

文章编号: 1000-0550(2006)03-0333-06

洪湖流域自然农耕条件下营养盐沉积 输移演化模拟研究^①

桂峰^{1,2} 于革¹ 赖格英^{1,2,3}

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所 南京 210008 2 中国科学院研究生院 北京 100039

3 鄱阳湖生态环境与资源研究重点实验室 南昌 330027)

摘要 选择洪湖流域为研究区域,应用分布式流域模型 SWAT,从长期演化的角度出发,对流域营养盐输移演化进行模拟。模拟的边界条件设置为自然农耕背景,探讨百年尺度洪湖流域营养盐输移演变规律。对 TN、TP 的模拟分汛期与非汛期两个时间段,分别进行 200 年的模拟运算。模拟结果显示模型可以很好的体现流域营养盐沉积输移演变的基本特征。TN、TP 浓度变化有明显的季节特征,随时间变化特征与沉积记录相一致。模拟结果的时间序列分析,TN、TP 显示出不同的变化趋势。流域模型为百年时间尺度上流域营养盐沉积输移演化的自然趋势研究,提供了很好评价依据。

关键字 自然农耕环境 营养盐沉积 TN、TP 输移 模拟 洪湖流域

第一作者简介 桂峰 女 1977 年出生 博士研究生 流域环境演变与数值模拟

中图分类号 P512.32 X141 **文献标识码** A

近年来,湖泊水环境问题日益为人们所关注,长江中下游湖泊水面缩小、水质恶化、湖泊富营养化发展迅速,严重的制约了区域社会经济和人民生活。这些变化既与流域范围内日益剧烈的人类活动相关,亦有可能是流域自然沉积演化的自然结果,如何从中区分自然与人类的作用,恢复自然沉积下流域营养盐输移的面貌,对认识长江中下游湖泊富营养化发展和沉积机制具有重要理论意义,对治理和控制湖泊富营养化发展也具有极为现实意义。

数值模拟为历史时期的流域营养盐输移研究提供了一个有效的途径,可以弥补实测资料缺乏的不足。本文选择位于长江中游的洪湖流域作为研究对象,应用流域分布式模型 SWAT,探讨流域自然农耕条件下营养盐输移的规律,以期流域环境决策提供科学依据。

1 研究区概况

洪湖地处长江中游,是江汉平原上最大的浅水湖,长江和汉水支流东荆河之间的一个洼地壅塞湖,洪湖市与监利县之间的跨界湖泊,在长江中下游浅水湖泊中具有代表意义(图 1)。

洪湖成湖于明代,位居四湖地区长湖、三湖、白露

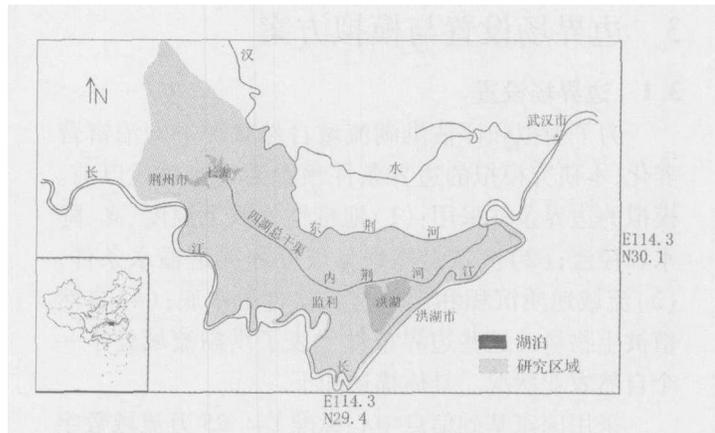


图 1 研究区域地理位置示意图(据参考文献[12]编辑)

Fig 1 Location of the study area (After Xiang Guorong 1997)

湖下游,建国以后,流域范围内大规模的围湖垦殖,使得四湖之中的三湖和白露湖已经消亡,仅存洪湖和长湖。洪湖现有面积 344.4 km²,水面范围跨东经 113°12'~113°26',北纬 29°40'~29°58'^[9,11]。经过几百年的自然演化和人类活动的影响,洪湖已逐步向沼泽化发展。

洪湖流域属亚热带中纬度北缘,为典型的北亚热带湿润季风气候,热能充足,降水丰富,雨热同季,年均降水量 1 100~1 300 mm,其中夏半年(4~10月)

① 国家科技部国家重点基础研究发展规划 973 项目(2002CB412300-1)、中国科学院知识创新工程课题(KZCX1-SW-12-1)资助。

收稿日期: 2005-07-15 收修修改稿日期: 2005-09-12

降水量占全年降水总量的 77%，年平均径流量 $37.35 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。流域集水面积，除上游区间 $8\,265 \text{ km}^2$ 外，汛期时，外江高水位季节，下游地区农田渍水可沿内荆河上溯倒灌入湖，全湖集水面积扩大为 $10\,352 \text{ km}^2$ [11, 12]。

2 模型简介

本文选用模型为美国农业部农业研究所开发的 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 模型，SWAT 模型是一个基于物理的流域分布式水文模型，与 GIS 结合的 SWAT2000 版本具有更加强大的空间分析和可视化功能。它适用于不同土壤类型、不同土地利用方式和管理条件下的复杂大流域，涵盖了自然与人类活动对水文、生物、物理化学等多因子的模拟和评估；适用于长时间序列模拟（一次可以达到 200 年的模拟）。目前，SWAT 模型在国内外都有很多成功的应用例子，它可以输出多年的模拟结果，用于反演过去事件的发生过程，以及预测未来的发展情况 [1~3, 8]。

3 边界场设置与模拟方案

3.1 边界场设置

为了模拟和评估洪湖流域自然状况下湖泊富营养化，本研究模拟的边界条件预置为工业时代以前。模拟的边界条件采用：(1) 地带性气候下温度、光、降水和径流；(2) 流域自然地形坡度和河道输水条件；(3) 流域地质沉积和土壤营养盐含量本底；(4) 自然植被生物量。这些边界条件代表了洪湖流域处于一个自然农业状况。具体描述如下。

采用国家基础信息中心标准 1:25 万流域数字高程 (DEM) [14]，构成基本地形数据库和水文单元；应用 1:100 万土壤调查资料 [4]，获取土壤类型和土壤物理、化学属性数据；根据 20 世纪 80 年代 1:100 万中国植被调查图，转化为栅格单元精度 10×10 分的植被资料 [7]，作为植被类型和空间分布资料，并以此构成植被本底营养盐数据库。由于流域地处平原地区，地形起伏很小 ($20 \sim 40 \text{ m}$ 高程占总流域面积的 65% 以上)，单纯依据数字高程生成流域水系误差较大，本文采用 SWAT 模型对 DEM 预处理中的“刻入法 (burn in)”。该方法利用现有的数字河网 (实际河网) 来帮助提取河网系统，通过对指定水系“挖沟”的方法，降低数字河网所在位置的 DEM 高程，使自动提取的河网与数字河网相匹配。本模拟采用的数字河网根据 1:10 万地形图数字化得到。气象站点资料以

流域范围内 (包括附近气象站点) 的气象数据 (1950 年以来各站点的逐日最高、最低气温，降水资料，1980 年以来各站点的逐日平均风速、平均湿度、日照时数) 为基础，计算出模拟所需气候统计量，由模型自带的 Weather Generator 工具生成长时间序列的气象数据。

上述地形、土壤、植被以及气象站点等空间信息均在 GIS 平台下栅格化，并采用 ALBERS 等积圆锥投影方式后的数据形式，作为 SWAT 模拟试验的边界场。

3.2 模拟方案设计

模拟方案包括：(1) 以洪湖流域作为研究区，建立基于 SWAT 模型模拟的各子流域本底和动态数据库，包括了地质沉积、地形、气候、水文、土壤等专题数据库。(2) 对各数据库专题的分布与属性进行空间离散化处理，获得营养盐来源和营养盐输移动力的地表过程的空间分布式。(3) 运行所构建的数值模型，模拟自然状况下洪湖流域营养物质特征和变化。以逐日为时间步长，连续模拟时间 200 年。(4) 利用湖泊钻孔揭示的过去百年沉积记录，对营养盐模拟进行对比和验证。

此外，基于汛期与非汛期洪湖集水面积不同的考虑，模拟工作分为两部分进行。自然状况下，洪湖水位变化主要与流域降水、湖区来水量有关。一般规律是 4 月份起，湖区降水增加，流域来水量增大，湖水位逐步上升，5 月长江进入汛期，内湖水位加快上涨，7~8 月出现最高水位，9~10 月为平水季节，10 月后外江水位消退，水位逐渐下降，直至次年 3 月。依据来水时间不同，模拟时段可以分为四季：春 (3~5 月)、夏 (6~8 月)、秋 (9~11 月)、冬 (12~2 月)，其中夏季为汛期，单独模拟。

第一部分模拟，适用于非汛期，集水面积包括了洪湖以上的长湖、三湖、白露湖，流域面积 $8\,265 \text{ km}^2$ (图 2)。

第二部分模拟，适用于汛期，集水面积除非汛期的范围之外，还包括了下游上溯倒灌入湖的水，流域面积扩大为 $10\,325 \text{ km}^2$ (图 3)。

3.3 模型运行

SWAT 模型的运行过程包括以下几个主要步骤：(1) DEM 数据调入，进行预处理，对流域范围内的坑洼进行填充，同时利用“刻入法”提高流域水系和边界生成的精确度；(2) 流域离散化，基于流域 DEM 数据，SWAT 模型可以对整个流域进行空间离散化，把

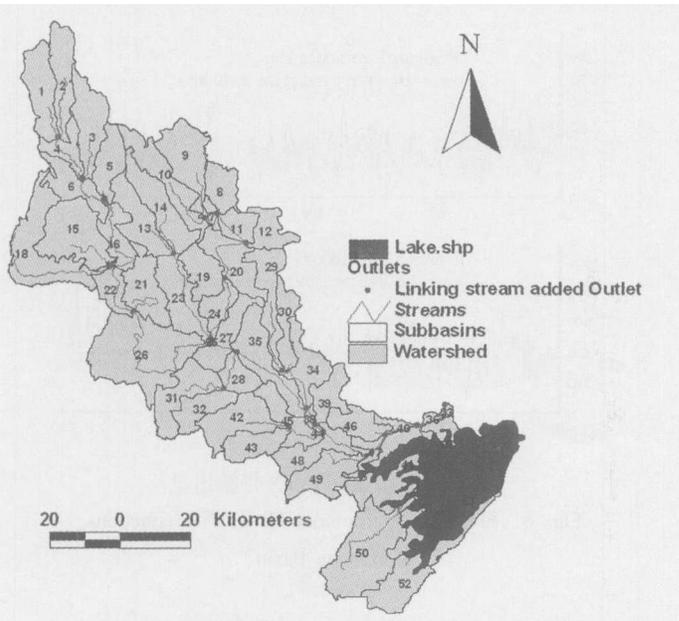


图 2 流域边界生成及子流域划分(非汛期)
Fig 2 Watershed delineation & subbasin division for non flood period

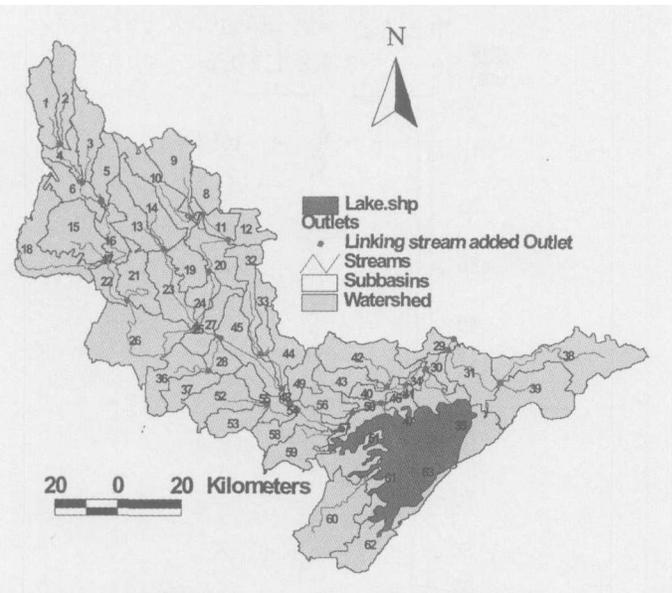


图 3 流域边界生成及子流域划分(汛期)
Fig 3 Watershed delineation & subbasin division for flood period

整个流域划分成若干个子流域 (subbasins); (3) 根据子流域的划分, 叠加土地利用和土壤资料, 以拥有单一土地利用、土壤属性和管理方式为准则, 将子流域离散为至少一个水文响应单元 (HRU); (4) 由 SWAT 模型的 weather generator 工具, 生成历史时期气候数据系列, 并分配到各 HRU 上; (5) 植被参数、农业管理方式, 以及模拟运行时间设置; (6) 运行模型。

4 结果分析与验证

4.1 模拟结果分析

1) 流域径流量变化特征

模拟结果显示, 流域多年平均径流量为 $46.1 \times 10^8 \text{ m}^3$, 径流量年度分配, 以 4~9 月分布最为集中, 占全年径流总量的 75%。其中夏季 (6~8 月) 的径流总量占全年的 50%。(图 4a)

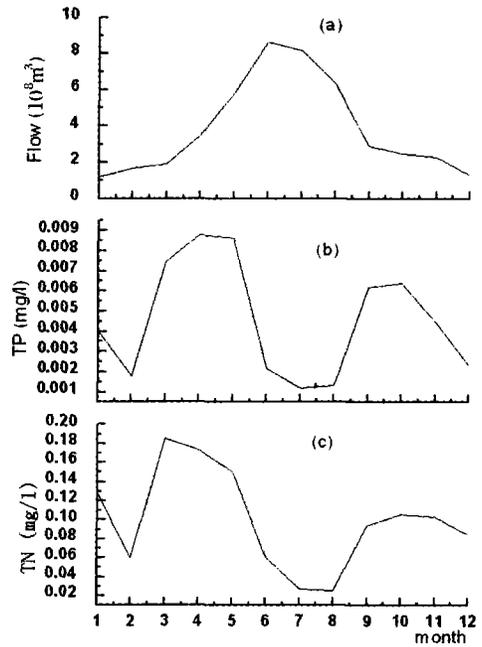


图 4 流域径流量、TN、TP 模拟值变化特征
Fig 4 Simulated flow fluxes TN TP changes in one year

2) 营养盐浓度年内变化特征

模拟结果中, 流域营养盐浓度的年内变化 (200 年平均状态) 与流域径流量的变化密切相关, 夏季时营养盐浓度达到出现一个很明显的低谷, 与该时段降水集中, 径流量大, 营养盐被稀释的特征相对应。春季比其他季节都要高的分布特征, 可能与耕作制度有关。此外, 受流域汇水过程的影响, 营养盐浓度低值与径流量高值之间有一个滞后的过程。(图 4 b c)

3) 营养盐输移时间变化特征

营养盐浓度在整个模拟时段中出现的变化趋势, 从 4 个季度分别来考察。营养盐浓度在 4 个季节中均有显著的变化, TN 浓度随时间推移呈缓慢上升趋势, TP 水平保持平稳, 略有下降, 变化幅度很小。(图 5)

4) 营养盐输移总量时间变化特征

模型输出包含营养盐输出的平均浓度, 由年平均

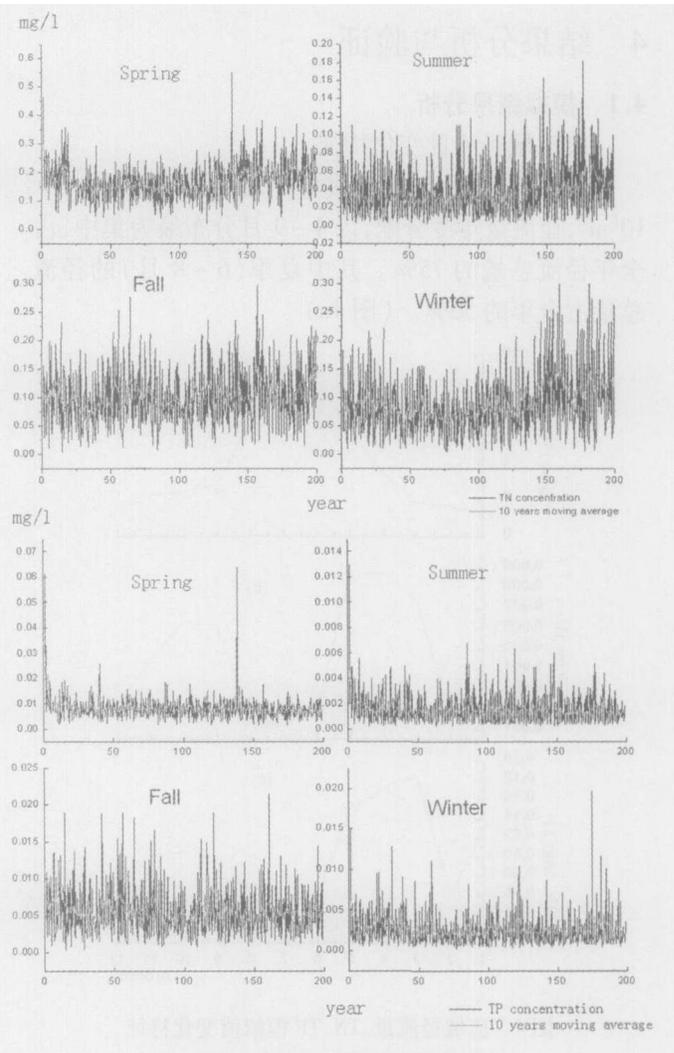


图 5 营养盐浓度时间变化图

Fig 5 Change of nutrient concentration with time

径流总数与营养盐输出浓度, 可以计算出流域范围内, 多年平均 TN、TP 产量分别为 420.25 t/a 和 19.613 t/a。模拟时段内, TP 的变化趋势不太明显, 波动较大, TN 显示出增加趋势。流域范围内营养盐的不断累积是一个自然趋势。(图 6)

4.2 模拟结果验证

对自然农耕条件下模拟结果的验证, 因为缺乏实测数据, 故采用沉积钻孔的数据来对比。本文选择洪湖 HN 和 H2002-2 钻孔沉积记录以及年代测定成果来验证。

据姚书春等洪湖钻孔 (HN) 的 ¹³⁷Cs 法测定的绝对年龄, 洪湖 540 年来 (84cm 长度的沉积物) 沉积速率为 0.155 cm/a。HN 钻孔中, 25~8 cm, 对应于 1840~1950a 左右, 8 cm~表层, 对应于建国 50 年以来的情况; 根据陈萍等, H2002-2 孔 ¹⁴C 测年, 洪湖沉积速

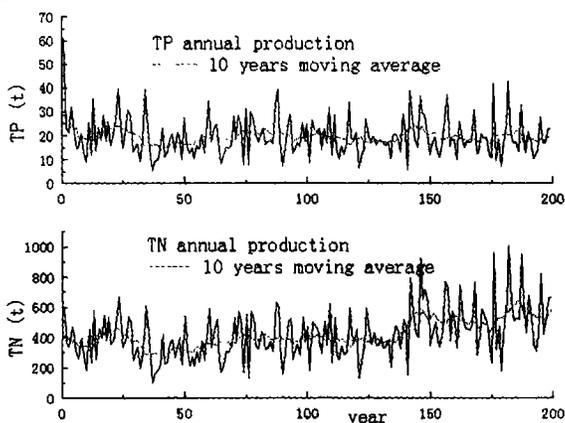


图 6 模拟流域 TP、TN 年输出量

Fig 6 Simulations of annual TP & TN productions of Honghu Basin

率在 0.092~0.129 cm/a 之间, 钻孔 D 层 22 cm 以上, 代表了 1845~1992 年, 洪湖近 150 年的发展历程^[5, 13]。两个钻孔的年代测定大体一致。

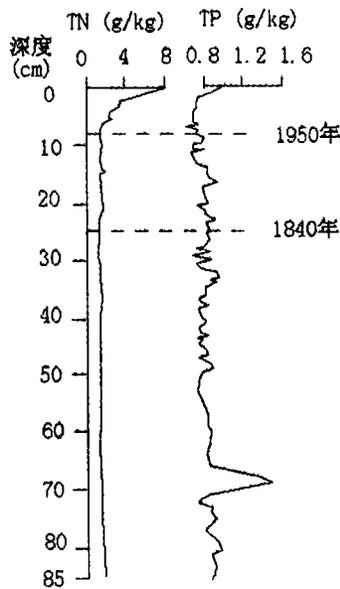


图 7 HN 孔沉积物中 TN、TP 分析值 (据姚书春等, 2004)

Fig 7 TN & TP values in Core HN (after Yao et al., 2004)

模拟方案设置的边界场条件为工业时代以前的自然农耕状态, 在我国, 也就对应于钻孔中 1840~1950 年这段时间。故可根据年代测定数据, 读取钻孔中相应年代层位 TN、TP 的含量来验证模拟结果。具体验证过程描述如下。

(1) 钻孔 (HN 孔) 中营养盐浓度 (图 7)。1840 ~ 1950 年, TN 含量随深度的减少, 慢慢增加, 变化区间在 1.20 ~ 1.77 g/kg。1959 ~ 2002 年, 随深度的减少, 迅速增加, 变化区间在 1.77 ~ 8.78 g/kg。

TP 的变化在整个剖面中比较频繁, 65 ~ 70 cm 内出现一个峰, 但在表层 4 cm 内, 随着深度的减少显示了增加的趋势, TP 的含量在 0.25 m 处达到 0.946 g/kg (表 1)。

(2) 洪湖水环境质量数据: 文献资料数据与实测数据 (2002 年, 羊向东提供)。50 年代以来, 不同时段, 洪湖水环境质量数据 (三氮的含量)^[6-10] 与钻孔中相应层位沉积物中 TN 浓度对比 (表 1), 得回归方程 (公式 1)。

$$y = 0.2475 \ln(x) + 0.0864$$

$$R^2 = 0.9557 \quad (1)$$

式中, y 为水体中三氮含量 (mg/l), x 为沉积物中 TN 含量 (g/kg)。

由 (1) 式可以推算出, 模拟时段 (1840 ~ 1950 年) 内, 水体中三氮含量变化区间为 0.13 ~ 0.23 mg/l 平均值为 0.19 mg/l 而模拟结果为 0.071 ~ 0.11 mg/l 平均值为 0.09 mg/l (表 2)。

表 1 钻孔和水中营养盐浓度对照表

Table 1 Comparison of nitrogen concentration between sediment core and simulation

	钻孔 TN (g/kg)	水体三氮 (mg/l)
1960s	2	0.28
1970s	3	0.32
1980s	3.8	0.41
1990s	5.8	0.558
2002	8.3	0.597

表 2 营养盐浓度模拟值与推算值对照表

Table 2 Comparison of nitrogen concentration between the simulated and transformed value

	模拟 TN (mg/l)	沉积物转换三氮 (mg/l)	准确率
高值	0.114	0.228	0.502
均值	0.090	0.195	0.463
低值	0.076	0.132	0.581

模拟结果与推算结果之间相差一倍, 这一差异除模型本身误差外, 还可能由以下原因造成: 湖泊的营养物质来源, 有内外源之分, 而模拟工作仅仅考察了外源部分, 体现了整个流域向湖泊水体输送营养盐的水平, 忽略了内源营养物质的释放, 因而必然出现偏差, 内源问题为富营养化研究工作中不可或缺的一个

部分, 值得重视。

5 结语

自然农耕下流域营养物质输移的模拟工作, 揭示了自然农耕条件下, 流域营养盐输移的基本特征, 并得到沉积钻孔资料的验证。在自然状态下, 湖泊作为流域营养物质的汇, 流域营养物质会不断汇入到湖泊, 营养物质输入的浓度会随季节而变化, 随着流域营养物质的输入不断增加, 湖泊营养物质不断累积, 逐步向富营养化发展, 这是一个自然过程。20 世纪 50 年代以来, 人类活动加速了营养物质的积累, 湖泊水体中营养盐浓度急剧增加, 水体富营养化进程加速。同时, 作为探索性工作, 也验证了 SWAT 模型在流域的富营养化机理工作中应用的可行性, 对今后人类活动影响加深情况下的模拟, 可以结合更新的土地利用资料, 农药化肥施用资料, 以及实测水环境数据等等进行模拟和验证, 而模拟工作也将具有更高的应用价值。

参考文献 (References)

- 1 Di Luzio M, Srinivasan R, Arnold JG *et al*. A review interface for SWAT2000 Users Guide. Published by Texas Water Resources Institute TR 193 College Station TX 2002 345
- 2 Neitsch S L, Arnold JG, Kiniry JR *et al*. Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2000. Published by Texas Water Resources Institute TR 193 College Station TX 2002 498
- 3 Neitsch S L, Arnold JG, Kiniry JR *et al*. Soil and Water Assessment Tool Users Manual Version 2000. Published by Texas Water Resources Institute TR 193 College Station TX 2002 438
- 4 Shi X Z, Yu D S, Warner E D *et al*. Soil Database of 1:100,000 Digital Soil Survey and Reference System of the Chinese Genetic Soil Classification System. *Soil Survey Horizon* 2004 45(4): 129 ~ 136
- 5 陈萍, 何报寅, 杜耘, 等. 1200 年来洪湖演变的环境磁学记录. *沉积学报*, 2005 23(1): 138 ~ 142 [Chen Ping, He Baoyan, Du Yun *et al*. The environment magnetic records of Honghu lake evolution in past 1200 years. *Acta Sedimentologica Sinica* 2005 23(1): 138 ~ 142]
- 6 陈世俭. 洪湖的环境变迁及其生态对策. *华中师范大学学报 (自然科学版)*, 2001 35(1): 107 ~ 110 [Chen Shijian. Environmental problems and ecological countermeasures for Honghu lake in Hubei province. *Journal of Central China Normal University (Natural Science Edition)*, 2001 35(1): 107 ~ 110]
- 7 侯学煜. 中国自然地理 (植物地理). 北京: 科学出版社, 1988 318 [Hou Xueyu. *China Physical Geography (Botanical Geography)*. Beijing: Science Press, 1988 318]
- 8 胡远安, 程声通, 贾海峰. 非点源模型中的水文模拟——以 SWAT 模型在芦溪小流域的应用为例. *环境科学研究*, 2003 16(5): 29

- ~32 [Hu Yuanan, Cheng Shenglong, Jia Haifeng. Hydrological simulation in NPS models: case of application of SWAT in Luxi watershed. *Research of Environment Science*, 2003, 16(5): 29~32]
- 9 湖北水利志, 湖北省水利志编纂委员会编, 北京: 中国水利水电出版社, 2000 [Hubei Water Conservancy compile committee of water conservancy Hubei province. Beijing: China Water Conservancy & Water Electricity Press, 2000]
- 10 王飞, 谢其明. 洪湖湿地生态系统的演替趋势及管理对策. *农村生态环境*, 1990 (2): 21~25 [Wang Fei, Xie Qiming. The succession trend and management countermeasure for Honghu wetland ecosystem. *Rural Environment*, 1990 (2): 21~25]
- 11 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998: 580 [Wang Suming, Dou Hongsheng eds. *China Lake*. Beijing: Science Press, 1998: 580]
- 12 项国荣. 四湖地区湿地农业持续发展研究. 北京: 科学出版社, 1997: 271 [Xiang Guorong eds. *Research on Sustainable Development of Wetland Agriculture in Sihug Region*. Beijing: Science Press, 1997: 271]
- 13 姚书春, 薛滨, 夏威岚. 洪湖近 540 年来人为活动的沉积记录. *河海大学学报*, 2004, 32(增刊): 154~159 [Yao Shuchun, Xue Bin, Xia Weilan. Human impact recorded on the sediment of Honghu Lake. *Journal of Hohai University (Natural Science Edition)*, 2004, 32 (Supp): 154~159]
- 14 中国国家基础信息中心. 中国 1:25 万地图. 北京: 1999 [National GIS Center of China. *Data Base of 1:2500000 topography of China*. Beijing: 1999]

Historical Simulations of Nutrient Sedimentary and Transport Changes in Honghu Lake Basin

GUI Feng^{1,2} YU Ge¹ LAI Ge-ying^{1,2,3}

1(Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008)

2(The Graduate School of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

3(The Key Lab of Poyang Lake Ecological Environment and Resource Development, Nanchang 330027)

Abstract A catchment's nutrient model SWAT was used in this paper to examine changes in the nutrient sedimentation and transportation in a hundred year time scale and Hong Lake Basin, located in the middle reach of Changjiang River was chosen as the study area. Boundary condition in the simulations is prescribed in a pre-industrial time mode in order to evaluate a natural agricultural forced nutrient changes in the Hong Lake Basin one hundred years ago. Total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in the main channel transported into the lake were simulated in two periods of flood season (summer) and non-flood season (spring, fall and winter) in running 200 model years respectively. Results show the modeling can catch basic features of the basin nutrient transportations and changes. The TN and TP concentrations show significant seasonal changes and annual mean concentration can be compared well with nutrient concentrations transformed from sediment cores of Hong Lake that records were ¹³⁷Cs dated to ca 100 year ago. Time series in the 200-yr simulation shows different trends in TN and TP concentration changes. There are obvious differences spatially in the input and output subbasins. The SWAT model has provided an effective tool to evaluate how nutrient production and changes in natural environmental system of the 200 years in the Hong Lake Basin.

Key words natural agricultural environment, nutrient sedimentation, TN and TP transportations, simulation, Honghu Lake Basin