

文章编号: 1000-0550(2006)06-0849-08

太湖流域营养盐沉积 200 年的历史模拟研究^①

于 革 桂 峰

(中国科学院南京地理与湖泊研究所 南京 210008)

摘 要 介绍边界条件设置为工业时代以前太湖流域处于自然农耕状况下,对太湖的总氮和总磷沉积反演 200 年的数值模拟研究。模拟反映了自然状况占 1990 年湖泊富营养化观测资料的湖区总氮约 7%, 占总磷约 12%。模拟总氮和总磷浓度与太湖沉积钻孔沉积样推算的水体含量的数量级和变化范围相当,太湖流域的营养盐空间来源模拟也能够与流域自然地理变化吻合,表明模拟能够捕捉到流域营养盐历史变化特征,对湖泊营养物质来源、沉积和空间分布的流域环境历史变化响应具有良好模拟能力。

关键词 自然农耕环境 营养盐沉积 数值模拟 百年反演 太湖流域

第一作者简介 于革 女 1957 年出生 研究员 博士生导师 第四纪地质与湖泊沉积环境、花粉与古植被、古气候动力模拟 E-mail: geyu@niglas.ac.cn

中图分类号 X141 **中图分类号** A

长江中下游地区湖泊富营养化极大地制约水资源可持续利用,也日益制约社会经济的发展。作为湖盆基地的第四纪河湖相沉积物,尽管含多种复杂物质成分,而其中以物理、化学和生物形式表现的氮、磷营养盐对湖泊营养化发展具有及其重要贡献^[1-2]。对太湖水体和沉积界面的研究表明,影响湖泊富营养化发展的水土物质交换主要发生在湖底 5~10 cm 的沉积物中^[3]。从沉积学的角度来看,太湖 5~10 cm 厚的表层沉积物是近百年来流域内沉积物质输移、沉积的产物^[4]。长江中下游湖泊的一系列浅地质钻孔揭示了氮、磷营养盐数百年来含量和变化^[4-7],为追溯营养盐沉积历史、分析富营养演化的地质环境提供了科学依据。然而,对流域营养盐沉积产量、输移速率等定量追踪、对历史气候和垫面变化引起的流域输水输沙能力改变、从而引起的氮、磷沉积等动力因子变化的认识,地质钻孔方法还难以全面涵盖和解决。这类问题涉及到如何认识湖泊富营养化沉积过程和机理、控制湖泊沉积富营养化发展等重要问题,而流域沉积物输移与水动力结合的数值化模拟能够为这一目标实现提供了有效途径^[8]。

太湖流域在长江中下游湖泊富营养化演变中是一个突出的典型^[1,9,10]。太湖的泥沙主要来源于入湖河流。由于太湖平原地势平坦,河床比降小,流速缓,太湖年输沙量在 30~40 万吨级^[9,10]。这对于湖

泊面积有 2 428 km² 的太湖来讲,入湖输沙量甚少,在流域坡降最大、流量最高的西南苕溪入湖口也没有形成入湖三角洲^[9]。但是,由于太湖流域雨量丰沛,降水年总量 1 000~1 400 mm,入湖年径流在 40 亿立方米以上^[9,10]。因此,入湖营养盐的物质形态主要是高径流量下的化学态。水体中氮磷营养盐表现形式有溶解氮和有机氮,而沉积物主要为有机氮和无机氮,包括了硝酸盐氮、亚硝酸盐氮和铵态氮等形式;水体和沉积物中的磷营养盐相似,表现为有机磷和矿物磷^[8]。因此,对于以化学输移为主的氮、磷沉积模拟,采用通常的物理沉积模型还难以胜任。

SWAT 模型^[11]是对一个流域的地质、土壤、水文等多要素进行水质环境的综合评估系统。它着眼于流域水平的地质基地和流域环境动态,能够模拟流域营养盐包括了氮、磷主要营养盐的来源、沉积及空间变化。本文试图用它来评估太湖流域营养盐沉积物来源和速率,反演百年来氮、磷营养盐特征和变化,分析湖泊沉积的输移趋势,从地质环境层面对湖泊富营养化控制和治理提供科学理论和依据。

1 模式与模拟方案

美国 2000 年版的土壤和水质评价模型 (Soil and Water Assessment Tools SWAT)^[11-13]是基于 GIS 平台的流域模拟评估系统,适用于地理状况复杂的大流域对水体、土壤、沉积物、植被等变化和空间分布进行

①中国科学院南京地理与湖泊研究所和科技部国家重点基础研究发展规划 973 项目 (2002CB412300-1) 联合资助。
收稿日期: 2006-03-23 收修改稿日期: 2006-04-13

中长期数值模拟。SWAT 基本动力模块包括了辐射和大气能量方程、水量平衡模型(包括地表径流动态模型和地表物质下渗模型)和基本生物化学模块^[14~16]。在生物化学模块中,涵盖了氮、磷营养盐在流域沉积物、土壤层、植被层、地表水等运动和沉积过程,通过径流、侧流、入渗中的通量和浓度变化模拟矿物态和有机态多种形态的氮和磷。对氮元素循环,除了考虑沉积物和土壤层中的排放和富集,模式还考虑到地表植被层的排放和吸收,以及地下的入渗和侧流中的过滤过程。因此,模型中氮营养盐模块包括了硝化和反硝化作用、固氮作用、矿化作用、腐烂分解作用等多重生物化学循环过程^[17~19]。除了对矿物磷模拟外,对溶解状态下的磷元素模式分解为溶解和沉淀两种状态进行模拟。磷元素的流失计算考虑了地表本底磷的富集、径流量溶解和输移,以及地表植被的生长、吸收。因此,磷营养盐模块包括了矿化—分解—固化作用、吸附作用、下渗过程等多重生物化学过程循环过程^[20~22]。因此,SWAT 模型输出具有水文物理变量(以输水和输沙过程为主)和化学变量(以多种形态的氮和磷为主)以及它们的时间序列和空间分布。

SWAT 模型动力框架为时间连续的分布式,模拟时间可从月、年直至百年。为了模拟和评估太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。模拟方案包括:(1)以太湖流域作为研究区,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)分析流域特征和河网系统,建立各子流域和水文响应单元,利用区域实测资料对模型参数进行调试和率定,并进行模型的有效性检验。(4)运行所构建的数值模型,模拟自然状况下太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。(5)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。

2 数据库构建和边界场设置

太湖流域位于 30°1′~32°1′N, 119°1′~121°9′E, 面积 36 895 km²^[9]。从流域营养盐来源和营养盐输移动力两个方面考虑,本文首先构建 SWAT 模拟试验的边界场,包括了土壤沉积物质来源、植物生产量

来源、地形动力和水动力四个方面的数据库以及相应的模拟计算预处理。

地形和地貌以及构成的河道、水系是沉积物从流域分布到湖区沉积的基本动力场,具体包括了海拔、高差、坡降、河网形态、流域边界和子流域组合等地形要素。太湖流域地势西高东低,上游区河流以入湖为主,包括苕溪水系、宜溧河—南溪水系、镇江—苏州运河水系。镇江—苏州运河水系由于地势平坦,在长江与太湖水体之间互有交换。下游区河流以出湖为主,包括通江水系、黄浦江水系及杭州湾水系^[9, 23]。采用国家基础信息中心标准 1:25 万等高线数字地图^[24],构成基本地形数据库和水文单元。数字高程值在地理信息系统 ArcGIS 中,采用 TN 模块生成不规则三角网,经高程内插后生成栅格单元的数字高程模型(DEM)(图 1a)。在地形和水系基础上,由 SWAT 模拟出四个子流域,分别包括了西北区宜溧河—南溪水系、西南区苕溪水系、北部镇江—苏州运河水系、东南区通江水系、黄浦江水系及杭州湾水系。其中西北区子流域(代号 NW)(图 1b)、西南区子流域(代号 SW)(图 1d)为太湖输入水系;北部地区子流域(代号 N)接纳江湖吞吐,同年具有输入和输出性质(图 1c);东南区子流域为太湖出水水系(代号 SE)(图 1e)。对北部子流域,根据太湖多年水文和环境监测资料^[10],长江和太湖输入:输出的水量比为 0.55:0.45,污染物比 0.46:0.54,由此估计长江和太湖的水沙输入:输出权重为 0.5:0.5。模拟的太湖四个子流域的地理和水文特征如表 1。

表 1 太湖 4 个子的流域模拟的地理和水文特征

Table 1 Topography and hydrology features of four subbasins in Taihu

子流域	SW	NW	N	SE	总和
模拟面积 /km ²	5254	8298	3710	12984	30246
高程范围 /m a s l	21~1266	2~453	1~283	0~178	
平均高程 /m a s l	180	31	11	7.8	
输入水系权重	1	1	0.5	0	2.5
输出水系权重	0	0	0.5	1	1.5

太湖流域内出露的基岩、沉积物和发育在地质母岩上土壤层是湖泊沉积物的基本来源。太湖流域北部和东部地表以第四纪松散沉积物为主,沉积厚度自西南部 50 m 变化到东北部 200 m^[9, 25]。全新世河湖相沉积厚度 1~25 m。该河湖相沉积覆盖在晚更新世黄土堆积的古地面上,黄土地层主要出露在平原西

部岗地和丘陵地区。流域西部出露晚古生代灰岩、砂岩,构成茅山和宜溧低山丘陵。流域西南部为天目山南翼,主脉由中生代安山岩、流纹岩、花岗岩及花岗闪长岩构成。天目山主脉北侧主要为早古生代石灰岩、砂岩和泥质岩出露。环湖断裂发育,在苏锡地区出露中生代闪长花岗岩侵入岩体,侏罗纪火山岩主要分布于溧阳、苏州、无锡、上海及浙江杭州湾以北地

区^[9, 26]。我国 1:100 万土壤调查资料^[27] 提供了地表数米厚的土壤和沉积物类型和属性。经过数字化处理后的土壤资料^[28], 包括了沙、粉砂、粘土、有机质、土壤 pH 值和容重等物体指标, 还提供了营养盐本底包括了全氮、全磷和速效磷等化学成分, 由此构建流域本底营养盐数据库, 其中太湖流域总氮和总磷分布见图 2。

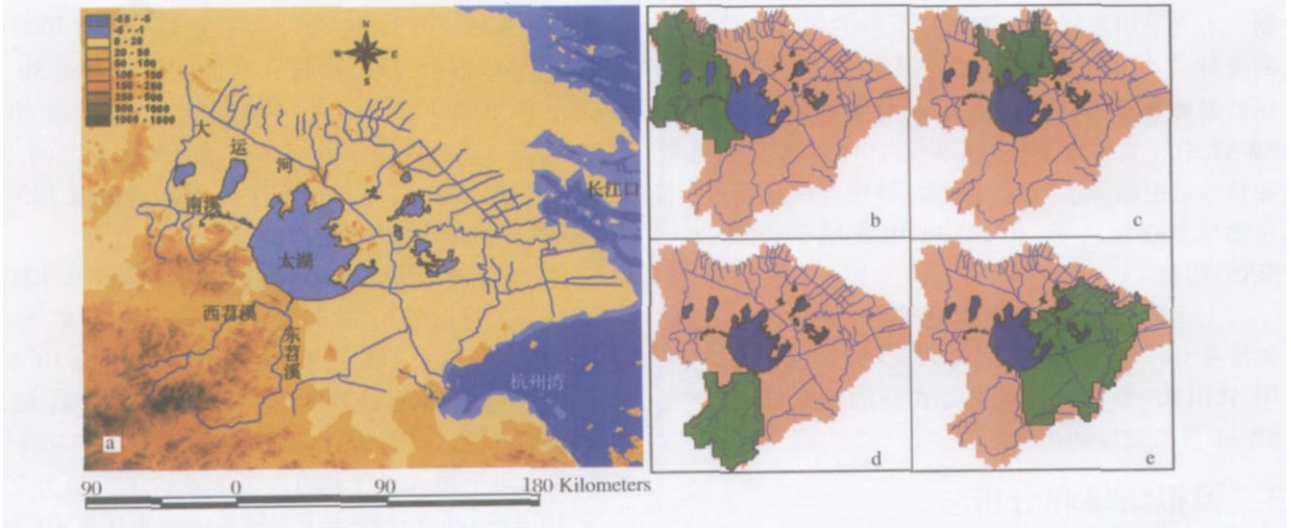


图 1 太湖流域地形、水系和子流域。a 数字化地形高程 (m a s l) 和太湖水系, b c d e 中阴影部分分别为 NW, N SW 和 SE 四个子流域。

Fig 1 Topographical hydrological settings of Taihu Basin (a), and four NW, N, SW and SE subbasins (b c d and e).

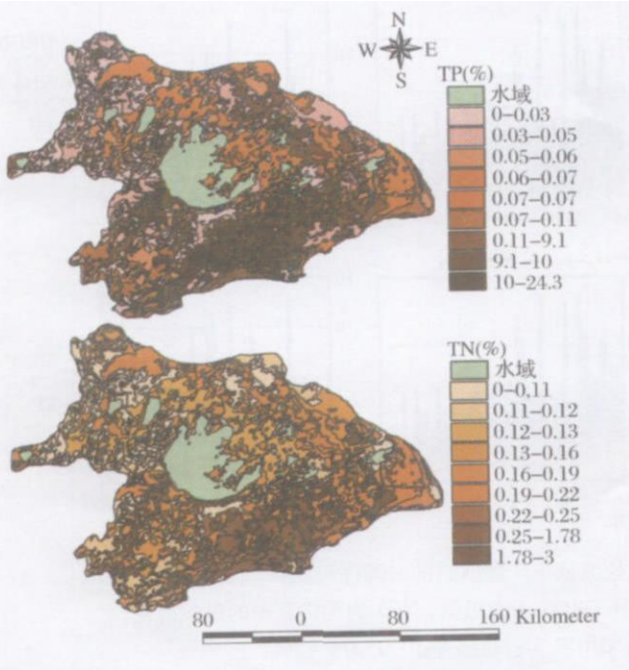


图 2 太湖流域沉积物 TN、TP 本底含量分布图(资料来源 [28])
Fig 2 Background distributions of TN and TP in sediments of Taihu Basin (Data from [28])

流域内植被产生了不同的物理、化学和生物营养盐成分, 是湖泊沉积营养盐的一个重要来源。太湖流域地跨北亚热带与中亚热带, 植被状况良好, 生物生长量较高^[29]。丘陵山区的植被自北向南具有自然分带的植物区系, 天目山、宜溧山地为常绿阔叶林, 北部为常绿阔叶和落叶阔叶混交林。东部和北部地区以农业栽培植被为主^[9, 25, 29]。本文根据上世纪 80 年代 1:100 万中国植被调查^[29] 资料, 设置太湖流域植物和作物类型, 与 SWAT 模型中的相应 8 种植被类型对应。根据它们的平面分布(经度、纬度、块状分布)转化的栅格单元精度 $10' \times 10'$ 的数字资料, 构建各种植被(包括农作物)覆盖的基本性状、参数和空间分布数据库。

营养盐来源除了沉积物本底和地表生物层外, 大气沉降也有一定贡献。1987—1988 年太湖流域的实际观测数据反映了大气降水中总氮浓度 $0.826 \mu\text{g}/\text{l}$ 总磷浓度为 $0.018 \mu\text{g}/\text{l}$ ^[10]。2002—2003 年的观测总氮浓度达到了 $1.479 \mu\text{g}/\text{l}$ 总磷浓度 $0.0367 \mu\text{g}/\text{l}$ ^[30]。这个数据表现出 15 年来大气降水中氮磷量

增加接近 1 倍,反映了营养盐大气沉降变化主要受到现代工业城市化的速猛发展影响。考虑 80 年代中期氮磷大气降水浓度在百万分之一量级,推测自然农耕状况势微小,因此在历史模拟中暂忽略了这一来源的设置。

最终完成营养盐从流域到湖区沉积需要一定的动力作用。太湖流域沉积物动力主要以水动力搬运作用为主,而水动力受到气候降水和河流水文状况控制。本文采用流域内长期气候资料的温度和降水观测资料^[31~36]。太阳辐射、相对湿度、风速等其它气候要素则根据地理位置、基本温度和降水资料由 SWAT 中气象要素子模块 (WG) 产生。水文径流量和输沙量根据降水等气候要素、地形与河道特征、沉积物与土壤属性等,由 SWAT 中流域子模块 (BASINS) 模拟。

上述地形、土壤、植被以及气象站点等空间信息矢量在 GIS 平台上栅格化成 92m×92m 单元,并均采用 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 模拟结果和分析

SWAT 模拟主要营养盐输出变量包括了不同化学态的氮、磷元素。本文采用总氮 (TN: 溶解无机

氮—硝酸盐、亚硝酸盐和铵盐、溶解态有机氮、颗粒氮的总和)和总磷 (TP: 溶解无机磷酸盐、溶解有机磷、颗粒磷的总和)作为主要分析变量。营养盐时间序列以各个子流域的 200 年逐日输出,平均到月并计算到年以分析季节和年际变化。从 4 个子流域营养盐氮磷产量的 200 年模拟时间变化序列中,可以看到除了显著的 12 个月周期外,四个子流域具有不同的变化幅度和趋势特征 (图 3)。TN 和 TP 的最高产量在西南子流域 (图 3c 和 3g), 年产量分别达到 2000 吨级和 200 吨级。最低产量在北部子流域 (图 3b 和 3f), TN 的年产量为 300~400 吨级, TP 年产量 20~30 吨级。其它两个子流域 NW 和 SE 介于之间, TN 的年产量 1000 吨级, TP 年产量 NW 子流域 100 吨级, SE 子流域在 40 吨级。

太湖各个流域 TN 和 TP 模拟的多年产量计算如图 4a b 根据输入、输出流域的权重 (表 1) 来计算,模拟 2.5 个输入子流域 TN 多年平均 18.6×10^5 kg / a 1.5 个输出子流域多年均 11.3×10^5 kg / a 输出产量仅占输入产量 60%, 平均湖区净产量 730 t / a 模拟 2.5 个输入子流域 TP 多年平均年产量为 2.4×10^5 kg / a 1.5 个输出子流域多年均 4.0×10^4 kg / a 输入产量比输出产量大出 6 倍, 平均湖区净产量 200 t / a

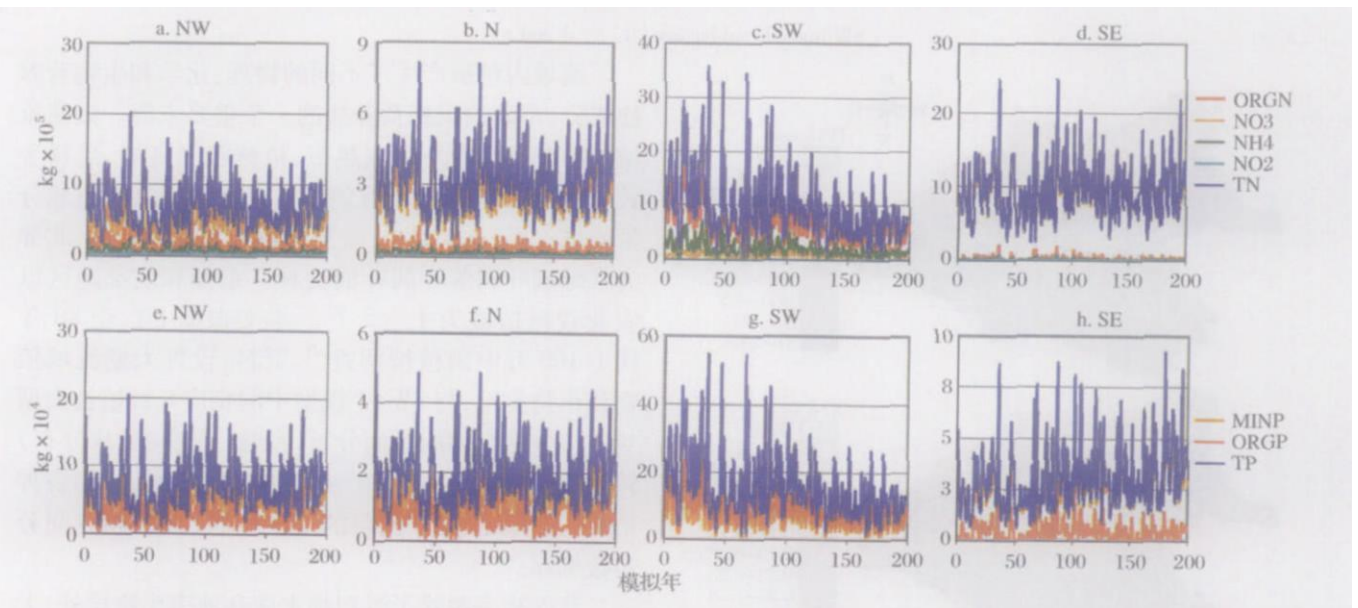


图 3 太湖流域氮 (a b c d) 和磷 (e f g h) 营养盐流域年产量 (kg) 的时间序列模拟。图中 4 个子流域分别用 NW, N, SW 和 SE 表示; 模拟的营养盐成分 ORGN 为有机氮, NO3 为无机氮中的硝酸盐氮, NO2 为亚硝酸盐氮, NH4 为铵态氮, ORGP 为有机磷, MINP 为矿物磷。

Fig. 3 Annual nitrogen and phosphorus productions (kg) simulated from the four subbasins in Taihu Basin where total nitrogen (TN) as a sum of organic nitrogen (ORGN), NO3, NO2 and NH4 total phosphorus (TP) a sum of mineral phosphorus (MINP) and organic phosphorus (ORGP).

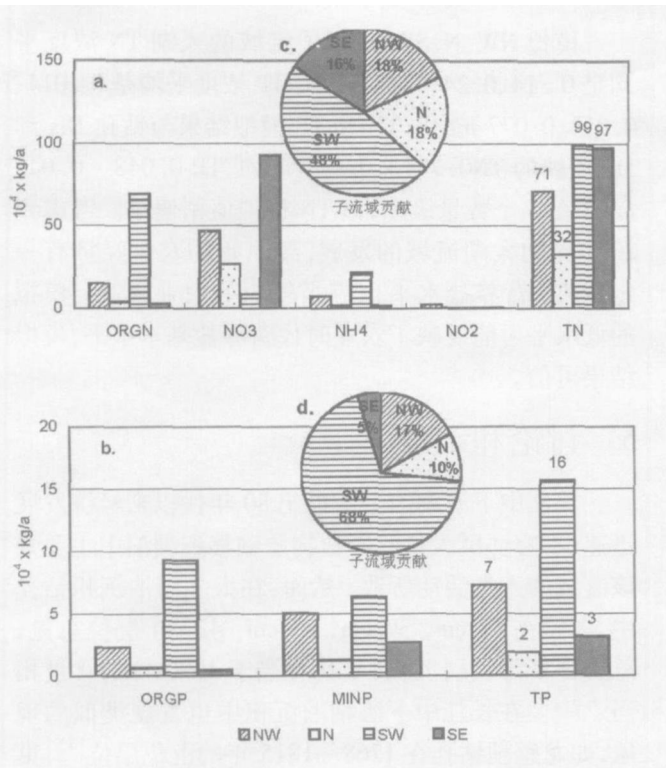


图 4 模拟太湖各子流域总氮、总磷年产量及其贡献。a TN 多年平均年产量 (kg/a), b TP 多年平均年产量 (kg/a)。湖区营养盐按照子流域面积平均 (kg/km²·a) 后计算其百分比; c 子流域的 TN 贡献比例 (%), d 子流域的 TP 贡献比例 (%)。横坐标营养盐代号和子流域代号均与图 3 相同

Fig. 4 Simulations of annual nutrient productions of Taihu subbasins a Multiple year means of TN (kg/a), b Multiple year means of TP (kg/a), c TN proportions of each subbasin (%), d TP proportions of each subbasin (%). Nutrient codes as in Fig 3

平均到流域单位面积上的年产量能够反映营养盐产地的空间差异。图 4c、d 显示太湖营养盐主要来自于西南山地丘陵 (TN 占总量 48%, TP 占 68%), 其次来自西北苏浙皖交界山地 (TN 占总量 18%, TP 占 17%), 小部分来自北部水系 (TN 占总量 18%, TP 占 10%)。若考虑该子流域与长江交换输入输出比为 0.5:0.5 则 TN 占总量 9%, TP 占 5%。由于东部出水系统地势平坦, 营养盐输出量仅是输入量 1/5 以下 (TN 16%, TP 5%)。该模拟反映了西南区是湖区 TN 主要来源 (占 1/2), 究其原因与该区常绿森林植被覆盖和高生物产量密切相关^[29]。同时该区也是湖区 TP 主要来源 (占 2/3), 主要受到较多面积的变质岩和石灰岩出露的影响^[29]。此外, 该区坡降最大, 产流和输沙能力强, 95% 从西南子流域的天目山北坡南溪和苕溪入湖^[9]。这也是西南子流域是自然条

件下营养盐主要原地的重要原因。

对营养盐在太湖中的净沉积量和定量化趋势, 本文采用入湖流域与出湖流域的 TN、TP 径流浓度之差作为湖区净沉积浓度进行分析。图 5 显示了 200 年模拟序列 TN 和 TP 逐年湖区净沉积浓度均为正值, 反映湖区的氮磷基本呈积累态势。前 100 年模拟 TN 序列呈缓降 (年速率: $-1.02 \times 10^{-3} \text{ mg/L} \cdot \text{a}^{-1}$), 后 100 年速率较小 ($-0.8 \times 10^{-3} \text{ mg/L} \cdot \text{a}^{-1}$), 变率也由大 (0.08 mg/L) 到小 (0.04 mg/L), 趋于 0 值 (平衡值)。该模拟说明了太湖流域在农耕经济下, 经过约 100 年的变化后湖泊 TN 基本处于动态平衡中, 此后湖泊营养盐趋于较稳定状况, 但仍为正向积累态势。TP 前 100 年年际变化速率 ($-1.4 \times 10^{-4} \text{ mg/L} \cdot \text{a}^{-1}$) 与后 100 年 ($-1.3 \times 10^{-4} \text{ mg/L} \cdot \text{a}^{-1}$) 相当, 但变率有所减小 (从 0.013 mg/L 到 0.007 mg/L), 说明后 100 年总磷变化趋于稳定。这个模拟说明太湖流域在农耕经济下, 湖区总磷排泄能力小于汇入能力。

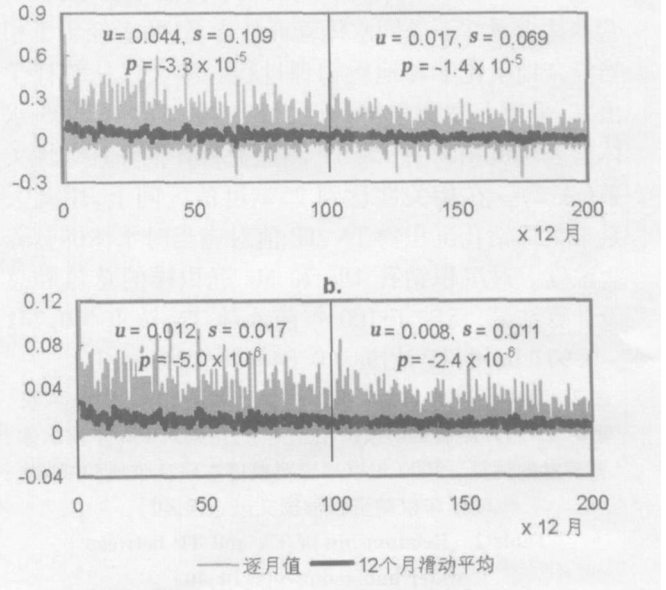


图 5 模拟太湖营养盐净沉积量, 采用三个输入子流域的 TN、TP 浓度总和与输出子流域 N、P 浓度之差表示 a 总氮浓度 (mg/L), b 总磷浓度 (mg/L)。图中 u 代表平均值 (mg/L), s 代表标准偏差 (mg/L), p 代表反映时间坡降和变化趋势的逐年斜率变化 ($\text{mg/L} \cdot \text{a}^{-1}$)

Fig. 5 Net sediment simulations of TN and TP concentration with the 12-month moving means expressed by differences between input subbasins and output subbasins in Taihu Basin a TN concentration (mg/L), b TP concentration (mg/L). u represents the mean value (mg/L), s represents the standard deviation (mg/L), p represents the slope of annual change in time sequences ($\text{mg/L} \cdot \text{a}^{-1}$)

TN 和 TP 的湖区净沉积浓度的累积曲线 (图未示) 能够反映其速度变化。TN 逐年浓度累积变化率在 200 年序列中为 +0.114 mg/l 达到稳定后的 100 年为 +0.075 mg/l TP 逐年浓度累积变化率在 200 年中为 +0.026 mg/l 达到稳定后的 100 年为 0.020 mg/l

4 模拟与沉积记录对比

为了验证历史时期的模拟, 本文采用太湖 D_{1s} 和 M_s 钻孔沉积记录和年代测定成果^[4-37]。两钻孔深度达到 50 cm, 根据 C_s 137 和 Pb 210 年代测定和沉积速率计算, D_{1s} 钻孔深度 20 cm 以下的层位相当于 1900 AD 以前。考虑到沉积年代的精度, 我们采用 20~30 cm 深度中 10 个样品 TN 和 TP 测定的平均值, 作为 1900 AD 以前记录来代表了太湖流域工业时代以前的湖泊营养盐水平。两个钻孔该层位 TN 平均值分别为 0.205% 和 0.149%, TP 平均值分别为 0.060% 和 0.059% (表 2)。从沉积学角度来看, 沉积物营养盐含量并不等同水体营养盐含量, 两者经历了相当复杂地质化学和地质物理过程。本文仅从统计学出发, 采用太湖梅梁湾和西太湖地区 1980—2003 水体与表层沉积物中 TN、TP 测值资料并推算其线性关系 (表 2)。在相关性达到 95% 可信区间上, 用此关系来估计钻孔沉积物 TN、TP 值对应当时水体的营养盐浓度。对沉积钻孔 D_{1s} 和 M_s 沉积样的总氮和总磷计算结果, 反映了 100 年前水体 TN 浓度为 0.741~0.971 mg/l TP 浓度为 0.048~0.049 mg/l

表 2 1980—2003 年太湖梅梁湾和西太湖地区水体与沉积物中 TN、TP 测值资料以及相互关系, 用来对 100 年前水体营养盐的估算。2000 年以来资料根据本研究收集和试验,

2000 年以前资料根据文献 [10-40]

Table 2 Relationship of TN and TP between water and sediment [10-40]

	沉积样 TN	水样 TN	沉积样 TP	水样 TP
	%	mg/l	%	mg/l
1960	0.067		0.044	
1980	0.147	0.9	0.067	0.02
1990-1991	0.47	1.89	0.107	0.05
1995-1996	0.45	1.73	0.237	0.13
1997-1999	0.618	2.994	0.28	0.122
2002-2003	0.4	1.77	0.064	0.045
线性拟合斜率			4.1363	0.4710
线性拟合截距			0.1320	0.0023
相关系数 (R)			0.9487	0.9601
临界相关系数			0.868	0.868
(R* -95% C.I)				

模拟 NW、N、SW 三个子流域的入湖 TN 浓度平均是 0.14、0.24、0.48 mg/l TP 浓度平均是 0.014、0.014、0.077 mg/l TN 和 TP 模拟结果与钻孔 D_{1s} 和 M_s 反映的 TN 0.741~0.971 mg/l TP 0.048~0.049 mg/l 在一个数量级上, 但 TN 模拟值稍偏小。考虑到 20 世纪初太湖流域的发展, 离原始的农业经济有一定距离, 营养盐水平也应当较原始农业稍高。模拟的低水平可能反映了农业时代营养盐基本水平, 模拟结果可信。

5 讨论和结语

长江中下游湖泊上个世纪 80 年代以来经济发展迅速, 不容怀疑大量营养盐物质输移到湖泊中主要是该流域的人类活动所致。然而, 在太湖湖泊沉积钻孔中, 太湖在 22 cm, 30 cm, 35 cm, 42 cm 层位总氮、总磷含量与表层沉积 (年代相当于 1990s) 的含量相当^[4-37]。在长江中下游湖泊沉积中也发现类似的现象, 如龙感湖钻孔在 1768—1815 年的沉积层位^[5], 巢湖钻孔在 16 cm, 20 cm, 24 cm 的层位^[6], 洪湖在 70 cm 以下的层位^[6-38] 等多次出现总氮、总磷含量与 1970—1990 年相当或更高的层位。观察更长时期还会发现, 在太湖全新世钻孔中, 总氮含量在 5930 aBP 和 7899 aBP 达到了 1990s 水平^[39]。这些湖泊沉积记录表明, 在没有人干预下或者人类干预甚微情况下, 长江中下游地区具备营养盐沉积、富集的条件和引发湖泊富营养化的基础。由此可能引发对长江中下游湖泊富营养化自然发展和沉积机制的再认识。通过本文模拟研究, 我们对此获得了一些定性和定量的认识。从太湖三个子流域的营养盐输入与子流域输出对比来看, 总氮输入年产量比输出的高出 60%, 总磷的输入年产量是输出的 6 倍, 结果造成在湖区沉积的总氮年产量在 700 吨级, 总磷的年产量在 200 吨级。这个模拟反映了太湖湖区在自然的农耕条件下, 流域搬运的营养盐在湖区呈长期积累态势。根据 1987—1988 年的实际观测数据和理论计算, 太湖营养盐的入湖年总氮的年总量为 28.106 吨, 总磷为 1989 吨^[10]。这些资料反映了太湖流域营养盐自然输移和现代人为活动排放 (包括了工业排放、城市排放、现代农业排放等) 的双重结果。由此可以估计自然状况模拟占现代自然和人为状况的总氮年产量约 7%, 总磷占 12%。由于长江中下游湖泊位于低纬亚热带、东亚季风气候区域, 光照、热量充足, 雨量丰沛; 亚热带常绿和落叶阔叶植被广布, 水生植物生长量较

高;晚第四纪河湖相松散沉积,高含有机物,土壤发育成熟。这些气候、地理、沉积等流域环境引起湖泊营养盐富集和水质营养化自然发展。

在人为活动日益加剧的今天,自然因素已经不是影响湖泊营养化发展趋势的主要权重。然而,我们仍然关心自然状况与人为活动下的营养盐运移速率和变化趋势的异同,这将涉及到是否能够控制湖泊营养化的恶化趋势、能否治理达到最佳的湖泊水体自然状况。20 世纪 80~90 年代的太湖水质已经达到富营养化水平,其水体中的总氮浓度 $1.0 \sim 1.6 \text{ mg/L}$ 总磷浓度 $0.02 \sim 0.05 \text{ mg/L}^{[10]}$ 。本文模拟的自然状况的湖泊营养盐总氮浓度多年平均 0.29 mg/L 总磷浓度 0.035 mg/L 。根据模拟的时间序列和趋势来估计,稳定状况下(即 200 年模拟的后 100 年)氮和磷浓度累计曲线的时间变化率分别为 $0.075 \text{ mg/L} \cdot \text{a}^{-1}$ 和 $0.020 \text{ mg/L} \cdot \text{a}^{-1}$, 以此计算氮和磷浓度需要 26~27 年达到现代湖泊富营养化的水平。尽管这个估计没有考虑到湖泊水体内部的净化过程(即营养盐的内源因素和过程),可以成为对流域水平的营养盐累积(即营养盐的外源因素和过程)的一个定量估计。

参考文献 (References)

- 1 金相灿,刘鸿亮,屠清瑛,等.中国湖泊富营养化.北京:中国环境科学出版社,1990 [Jin Xiangcan, Liu Hongliang, Tu Qingying, et al. China Lake Eutrophication. Beijing: China Environment Science Press, 1990]
- 2 David H. Eutrophication of Freshwaters: Principles, Problems and Restoration. London: Chapman & Hall, 1992. 5~35
- 3 秦伯强,胡维平,高光,等.太湖沉积物悬浮的动力机制及内源释放的概念性模式.科学通报,2003,48(17):1822~1831 [Qin Boqiang, Hu Weiping, Gao Guang, et al. Mechanisms of sediment suspending and concept model of inner nutrient releasing in Taihu Lake. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(17): 1822~1831]
- 4 刘恩峰,沈吉,朱育新,等.太湖沉积物重金属及营养盐污染研究.沉积学报,2004,22(3):507~512 [Liu Enfeng, Shen Ji, Zhu Yuxin, et al. Sedimentary heavy metals and nutrient pollutions of Taihu Lake. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(3): 507~512]
- 5 吴艳宏,王苏民, Bantabee RW. 龙感湖小流域元素时空分布及湿地拦截功能探讨.湿地科学,2003,1(1):33~39 [Wu Yanhong, Wang Sumin, Bantabee RW. Study on element distribution in time and space and holding functions by the wetland of Longganhu Lake catchment. Wetland Science, 2003, 1(1): 33~39]
- 6 姚书春,李世杰.巢湖富营养化过程的沉积记录.沉积学报,2004,22(3):343~347 [Yao Shuchun, Li Shijie. Sedimentary records of eutrophication processes in Chaohu Lake. Acta Sedimentologica Sinica, 2004, 22(3): 343~347]
- 7 姚书春,薛滨,夏威夷.洪湖近 540 年来人为活动的沉积记录.

- 8 王海大学学报,2004,32(增刊):154~159 [Yao Shuchun, Xue Bia, Xia Weilan. Sedimentary records for human activities during the last 540 years in Honghu Lake. Journal of Hohai University, 2004, 32 (Suppl): 154~159]
- 9 孙顺才,黄漪平.太湖.北京:海洋出版社,1993 [Sun Shunca, Huang Yiping. Taihu Lake. Beijing: Ocean Press, 1993]
- 10 黄漪平,范成新,濮培民,等.太湖水环境及其污染控制.北京:科学出版社,2001 [Huang Yiping, Fan Chengxin, Pu Weimin, et al. Water Environments and Pollutant Control. Beijing: Science Press, 2001]
- 11 Arnold JG, Srinivasan R, Mutiah R S, et al. Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. Journal of American Water Resources Association, 1998, 34: 73~89
- 12 Di Luzio, Srinivasan M R, Arnold JG. Integration of Watershed Tools and SWAT Model into Basins. Journal of the American Water Resources Association, 2002, 38: 1127~1141
- 13 Di Luzio, Srinivasan M R, Arnold JG. A GIS-Hydrological model system for the watershed control of agricultural nonpoint and point sources of pollution. Transactions in GIS, 2004, 8: 113~136
- 14 Stefan H G, Preudhomme E B. Stream temperature estimation from air temperature. Water Resources Bulletin, 1993, 29(1): 27~45
- 15 Rawls W J, Brakensiek D L. Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. In: Jones E B and Ward T J, eds. Watershed management in the 80's. ASCE, New York, 1985. 293~299
- 16 Natural Resources Conservation Service Soil Survey Staff. National Soil Survey Handbook. 430-VI. U. S. Government Printing Office, Washington D. C. 1996
- 17 Godwin D G, Jones C A, Ritchie J T, et al. The water and nitrogen components of the CERES models. In: Proc. Intl. Symposium on Minimum Data Sets for Agrotechnology Transfer. India: Intl. Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics, 1984. 95~100
- 18 Reddy K R, Khakel R, Overcash M R, et al. A nonpoint source model for land areas receiving animal wastes. II. Ammonia volatilization. Trans., 1979, 22: 1398~1404
- 19 Seligman N G, van Keulen H. PAPER. A simulation model of annual pasture production limited by rainfall and nitrogen. In: Frissel M J and van Veen J A, eds. Simulation of nitrogen behavior of soil plant systems, 1981. 192~221
- 20 Jones C A, Cole C V, Sharpley A N, et al. A simplified soil and plant phosphorus model. I. Documentation. Soil Science Society American Journal, 1984, 48: 800~805
- 21 Sharpley A N, Gray G, Jones C A, et al. A simplified soil and plant phosphorus model. II. Prediction of labile, organic and sorbed P amounts. Soil Science Society American Journal, 1984, 48: 805~809
- 22 Munns D N, Fox R L. The slow reaction that continues after phosphate adsorption: Kinetics and equilibrium in some tropical soils. Soil Science Society American Journal, 1974, 40: 46~51
- 23 秦伯强,胡维平,陈伟民,等.太湖水环境演化过程与机理.北京:科学出版社,2004 [Qin Boqiang, Hu Weiping, Chen Weimin

- et al* Water Environment Evolution Processes and Mechanisms in Taihu Lake. Beijing: Science Press, 2004]
- 24 中国国家基础信息中心. 中国 1: 25万地图. 北京. 1999[National Base Information Center of China 1: 250 000 China Maps Beijing 1999]
- 25 王苏民, 窦鸿身. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社. 1998 [Wang Sumin, Dou Hongshen. China Lake Documentation. Beijing: Science Press, 1998]
- 26 江苏省地质矿产局. 江苏省及上海市区域地质志. 北京: 地质出版社. 1984 [Jiangsu Bureau of Geology and Mineral Resources Regional Geology of Jiangsu Province and Shanghai Municipality. Beijing: Geology Press, 1984]
- 27 中国国家土壤调查局. 中国土壤. 北京: 农业出版社. 1997[National Bureau of Soil Survey. China Soil. Beijing: Agriculture Press, 1997]
- 28 Shi X Z, Yu D S, Wamer E D *et al* Soil Database of 1: 1,000,000 Digital Soil Survey and Reference System of the Chinese Genetic Soil Classification System. *Soil Survey Horizon*, 2004, 45(4): 129~136
- 29 侯学煜. 中国植被地理. 北京: 科学出版社. 1988[Hou Xueyu. Vegetation Geography of China. Beijing: Science Press, 1988]
- 30 杨元龙, 秦伯强, 胡维平, 等. 太湖大气氮磷营养元素干湿沉降率研究. 海洋通报 (待刊) [Yang Yuanlong, Qin Boqiang, Hu Weiping *et al*. Study on precipitation rate of atmospheric nitrogen and phosphorus in Taihu Lake. *Oceanography Bulletin* (in press)]
- 31 中央气象局, 中国科学院地球物理研究所. 中国降水资料. 1954 [Center Meteorology Bureau of China. Institute of Geophysics of Chinese Academy of Sciences. China Precipitation Data, 1954]
- 32 中央气象局, 中国科学院地球物理研究所. 中国气温资料. 1954 [Center Meteorology Bureau of China. Institute of Geophysics of Chinese Academy of Sciences. China Temperature Data, 1954]
- 33 中央气象局. 1961~1970中国降水资料. 北京: 中央气象局出版社. 1976 [Center Meteorology Bureau of China. China Precipitation Data 1961~1970. Beijing: Publication of Center of Meteorology Bureau of China, 1976]
- 34 国家气象局北京气象中心气候资料室. 1951~1980中国降水资料. 1985[Climate Data Section of Beijing Center of National Meteorology Bureau of China. China Precipitation Data in years 1951~1980, 1985].
- 35 国家气象局北京气象中心气候资料室. 1951~1980中国平均气温资料. 1985 [Climate Data Section of Beijing Center of National Meteorology Bureau of China. China Temperature Data in years 1951~1980, 1985]
- 36 国家气象中心气候应用室. 中国地面气象记录年报. 2001[Climate Application Section of National Meteorology Center. Annual Report of Surface Weather Records in China, 2001]
- 37 刘恩峰, 沈吉, 朱育新, 等. 太湖表层沉积物重金属元素的来源分析. 湖泊科学, 2004, 16(2): 113~119 [Liu Enfeng, Shen Ji, Zhu Yuxin *et al*. Resource analysis of heavy metals in surface sediments of Taihu Lake. *Lake Science*, 2004, 16(2): 113~119]
- 38 陈萍, 何报真, 杜耘, 等. 1200a来洪湖演变的环境磁学记录. 沉积学报, 2005, 23(1): 138~142 [Chen Pin, He Baoyin, Du Yun *et al*. Environmental magnetism evolution records during past 1200a in Honghu Lake. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2005, 23(1): 138~142]
- 39 薛滨, 瞿文川, 吴艳宏, 等. 太湖晚冰期—全新世气候环境变化的沉积记录. 湖泊科学, 1998, 10(2): 30~35 [Xue Bin, Qu Wenchuan, Wu Yanhong *et al*. Sedimentary records of Late Pleistocene Holocene climate and environmental changes in Taihu Lake. *Lake Science*, 1998, 10(2): 30~35]
- 40 张运林, 秦伯强, 黄群芳. 东部平原地区湖泊富营养化的演变及区域分析. 上海环境科学, 2002, 21(9): 549~553 [Zhang Yunlin, Qin Boqiang, Huang Fangqun. Lake eutrophication evolutions and regional analysis in eastern plains of China. *Shanghai Environmental Science*, 2002, 21(9): 549~553]

Historical Simulations for 200 year Nutrient Sedimentations in Taihu Catchment

YU Ge GUI Feng

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

Abstract Nutrient sedimentations of total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) during the last 200 years were simulated through a boundary condition prescription of a pre industrial time mode in Taihu catchment. Simulations show that natural nutrient productions are ca 7% TN and ca 12% TP of 1990s production. Time series simulations are consistent with sediment records from lake bottom cores back to 100 years ago, and spatial distribution modeling of nutrient resources are agreement with changes in the geographical features. The work suggests that the simulations can catch basic characters of the basin nutrient changes, and provides a powerful tool to evaluate nutrient resources, sedimentations and distributions responding to historical changes in catchment environments.

Key words natural agricultural environments, sedimentary nutrients, numerical simulation, centurial reconstruction, Taihu catchment