农业环境科学学报 2008,27(2):677-682
Journal of Agro-Environment Science

应用输出系数模型估算长江上游非点源污染负荷

刘瑞民, 沈珍瑶, 丁晓雯, 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:本文在已有研究的基础上,利用输出系数模型,对2000年长江上游的非点源污染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情况下,2000年长江上游的TN负荷为194.737万t,TP负荷为8.365万t。就省份和水系二者而言,四川省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。就负荷强度而言,重庆市和嘉陵江水系单位面积的非点源污染负荷最高,应是今后重点治理地区。

关键词: 长江上游;非点源污染;输出系数模型;地理信息系统

中图分类号:X522　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1672-2043(2008)02-0677-06

Application of Export Coefficient Model in Simulating Pollution Load of Non-point Source in Upper Reach of Yangtze River Basin

LIU Rui-min, SHEN Zhen-yao, DING Xiao-wen, WU Xing, LIU Fang

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

Abstract: Water quality modeling is an important tool to assess the health of a watershed and to make necessary management decisions to control existing and future pollution of receiving water bodies. The existing export coefficient approach is practical due to minimum data requirement. Based on export coefficient model, the non-point source (NPS) pollution load in upper reach of Yangtze River Basin was estimated and its spatial distribution in 2000 was simulated with RS and GIS techniques. Results indicate that the load of TN and TP is 1.947×10^6 and 8.365×10^4 tons respectively. Sichuan province, Jinsha River and Jialing River are important contributories. Intensity analysis of NPS pollution load shows that Chongqing city and Jialing River watershed are the two highest NPS pollution load contributors. More attention should be paid to these areas in the future.

Keywords: upper reach of Yangtze River Basin; non-point source pollution; export coefficient model; geographic information system (GIS)

通过模型对非点源污染进行时空模拟是目前非点源污染研究的重要手段,但现有的非点源污染模型往往只是针对小区域的精细模拟,很难适用于大尺度区域的负荷估算[1]。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。英国学者Johns等提出的输出系数法,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[2]。Mattikalli等利用该方法对英国Glen河流域在1931至1989近60年的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[3]。庄咏涛利用该模型对渭河临潼断面以上流域的TN负荷进行了估算,时间上从1991至1999跨越9年, 空间上涉及3.12万km^2,是较大尺度的非点源污染负荷时空分布模拟[4]。刘瑞民等应用输出系数模型,从土地利用/覆盖变化的角度,探讨了近30年来长江上游非点源污染的变化特征[5]。已有的研究表明, 输出系数模型具有广泛的适用性。虽然该模型不能进行非点源污染的降雨径流模拟,但在非点源污染的年负荷估算及分析中,由于对于缺乏长系列监测数据的大尺度流域,发挥着重要的作用。

长江上游区域相当大,考虑单次降雨的非点源污染模拟难于实现,因此基于物理的非点源污染模型很难适用。本文在参考国内外研究的基础上,采用输出系数模型,以2000年为例,从年负荷方面探讨长江上

收稿日期:2007-06-08
基金项目:国家973课题(2003CB415204)
作者简介:刘瑞民(1975—),男,博士,主要从事水环境模拟、环境信息系统、遥感和GIS应用等研究。E-mail:liurm@163.com

游非点源污染特征,并进行空间模拟和分析。此研究对于从总体上了解长江上游非点源污染以及环境管理具有一定的意义。

1 研究区概况

长江上游地处我国西南部, 干流长 4511 km,占长江全长的 70%。流域面积 100 万 km²,占全流域总面积的 58.9%。流域涉及青、藏、云、贵、川、渝、陕、甘、鄂等 9 省、市、自治区(图 1),人口 1.63 亿,占全流域人口的 35%[6]。从水系来讲,长江上游包括金沙江水系、岷沱江水系、嘉陵江水系、乌江水系和上游干流区间等 5 部分(图 2)。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%,而耕地中坡耕地却占到 55%[7]。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[8]。

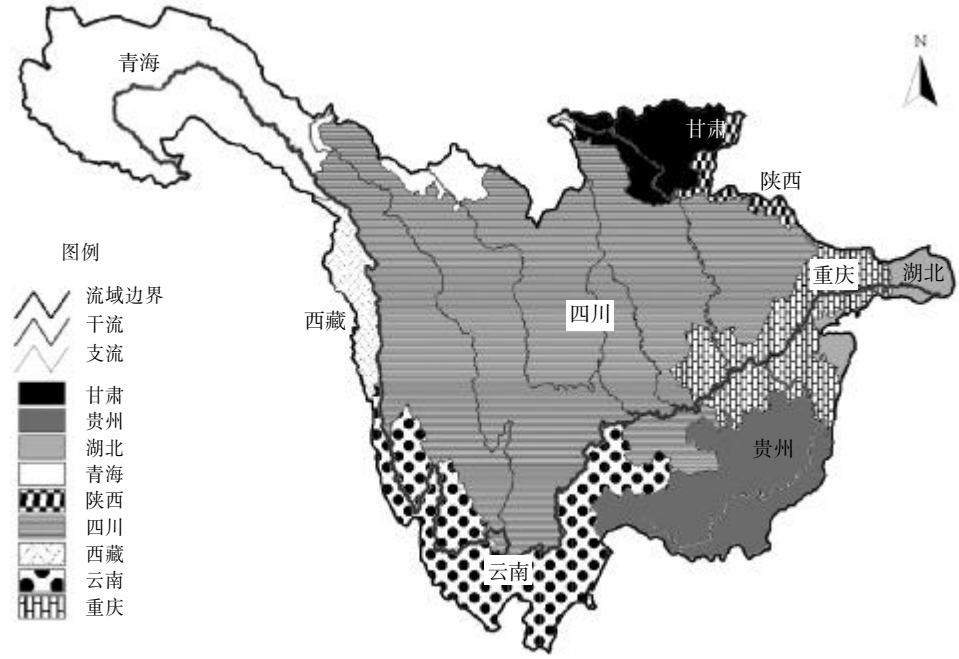

图 1 长江上游省区图

Figure 1 Districts of upper reach of Yangtze River

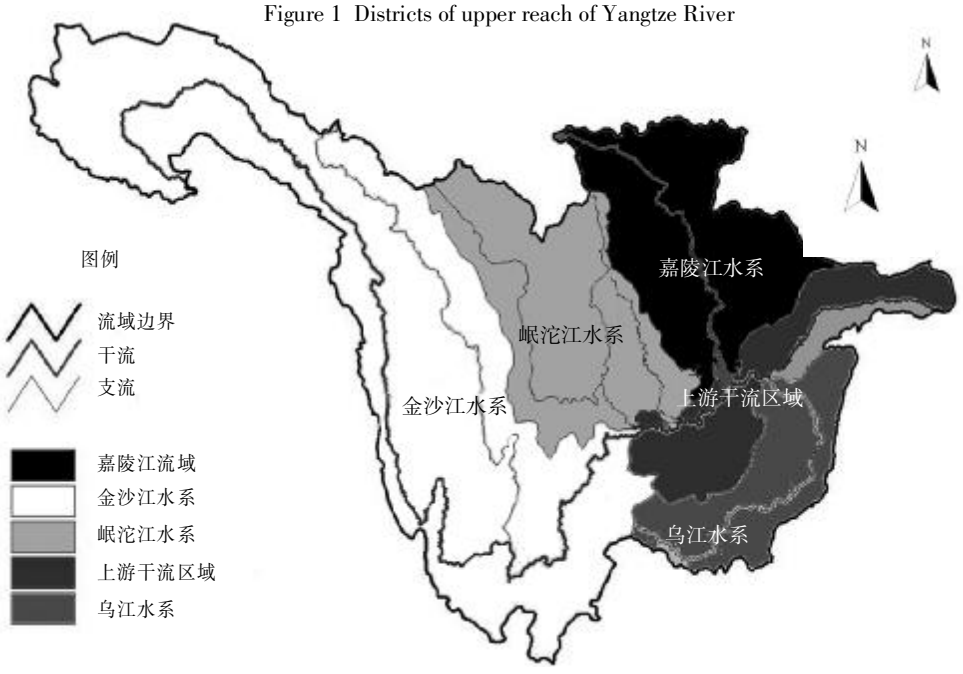

图 2 长江上游水系图

Figure 2 River system of upper reach of Yangtze River

2 输出系数模型

2.1 模型结构

输出系数模型于 20 世纪 70 年代初期在北美地区首先提出,其主要用来评价土地利用和湖泊富营养之间的关系[9~11]。早期的模型假定所有的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[2]。John 等在实际应用中不断改进输出系数模型,加入了牲畜、人口等因素的影响,使其得到了进一步完善和广泛应用[12~14]。模型的一般表达式为:

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

式中:j 为污染物类型;m 为流域中土地利用类型的种类或牲畜、人口;L_j 为污染物 j 在该流域的总负荷量,$kg\cdot a^{-1}$;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,$kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$ 或牲畜、人口的输出系数,$kg\cdot hm^{-2}\cdot a^{-1}$;$A_i$ 为第 i 种土地利用类型的面积,hm^2 或牲畜、人口数量,ca。

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[15]。对于输出系数,国外已积累了大量成果,相对而言,国内在这方面的研究才刚刚起步。参照国内外的相关研究[1~4,9~16],本文确定的长江上游非点源污染负荷的输出系数如表 1 所示。

3 数据获取及处理

研究中用到的数据主要包括长江上游 2000 年 1:10 万土地利用图,1:25 万 DEM 图,1:100 万政区图,2000 年长江上游人口数据及大牲畜、猪、羊、家禽数据。通过解译 2000 年卫星遥感图片获得长江上游土地利用图[17~19]。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,结合土地利用图以及人口、牲畜数据,对长江上游非点源污染负荷状况进行分析。

表 1 长江上游输出系数表

Table 1 Export coefficient of upper reach of Yangtze River Basin

类型	TN	TP
耕地/$t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$	2.900	0.090
森林/$t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$	0.238	0.015
草地/$t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$	1.000	0.020
城镇//$t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$	1.100	0.024
荒地/$t\cdot km^{-2}\cdot a^{-1}$	1.490	0.051
人/$t\cdot (ca\cdot 10^4)^{-1}\cdot a^{-1}$	19.547	2.142
大牲畜/$t\cdot (ca\cdot 10^4)^{-1}\cdot a^{-1}$	113.715	2.179
猪/$t\cdot (ca\cdot 10^4)^{-1}\cdot a^{-1}$	26.667	1.417
羊/$t\cdot (ca\cdot 10^4)^{-1}\cdot a^{-1}$	15.134	0.450
家禽/$t\cdot (ca\cdot 10^4)^{-1}\cdot a^{-1}$	0.459	0.054

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以及人口、牲畜数据,在 GIS 软件的支持下,得出 2000 年长江上游非点源污染 TN 和 TP 的空间分布图(图 3)。

从图 3 可以看出,长江上游非点源污染负荷 TN 和 TP 主要分布在四川盆地的周围,而在广大的源头区污染负荷则比较低。这是由于长江上游的农事活动以及人口主要集中在四川盆地,源头区的土地利用类型主要是草地和林地,人口稀少,农业用地很少,营养物的输入值也较小的缘故。

4.2 结果分析

4.2.1 TN、TP 负荷总量分析

通过图 3 可以看出,在选定的输出系数以及不考虑流域损失的情况下,2000 年长江上游非点源污染所产生的 TN 负荷为 194.737 万 t,TP 负荷为 8.365 万 t。长江上游面积超过 100 万 km^2,由非点源污染物从产生到输移至宜昌断面过程中存在着较大的损失。根据 Behrendt 的流域损失公式[20],可计算出宜昌监测断面的监测值为长江上游非点源实际污染负荷的 20% 左右,即宜昌监测站的估算值为 TN 和 TP 负荷分别为 38.947 万 t 和 1.673 万 t。

4.2.2 TN、TP 负荷总量空间分析

在总量估算的基础上,针对长江上游不同的行政省份和水系,可作出 TN、TP 在不同空间单元上的分布比例图(图 4)。由图 4 可以看出,各省份中,四川省对长江上游的 TN、TP 负荷的贡献率最大,分别占其总负荷的 51.8%和 52.7%。分析其原因,一方面是由于四川在长江上游的面积要远大于其他省市,另一方面是由于四川省人口众多,农业尤其是畜禽养殖业发达,TN、TP 排放量较大;在五大水系中,金沙江的 TN 负荷最高,TP 也比较高,分别占其总负荷的 32.5%和 25.1%,是由于其流域面积大于其他水系流域面积的缘故。嘉陵江水系 TP 负荷最高,TN 仅次于金沙江流

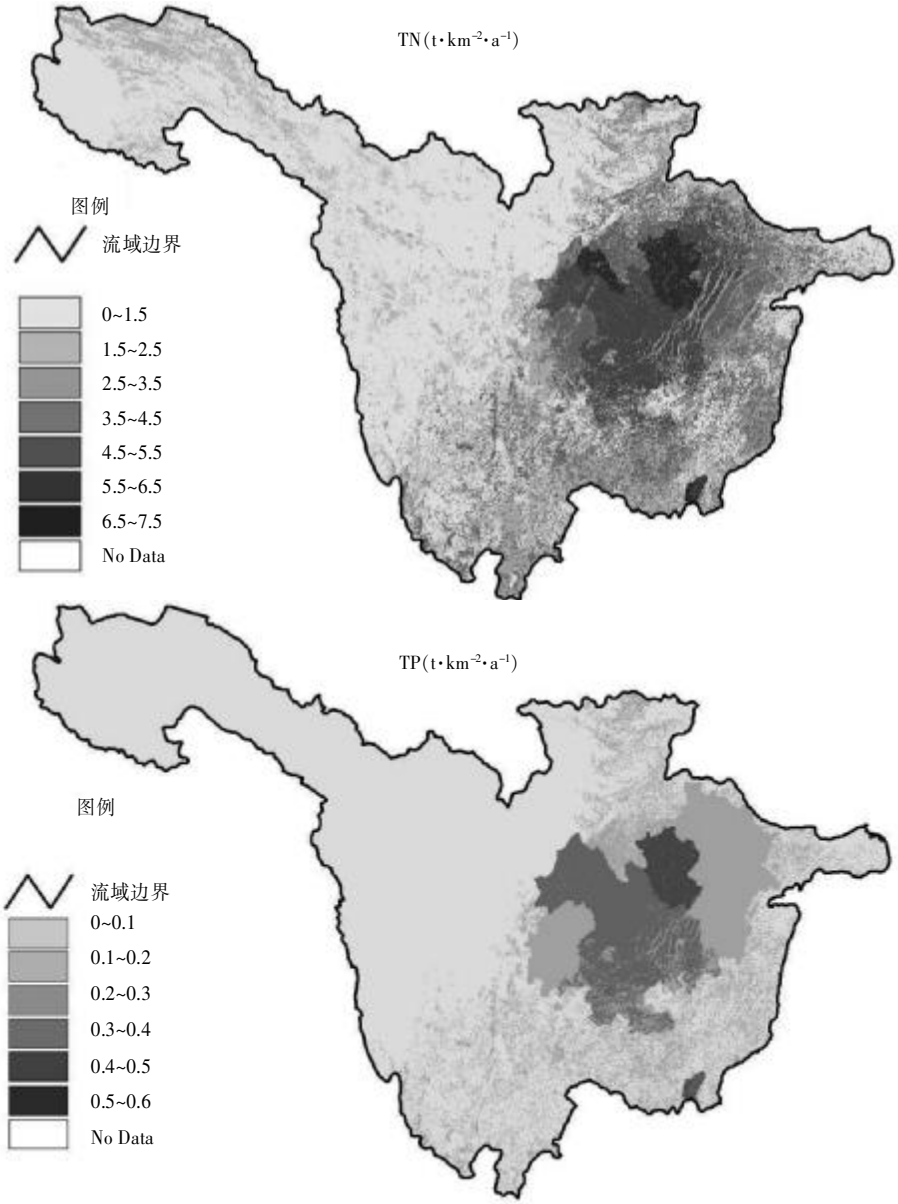

图 3 长江上游非点源污染负荷空间分布图(2000 年)

Figure 3 Spatial distribution of NPS pollution load in upper reach of Yangtze River Basin (year 2000)

域(分别占其总负荷的 24.0%和 26.3%,)的原因是由于该区水土流失严重,一旦遇到降雨,极易发生土壤侵蚀并伴随有 N、P 的流失。

4.2.3 TN、TP 负荷强度空间分析

结合不同省份、不同水系的非点源污染总量和土地利用面积, 可作出 TN、TP 在长江上游不同省份和水系上的负荷强度图(图 5)。从图 5 可以看出,就行政区来讲,重庆市单位面积所产生的 TN、TP 最多,分别达到 3.105、0.158 t·km^{-2};西藏自治区单位面积所产生的 TN 和 TP 最少,仅为 0.956、0.026 t·km^{-2}。就水系来讲,嘉陵江水系和上游干流区间单位面积所产生的 TN、TP 最多, 分别达到 2.932、2.822 t·km^{-2} 和 0.138、0.144 t·km^{-2};而金沙江水系单位面积所产生的 TN、TP 最少,约为 1.331、0.044 t·km^{-2}。分析其原因,重庆市 2000 年耕地面积约占总面积的 50%, 而西藏自治区长江上游区的林地、草地面积所占比例超过了 90%,因此,人类活动的影响造成了重庆市单位面积所产生的非点源污染负荷最高。嘉陵江是长江上游含沙量最高的支流[21],且虽地貌以山地和丘陵为主,但耕地面积却占到将近 45%,这些因素是造成嘉陵江流域单位面积负荷量较高的原因。而上游干流区间多数属于重庆市,因此造成了单位面积负荷量较高。

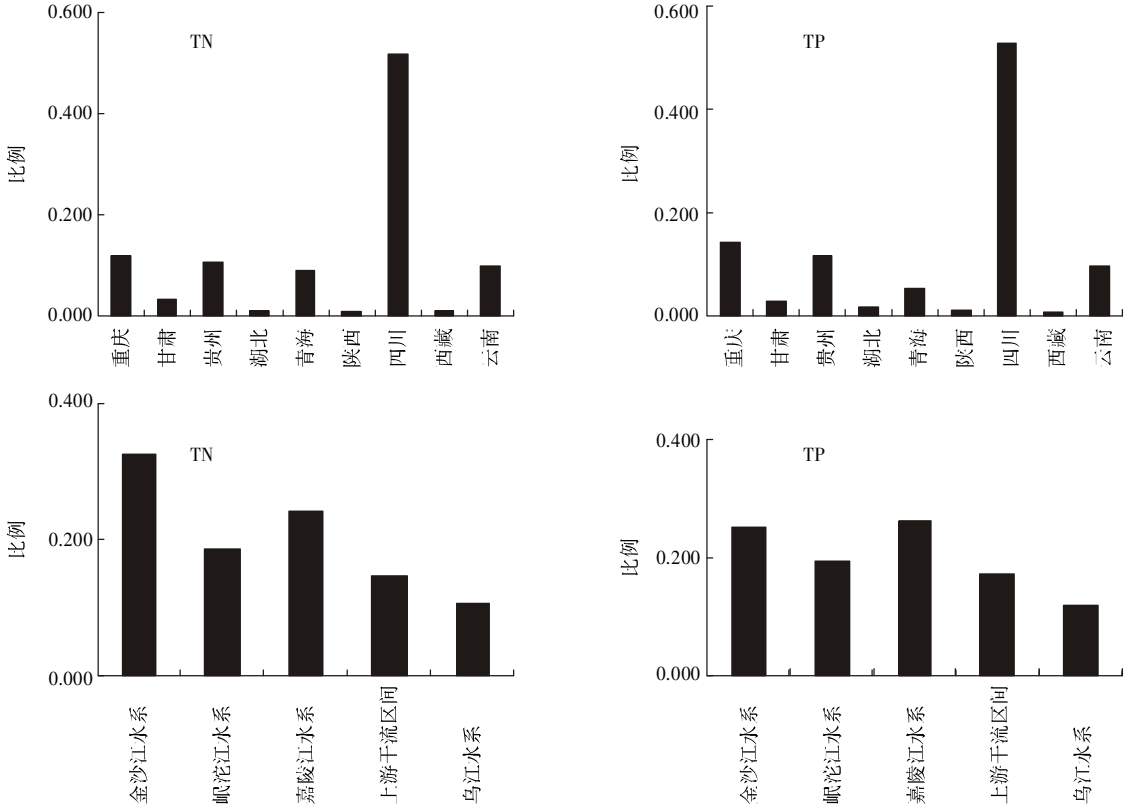

图 4 长江上游非点源污染负荷比例柱状图(2000 年)

Figure 4 Scale histogram of NPS load in upper reach of Yangtze River Basin(2000)

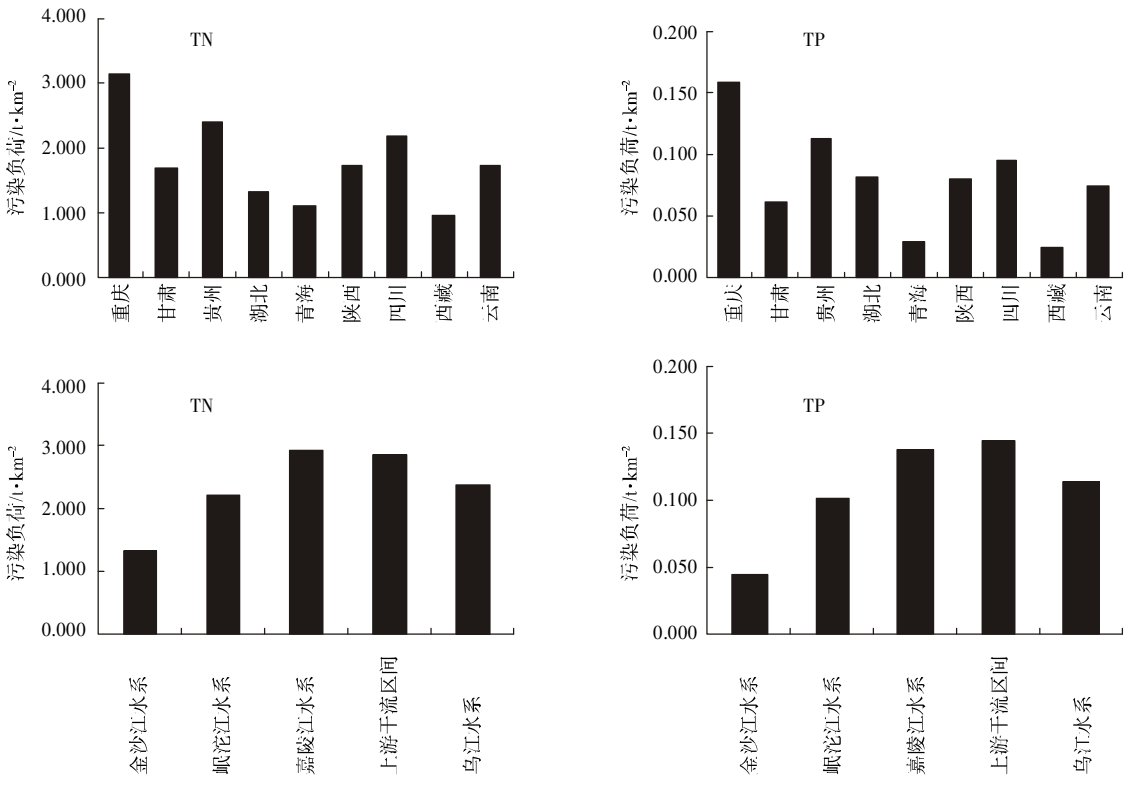

图 5 长江上游非点源污染负荷强度柱状图(2000 年)

Figure 5 Intensity histogram of NPS load in upstream of Yangtze River Basin (2000)

5 结论

(1)2000 年长江上游的 TN 负荷为 194.737 万 t,TP 负荷为 8.365 万 t。其中各省份中,四川省对长江上游的非点源污染贡献最大;而在各大水系中,金沙江水系和嘉陵江水系的非点源污染负荷量较大。

(2)从非点源负荷强度来讲,在省份中,重庆市单位面积所产生的非点源污染负荷最高;在水系中,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。

(3)模型在所需参数较少的条件下对长江上游100 万 km^2 的非点源污染负荷进行了较好的空间模拟,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。今后应开展长江上游各种土地利用类型输出系数的率定工作,以获取符合长江上游实地情况的输出系数。

参考文献:

[1] 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.

[2] Johnes 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.

[3] 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.

[4] 庄咏涛. 渭河临潼断面以上流域非点源总氮负荷研究[D]. 西安理工大学硕士学位论文, 2002.
ZHANG Yong-tao. Non-point source TN load research in Weihe basin above Lintong setion[D]. Master's degree paper of Xi'an University of Technology, 2002.

[5] 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 [J]. 环境科学, 2006,27(12): 2407-2414.
LIU Rui-min, YANG Zhi-feng, DING Xiao-wen, et al. Effect of land use/cover change on pollution load of non-point source in upper reach of Yangtze River Basin[J]. *Environmental Science*, 2006, 27(12): 2407-2414.

[6] 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.
WANG Xi-tong, LIU Zhi-wen, YANG Qing-yuan. Countermeasure study of constructing ecological barrier in upper reach of Yangtze River[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2003.

[7] 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.
ZHONG Xiang-hao, HE Yu-cheng, LIU Shu-zhen. Environmental characteristic and shelter belt construction in upper reach of Yangtze River[M]. Beijing: Science press, 1992.

[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[J]. 地域研究与开发, 2003, 22(1): 69-72.
ZHANG Dian-fa, WANG Shi-jie, LI Rui-ling. Effect of land use/land cover changes on aquatic environment in Yangtse River Basin [J]. *Areal research and development*, 2003, 22(1): 69-72.

[9] 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.

[10] Beaulac M N, Reckhow K M. An examination of land use-nutrient export relationships[J]. *Water Resources Bulletin*, 1982, 18: 1013-1024.

[11] USEPA. Modelling phosphorus loading and lake response under uncertainty:a manual and compilation of export coefficients[D]. Rep. EPA 44015-80-011, US Environmental Protection Agency, Corvallis, OR.

[12] Johnes 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.

[13] Johnes P J. An investigation of the effects of land use upon water quality in the windrush catchment [D]. D Phil Thesis, Uni. Oxford.

[14] 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 [C]// J.B. Thornes(Ed.), Vegetation and Erosion: Processess and Environments. Wiley, Chichester: 161-178.

[15] 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.
LI Huai'en, ZHUANG Yong-tao. The export coefficient modeling approach for load prediction of nutrient from nonpoint source and its application[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2003, 19(4): 307-312.

[16] 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, 07: 40-45.
CAI Ming, LI Huai'en, ZHUANG Yong-tao. Application of modified export coefficient method in polluting load estimation of non-point source pollution [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2004, 07: 40-45.

[17] Shi X E, Yu D S, Warner E D, et al. A framework for the 1:1000000 soil database of China[R]. In proceedings of the 17th world congress of soil science, in Bangkok, 2002, 1757: 1-5.

[18] Liu J Y, Liu M L, Zhuang D F, et al. Study on spatial pattern of landuse change in China during 1995-2000[J]. *Science in China*, 2003, 46(4): 373-384.

[19] Liu J Y, Zhuang D F, Luo D. Land cover classification of China: Integrated analysis of AVHRR imagery and Geo-physical data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, 24(12): 2485-2500.

[20] Behrendt H. Inventories of point and diffuse sources and estimated nutrient loads- a comparison for different river basins in central Europe[J]. *Wat Sci Tech*, 1996, 33: 99-107.

[21] 毛红梅,裴明胜. 近期人类活动对嘉陵江流域水沙量影响[J]. 水土保持学报, 2002, 16(5): 101-104.
MAO Hong-mei, PEI Ming-sheng. Influence of human activities on runoff and sediment transmitting in Jialingjiang Valley[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(5): 101-104.