

DOI: 10.5846/stxb201410111998

廖梦娜, 于革, 郭娅. 300 年来鄱阳湖营养盐演化重建与模拟. 生态学报, 2016, 36(8): - .

Liao M N, Yu G, Guo Y. Reconstructions and simulations of nutrient evolution in Poyang Lake over the past 300 years. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(8): - .

300 年来鄱阳湖营养盐演化重建与模拟

廖梦娜^{1,2}, 于革^{1,2,*}, 郭娅^{1,2}

1 中科院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008

2 湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008

摘要: 水体富营养化已经成为全球性的问题而受到广泛关注, 然而其发生的过程和机制尚未完全明了。在湖泊营养演化过程中, 水文和生态是两个最基本的制约因素。相对于短期的和试验性的研究, 长时间尺度的营养盐变化过程能更全面地揭示营养盐的演化机制。本文以我国最大的淡水湖-鄱阳湖为例, 采用湖泊水体交换周期模型和湖泊生态-营养盐动力耦合模型, 重建鄱阳湖营养盐的长期变化, 并利用沉积钻孔代用指标加以验证。在此基础上探讨其演化机制, 模拟的时间序列中营养盐变化对气候水文与生态系统存在两种不同的响应模式。敏感因子分析显示: 典型同步响应期中 (1812—1828 AD), 气候水文因子的贡献率达 79.1%, 生态因子为 20.9%; 典型异步响应期中 (1844—1860 AD), 两者贡献率分别为 36.4% 和 63.6%。在模拟的营养盐变化时间序列中同步期占 62.5%, 说明气候因子在营养盐演化过程中起重要的作用; 异步期虽只占 12.5%, 但对湖泊营养盐作用、营养盐反馈生物量同样至关重要。相关分析结果显示, 生物量增长与 *TP* 含量基本呈线性关系, 但存在一个阈值。在没有超过阈值前, 生物量对 *TP* 具有较好的调节作用; 当超过阈值之后, 生物量的调节作用减弱。

关键词: 营养盐演化; 水体交换周期; 湖泊生态-营养盐动力模型; 贡献率; 鄱阳湖

Reconstructions and simulations of nutrient evolution in Poyang Lake over the past 300 years

LIAO Mengna^{1,2}, YU Ge^{1,2,*}, GUO Ya^{1,2}

1 Nanjing Institute of Geography & Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China

2 State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing 210008, China

Abstract: Lake eutrophication has become a global environmental problem and severely affects water resource quality. Although studies have addressed eutrophication, the mechanisms are not fully understood to date because of the water-biomass-sediment complexity in lakes, and limited observation data makes analysis of the entire nutrient evolution process difficult. Therefore, to reveal eutrophication mechanisms more comprehensively, analysis should be based on long-term processes of nutrient changes. In lake ecosystems, all stresses and forces interact during the eutrophication, among which, hydrology and ecosystem play key roles. Hydraulic residence time impacted nutrient supply, lake productivity, and nutrient accumulation processes profoundly. With water cycles and energy exchanges in lake ecosystems, primary productivity is a critical process contributing to lake trophic states. Poyang Lake, the largest fresh water lake in China, is located on the southern bank of the middle-reach of the Yangtze River. Compared with most other eutrophic lakes in the region, water quality of Poyang Lake was mesotrophic during the 20th century. However, water quality has declined since the beginning of the 21th century. To discern the trophic evolution of Poyang Lake, hydraulic residence time and lake ecosystem-nutrient dynamic models, were used in the present study to determine long-term changes of nutrients and biomass in the lake.

基金项目: 科技部全球变化重大科学研究计划项目 (2012CB956103, 2013CB956501); 中国科学院国际合作计划项目 (KZZD-EW-TZ-08)

收稿日期: 2014-10-11; **网络出版日期:** 2015- -

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: geyu@niglas.ac.cn

Furthermore, sediment records, including total organic carbon (TOC), Pollen concentration and DI-TP series derived by using diatom-TP transfer function, compared the simulation results of the past 300 years. The simulation revealed that nutrient TP changed differentially in response to changes in climatic-hydrological and climatic-ecosystem conditions. Control runs for 1955—2008 proved that TP increase was consistent with the observed growth of primary producer biomass. On this basis, we ran the models for a long-term period from 1700 to 1899. The time-series analysis for the simulations showed that the period 1812—1828 was synchronized between hydrology-forced and ecosystem-feedback nutrient changes. Ratio of hydrology and aquatic biomass accounted for 79.1% and 20.9% of this simulated annual series. The period 1844—1860 AD showed an asynchronous match in which hydrology-forced and ecosystem-feedback nutrient changes occurred. The ratio of the two were 36.4% and 63.6%, respectively. In the simulated time series, the synchronous period was 62.5% of the entire time, suggesting climatic-hydrological factors played a major role in the process of nutrient evolution. Although the asynchronous period only accounted for 12.5%, it also had a critical effect on TP changes in the lake. Furthermore, simulations of nutrient and biomass were done by correlation analysis. The result revealed a quasilinear relationship between nutrient TP and biomass. However, a bifurcation appeared when $TP > 40\%$, indicating a threshold existed in this pattern, suggesting that TP changed significantly differently when it increased above the threshold and decreased below the threshold.

Key Words: nutrient evolution; hydraulic residence time; lake ecosystem-nutrient dynamic model; contribution rate; Poyang Lake

湖泊富营养化是湖泊发展的历史过程,在自然状态下从营养盐富集到富营养化通常是百年尺度过程^[1-2]。国内外一些研究对富营养化发生的现代过程和机制有了一定的认识,提出了浅水湖泊的多稳态理论^[3],分析了不同因子对湖泊富营养化的影响^[4],但由于湖泊环境和生态结构复杂多样,采用仅数十年的观测记录难以完全明了湖泊富营养化的长期变化过程和机制。湖泊富营养化被普遍认为是湖泊水体营养元素逐渐富集,生物量异常增殖,生物多样性和稳定性降低,透明度下降,水质恶化的过程^[5]。在营养态演化过程中,水文和生态系统是两个基本的制约因素^[6-10]。过去 300 年以来,我国许多湖泊营养态的演化经历了从渐变到突变^[2,11],以湖泊长期营养态变化过程为视角能在寻求稳定态的临界点及探索触发湖泊突变的关键因素和机制上有所突破^[12-14]。

鄱阳湖是中国第一大淡水湖泊,属于中营养水平^[15],但水质和湖泊生态环境不断恶化^[15-16],正处于向富营养化发展的关键时期^[17]。本文以湖泊沉积钻孔分析^[18]及湖泊气候-水文、生态-营养盐动力模拟^[19-21]为手段,重建 300 年来鄱阳湖营养盐变化过程,并试图从机制上进行分析。

1 方法和模型

1.1 湖泊沉积代用指标及定量重建

以营养盐变化为特征的湖泊营养态长期变化深刻印记在湖泊沉积之中,因此湖泊沉积记录是重建湖泊营养态演化的重要手段。建立现代硅藻与环境要素之间的函数关系已经被广泛应用到定量重建过去湖泊环境变化中^[18]。硅藻是鄱阳湖主要浮游植物之一,春季为繁盛期,共有 31 个属,以直链藻属(*Aulacoseira*)、曲壳藻属(*Achnanthes*)、舟型藻属(*Navicula*)和脆杆藻属(*Fragilaria*)为主^[22]。羊向东对长江中下游湖泊(包括鄱阳湖)的现代硅藻属种及环境参数进行分析,确定总磷为该地区湖泊最敏感的营养指标并构建了长江中下游湖泊硅藻-总磷转换函数^[23]:

$$\log_{10} TP = \beta x_i + \alpha$$

其中 x_i 是第 i 个样品的总磷初始推导值,单位为 mg/l 。在长江中下游的 49 个浅水湖泊群中(包括鄱阳湖), $\alpha = -2.1295$, $\beta = 2.0944$ 。这个硅藻数据库和 TP 转化函数已成功应用到太湖、巢湖、龙感湖、太白湖等沉积钻孔中^[11,24-26]。本文利用该转换函数重建鄱阳湖过去 300 年的营养盐历史。

此外,湖泊沉积代用指标分析能够定性重建环境演化过程。湖泊沉积物中的有机质主要来源于植物碎屑,因此湖泊沉积物中的总有机碳(TOC)能够反映湖泊初始生产力^[18]。湖泊水生植物花粉绝大部分落到湖泊并沉积到底泥中,因此沉积物中的水生植物花粉浓度能够定性地反映水生植物的生物量。本文根据硅藻、TOC 及水生花粉浓度指示意义和基本原理,重建鄱阳湖营养盐和生物量过去 300 年的主要变化序列。

1.2 模型 1:湖泊水体交换周期(Hydraulic Residence Time: HRT)

湖泊水体交换速度受到气候和流域、湖盆形态控制,能够反映气候控制下营养盐积累的变化过程。湖泊水体的交换周期(HRT)定义为湖盆中的水全部换一次所需要的时间^[19-20]:

$$HRT = V/Q \quad (1)$$

$$Q = V/(P + R - E) \quad (2)$$

其中 V 表示湖泊容积, Q 表示一定时段内入湖净水量, P、R、E 分别表示湖面降水量、入湖径流量及湖面蒸发量,它们均为体积的单位。若 P、R、E 均以年作为时间长度,湖泊年径流量 R 是流域有效降水(P - E) 与流域面积的乘积。

1.3 模型 2:湖泊生态 - 营养盐动力模型

1.3.1 湖泊初级生产者与顶级猎食者动力关系

湖泊初级生产者主要是能够进行光合作用的植物,主要包括浮游微体植物藻类和水生维管束高等植物草类。确定浮游微体植物群落(简称藻群落)与高等水生植物群落(简称草群落)之间的生态食物链关系和两者状态变量的量级(生物量)是构建两者间生态动力方程的关键。从生态理论上,草群落和藻群落之间主要是竞争关系:首先,作为水体初级生产者,为了维持基本的生命过程,它们竞争光以进行光合作用^[27-28];其次,两者均吸收底泥和水体中营养盐从而构成相互竞争^[29];最后,草的分泌物能够抑制藻的生长,反之亦然^[29-31]。在一个完整的湖泊生态系统中,顶级猎食者是不可忽略的组分,因此该模型引入鱼群落作为湖泊生态食物链中的顶级猎食者。在这个系统中,鱼类与水生植物是捕食者与被捕食者关系,被捕食者中藻类与草类是竞争关系。考虑到生物量存在季节和年际的变化,根据 SKT 模型原理和结构^[32],把生物群落随不同时间尺度变化的时间函数 g(t) 增加到系统中。由此,根据 Lotka-Volterra 模型的基本结构,设 y_1 为藻群落生物量变量, y_2 为草群落生物量变量, y_3 为鱼群落生物量变量,构成的湖泊生态系统 3 个主要群落生物量变量对时间变化的常微分方程组(以下 y' 均代表 $dy(t)/dt$):

$$\begin{aligned} y_1' &= y_1 \times (a_1 + a_2 \times y_3 + a_4 \times y_1 + g_1(t)); \\ y_2' &= y_2 \times (b_1 + b_3 \times y_3 + b_4 \times y_2 + g_2(t)); \\ y_3' &= y_3 \times (c_1 + c_2 \times y_1 + c_3 \times y_2 + c_4 \times y_3 + g_3(t)). \end{aligned} \quad (3)$$

该模型所涉及的三个主要参数—生物群落增长参数、环境容纳量参数及生物群落间作用参数—分别对应方程组中的一次项系数、二次项系数和混合项系数。方程组最后一项 t 为时间,单位为月; g_i 为年内逐月生物量变化。

1.3.2 营养盐对生物量作用和反馈

水体营养盐是水生生物的主要限制性资源。关于水体营养盐浓度对浮游植物生长、竞争,以及藻类对营养盐的摄取和吸收关系,前人总结了不少适用的关系模型,例如 Michael-Menten 模型、Monod 模型、Tilman 模型等^[33]。这些模型建立了营养盐与藻类增长之间的定量关系,尽管数学表达式不尽一致,其核心均是 Logistic 数学表达式构成的平衡方程:

$$N_{biome} = r N / (k + N) \quad (4)$$

其中 N_{biome} 是藻类的增长量, r 是藻类的最大增长率, N 是营养盐浓度, k 是半饱和常数(Michael 常数),相当于藻增长率达到 $1/2r$ 时的营养盐浓度。

高等水生植物主要摄取湖底沉积物的营养盐,由于大量研究表明草与营养盐的关系不显著^[34],有人采用统计的线性关系^[35]:

$$N = mC + e \quad (5)$$

其中 N 是藻类的增长速度/增长量变量, C 是营养盐浓度, m 、 e 是 N 与 C 线性关系中的坡降和截距系数(微分后 e 常数为零)。该统计关系也采用到鱼与营养盐关系。

构建生物作用平衡关系, 考虑湖泊生物对营养盐主要有吸收和摄取 ($-N$) 及释放和产生 ($+N$) 两个方向的作用。在生物量增长方程式(式 3)中, 采用草、藻类生物群落与营养盐关系(式 4, 式 5), 构建水体营养盐的供给(N)对湖泊群落生物量增加的微分方程为:

$$\begin{aligned} y_1' &= y_1(a_1 + a_2y_3 + a_4y_1 + g_1(t) m_1 N / (k_1 + N)); \\ y_2' &= y_2(b_1 + b_3y_3 + b_4y_2 + g_2(t) m_2 N); \\ y_3' &= y_3(c_1 + c_2y_1 + c_3y_2 + c_4y_3 + g_3(t) m_3 N). \end{aligned} \quad (6)$$

同时, 考虑在长江中下游的通江湖泊中, 湖泊积累的营养盐(N_Δ)是在湖泊营养盐(N_0)初始水平上、流域汇入营养盐(N_{catch})和湖泊生物摄取营养盐(N_{biome})的平衡:

$$N_\Delta = N_0 + N_{catch} - N_{biome}. \quad (7)$$

其中营养盐增量是湖泊的流域入湖径流量(W)与营养盐(N)的乘积: $N_\Delta = W N$ 。设营养盐状态变量为 y_4 , 则在湖泊藻、草、鱼群落(分别为 y_1 、 y_2 、 y_3)摄取下的湖泊营养盐平衡的微分方程可写为:

$$y_4' = y_4(W_0 + W) - y_4(d_1 k_1 / (1 - y_1) y_1 + d_2 y_2 + d_3 y_3) \quad (8)$$

W_0 和 W 分别是初始和状态径流量, d_1 , d_2 , d_3 分别是藻、草、鱼摄取营养盐速率参数。结合在 Lotka-Verterra 生态系统方程(式 6)和营养盐平衡方程(式 8), 构建湖泊营养盐与生物相互作用和反馈模型:

$$\begin{aligned} y_1' &= y_1(a_1 + a_2y_3 + a_4y_1 + g_1(t) m_1 y_4 / (k_1 + y_4)); \\ y_2' &= y_2(b_1 + b_3y_3 + b_4y_2 + g_2(t) m_2 y_4); \\ y_3' &= y_3(c_1 + c_2y_1 + c_3y_2 + c_4y_3 + g_3(t) m_3 y_4); \\ y_4' &= y_4(W_0 + W - d_1 k_1 / (1 - y_1) y_1 - d_2 y_2 - d_3 y_3). \end{aligned} \quad (9)$$

其中 y_1 、 y_2 、 y_3 、 y_4 是藻、草、鱼群落和营养盐状态变量; a 、 b 、 c 、 d 是相应的矢量系数; $g(t)$ 函数与公式(1)相同; m 和 k 是在一定营养盐状态下藻、草、鱼群落增长的矢量系数; d 是藻和草群落摄取营养盐的矢量系数。 W_0 是初始径流量, W 是径流量的状态变量。

2 资料与参数设置

2.1 湖泊沉积记录

2012 年 12 月(鄱阳湖的枯水季节)在吴城外南湖滩(115°59'46"E, 29°11'53"N, 13.2 m a.s.l)采用重力钻获取一根 1.0 m 长的岩芯(WC-2), 取芯率为 87.5%。岩芯以 1 cm 间隔取样进行硅藻属种鉴定和分析, 在湖泊与环境重点实验室进行 ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 活度比测定并采用恒定放射性通量模型(CRS 模型)^[36]计算沉积年代。采用长江中下游硅藻-水质数据库及构建的硅藻-总磷转换函数^[24], 利用 C2 Version 1.5^[37]重建了总磷历史序列。此外, 采用鄱阳湖 ZK01 钻孔(116°8'26"E, 29°1'58"N, 13.24 m a.s.l) 3500 a BP 以来水生植物孢粉指标^[38]和鄱阳湖 DCH 钻孔(115°5'24"E, 29°9'00"N) 1200 a BP 以来 TOC 指标^[39], 分别作为水生植物生物量和湖泊水体生物量变化的代用指标^[40], 以进行多钻孔指标相互验证。

2.2 现代资料与参数设置

本文采用 1880—2008 AD 作为鄱阳湖流域年降水和温度时间序列。由于战争、经济条件等原因, 1950 AD 以前中国器测记录存在不少时间段的缺失。1950 AD 以来鄱阳湖有 14 个气象观察站(资料源于中国气象局国家气候信息中心)。1880—1950 AD 气象资料采用与鄱阳湖流域处于相同纬度带的武汉站(1880 AD-)、九江和南昌站(1885 AD-)、景德镇站(1929 AD-)的气象站资料(中国气象局国家气候信息中心)。利用这些气象站 1880 AD 以来的资料衔接到鄱阳湖 14 个站点上: 采用了这些站 30 年(1959-1989 AD)观测资料计算月变差系数, 并采用距离加权法计算获得。潜在蒸发量采用 Thornthwaite 方法^[41]计算。鄱阳湖流量采用 1955—

2008 AD 湖口月径流量数据(资料源于长江水利委员会)。

鄱阳湖库容及流域面积视为常数,采用 1980—1990 AD 的调查结果^[42]。本文根据 1980—90 年代鄱阳湖环境和湖泊生态综合调查^[42-45]以及 21 世纪以来鄱阳湖生态调查和研究^[17,46-52]设置模型参数。运用 MATLAB 程序中方程求解函数(Solve)和非线性最小二乘法拟合函数(nlinfit)进行拟合,率定后确定生物群落特征参数和环境因子特征参数^[21]。

2.3 历史资料与参数设置

1880 AD 以前鄱阳湖流域几乎没有水文及气象观测记录。本文采用德国 ECHAM5 全球气候模型^[53]在太阳辐射、火山灰、温室气体变化驱动下的气候模拟^[54]。对 1700—1899 AD 全球气候模拟,通过区域统计降尺度方法获得鄱阳湖流域的温度和降水^[21](图 1(a))。在此基础上,根据 Thornthwaite 方法计算流域潜在蒸发量(图 1(b)),采用了流域水文模型 WATLAC^[55]模拟获得鄱阳湖 1700—2010 AD 的入湖流量^[21](图 1(c))。假设在本文讨论的历史时期生物学特征的变化忽略不计,各项生态学参数均与现代参数相同。

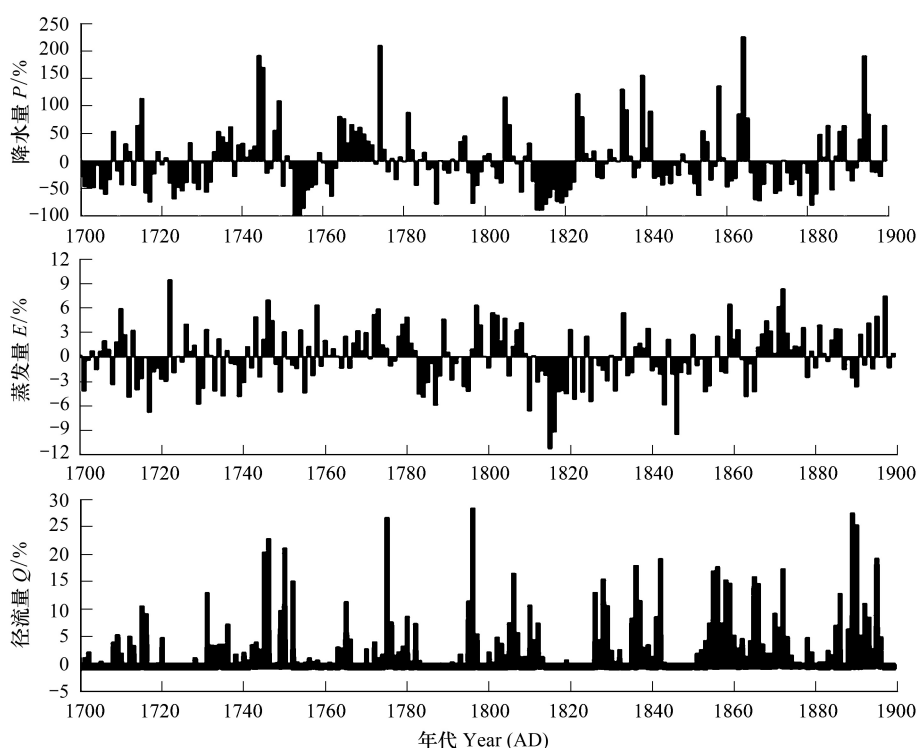


图 1 鄱阳湖流域历史气象与水文模拟数据(采用距平表示%表示):(a) ECHAM5 模拟的年降水量距平变化(1700—1899 AD); (b) ECHAM5 模拟的年蒸发量距平变化(1700—1899 AD); (c) ECHAM5-气候驱动 WATLAC 模拟的月径流距平变化(1700—1899 AD)。

Fig. 1 Simulated meteorological variation sequences, expressed by anomaly % of the means: (a) ECHAM5-simulated annual precipitation during 1700—1899 AD; (b) ECHAM5-simulated monthly potential evaporation during 1700—1899 AD; (c) WATLAC-simulated monthly lake discharge during 1700—1899 AD.

3 结果与分析

3.1 模型 1: 水体交换周期模型

根据公式(1)和(2)计算 1880—2008 AD 逐年 HRT 变化序列(图 2(b))。首先,针对 1984—2008 AD 逐年湖泊水体交换周期,验证 HRT 与营养程度的关系。根据大量研究的统计资料^[56],长江中下游大多数湖泊富营养化的限制性营养盐是磷;而总磷的变化与富营养化高度相关^[4,57]。将实测 TP 浓度与相应年份湖泊水体交换周期 HRT 做相关分析(图 2(a)),相关系数为 0.685($p < 0.05$),表明湖泊换水周期与总磷富集的多寡

显著正相关, HRT 变化可以指示湖泊营养状况的变化。

在此基础上,模拟了 1700—1899 AD HRT 变化序列 (图 2(c))。该距平序列的 10 年滑动平均趋势显示了 200 年间 HRT 出现了数次显著的波动,反映了历史时期湖泊营养盐浓度在气候因素控制下产生显著变化。

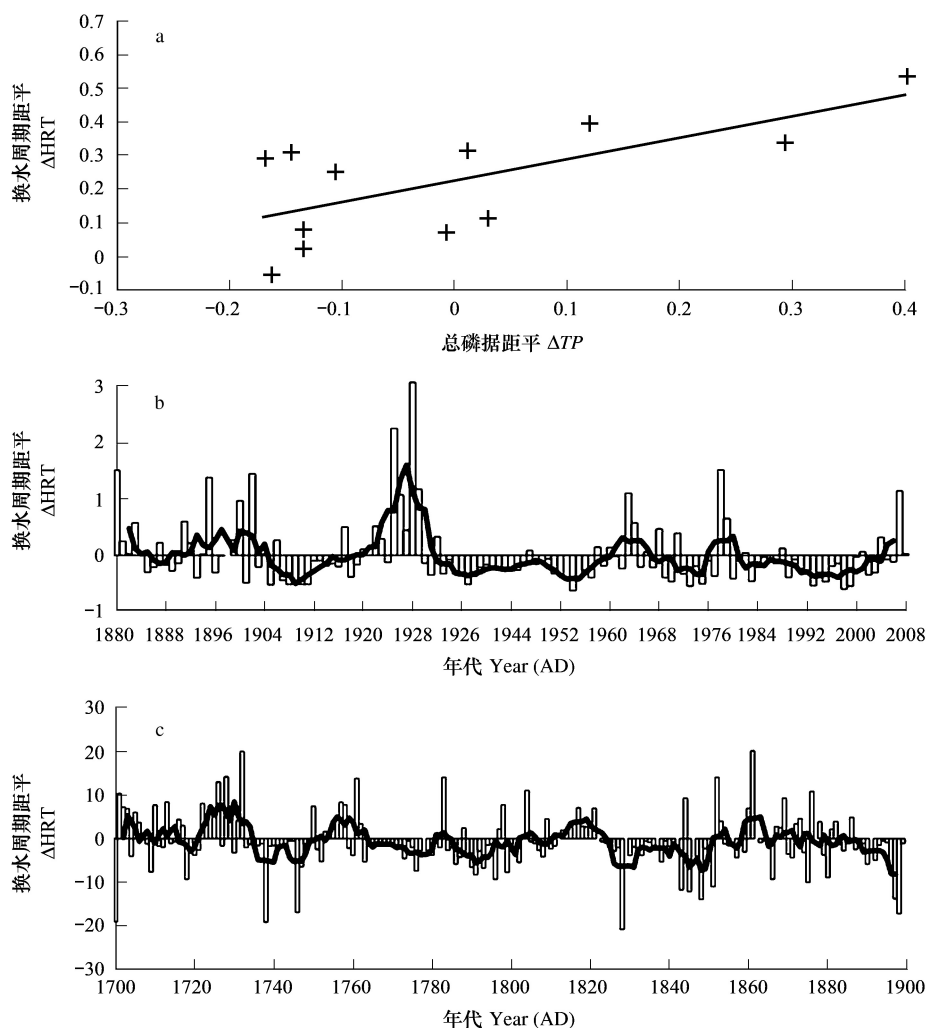


图2 模型1的控制试验和模拟试验结果:(a) 实测 TP 浓度与相应年份 HRT 相关;(b) 根据器测气候资料计算的 HRT 距平序列 (1880—2008 AD);(c) 采用模型1模拟的 HRT 距平序列 (1700—1899 AD)

Fig. 2 Control and simulation experiments of model 1: (a) correlations between observed ΔTP and ΔHRT ; (b) ΔHRT sequence calculated by monitoring meteorological data (1800—2008 AD); (c) model-simulated ΔHRT (1700—1899 AD).

3.2 模型2:湖泊生态-营养盐动力模型

3.2.1 控制试验 (1955—2008 AD)

利用公式(3)及设定的参数,采用 1955—2008 AD 实测气象和水文数据,模拟了湖泊草、藻生物量和湖泊 TP 。采用距平反映年际变化(图 3(a)-(b))。从初级生产者与 TP 的对比来看,当 TP 含量升高时,生物量也出现增加的趋势,反之亦然。湖泊初级生产者生物量与 TP 含量变化一致,反映了适度增加营养盐可促进初级生产者生长,而初级生产者生物量的增加势必消耗更多营养盐。

3.2.2 模拟试验 (1700—1899 AD)

在控制试验的基础上,对过去 200 年 (1700—1899 AD) 共 2400 个月的生物量及 TP 变量进行模拟 (图 3(c)-(d))。对这项模拟结果,我们采用了沉积资料予以对比验证。根据逐月模拟输出计算各年 TP 和生物量变量,并内插到硅藻重建的总磷 (DI- TP) 和两个代用指标 (水生植物花粉浓度和 TOC) ^[39-40] 对应年代的样品位置进行对比分析。其中 DI- TP 、水生植物花粉浓度及 TOC 的样本数分别为 18、34 和 22。DI- TP 与模拟 TP 变

量对比结果显示两者具有 64.7% 的同步变化率;初级生产者生物量变量与 ZK01 孔孢粉浓度序列及 DCH 孔 TOC 序列的同步变化率分别为 60.6% 和 61.9%。由此说明湖泊生态动力学模拟的生物量及 *TP* 变量是可接受的。

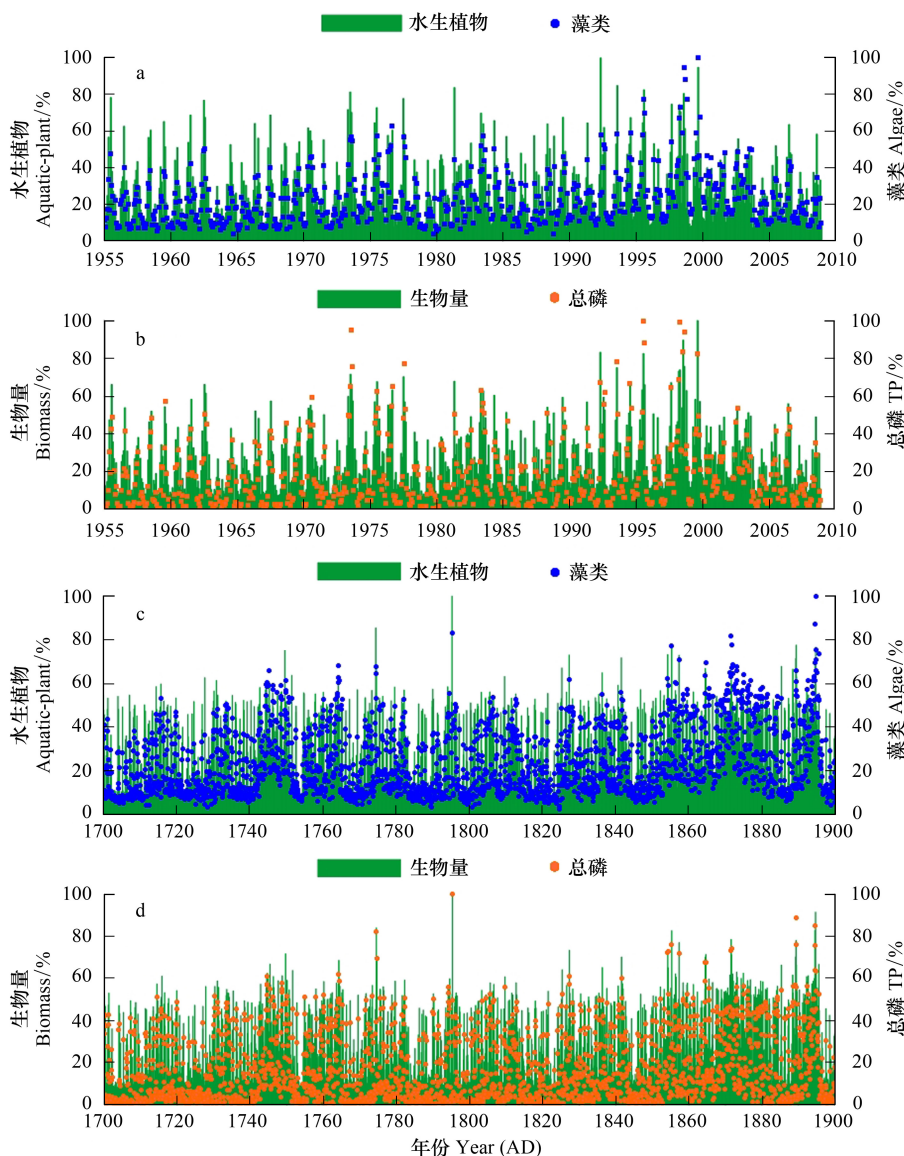


图 3 模型 2 的控制试验和模拟试验结果(采用距平 % 表示): (a) 1955—2008 AD 高等水生植物与藻类生物量变量关系; (b) 1955—2008 AD 初级生产者生物量变量与 *TP* 变量关系; (c) 1700—1899 AD 高等水生植物与藻类生物量变量关系; (d) 1700—1899 AD 初级生产者生物量变量与 *TP* 变量关系。

Fig. 3 Controlled and simulation experiments of model 2, expressed by anomaly % of the means: (a) comparison between aquatic—plant biomass and algae biomass (1955—2008 AD); (b) comparison between simulated monthly primary biomass and *TP* (1955—2008 AD); (c) comparison between aquatic—plant biomass and algae biomass (1700—1899 AD); (d) comparison between simulated monthly primary biomass and *TP* (1700—1899 AD).

模拟结果显示这 200 年 *TP* 与初级生产者生物量的变化趋势基本一致,但通过初级生产者生物量与 *TP* 变量的相关分析发现,虽然在 *TP* 逐渐增加的过程中生物量基本呈线性增长,但在 *TP* < 30% 的范围内,更多的数据点分布于长期平均增长线以上;在 *TP* > 40% 时,更多的数据点分布在长期平均增长线以下(图 4)。这说明在生物量增长方式中存在一个阈值,当 *TP* 变量小于阈值时,生物量增长高于长期平均增长水平;而当 *TP* 变量超过阈值时,生物量增长低于长期平均增长水平。因此推断,湖泊初级生产者在 *TP* 未超过阈值之前对

它具有较好的调节能力,当超过阈值之后,初级生产者对 TP 的调节能力便会下降。

3.3 结果对比

模型 1 和模型 2 均模拟输出湖泊营养态的长期变化,但反映了不同变化机制。在模型 1 中,湖泊水体交换周期(ΔHRT)表征的是气候因子驱动下湖泊营养态变化,反映出营养盐在气候-流域径流量控制下的变化。模型 2 模拟在气候-生态系统作用和反馈下的营养盐变化(ΔTP),不仅反映气候-径流量的控制,还具有生态系统的叠加效应。

运用 Mann-Kendall 方法^[58-59]对 HRT 与 TP 序列变化进行趋势分析,结果显示 1700-1899 AD 的 HRT 和 TP 变量的统计参数分别为 2.0122 和 4.7986,说明过去 200 年 HRT 和模拟 TP 变量均呈现上升趋势,意味着过去 200 年湖泊营养盐含量不断增加,水质整体呈下降趋势。其中,62.5% 的年份 HRT 和模拟 TP 变量呈同步变化,12.5% 呈异步变化,还有 25% 的年份没有表现明显的规律(图 5)。

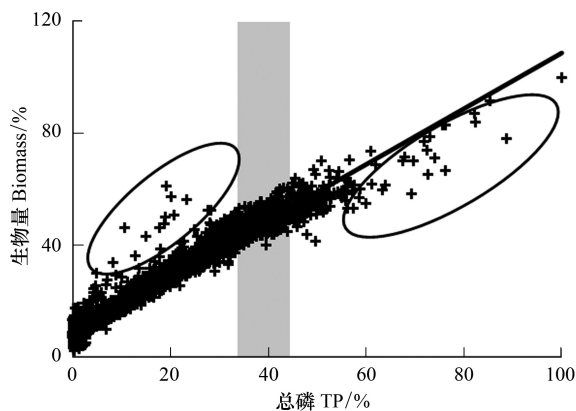


图 4 模拟的初级生产者生物量与 TP 的关系。

Fig. 4 Relationship between simulated primary biomass and TP (increase line of long-term means; black solid line).

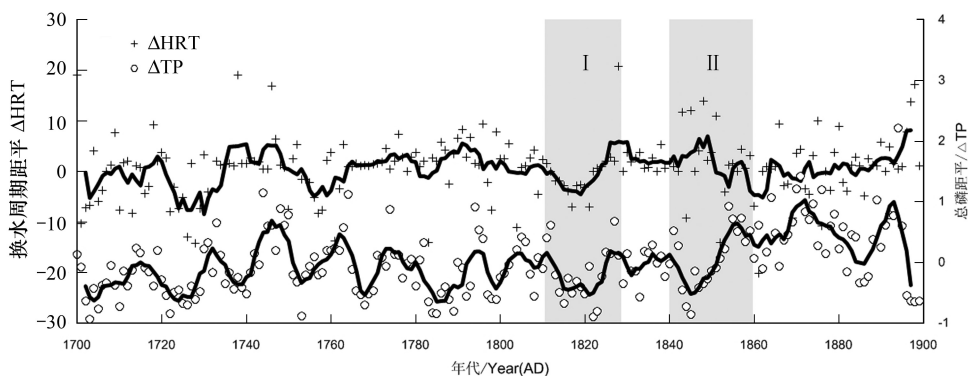


图 5 分析 1700—1899 AD ΔHRT 与 ΔTP 的关系

Fig. 5 Analysis between simulated ΔHRT and ΔTP (1700—1899 AD)

为了分析驱动湖泊水体交换变化的气候因子对生态系统总磷富集的影响程度,本文采用贡献率进行分析。贡献率指的是不同因子产生的变率占总变率的百分比。对 Mann-Kendall 指数分析,显示了 HRT 与 TP 在时间阶段上有着同步或异步变化(图 5),反映了不同因子的贡献。笔者选择两个典型时期进行分析。

典型同步变化期(1812-1828 AD, 图 5 中 I 阶段):气候因子和生态因子的贡献率分别为 79.1% 和 20.9%。过去 200 年大部分年份呈同步变化,说明湖泊营养盐变化在大部分时期主要受气象、气候因素影响。如果人为改变流域气象水文条件,湖泊生态系统营养盐状态将产生显著变化。现在很多地区为防洪防侵蚀及调度水量,在一些江河湖泊建立大量的硬质堤坝和水利工程,切断了陆域生态系统到水域生态系统的连续性并减缓了水体的交换速率,使得江河湖泊生态环境缓冲带消失,水体自净能力减弱,水质变差,加重了蓝藻水华、供水危机、生产安全等环境问题。因此,保持湖泊的通江属性,控制湖泊换水周期是控制污染的有效措施。

典型异步变化期(1844-1860 AD, 图 5 中 II 阶段):气候因子和生态因子的贡献率分别为 36.4% 和 63.6%,说明在异步变化时期生态因子对湖泊营养盐的变化起到主导作用。尽管这个时期在整个研究期中仅占 12.5%,但湖泊内部生态结构的优劣对营养盐变化的影响至关重要。例如,对湖泊生物链网进行优化改造、恢

复生物的多样性能够提高系统缓冲能力^[60-62]。从长期湖泊营养态演变的角度来看,利用湖泊生态系统的生物链控制、自身生物量的调节,能够加快环境自然恢复过程并最终达到改善环境和水质的目标。

4 结语

气候因子或者气候-生态因子驱动下,鄱阳湖营养盐均产生变化,但是两种模型的变化并不完全同步。在过去 200 年中,有 62.5% 的年份为同步变化,12.5% 的年份为异步变化,还有 25% 的年份没有表现出明显的规律。选择 62.5% 的年份中 1812—1828 AD 和 12.5% 的年份中 1812—1828 AD 作为两个典型同步期和异步期进行分析,通过计算气候因子与生态因子的贡献率发现:同步期气候因子的贡献率较高(79.1%),异步期生态因子的贡献率较高(63.6%)。由于同步期占的比例较高,说明气候因子对控制鄱阳湖污染是十分重要的。因此为了保持良好的湖泊生态环境,相关部门应谨慎考虑水利工程设施的建设。生态因子对鄱阳湖营养盐变化的作用是不可忽略的,特定时期甚至是至关重要的。因此,优化湖泊生态结构,充分发挥生态因子对营养盐的控制作用是一个十分有效的辅助手段。

对比模拟初级生产者生物量与模拟 *TP* 变化,发现在模拟 *TP* 含量范围内,生物量基本呈线性增长方式。但是增长过程中存在一个阈值,当 *TP* 含量低于这个阈值时,生物量增长速度随着 *TP* 供给的增加而加快;当 *TP* 含量超过阈值时,生物量的增长却随着 *TP* 含量的增加而下降。由此我们推断生物对营养盐含量具有一定的调节作用,但是当营养盐含量超过生物的耐受程度时,生物的调节作用将会降低。

研究结果中出现 25% 年份的不确定变化,说明除了气候和生态因子外还有其他因子驱动着湖泊营养盐变化。已有研究表明,鄱阳湖营养盐主要来源于赣江、抚河和信江及非点源(湖区径流,养殖投饵,船只排放等),入湖废水量为 $62 \times 10^4 \text{ t/d}^{[22]}$ 。因此,人类活动越来越强烈地影响着湖泊水质和生态环境,将人类活动作为营养盐变化的一个重要驱动因子进行定量分析将会更全面地揭示营养盐的变化机制。这也将是我们今后研究湖泊营养盐演化的重点和难题。

致谢:感谢李春海、姚书春博士野外钻孔工作的支持。

参考文献 (References):

- [1] Burkett V R, Wilcox D A, Stottlemeyer R, Barrow W, Fagre D, Baron J, Price J, Nielsen J L, Allen C D, Peterson D L, Ruggerone G, Doyle T. Nonlinear dynamics in ecosystem response to climatic change: case studies and policy implications. *Ecological Complexity*, 2005, 2(4): 357-394.
- [2] Wang R, Dearing J A, Langdon P G, Zhang E L, Yang X D, Dakos V, Scheffer M. Flickering gives early warning signals of a critical transition to a eutrophic lake state. *Nature*, 2012, 492(7429): 419-422.
- [3] Scheffer M. Multiplicity of stable states in freshwater systems // Gulati R D, Lammens E H R R, Meyer M L, van Donk E, eds. *Bio-manipulation Tool for Water Management*. Amsterdam, Netherlands: Springer, 1990: 475-486.
- [4] Qin B Q, Yang L Y, Chen F Z, Zhu G W, Zhang L, Chen Y Y. Mechanism and control of lake eutrophication. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(19): 2401-2412.
- [5] 钱凯先. 国内外湖泊富营养化研究及对策. *环境科学*, 1988, 9(2): 59-63.
- [6] Morowitz H. Entropy and nonsense. *Biology and Philosophy*, 1986, 1(4): 473-476.
- [7] Jørgensen S E. *Application of Ecology in Environmental Management*. Boca Raton FL: CRC Press, 1983.
- [8] 吴挺峰, 高光, 晁建颖, 秦伯强. 基于流域富营养化模型的水库水华主要诱发因素及防治对策. *水利学报*, 2009, 40(4): 391-397.
- [9] 顾平, 万金保. 鄱阳湖水文特征及其对水质的影响研究. *环境污染与防治*, 2011, 33(3): 15-19.
- [10] Kalff J. *湖沼学——内陆水生态系统*. 古滨河, 刘正文, 李宽意, 等译. 北京: 高等教育出版社, 2011: 122-126.
- [11] 羊向东, 沈吉, 董旭辉, 刘恩峰. 长江中下游浅水湖泊历史时期营养态演化及湖泊生态响应——以龙感湖和太白湖为例. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2005, 35(增刊 II): 45-54.
- [12] Degobbis D, Precali R, Ivancic I, Smolaka N, Fuks D, Kveder S. Long-term changes in the northern Adriatic ecosystem related to anthropogenic eutrophication. *International Journal of Environment and Pollution*, 2000, 13(1/6): 495-533.
- [13] Suding K N, Katherine L G, Gregory R H. Alternative states and positive feedbacks in restoration ecology. *Trends in Ecology and Evolution*, 2004, 19(1): 46-53.

- [14] Demenocal P, Ortiz J, Guilderson T, Adkins J, Sarnthein M, Baker L, Yarusinsky M. Abrupt onset and termination of the African Humid Period: rapid climate responses to gradual insolation forcing. *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19(1/5): 347-361.
- [15] 王圣瑞, 舒俭民, 倪兆奎, 冯明雷, 刘志刚, 庞燕, 方红亚. 鄱阳湖水污染现状调查及防治对策. *环境工程技术学报*, 2013, 3(4): 342-349.
- [16] 杨桂山, 马荣华, 张路, 姜加虎, 姚书春, 张民, 曾海鳌. 中国湖泊现状及面临的重大问题与保护策略. *湖泊科学*, 2010, 22(6): 799-810.
- [17] 胡春华, 周文斌, 王毛兰, 魏志巍. 鄱阳湖氮磷营养盐变化特征及潜在性富营养化评价. *湖泊科学*, 2010, 22(5): 723-728.
- [18] 沈吉, 薛滨, 吴敬禄, 吴艳宏, 刘兴起, 羊向东, 刘健, 王苏民. 湖泊沉积与环境演化. 北京: 科学出版社, 2010.
- [19] Wigley T M L, Jones P D. Influences of precipitation changes and direct CO₂ effects on streamflow. *Nature*, 1985, 314(6007): 149-152.
- [20] Dingman S L. *Physical Hydrology*. 2nd ed. Upper Saddle River, New Jersey, USA: Prentice-Hall, 2002.
- [21] 于革, 廖梦娜, 李永飞. 湖泊生态系统对过去 1000 年气候变化的响应研究——以鄱阳湖生态系统动力学模拟为例. *第四纪研究*, 2013, 33(6): 1148-1159.
- [22] 朱海虹, 张本. 鄱阳湖-水文·生物·沉积·湿地·开发整治. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1997: 146-148.
- [23] 羊向东. 硅藻转换函数与环境定量重建——以青藏高原和长江中下游湖泊为例[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2004: 40-41.
- [24] Dong X H, Bennion H, Battarbee R, Yang X D, Yang H D, Liu E F. Tracking eutrophication in Taihu Lake using the diatom record: potential and problems. *Journal of Paleolimnology*, 2008, 40(1): 413-429.
- [25] 陈旭, 羊向东, 刘倩, 刘恩峰. 巢湖近代沉积硅藻种群变化与富营养化过程重建. *湖泊科学*, 2010, 22(4): 607-615.
- [26] 董旭辉, 羊向东, 刘恩峰. 湖北太白湖 400 多年来沉积硅藻记录及湖水总磷的定量重建. *湖泊科学*, 2006, 18(6): 597-604.
- [27] 章宗涉. 水生高等植物——浮游植物关系和湖泊营养状态. *湖泊科学*, 1998, 10(4): 83-86.
- [28] 谢平. 从生态学透视生命系统的设计、运作与演化——生态、遗传和进化通过生殖的整合. 北京: 科学出版社, 2013: 397-397.
- [29] 秦伯强, 吴庆农, 高俊峰, 范成新, 许刚, 陈伟民, 毛锐, 陈宇炜. 太湖地区的水资源与水环境——问题、原因与管理. *自然资源学报*, 2002, 17(2): 221-228.
- [30] Jasser I. The influence of macrophytes on a phytoplankton community in experimental conditions. *Hydrobiologia*, 1995, 306(1): 21-32.
- [31] Mulderij G, Mooij W M, Smolders A J P, Van Donk E. Allelopathic inhibition of phytoplankton by exudates from *Stratiotes aloides*. *Aquatic Botany*, 2005, 82(4): 284-296.
- [32] Shigesada N, Kawasaki K, Teramoto E. Spatial segregation of interacting species. *Journal of Theoretical Biology*, 1979, 79(1): 83-99.
- [33] 孔繁翔, 宋立荣. 蓝藻水华形成过程及其环境特征研究. 北京: 科学出版社, 2011: 103-111.
- [34] Kalff J. *Limnology: Inland Water Ecosystems*. Vol. 592. New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- [35] 梁英琼, 刘贤宁, 吕万碧. 水生生态系统中有竞争和捕食效应的一类简单食物网模型的稳定性分析. *西南大学学报: 自然科学版*, 2010, 32(3): 15-20.
- [36] Last W M, Smol J P. *Tracking Environmental Change Using Lake Sediments, Volume 1: Basin Analysis, Coring, and Chronological Techniques*. New York: Kluwer Academic Publishers, 2001: 171-196.
- [37] Juggins S. *C2 Version 1. 5: Software for Ecological and Palaeoecological Data Analysis and Visualization*. Newcastle: University of Newcastle, 2007.
- [38] 谢振东, 冯绍辉, 黄文虹, 罗音, 冯昌和, 马振兴. 江西鄱阳湖区 ZK01 钻孔孢粉记录及其古环境信息. *资源调查与环境*, 2006, 27(1): 60-69.
- [39] 吴艳宏, 项亮, 王苏民, 蒋雪中. 鄱阳湖 2000 年来的环境演化. *海洋地质与第四纪地质*, 1999, 19(1): 85-92.
- [40] Lowe J J, Walker M J C. *Reconstructing Quaternary Environments*. 2nd ed. London: Longman, 1997.
- [41] Palmer W C, Havens A V. A graphical technique for determining evapotranspiration by the Thornthwaite method. *Monthly Weather Review*, 1958, 86(4): 123-128.
- [42] 朱海虹, 张本. 鄱阳湖-水文·生物·沉积·湿地·开发整治. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1997: 349-349.
- [43] 《鄱阳湖地图集》编委会. 鄱阳湖地图集. 北京: 科学出版社, 1993.
- [44] 官少飞, 郎青, 张本. 鄱阳湖水生维管束植物生物量及其合理开发利用的初步. *水生生物学报*, 1987, 11(3): 219-227.
- [45] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范. 北京: 中国环境科学出版社, 1990: 299-299.
- [46] 彭映辉, 简永兴, 李仁东. 鄱阳湖平原湖泊水生植物群落的多样性. *中南林学院学报*, 2003, 23(4): 22-27.
- [47] 刘元波, 张奇, 刘健, 李恒鹏. 鄱阳湖流域气候水文过程及水环境效应. 北京: 科学出版社, 2012: 212-212.
- [48] 陈格君, 周文斌, 李美婷, 童乐, 胡春华. 鄱阳湖氮磷营养盐对浮游植物群落影响研究. *中国农村水利水电*, 2013, (3): 48-61.
- [49] 余进祥, 刘娅菲, 钟晓兰, 尧娟. 鄱阳湖水体富营养化评价方法及主导因子研究. *江西农业学报*, 2009, 21(4): 125-128.
- [50] 徐彩平. 鄱阳湖浮游植物群落结构特征及蓝藻水华初步分析[D]. 南京: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 2013: 84-84.

- [51] 江西省鄱阳湖管理局. 鄱阳湖渔业资源利用与保护专题调研报告. 2011 (内部).
- [52] 周文斌, 万金保, 姜加虎. 鄱阳湖江湖水位变化对其生态系统影响. 北京: 科学出版社, 2011: 2-6, 9-9, 78-82.
- [53] Roeckner E, Brokopf R, Esch M, Giorgetta M, Hagemann S, Kornbluh L, Manzini E, Schlese U, Schulzweida U. Sensitivity of simulated climate to horizontal and vertical resolution in the ECHAM5 atmosphere model. *Journal of Climate*, 2006, 19(16): 3771-3791.
- [54] IPCC Data Distribution Center. AR4 GCM data (Data provided by the Met. Office Hadley Centre). <http://www.ipcc-data.org>, 2006.
- [55] Zhang Q, Werner A D. Integrated surface-subsurface modeling of Fuxianhu Lake catchment, Southwest China. *Water Resources Management*, 2009, 23(11): 2189-2204.
- [56] 王苏民, 窦鸿身, 陈克造, 汪宪枢, 姜加虎. 中国湖泊志. 北京: 科学出版社, 1998: 103-111.
- [57] Vollenweider R A. Scientific Fundamentals of the Eutrophication of Lakes and Flowing Waters, with Particular Reference to Nitrogen and Phosphorous as Factors in Eutrophication. OECD Report No. DAS/CSI/68. 27, Paris, 1968, 192; Annex, 21; Bibliography, 61.
- [58] Mann H B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245-259.
- [59] Kendall M G. Rank Correlation Methods. Oxford: Griffen, 1948.
- [60] 秦伯强, 胡维平, 刘正文, 谢平, 尹澄清, 高光, 谷孝鸿, 徐在宽. 太湖水源地水质净化的生态工程试验研究. *环境科学学报*, 2007, 27(1): 5-12.
- [61] 徐德兰, 刘正文, 雷泽湘, 曾勇, 程云环. 大型水生植物对湖泊生态修复的作用机制研究进展. *长江大学学报: 自然科学版*, 2005, 25(2): 14-18.
- [62] 杨龙元, 梁海棠, 胡维平, 季江, 陈伟民, 濮培民, 蔡启铭. 太湖北部滨岸区水生植被自然修复观测研究. *湖泊科学*, 2002, 14(1): 60-66.