

文章编号:1674-991X(2012)03-0193-07

## 基于模型反演确定邛海湖泊营养物的参照状态

张礼兵<sup>1,2</sup>, 张展羽<sup>1</sup>, 霍守亮<sup>3</sup>, 赵言国<sup>4</sup>, 金菊良<sup>2,5\*</sup>

1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098

2. 合肥工业大学土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009

3. 中国环境科学研究院, 北京 100012

4. 水利部淮委沂沭河水利管理局, 山东 临沂 276004

5. 合肥工业大学水资源与环境系统工程研究所, 安徽 合肥 230009

**摘要:**湖泊营养物基准参照状态的科学合理确定是营养物基准制定的重要技术基础之一。以四川邛海为例, 将系统动力学模型耦合多种数学模型, 对湖泊营养物的产生、分布及输移进行系统模拟, 并结合系统反演方法获得湖泊近几十年不同水文条件下的各营养物浓度演化过程及湖泊富营养化水平。结果表明, 经过试验校准的系统仿真模型能够较真实地反映湖泊历史富营养化变化过程, 据此确定了湖泊营养物基准参照状态: TP 浓度为 0.008 ~ 0.015 mg/L; TN 浓度为 0.286 ~ 0.323 mg/L; Chl-a 浓度为 2.140 ~ 4.211  $\mu\text{g/L}$ ; 透明度(SD)为 1.862 ~ 2.731 m。

**关键词:**邛海; 营养物基准; 参照状态; 系统动力学; 仿真

中图分类号: X524

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.1674-991X.2012.03.029

## Establishing Nutrient Criteria Reference Conditions Based on Model Retrieval for Lake Qionghai

ZHANG Li-bing<sup>1,2</sup>, ZHANG Zhan-yu<sup>1</sup>, HUO Shou-liang<sup>3</sup>, ZHAO Yan-guo<sup>4</sup>, JIN Ju-liang<sup>2,5</sup>

1. School of Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China

2. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

3. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

4. Water Resource Bureau of Yishu River, Huaihe River Commission of Ministry of Water Resources, Linyi 276004, China

5. Systems Engineering Research Institute for Water Resources and Environment,  
Hefei University of Technology, Hefei 230009, China

**Abstract:** Establishing lake nutrient reference conditions scientifically and reasonably is one of essential technical foundations for nutrient criteria determination. A system dynamics-based method, combined with several mathematical models, was undertaken to simulate the nutrient sources, distribution and movement in Lake Qionghai, Sichuan Province. The evolution process of nutrient concentrations and eutrophication levels in the past decades under different hydrological conditions was modeled by a system retrieval method. The results showed that the system simulation model calibrated by experiments was capable of describing the historical changes of lake eutrophication. Accordingly, this new method identified the reference total phosphorus values of 0.008-0.015 mg/L, reference total nitrogen values of 0.286-0.323 mg/L, reference chlorophyll-a values of 2.140-4.211  $\mu\text{g/L}$ , and reference Secchi depth values of 1.862-2.731 m for Lake Qionghai.

**Key words:** Lake Qionghai; nutrient criteria; reference conditions; system dynamics; simulation

收稿日期: 2011-12-21

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07106-001); 国家自然科学基金项目(51079037)

作者简介: 张礼兵(1972—), 男, 副教授, 博士后, 主要从事水资源与水环境系统工程研究, zhanglibing777@163.com

\*责任作者: 金菊良(1966—), 男, 教授, 博导, 主要从事水资源系统工程研究, jinjl66@126.com

湖泊营养物基准、标准是进行湖泊富营养化有效控制和科学管理的重要支撑,对控制湖泊富营养化,恢复湖泊水生态系统健康等具有不可替代的作用<sup>[1-3]</sup>。霍守亮等<sup>[4]</sup>探讨了各种方法对我国湖泊营养物基准制定中的借鉴意义;郑丙辉等<sup>[5]</sup>采用频数分析法研究了太湖营养物总氮、总磷及响应指标叶绿素 a、塞氏深度(Secci depth, SD) 基准的参照状态;Huo 等<sup>[6]</sup>结合云贵高原湖区古湖沼学重建的资料和历史水质监测数据进行综合分析,初步确定了云贵高原湖区营养物基准参照状态的阈值。以上工作为我国湖泊营养物基准参照状态的建立进行了探索性研究,取得了丰富而有意义的成果。

众所周知,对于某一生态分区的湖泊(如邛海),其营养物的产生、输移、转化等一般是以湖泊-流域为基础而构成相对独立、封闭的自然与社会复合大系统,因此,以湖泊-流域系统为单元对湖泊营养物进行整体研究,能适应河川、湖泊水资源的自然规律和流域社会经济发展相互联系的特点<sup>[7-9]</sup>,而目前我国在湖泊富营养化研究方面普遍缺乏整体性和系统性<sup>[10]</sup>。运用系统动力学模型可以较好地模拟湖泊流域自有的因素整体性和相互关联性,能从宏观和微观的角度描述湖泊营养物与流域生态、环境、资源、经济和社会之间的高阶、非线性复杂关系<sup>[11-12]</sup>。基于此,笔者以云贵高原湖区邛海为例,在湖泊-流域系统理论上,针对高维、动态、非线性等复杂系统特征,基于系统动力学方法建立邛海湖泊-流域系统模拟模型,以揭示营养物在流域水文、生态、经济(人类活动)等过程中产生、分布及输移过程,进而描述营养物输入-湖泊营养状态动态响应关系。同时,结合系统反演方法和富营养化综合评价技术,推算邛海营养物基准的参照状态阈值,以期为区域营养物基准参照状态确定提供一种新的途径。

## 1 系统模型构建

邛海,位于四川省凉山彝族自治州西昌市,古称邛池,是四川省第二大湖泊,属更新世早期断陷湖,至今约 180 万年。邛海湖形似蜗牛,头在西北的海河出湖口一带,湖盆为锅底形,湖底泥是由暴雨径流冲刷地表土入湖沉积所致,为红棕色细泥,湖岸到湖心深度变化很大,水位变幅小,集水面积约 30 km<sup>2</sup><sup>[13]</sup>。

### 1.1 流域自然生态系统模型

#### 1.1.1 水资源与水环境子系统

邛海流域具有中亚热带高原山地气候特点,流域的气候和地形、地质特征共同影响了水系的分布,使得溪沟密布、河沟比降大。流域的多年平均年径流深为 478.8 mm,多年平均年径流量为 1.473 亿 m<sup>3</sup>。年径流量集中于 6—10 月的江洪水期,暴雨形成洪峰较快,洪水持续过程多在 6~12 h 内,洪水含沙量高,陡涨陡落,多呈单峰。邛海汇水河流北有干沟河,东有官坝河,南有鹅掌河,次一级的河流有青河、高沧河、踏沟河、龙沟河等。以上河流汇入邛海后,由海河排泄入安宁河。流域内支沟、冲沟密布,长度大于 1 km 的支沟众多,水系密度达 0.68 条/km<sup>2</sup>。邛海属长江流域雅砻江水系,湖泊周长 37.2 km,南北长 10.3 km,东西最宽 5.6 km,东西中部宽 3.8 km,最大水深 18.32 m,平均水深 10.95 m。在正常蓄水位海拔 1 510.30 m 下,水量为 2.891 亿 m<sup>3</sup>,湖面面积为 27.877 km<sup>2</sup>。多年平均湖面降水量 2 650 万 m<sup>3</sup>,湖泊补缀带系数 9.97,湖水滞留时间约 834 d<sup>[9,13]</sup>,如受到污染极难被恢复。邛海流域水资源子系统动力学模型流程如图 1 所示。

#### 1.1.2 土地资源子系统

森林是邛海流域陆地生态系统的主要形式。对邛海流域森林植被分布的文献资料<sup>[13]</sup>分析可知,自 20 世纪 40 年代以来,邛海流域的植被覆盖率总体处于增长态势。在 40 年代,流域的森林覆盖率仅为 16.3%;经过 50 年代的大规模造林,森林覆盖率大幅增加;到 60 年代覆盖率达到 32.67%;2004 年流域的森林覆盖率达到 37.8%,其中有林地覆盖率为 32.2%,灌木林覆盖率为 5.6%。但根据植被覆盖度的计算,邛海流域的有林地覆盖率相对较低。流域内坡耕地占土地总面积的比例仍高达 18.83%,陆地生态恢复和森林管护的力度仍需加大。水土流失是邛海流域重要的入湖污染源。邛海流域内水土流失以水力侵蚀为主,流失的地类主要是坡耕地,分布在流域内的山坡上和河流两岸。由于地形地质等自然条件和人为活动的影响,流域尤其是外围山岭区水土流失严重,流域水土流失面积达 128.75 km<sup>2</sup>,占流域面积的 45.51%,流域平均土壤侵蚀模数 2 750.34 t/(km·a),整体为中度侵蚀,土壤侵蚀量 77.81 万 t/a<sup>[9]</sup>。综合邛海流域主要用地形式,建立土地资源子系统动力学模型流程(图 2)。

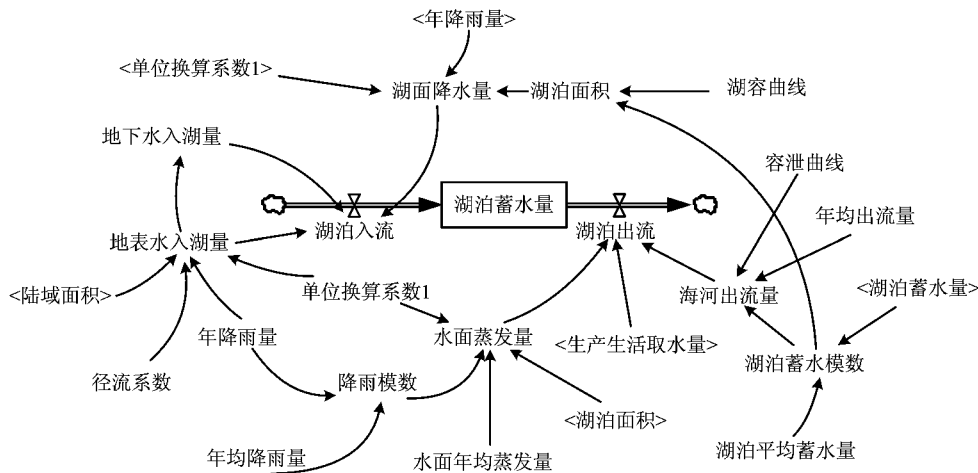


图1 邛海流域水资源子系统动力学模型流程

Fig. 1 The system dynamics flow chart for water resources sub-system of Lake Qionghai

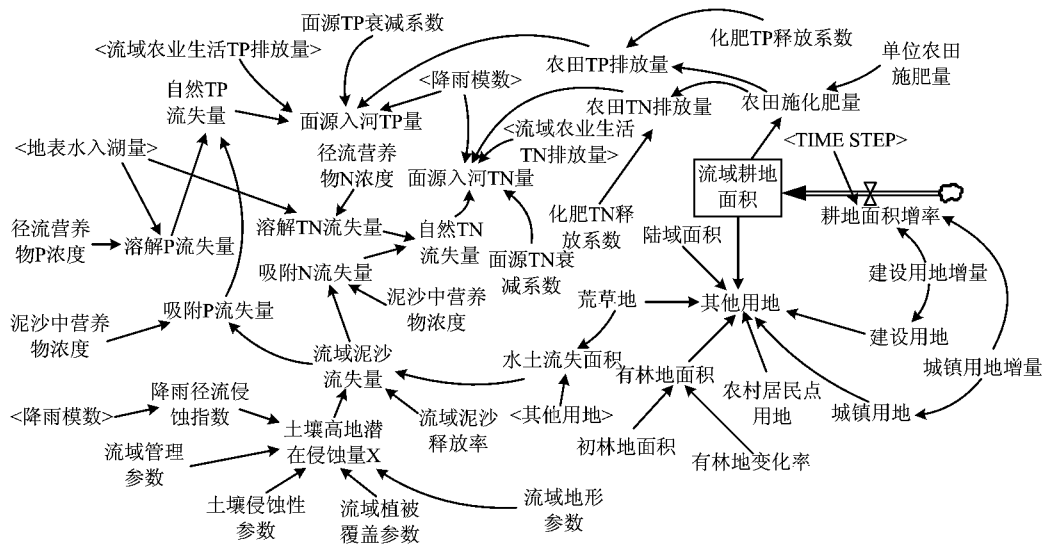


图2 邛海流域土地资源子系统动力学模型流程

Fig. 2 The system dynamics flow chart for land resources sub-system of Lake Qionghai

### 1.2 流域社会经济系统模型

#### 1.2.1 人口生活子系统

邛海流域辖西昌市西郊乡、大箐乡、海南乡、大兴乡、川兴镇、高视乡及昭觉县的普诗乡和玛增依乌乡、喜德县的东河乡。根据2004年统计,流域总人口为84 153人,其中农业人口占80.5%;西昌市辖区内68 331人,占流域总人口的92.9%。流域人口分布的特点为农业人口所占比例大,其中海南、大箐、大兴、川兴四个乡镇农业人口比例达到90%以上,高视乡、东河乡及昭觉县两个乡镇则100%为农业人口<sup>[13]</sup>。人口数量和质量直接影响着邛海流域的经济发展速度和规模、资源的消耗以及污染物的

负荷和分布。

#### 1.2.2 工业、旅游业及水产养殖业子系统

邛海流域以农业为主,总人口中农业人口占较大比例,城镇化水平比较低。但近年来第三产业发展迅速,城市化进程加快,非农业人口数量呈迅速上升趋势。与农业人口比例高的特点相一致,邛海流域亦以农业经济为主。尽管工业总产值占社会总产值的47%,但主要分布在西郊,其余乡镇工业发展速度均很薄弱。在农业经济中,农牧比例大,渔业也占一定比例,林业所占比例较小。邛海湖盆区2004年的农林牧渔业总产值为13 027万元,其中,农业占56.63%,畜牧业占32.45%,渔业占9.82%,林

业占 1.1%。邛海流域拥有邛海—泸山风景区以及螺髻山风景区,加之特殊的气候和民族特征,旅游资源丰富。旅游业也是邛海流域的重要经济来源,2004 年旅游收入 44 130 万元,比 2003 年增长 13.5%<sup>[9,13]</sup>。对社会经济子系统的分析将为建立生态经济模型及制定生态系统管理措施提供基础。

### 1.2.3 农业生产子系统

流域经济子系统主要由农业、工业和第三产业构成。就农业而言,在模型中需要考虑农业总产值的变化,以及土地利用类型变动、灌溉用水、农业产业结构、农业劳动力用量和农业投资等变化情况。邛海流域的工业虽然不发达,在社会总产值中仍占有重要的份额,是拉动经济增长的关键因素。工业生产不但为整个流域带来经济效益,安排劳动力就业,同时也会消耗大量的资源:如原材料、水资源、土

地。尽管工业发展会排放相当数量的污染物,根据地方规划,污水将全部实现截流和外排,对邛海水质的影响不大;但产生的固体废物会占用大量的土地,对邛海流域水系造成污染,在模型中需加以考虑。邛海流域的第三产业发展迅速,但发展同时带来一系列环境问题,如大量的旅游人口进入,会增加对水、食品、能源的需求量,同时增大污水、生活垃圾的排放量,需在模型中加以反映。

### 1.3 湖泊营养物子系统模型

根据实地调研,将生活污水、农业面源、水土流失和大气沉降作为邛海的入湖污染物负荷源纳入模型中,将河道输出、渔业和水生植物收获及水资源开发作为污染物的输出。根据实地调研,将生活污水、农业面源、水土流失和大气沉降作为邛海的入湖磷负荷源,而将河道输出、渔业和水生植物收获以及水资源开发作为湖泊磷的输出(图 3)。

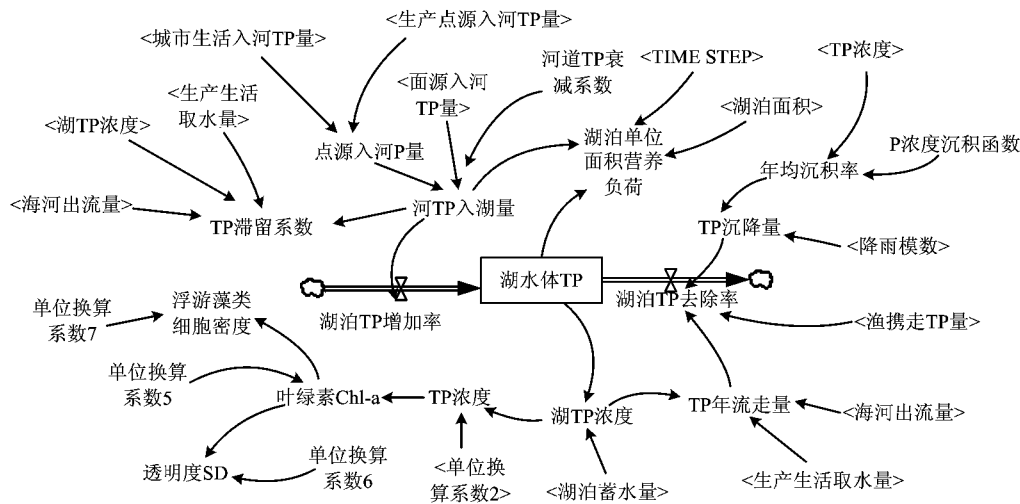


图 3 邛海湖泊水体营养物子系统动力学模型流程

Fig. 3 The system dynamics flow chart for nutrient sub-system in water of Lake Qionghai

由于邛海流域内人口密度低,且农村人口居住分散,农村生活污水通常被直接泼洒于地上或者是以废水形式进入沼气池中,人畜粪便和固体废物也多用于堆肥,而沼渣和堆肥又以农家肥的形式进入农田。根据实地调研和相关研究结果,在本研究中假定人类和牲畜粪便全部被用于农田。由于邛海流域内的河道生态破坏很严重,在雨季径流量大且集中,加剧了水土流失和泥石流的发生,因此不考虑河道对污染物的去除能力;同时,由于地下水对邛海的补给量仅占总入湖水量的 3.14%,且地下水中的磷浓度较低,因此地下水的磷输入未加考虑。农田面

源污染主要是考虑农田灌溉退水时的磷流失,雨季农田的磷流失纳入水土流失中考虑,反映出了溶解态磷(DP)。此外,每年尚有 488.80 t 的吸附态磷(PP)在雨季时进入邛海<sup>[9]</sup>。

## 2 模型参数率定及优化

参数的率定是模型建立的关键,关系到模型模拟结果的可靠性和实用性。根据流域及湖泊各要素的历史监测和相关研究对象,对参数进行估计和率定。

由于缺乏长期的监测资料,尤其是入湖河流水质,湖泊水生态如水生动植物、鱼类等,从而使

得相关子系统的模拟和验证数据缺乏,在一定程度上影响模型的拟合精度,改进的方法是对现有数据利用插值补充,或是建立数学模型进行延长等方法来增加数据信息量。根据灵敏度分析和系统适宜性

检验,在参数率定时重点关注灵敏度高的参数设定。

限于资料,仅以 2003—2009 年邛海 TP 和 TN 浓度的实测数据作为模型校准的样本<sup>[9]</sup>。模型计算值与邛海水质实测值的拟合结果见图 4。

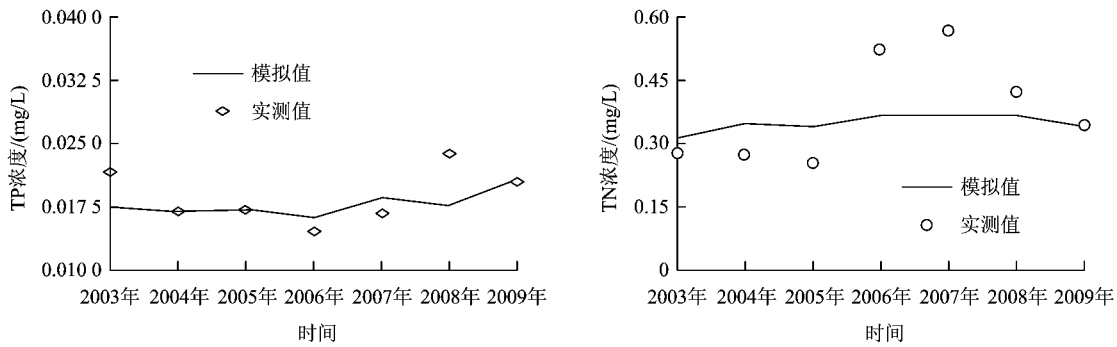


图4 邛海水体主要营养物年均浓度拟合结果

Fig. 4 The calibration results of the annual concentrations of main nutrients in water of Lake Qionghai

由图 4 可见,邛海 TP 的拟合情况尚可,除 2003 年和 2008 年的偏差较大外,其他数据精度基本令人满意。TN 浓度的模型计算值与实测值偏差较大,这与其极不稳定性和季节变化较大有关,但基本可用于系统宏观性模拟与分析。以上结果说明该模型通过邛海湖泊-流域的系统模拟,结果对主要营养物具有较好的仿真效果,可以用于邛海流域湖泊自然生态社会经济系统中对营养物的发展变化进行模拟、反演分析计算。

营养物状态受人类影响相对较小的年份,最终以该年份的营养物状态近似视为湖泊营养物参照状态。

### 3.1 基准年主要驱动因子反演

在以上构建的邛海湖泊-流域自然生态及社会经济系统模拟模型的基础上,针对营养物浓度的主要驱动因子建立数学模型,反演其历史变化过程,将其代入系统动力学模型中,同时代入湖泊水文、气象等数据资料,反推出 20 世纪初邛海受人类活动影响较小时的湖泊营养物参照状态。

## 3 系统模型应用

根据湖泊水质模型和历年流域营养物入湖量、径流量、取水量等数据资料,结合湖泊流域生态健康性综合评价,反推出受人类活动影响较小时的湖泊营养物参照状态。根据分析计算结果判断湖泊水体

邛海水体营养物部分驱动因子以及流域总人口、流域农业人口等反演结果见图 5。由图 5 可见,流域农业人口数占流域总人口的比例很大,即邛海城镇化率始终不到 8%。同时由图 5 可知,工业 GDP 从 20 世纪 80 年代开始才有较高速增长,但占流域国民生产总值最高才达到 20%,而旅游人次

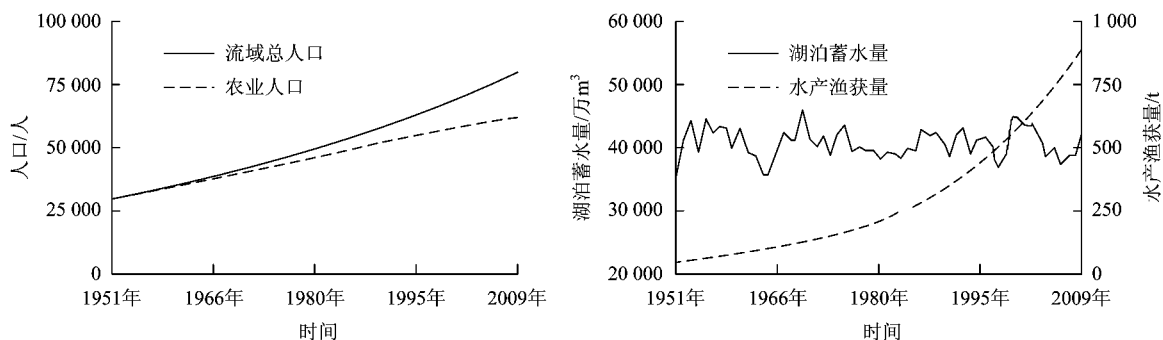


图5 邛海水体营养物部分驱动因子反演结果

Fig. 5 The retrieval results of partial driving factors of water nutrients in Lake Qionghai

则是从 1985 年才渐成规模,以后逐年显著增长。以上流域营养物主要驱动的这一特性直接影响到邛海流域营养物来源的性质,邛海流域(以 TP 为例)营养物来源中面源占有绝对比例,即使点源从 1995 进入高增长以来,其占总来源最高约为 20%,远低于流域面源排放值,这也符合历史实际估算情况。另外,在点源负荷中,城市生产生活排放 TP 大都通过海河直接排走,对湖泊水体污染影响有限。

### 3.2 基准年反演结果分析

#### 3.2.1 不同年份湖泊营养物浓度计算

在模拟模型校准验证合理的情况下,基于系统反演模拟以邛海流域湖泊的流域人口、土地利用、工农业生产等作为输入,重点分析计算在不同水文气象条件下(1951—2009 年来水情况)<sup>[14]</sup>湖泊营养物的浓度年均值,如图 6 所示。

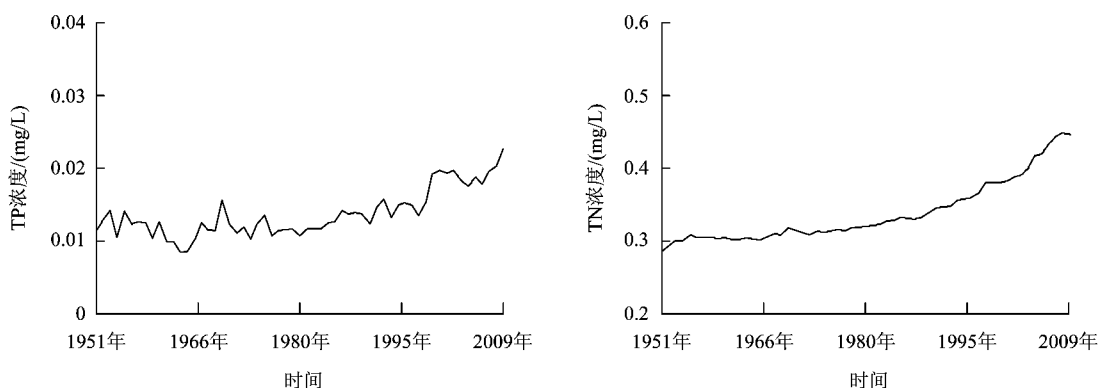


图 6 邛海水体 TP、TN 年均浓度反演结果

Fig. 6 The retrieval results for annual average concentration of TP and TN in water of Lake Qionghai

由图 6 可见,邛海流域基本以 20 世纪 80 年代初期为明显分界,1951—1980 年 TN 和 TP 浓度基本处于较低且平稳的水平,而 1980 年以后呈明显上升趋势。

#### 3.2.2 湖泊营养物基准参照年及参照状态浓度的确定

为了判断邛海湖泊营养物基准参照状态,需根据水体营养化状况进行综合分析,确定出参照状态基准年。现在常用的湖泊富营养化评价方法主要有:营养度指数(TSI)法、改进营养度指数(TSM)法、综合营养指数(TLI)法及评分法等,考虑到综合营养指数法简便易行、主观影响小,选取综合营养指数法进行湖泊营养化综合评价。代入模型计算得湖泊综合营养指数的历史反演结果(图 7)。

由图 7 可见,该湖泊综合营养指数以 20 世纪 80 年代为界分为两个阶段:1980 年以前湖泊基本处于贫营养状况(TLI < 30),水质尚好;1980 年以后进入中营养水平,且逐年有上升趋势,直至近几年综合营养指数甚至超过 35。这主要是由于流域内人类社会经济活动从 20 世纪 80 年代中期开始逐年增加,如农业化肥施肥量的增加、湖泊水产的规模化养

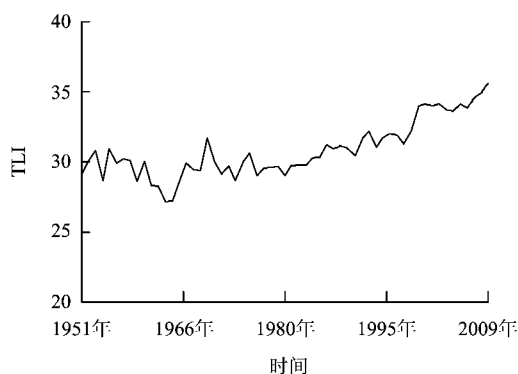


图 7 邛海湖泊综合营养指数历史反演结果

Fig. 7 The historical retrieval results of the integrated nutritional index of Lake Qionghai

殖等,使邛海湖泊营养物又有一定幅度的突增,这从反演结果中也有明显体现。

综合考虑邛海作为内流型湖泊以及流域内人类社会经济适度发展需要,判定该湖泊 20 世纪 50 年代初期为基准参照状态阶段,并以该阶段各营养物浓度确定为邛海营养物参照状态值。将流域历年水文径流系列代入模拟模型获得各营养物相应的浓度计算值,并对其频率分布分析,配频结果如图 8 所示。

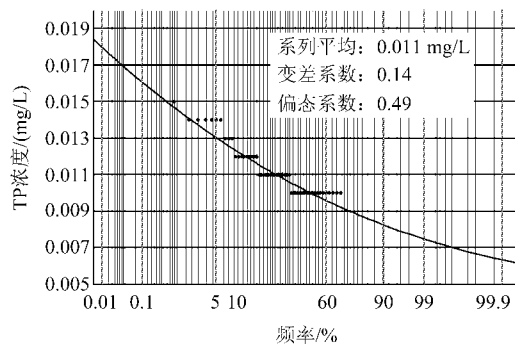


图8 基准参照年不同水文年下TP年均浓度配频计算结果

Fig. 8 The frequency analysis results of annual concentrations of TP under different hydrologic conditions

#### 4 结论

基于湖泊-流域整体理论对邳海及其流域进行关联识别,建立了湖泊-流域整体的自然生态社会经济大系统。通过系统模拟与反演推算出该湖泊综合营养指数在1980年以后进入中营养水平,且有逐年上升趋势,至2009年综合营养指数已超过35。结合邳海流域社会经济发展状况分析,这主要是由于流域内活动从20世纪80年代中期开始逐年增加,如农业化肥施肥量的增加、湖泊水产养殖规模化等。另外,由于城市工业生产及城市人口生活废水基本直接通过海河排出而不进入湖泊,因此邳海入湖的点源营养物增加幅度不明显。

基于以上分析,判断该湖泊20世纪50年代初期为基准参照状态阶段,并以该阶段各营养物浓度确定为邳海营养物参照状态值。建议取1951年为参照状态年,则基于该模型由历史反演获得的结果,各营养物参照状态:TP浓度为0.008~0.015 mg/L; TN浓度为0.286~0.323 mg/L; Chl-a浓度为2.140~4.211  $\mu\text{g/L}$ ;透明度(SD)为1.862~2.731 m。

#### 参考文献

- [1] 孟伟,王丽婧,郑丙辉,等. 河口区营养物基准制定方法[J]. 生态学报,2008,28(10):5133-5140.
- [2] 夏青,陈艳卿,刘宪兵. 水质基准与水质标准[M]. 北京:中国标准出版社,2004:1-32.
- [3] GIBSON G, CARLSON R, SIMPSON J. Nutrient criteria technical guidance manual: lakes and reservoirs (EPA-822-B-00-001) [R]. Washington DC: Unites States Environment Protection Agency,2000:12-67.
- [4] 霍守亮,陈奇,席北斗,等. 湖泊营养物基准的制定方法研究进展[J]. 生态环境学报,2009,18(2):743-748.
- [5] 郑丙辉,许秋瑾,周保华,等. 水体营养物及其响应指标基准制定过程中建立参照状态的方法:以典型浅水湖泊太湖为例[J]. 湖泊科学,2009,21(1):21-26.
- [6] HUO S L, ZAN F Y, XI B D, et al. Determining reference conditions for nutrients, chlorophyll a and secchi depth in Yungui Plateau Ecoregion Lakes, China [J/OL]. Water and Environ J, doi:10.1111/j.1747-6593.2011.00292.x.
- [7] GAISER T, RAUMER P A, SCHWARZ H G, et al. Development of a regional model for integrated management of water resources at the basin scale [J]. Physics and Chemistry of the Earth, 2008, 33(1/2):175-182.
- [8] CHOU W S, LEE T C, LIN J Y, et al. Phosphorus load reduction goals for Feitsui Reservoir Watershed, Taiwan [J]. Environ Monit Assess, 2007, 131:395-408.
- [9] 刘永,郭怀成. 湖泊-流域生态系统管理研究[M]. 北京:科学出版社,2008:1-258.
- [10] 张礼兵,金菊良,周玉良,等. 大型湖泊非点源污染负荷预测及控制研究[C]//烟台:2008年中国控制与决策学术年会,2008:5000-5004.
- [11] 王其藩. 系统动力学[M]. 上海:上海科技出版社,1996:1-236.
- [12] 张波,王桥,李顺,等. 基于系统动力学模型的松花江水污染事故水质模拟[J]. 中国环境科学,2007,27(6):811-815.
- [13] 百度百科. 邳海 [EB/OL]. [2011-11-09]. <http://baike.baidu.com/view/68922.htm>.
- [14] 中国气象局,国家气象信息中心. 中国气象科学数据共享服务网 [EB/OL]. [2011-11-09]. <http://cdc.cma.gov.cn/>. ▷