源污染负荷 TN、TP 总量从 20 世纪 70 年代到 2000 年基本上呈逐渐下降的趋势, 这种变化趋势和土地利用/覆盖变化紧密相关; 在空间分布上, 四川省、种植地和金沙江水系、嘉陵江水系对长江上游的非点源污染贡献最大; 从非点源负荷强度来讲, 重庆市、嘉陵江水系和上游干流区间单位面积所产生的非点源污染负荷最高, 这些地区是今后重点治理的地区; 由于土地利用的差别, 长江上游不同省份内非点源污染负荷差别非常大, 在重庆等省(市)内, 非点源污染负荷 TN、TP 主要受种植地影响, 而在青海、西藏(自治区)内, 非点源污染负荷 TN、TP 主要受草地影响; 对于金沙江水系, 非点源污染负荷 TN、TP 主要受草地的影响, 而其它 4 个水系中, 非点源污染负荷 TN、TP 主要受种植地的影响。模型在所需参数较少的条件下对长江上游 100 万 km² 的土地利用/覆盖变化造成的非点源污染负荷进行了较好的负荷估算和空间模拟, 这为大尺度流域和资料缺乏地区的非点源污染研究提供了新思路。今后应进一步考虑化肥施用量、降雨、地形等因子对非点源污染负荷的影响, 以便得到更为精确的模拟结果。

参考文献:

- [1] 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[J]. 地域研究与开发, 2003, 22(1): 69~72.
- [2] 沈泰. 长江水资源保护与可持续发展[J]. 水资源保护, 2002, 3: 2~5.
- [3] Worrall F, Burt T P. The impact of land use change on water quality at the catchment scale: the use of export coefficient and structural models[J]. J. Hydrol., 1999, 221: 75~90.
- [4] Johns P J. Evaluation and management of the impact of land use change on the nitrogen and phosphorus load delivered to surface waters: the export coefficient modeling approach[J]. J. Hydrol., 1996, 183: 323~349.
- [5] Mattikalli N M, Richards K S. 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[J]. J. Environ. Management, 1996, 48: 263~282.
- [6] Ierodiaconou D, Laurenson L, Leblanc M, et al. The consequences of land use change on nutrient exports: a regional scale assessment in south~west Victoria, Australia[J]. J. Environ. Management, 2005, 74: 305~316.
- [7] 蔡明, 李怀恩, 庄咏涛. 改进的输出系数法在流域非点源污染负荷估算中的应用[J]. 水利学报, 2004, (7): 40~45.
- [8] 王锡桐, 刘志文, 杨庆媛. 建设长江上游生态屏障对策研究[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [9] 钟祥浩, 何毓成, 刘淑珍. 长江上游环境特征与防护林体系建设[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [10] Reckhow K H, Simpson J J. A procedure using modeling and error analysis for prediction of lake phosphorus concentration from land use information[J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 1980, 37: 1439~1448.
- [11] Beaulac M N, Reckhow K M. An examination of land use nutrient export relationships[J]. Water Resources Bulletin, 1982, 18: 1013~1024.
- [12] USEPA. Modelling phosphorus loading and lake response under uncertainty: a manual and compilation of export coefficients[D]. Rep. EPA44015 ~ 80 ~ 011, US Environmental Protection Agency, Corvallis, OR.
- [13] Johns P J, O'Sullivan P E. The natural history of Slapton Ley Nature Research XVIII: nitrogen and phosphorus losses from the catchment—an export coefficient approach[J]. Field Studies, 1989, 7: 285~309.
- [14] Johns P J. An investigation of the effects of land use upon water quality in the windrush catchment[D]. D. Phil. Thesis, Uni. Oxford, Oxford.
- [15] Heathwaite A L, Burt T P, Trudgill S T. The effect of land use on nitrogen, phosphorus and suspended sediment delivery to streams in a small catchment in Southwest England[A]. In: J. B. Thornes (Ed.), Vegetation and Erosion: Processes and Environments[C]. Wiley, Chichester: 161~178.
- [16] 李怀恩, 庄咏涛. 预测非点源营养负荷的输出系数法研究进展与应用[J]. 西安理工大学学报, 2003, 19(4): 307~312.
- [17] 庄咏涛. 渭河临潼断面以上流域非点源总氮负荷研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2002.
- [18] Shi X E, Yu D S, Warner E D, et al. A framework for the 1:1000000 soil database of China[A]. In: proceedings of the 17th world congress of soil science[C]. Bangkok: 2002. 1~5.
- [19] Liu J Y, Liu M L, Zhuang D F, et al. Study on spatial pattern of land use change in China during 1995~2000[J]. Science in China, 2003, 46(4): 373~384.
- [20] Liu J Y, Zhuang D F, Luo D. Land cover classification of China: Integrated analysis of AVHRR imagery and Geophysical data[J]. International Journal of Remote Sensing, 2003, 24(12): 2485~2500.