

太湖流域营养物质输移的模拟评估研究

赖格英^{1,2}, 于 革²

(1. 江西师范大学鄱阳湖生态环境与资源研究教育部重点实验室, 江西 南昌 330027;

2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008)

摘要:以太湖流域上游来水区作为研究区, 利用 1995 年、1998 年和 2002 年实测的气象、水文水质资料和社会经济统计资料, 以 SWAT 模型为模拟工具, 对土壤本底营养盐、城镇农村居民生活排污、牲畜养殖排放、农业化肥使用、工业点源排放等 5 种营养来源进行了敏感性模拟。模拟结果表明: 生活污水和工业点源是最重要的营养物质来源; 农业化肥、牲畜养殖、生活污水、土壤本底营养盐及其他面源等非点源营养物质来源是太湖外源输入的主要形式; 在营养盐入湖总量中, 大约 86% 的总氮和 88% 的总磷与人类活动密切相关; 总氮、总磷入湖量的贡献份额具有明显的空间差异, 湖西区和武虞区是营养物质外源输入的主要贡献地区。

关键词: 太湖流域; 营养物质; 总氮; 总磷; SWAT 模型

中图分类号: X171 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-198X(2007)02-0140-05

在湖泊富营养化的研究与治理中, 外源输入始终是问题的核心和焦点。研究表明^[1], 在外源输入中, 流域上游的工业点源排放、城市与乡镇居民的生活废水排放、农业化肥流失、土地与农田的面源营养物质输出是主要的营养来源。由于外源输入问题涉及流域-湖泊复杂环境系统中的气象、水文、土壤、物理、化学、生物等自然过程以及工业生产、集约化养殖、城市扩张、人口增加、土地利用变化、农业种植制度和管理方式等人文过程^[2], 因此, 采用传统、常规的方法来研究湖泊富营养化外源输入问题必然有许多局限性。SWAT(soil and water assessment tools)模型是一种分布式、机理性环境水文模型^[3], 运用 SWAT 模型, 在流域的空间尺度上对营养物质输移进行数值模拟, 是研究流域营养物质形成以及输移过程的有效手段, 它对于探讨和分析外源性营养物质输移的驱动因素具有重要的意义。

本文以太湖流域上游来水区作为研究区, 利用 1995 年、1998 年和 2002 年的气象、工业点源等实测资料和社会经济统计资料, 以 SWAT 模型为模拟工具, 对土壤本底营养盐、城镇农村居民生活排污、牲畜养殖排放、农业化肥使用和工业点源排放等 5 个营养物质来源进行了敏感性试验, 以探讨太湖流域各营养来源排放的量化关系以及其空间分布。

1 研究区概况

太湖流域介于 30°5′~32°8′N, 119°8′~121°55′E, 行政上隶属于江苏、浙江、安徽和上海三省一市, 面积 36 895 km²。入湖河流包括苕溪水系、宜溧河水系、洮滬水系和武进港-直湖港水系; 出湖河流包括北通长江水系、黄浦江水系及杭州湾南排水系^[4]。根据地形和水文特征, 可以将整个太湖流域划分成湖西区、浙西区、太湖区、武澄锡虞区(简称武虞区)、阳澄淀泖区、杭嘉湖区、浦东浦西区 7 个分区。由于各区之间有水利工程控制区间水量交换, 因而 7 个分区构成了相对闭合的水文单元。其中湖西区、浙西区和武虞区是上游来水区, 太湖的水量和营养物质主要通过这 3 个区的入湖河道汇集; 其余 4 个区为下游出水区, 排放太湖绝大部分的水量和营养物质。根据本文的研究目的, 将太湖流域的上游来水区(即武虞区、湖西区和浙西区)作为研究的地理空间单元, 整个研究区面积为 19 057 km², 占整个太湖流域的 51.7%, 人口为 1 020 万人, 占整个流域人口的 28.3%。3 个区的人口数分别为 461 万、293 万和 266 万人, 平均高程分别为 21.1 m、6.7 m 和 152.2 m。

2 数据处理与模拟方案

SWAT 模型的输入变量包括气象资料(降水、最高及最低温度、相对湿度、风速、太阳辐射)、土壤数据、地形、土地利用、河网信息、水库资料、农作物种植类型与管理(包括主要的农事活动,如种植、移栽、施肥、收获和收割等)、点源排放等数据^[5]。

2.1 空间与非空间基础数据

地形图以国家基础信息中心标准 1:250 000 数字资料为主,其中 1:250 000 等高线数字地图是在 1:50 000 扫描栅格地形图的基础上,对平原地区进行了加密处理,然后生成栅格单元大小为 50 m×50 m 的 DEM。土壤资料采用中国科学院南京土壤研究所提供的 1:1 000 000 的数字化地图^[6]。土地利用资料包括流域内 1997 年和 2001 年的 1:100 000 数字化地图;气象资料为流域内 20 个县气象站 1994~2002 年的逐日降水、最高与最低气温、相对湿度和风速资料。

2.2 各营养源排放初始值的处理与计算

在外源输入中,流域上游的工业点源排放、城市与乡镇居民的生活废水排放、农业化肥流失、土地与农田的面源营养物质输出是最主要的营养来源。

2.2.1 工业点源排放

太湖上游来水区 1995 年、1998 年和 2002 年的各县工业点源排放数据来源于江苏省环境信息中心。

2.2.2 城市与乡镇居民的生活废水排放

居民生活污水包括排放的粪尿及日常生活洗涤等排污,城市居民的生活污水当作点源来对待,农村居民的生活排污当成面源来处理。城市和农村居民每日排放的营养物质存在一定差异^[4,7],但由于本文主要进行趋势方面的评估研究,所以采用统一标准,总磷排放量为 0.6 kg/(a·人),总氮为 3.5 kg/(a·人)。

2.2.3 农业化肥施用量

在 SWAT 模型中,农业化肥以施肥的方式按不同子流域的施用量存放在 SWAT 模型的农事管理数据库中^[8]。农业化肥的施用量由江苏省统计年鉴和浙江省统计年鉴得到。

2.2.4 牲畜养殖排放

将牲畜养殖排放作为非点源污染来处理。牲畜养殖量主要按江苏省统计年鉴和浙江省统计年鉴统计了猪、牛和羊等大型牲畜的饲养量,单位饲养量的排放量总磷为 0.146 kg/(a·kg),总氮为 0.182 kg/(a·kg)。

2.2.5 土壤本底营养盐

无机态氮在土壤氮素中比例很小,有机氮约占土壤全氮的 97%~98%^[9],因此全氮作有机氮来处理,而速效磷当作可溶性磷来处理。由此构建的 SWAT 模型土壤用户数据库形成了土壤本底营养盐数据层。

2.3 模拟方案

对各营养来源进行敏感性试验,主要是通过设置土壤本底营养盐、生活污水排放、牲畜养殖排放、农业化肥施用、工业点源排放等敏感性因子来进行模拟。敏感性试验的具体模拟方案见表 1。

表 1 敏感性试验的模拟方案设计

Table 1 Simulation schemes for susceptibility tests

敏感性因子	模拟的变量条件
土壤本底营养盐	土壤、地形和 1997 年土地利用等下垫面数据;1995 年、1998 年和 2002 年的气象实测数据
生活污水排放	在土壤本底营养盐的变量条件下,增加 1995 年、1998 年和 2002 年的生活污水排放初始值数据
牲畜养殖排放	在土壤本底营养盐的变量条件下,增加 1995 年、1998 年和 2002 年的牲畜养殖污水排放初始值数据
农业化肥施用	在土壤本底营养盐的变量条件下,增加 1995 年、1998 年和 2002 年的农业化肥施用数据
工业点源排放	在土壤本底营养盐的变量条件下,增加 1995 年、1998 年和 2002 年的工业点源排放初始值数据

3 模型的运行、率定与效验

3.1 模型的运行与率定

应用 SWAT 模型对研究区进行空间离散化和流域河网的提取,形成了各分区共 82 子流域、414 个水文响应单元和 5 个入湖口^[8]。河道入湖和出湖的水量交换问题,采用入湖水量权重系数来处理^[8]。浙西区、湖西区和武虞区的入湖水量权重系数分别为 0.60、0.98 和 0.59。利用这些系数来调整模拟的水量。在此基础上,对模拟的有效性进行测试,首先利用 1995 年的气象资料、计算的生活污水排放初始值、农业化肥单位耕地施用量、牲畜养殖排放初始值等数据,按 SWAT 模型的要求进行模拟。

经过率定和调试,模型对地表径流参数、土壤饱和含水量、蒸发补偿因子等参数变化反应敏感,通过调试

这些参数,使模拟的结果尽可能地接近实测值.

3.2 模型的效验

利用率定的模型参数对 2002 年进行模拟,所得模拟结果用于模型的效验.采用相关系数 R 和 Nash-Suttelife 系数 E_{NS} 来衡量模型模拟值与实测值之间的统计特征,前者在某种程度上反映了模拟值和实测值趋势变化的统计特征,而后者则从模拟值和实测值在量上的统计差异程度^[10]. E_{NS} 的计算表达式可参见文献[8,10], E_{NS} 的值可以在 0~1 的范围内变化,1 表示模拟效果极好,与实测值完全一致,0 表示模拟效果与采用实测值的平均值代替模拟值的效果一样,模拟值与实测值的平均值没有差异^[10].

表 2 是根据实测值和模拟值计算的各区水量、总氮和总磷的 E_{NS} 系数及相关系数.从相关系数来看,各区各要素的相关系数都经过了显著性检验($R_{\alpha=0.01}$ 与 $R_{\alpha=0.05}$ 分别为 0.708 和 0.576),但武虞区总氮的相关系数为 0.63,没有达到极显著相关.从 E_{NS} 系数来看,浙西区的模拟效果最好,而武虞区的则相对较差,并且误差主要集中在冬季的几个月份,对水量的模拟要好于总氮、总磷的模拟.

表 2 各区水量、总氮和总磷的 E_{NS} 系数
和相关系数(R)

Table 2 Nash-Suttelife coefficient and correlation coefficient of water volume, TN, and TP for each district

要素	湖西区		浙西区		武虞区	
	E_{NS}	R	E_{NS}	R	E_{NS}	R
水量	0.81	0.87	0.91	0.96	0.58	0.84
总氮	0.71	0.87	0.78	0.92	0.53	0.63
总磷	0.72	0.89	0.75	0.78	0.55	0.92
平均	0.75	0.88	0.81	0.89	0.55	0.80

4 结果与分析

按表 1 设计的敏感性模拟试验方案和调试率定的模型参数,对 1995 年、1998 年和 2002 年进行敏感性模拟.由于在敏感性模拟中,土壤本底营养盐造成的营养负荷贯穿在其他敏感性因子的试验中,因此,其他敏感性因子的模拟结果必须去处掉土壤本底营养盐的模拟结果.此外,在分析过程中,为了避免随机性,将上述 3 a 的模拟结果进行平均.

4.1 各营养来源排放的量化关系

表 3 是 3 年敏感性模拟的平均结果,从表 3 中可以看出,在这些营养排放源中,生活污水对总氮、总磷的贡献最大,其贡献率分别达到了 31% 和 47%,年入湖总量 3 年平均为 12 208 t 和 924 t.表示除农业化肥、牲畜养殖和土壤本底营养盐以及非点源形式的生活污水等营养来源之外的各种土地利用所造成的面源污染对总氮、总磷的贡献率.从营养负荷排放的形式来看,包含工业点源和部分生活污水的点源对总氮、总磷的贡献率分别占 47% 和 44%,3 a 平均年入湖总量达 18 509 t 和 865 t,而包含农业化肥、牲畜养殖、土壤本底营养盐、部分生活污水等面源因素对总氮、总磷的贡献率则达 53% 和 56%,3 a 平均年入湖总量达 20 872 t 和 1 101 t,由此可以看出,非点源形式的营养物质来源是太湖外源输入的主要形式.

从表 3 还可以看出,与人类活动密切相关的工业点源、生活污水、牲畜养殖和农业化肥等过程排放的总氮、总磷分别占入湖总量的 86% 和 88%,由此可以说明人类活动的方式和强度是引发湖泊富营养化的最主要的因素.

4.2 营养来源对总氮、总磷贡献率的空间分布

表 4 是根据敏感性模拟按分区统计的结果,从表中可以看出,工业点源、生活污水、牲畜养殖和农业化肥等营养来源造成的总氮、总磷入湖量和所占份额具有明显的空间差异,其中湖西区所占份额是最高的,农业化肥对总氮、总

表 3 各营养来源对总氮、总磷输移的贡献率

Table 3 Contribution ratios of each nutrient source to transport of TN and TP

敏感性控制因子	排放形式	总氮排放量/总氮贡献率/%		总磷排放量/总磷贡献率/%	
		(t·a ⁻¹)		(t·a ⁻¹)	
工业点源	点源	11 814	30	315	16
生活污水	点源	6 695	17	550	28
	非点源	5 513	14	374	19
牲畜养殖	非点源	3 938	10	216	11
农业化肥	非点源	5 907	15	275	14
土壤本底营养盐	非点源	788	2	59	3
其他面源	非点源	4 726	12	177	9
合计		39 381	100	1 966	100

磷的贡献份额尤其突出,分别达 52.1% 和 48.2%,作为营养来源中贡献份额最大的生活污水,湖西区所占的比例也分别达 47.4% 和 48.0%.综合各种营养来源,由湖西区入湖的总氮、总磷最多,而浙西区的总氮、总磷入湖量只及湖西区总氮、总磷的一半,但该区土壤中的总氮、总磷本底比较高,因而由土壤本底营养盐造成的总氮、总磷入湖量比其他区要大.主要营养物质来源中,工业点源、生活污水和农业化肥的空间变异较大,而

牲畜养殖、土壤本底营养盐和其他面源的空间变异相对较小。

表 4 各区营养来源对总氮、总磷入湖量的贡献率

Table 4 Contribution ratios of each nutrient source to TN and TP discharged into Taihu Lake from three sections															
分区	营养负荷	工业点源		生活污水		牲畜养殖		农业化肥		土壤本底营养盐		其他面源		合计	
		贡献率/%	入湖量/t	贡献率/%	入湖量/t	贡献率/%	入湖量/t	贡献率/%	入湖量/t	贡献率/%	入湖量/t	贡献率/%	入湖量/t	贡献率/%	入湖量/t
湖西区	TN	41.3	4879	47.4	5787	36.9	1453	52.1	3078	30.4	240	33.1	1564	43.2	16997.2
	TP	44.5	140	48.0	444	42.3	91	48.2	133	29.8	18	32.9	58	44.9	882.7
武虞区	TN	37.4	4418	34.3	4187	29.9	1177	29.8	1760	34.6	273	34.5	1630	34.1	13443.1
	TP	36.8	116	32.5	300	33.1	71	31.6	87	33.2	20	35.6	63	33.4	656.5
浙西区	TN	21.3	2516	18.3	2234	33.2	1307	18.1	1069	35	276	32.4	1531	22.7	8941.4
	TP	18.7	59	19.5	180	24.6	53	20.2	56	37	22	31.5	56	21.7	426.8

图 1 为根据 SWAT 模型各子流域模拟结果计算并绘制的总氮、总磷产出率分布图,从图中可以看出,太湖流域上游来水区总氮、总磷的产出率分别在 20~80 kg/hm² 和 4.5~10.5 kg/hm² 之间,产出率高的子流域主要分布在无锡、宜兴、常州、镇江、张家港、湖州等几个主要城市的所在子流域或周边子流域中,这种分布格局与城市工业点源排放、相对集中的人口等有密切关系,相对低值区出现在浙西区和湖西区的部分山地,这些地区的土地利用以林地为主,人为干扰少,总氮、总磷的排放主要与林业面源和土壤本底营养盐等过程有关。

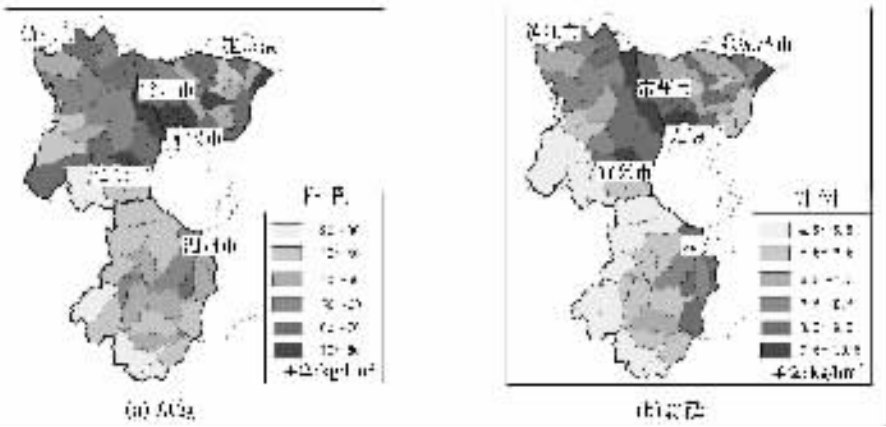


图 1 各区总氮、总磷产出率的空间分布

Fig.1 Spatial distribution of productivity of TN and TP in different sections

5 结 论

- a. 在 5 个营养来源中,生活污水排放是最重要的营养物质来源,它以点源和非点源的形式排放了总氮、总磷入湖总量的 31%和 47%;工业点源对营养负荷入湖总量的贡献仅次于生活污水,贡献率分别为 30%和 16%,而农业化肥对总氮、总磷的贡献率分别为 15%和 14%;牲畜养殖排污对总氮、总磷的贡献率分别为 10%和 11%。
- b. 人类活动的方式和强度是引发太湖富营养化的最主要的因素,在营养盐入湖总量中,大约 86%的总氮和 88%的总磷与人类活动有关。
- c. 从营养负荷排放的形式来看,包含工业点源和部分生活污水的点源对总氮、总磷的贡献率分别占 47%和 44%,而包含农业化肥、牲畜养殖、土壤本底营养盐、部分生活污水等面源因素对总氮、总磷的贡献率则达 53%和 56%,因此,非点源是太湖外源输入的主要形式。
- d. 总氮、总磷入湖量的贡献份额中,湖西区所占的比重最大,分别为 43.2%和 44.9%,武虞区仅次于湖西区,分别为 34.1%和 33.4%,浙西区最小,只及湖西区的一半左右,分别为 22.7%和 21.7%。明显的空间差异表明,湖西区和武虞区是营养物质外源输入的主要贡献地区,其中武虞区是值得注意的区域,如果该区外排不畅,则该区将是营养物质外源输入的最大来源。

参考文献：

[1] 黄漪平 , 范成新 , 濮培民 等. 太湖水环境及其污染控制[M]. 北京 : 科学出版社 , 2001.

[2] SRINIVASAN D L M R ,ARNOLD J G. Integration of watershed tools and swat model into basins[J]. Journal of the American Water Resources Association ,2002 ,38 :1127-1141.

[3] SRINIVASAN D L M R ,ARNOLD J G. A gis-hydrological model system for the watershed control of agricultural nonpoint and point sources of pollution[J]. Transactions in GIS ,2004 ,8 :113-136.

[4] 秦伯强 , 胡维平 , 陈伟民 等. 太湖水环境演化过程与机理[M]. 北京 : 科学出版社 , 2004.

[5] NEITSCH S L ,ARNOLD J G ,KINIRY J R ,et al. Soil and water assessment tool user 's manual version 2000[R].[s. n.] ,2002.

[6] SHI Xue-zheng ,YU Dong-sheng ,WARNER E D ,et al. Weindorf soil database of 1:1000000 digital soil survey and reference system of the Chinese genetic soil classification system[J]. Soil Survey Horizon ,2004 ,45(4) :129-136.

[7] PIETERSE N M ,BLEUTEN W ,JORGENSEN S E. Contribution of point sources and diffuse sources to nitrogen and phosphorus loads in Lowland River tributaries[J]. Journal of Hydrology ,2003 ,271 :213-225.

[8] 赖格英 , 于革. 太湖流域营养物质输移模拟评估的初步研究[J]. 中国科学 :D 辑 ,2005 ,35(增刊 2) :121-130.

[9] 席承藩 , 徐琪 , 马毅杰. 长江流域土壤与生态环境建设[M]. 北京 : 科学出版社 ,1994.

[10] NASH J E ,SUTCLIFFE J V. River flow forecasting through conceptual models Part I :A discussion of principles[J]. Journal of Hydrology ,1970 ,10(3) :282-290.

Simulation assessment on nutrient transport in Taihu Lake Basin

LAI Ge-ying^{1 2} , YU Ge²

(1. Key Lab of Poyang Lake Ecological Environment and Resource Development ,
Jiangxi Normal University , Nanchang 330027 , China ;

2. Nanjing Institute of Geography and Limnology , Chinese Academy of Science , Nanjing 210008 , China)

Abstract :Based on the observed meteorological , hydrological , and water quality data and social and economic statistical data of 1995 , 1998 , and 2002 , and with the SWAT model as the simulation tool , a simulative analysis of 5 nutrient sources , including soil nutrient background , urban and rural domestic sewage discharge , industrial point source discharge , livestock breeding discharge , and the use of fertilizers , was performed for the intake area on the upper Taihu Lake Basin. The simulated result shows that the domestic sewage and industrial point sources are the main nutrient sources , and that the non-point source nutrients , such as fertilizers , livestock breeding , domestic sewage , soil nutrient background , are the main forms of external nutrient sources discharged into the Taihu Lake. Of the total amount of nutrient salt discharged into the lake , about 86 % of TN and 88 % of TP are closely related to the human activities. The contribution ratios of TN and TP discharged into the lake are of obvious spatial difference. Moreover , Huxi district and Wuyu district are the leading sections of external nutrients discharged into the Taihu Lake.

Key words :Taihu Lake Basin ; nutrients ; TP ; TN ; SWAT model