

## 美国 Apopka 湖的富营养化及其生态恢复<sup>\*</sup>

古滨河

(湛江海洋大学, 湛江 524088)

**摘 要:** 本文系统地回顾了美国佛罗里达州大型浅水湖——Apopka 湖富营养化和生态恢复的过程. 流域水文状况的改变, 围湖种植和向湖排放农业污水是 Apopka 湖从“草清型”转变为“藻浊型”湖泊的根本原因. 50 多年来, 尽管内源控制的手段几经改变, 但是, 控制外源营养输入一直是 Apopka 湖整治的主要措施之一. Apopka 湖富营养化的研究主要包括 Apopka 湖原始状态分析, 浮游植物区系, 生长限制因子, 初级生产力, 沉积物的理化特征和再悬浮, 碳、氮、磷蕴藏量和释放率, 富营养化的古湖沼学证据, 外源磷负荷和恢复指标等. 目前, Apopka 湖生态恢复主要采取降低外源磷输入, 通过人工湿地清除湖中悬浮物和颗粒磷, 捕鱼除磷和生物操纵, 种植水生植物和提高水位变动幅度等措施. 最后介绍了围绕 Apopka 湖的富营养化及其恢复的学术争论. 最后, 还讨论了该湖研究和整治一些可能的存在问题和建议.

**关键词:** Apopka 湖; 沉水植物; 富营养化; 总磷; 生态恢复

## Eutrophication and Restoration of Lake Apopka, USA

GU Binhe

(Zhanjiang Ocean University, Zhanjiang 524088, P. R. China)

**Abstract:** This paper provides a literature review on eutrophication and restoration of Lake Apopka, a large, shallow and subtropical lake in Florida, USA. Prior to 1947, Lake Apopka was a clear-water, submerged macrophyte-dominated system with a famous recreation fishery. Hydrologic alteration of the drainage basin and large-scale agricultural development of floodplain has resulted in catastrophic changes in Lake Apopka ecosystem. These changes include excessive phosphorus loading to the lake, massive die-off of the submerged macrophytes and virtual disappearance of the large-mouth bass population. Nowadays, Lake Apopka is a hypereutrophic system dominated by picophytoplankton and rough fish gizzard shad. Approximately 90% of the lake bottom is covered by a layer of 50 cm thick, unconsolidated, flocculent organic materials largely originated from water column production. Measures of Lake Apopka restoration include (1) reduction of external phosphorus loading, (2) removal of phosphorus and other suspended solids from the lake by filtration through the marsh flow-way and by mass removal of gizzard shad, (3) improvement of food-web structure by removing gizzard shad, (4) restoration of habitat through shoreline plantation and (5) increases in water level fluctuation. Major research covers a variety of topics including analysis of past water quality conditions, estimates of external and internal phosphorus loading, setting water quality goal, sediment characterization, resuspension, nutrient inventory and fluxes, paleolimnological evidences for eutrophication, primary productivity, phytoplankton community structure, and limiting nutrients. Recent debates on eutrophication mechanisms and restoration strategies are also presented.

**Keywords:** Lake Apopka; eutrophication; submerged macrophytes; total phosphorus (TP); restoration

近百年来, 由于经济发展, 人口膨胀, 以及对自然资源不合理的开发利用, 全球水体富营养化日益严重. 尤其是湖泊生态系统结构遭到空前的破坏、生态功能萎缩, 营养盐浓度剧增, 蓝藻水华频繁暴发, 大型水生植被锐减, 并造成了巨大的经济损失. 因此, 湖泊富营养化已引起了各国政府的高度重视. 美国和欧洲部分国家对湖泊富营养化发生机制和整治已经作了大量的工作. 本文就美国 Apopka 湖富营养化及其恢复的发展过程, 主要研究结果和围绕 Apopka 湖恢复手段的学术争论作了综述, 希望对国内大型浅水湖泊的研究、治理和恢复起到一点借鉴作用.

<sup>\*</sup> 2004–09–19 收稿; 2004–12–19 收修改稿. 古滨河, 男, 1957 年生, 博士, 客座教授. 通讯地址: 3911 Hamilton Key, West Palm Beach, FL 33411, USA; E-mail: bengu@netzero.com.

表1 Apopka 湖的一些湖沼学特征(1987–2003 平均值)\*  
Tab. 1 Limnological characteristics of Lake Apopka, 1987–2003

平均水深: 1.7 m	pH: 9.1	总氮: 4.8 mg/L
最大水深: 5 m	总碱度: 115 mg/L	溶解无机氮: 76 mg/L
湖水交换时间: 5 a	叶绿素 a: 80 µg/L	总磷: 172 µg/L
透明度: 28 cm	总悬浮物: 73 mg/L	正磷酸盐: 28 µg/L

\* 圣约翰斯河水资源管理局, 未发表数据.

Apopka 湖处于美国佛罗里达州中部 (28°37'N, 81°37'W), 属亚热带气候, 年平均水温 25℃, 湖泊面积 124 km<sup>2</sup>, 主要水源是降雨, 其次是农业排放水和地下泉. 目前, Apopka 湖属超富营养型 (表 1). 浮游蓝藻和滤食性鱼类砂囊鲂 (*Dorosoma cepedianum*) 是该湖动植物区系的优势种类. 然而, 1947 年以前, Apopka 湖是一个清水湖, 水生

植物区系由沉水植物美洲苦草 (*Vallisneria americana*) 和伊利洛斯眼子菜 (*Potamogeton illinoensis*) 组成, 覆盖水面 70% 左右. 大口鲈 (*Micropterus salmoides*) 为主要游钓鱼类, 每年给该湖地区带来百万美元的收入<sup>[1]</sup>.

1 Apopka 湖富营养化和生态恢复过程

1.1 Apopka 湖富营养化的发生

人类活动对 Apopka 湖的影响可以追溯到两个世纪以前. 早在 1844 年, 欧洲开拓者就开始在湖的南岸地带种植蔬菜和柑橘. 1877 年 Beaulclair 运河的开通导致 Apopka 湖水位明显下降. 20 世纪 20 年代, 位于 Apopka 湖旁的污水处理厂和柑橘加工厂开始向湖排放经过初步处理的生活污水和有机物. 1942 年, 当地农民在湖北面围垦了面积达 80 km<sup>2</sup> 的锯草 (*Cladium jamaicense*) 湿地建立农场, 导致 Apopka 湖面积减少了 40%. 由于水位降低, 水下光照条件改善和大量的营养通过农业用水进入 Apopka 湖, 这段时间沉水植物生长茂盛, 覆盖率达 70%, 湖水清澈见底, 大口鲈、鲶鱼和太阳鱼游渔业极其兴旺<sup>[2]</sup>.

据记载, 1947 年 9 月, 一场猛烈的飓风从 Apopka 湖附近经过, 把湖中的大部分沉水植物连根拔起. 一个星期后, Apopka 湖首次发生藻类水华<sup>[3]</sup>. 但是, 最近的研究不支持 Apopka 湖因风力作用突然从沉水植物型湖泊转变为浮游植物型湖泊的观点. 1947 年的飓风中心位于离 Apopka 湖 240 英里以外; 1947 年以前多个热带风暴和飓风在 Apopka 湖附近经过, 并没有对沉水植物造成负面影响<sup>[4]</sup>. 湖水位降低, 围垦种植和农业水排放是造成 Apopka 湖富营养化的根本原因<sup>[4–6]</sup>. 水位下降水中光照条件改善和大量的外源营养输入导致沉水植物生长达到生态极限. 而且, 外源营养输入也刺激了浮游植物和附生藻类生长, 沉水植物因得不到足够的光照而死亡. 由于沉水植物大量死亡, 大口鲈失去了繁殖基质和幼鱼逃避凶猛鱼类的庇护所, 产量大幅度下降, 大口鲈游钓鱼业不复存在. 而作为野杂鱼的砂囊鲂因为没有大口鲈的捕食压力和持续的藻类水华提供大量的食物而迅速增殖. 1947 年, 砂囊鲂占鱼总产量的 20%. 到了 1950 年, 砂囊鲂上升至鱼总产量的 69%. 1956–1957 年间, 砂囊鲂占鱼总产量的 82%, 游钓鱼产量却下降到 18%. 鉴于砂囊鲂繁殖过盛, 1957 至 1959 年 3 年间, 佛罗里达州野生动物和淡水鱼类委员会 (Florida Game and Freshwater Fish Commission) 在 Apopka 湖毒杀砂囊鲂共达 9000 t. 另外, 在 1963 年, 由于气体泄漏, 又导致 1400 t 砂囊鲂死亡. 这些鱼死亡后无人清理, 遗弃在湖里腐烂分解<sup>[1]</sup>.

1.2 政府干预和初步调查

1967 年, Apopka 湖的富营养化引起了佛罗里达州政府的重视. 当年 4 月, 州长指定成立了一个技术委员会评估 Apopka 湖的生态恢复问题. 这个技术委员会包括联邦水污染控制署 (Federal Water Pollution Control Administration, FWPCA) 在内的 16 机构. 1968 年, FWPCA 对 Apopka 湖的沉积物进行了调查, 发现湖底的松散沉积物深达 1.5 m, 含氮 22.5 × 10<sup>4</sup> t 和磷 2000–3000 t<sup>[1]</sup>. FWPCA 强调, 恢复 Apopka 湖必须清除沉积物和控制农业排放水, 工业废水和城市污水的输入. 除了控制外部营养源外, Schneider 和 Little<sup>[7]</sup> 还提出了 6 项改善水质措施: (1) 清除营养丰富的松散沉积物, 提高湖的深度和降低内源营养盐输入; (2) 降低水位, 暴晒, 氧化和压实湖底大部分沉积物; (3) 向湖中投放惰性封闭物质以稳固沉积物; (4) 利用大型水生植物清除水中的溶解营养盐; (5) 收获浮游藻类; (6) 大规模地捕捉野杂鱼.

1970 年, 州政府指定佛罗里达大气和水污染控制委员会 (Florida Air and Water Pollution Control Commission) 负责 Apopka 湖的恢复工作. 这个委员会建议通过干湖来巩固沉积物, 降低营养循环速率, 同时为植物生长提供合适的底质. 然而, 考虑到费用过高 (2 千万美元) 和干湖对农业经济和环境的负面影响等因素, 这

项计划最终没能付诸实施<sup>[1]</sup>. 与此同时,其他研究人员对 Apopka 湖水质和恢复问题也作了研究. 这些研究包括水质和湖沼学调查<sup>[8]</sup>,利用砂囊鲂对藻类进行生物操纵(Biomanipulation)<sup>[9]</sup>和通过在湖中种植和收获凤眼莲来清除湖水中的营养盐<sup>[10]</sup>.

### 1.3 Apopka 湖整治和恢复方案的实施

70 年代末和 80 年代初, Apopka 湖附近的柑橘加工厂和污水处理厂先后停止了向湖里排放有机物和生活污水, 打响了整治 Apopka 湖的第一炮. 1985 – 1987 年间, 佛罗里达州通过了 Apopka 湖法案和地表水改善和管理法案, 要求圣约翰斯河水资源管理局(St. Johns River Water Management District)负责 Apopka 湖的整治工作<sup>[1]</sup>. 圣约翰斯河水资源管理局因此制定了 5 项 Apopka 湖恢复措施<sup>[11]</sup>:

(1) 降低外源磷输入: 这是 Apopka 湖整治方案的核心之一, 耗资巨大. 主要措施是购买湖北岸的农场, 并将其改造成为湿地, 以切断农业径流. 1999 年, 圣约翰斯河水资源管理局购买了面积为 19000 英亩的农场. 其中 2000 英亩业已改造成为湿地<sup>①</sup>.

(2) 建造人工湿地, 过滤湖水中的悬浮物: 这是因为 Apopka 湖 90% 的总磷以颗粒性磷的形式存在. 这项措施一方面除磷, 另一方面提高湖水的透明度. 80 年代末, 圣约翰斯河水资源管理局在湖的北面建造了一块面积为 2 km<sup>2</sup> 的试验湿地, 试图利用湿地除去 Apopka 湖中的悬浮物<sup>[11]</sup>. 经过过滤的湖水再排回湖中. 其运行指标和 29 个月的运行结果归纳如下: 水负荷率 6.5 – 65 m/a; 平均水停留时间 7 d; 流入水总悬浮物浓度 40 – 180 mg/L, 总磷 80 – 380 μg/L, 总氮 3 – 9 mg/L; 去除效果: 总悬浮物为 89% – 99%, 总磷为 30% – 67%, 总氮为 30% – 52%<sup>[11]</sup>.

(3) 捕获砂囊鲂和生物操纵: 目前, 砂囊鲂占 Apopka 湖鱼产量的 90%, 此鱼对 Apopka 湖的生态恢复有许多负面影响: (a) 砂囊鲂在湖底摄食时搅动表层沉积物, 从而降低湖水的透明度; (b) 未消化的食物随粪便排出加速有机物分解; (c) 摄食浮游动物, 间接帮助藻类生长. 因此, 捕捞砂囊鲂有多方面的积极作用: (a) 可以从湖中除去一部分有机磷. 1993 – 2003 年期间, 圣约翰斯河水资源管理局总共捕获砂囊鲂 4000 t, 折合除磷 260 t, 除氮 880 t<sup>①</sup>; (b) 改善湖水透明度; (c) 降低营养循环; 和 (d) 减轻鱼类对浮游动物的摄食压力, 浮游动物的增殖可以降低藻类生物量.

(4) 种植水生植物: 近年来圣约翰斯河水资源管理局多次在湖的浅水区种植了 6 种本地水生植物. 另外, 1995 年以来, 已发现非人工种植的美洲苦草在 20 多块浅水区出现<sup>①</sup>.

(5) 提高水位变动幅度: 水位变动是自然生态系统的标志之一. 干旱期的低水位可以帮助巩固沿岸带沉积物, 为埋在沉积物里的植物种子提供萌芽机会. 近年来圣约翰斯河水资源管理局利用干旱期在沿岸带种植多种水生植物. 同时, 高水位有利于水生植物生长, 饵料生物增殖和鱼类摄食繁殖.

通过以上措施, 近年来 Apopka 湖水质有了明显的改善. 比较 1987 – 1995 年(恢复前)和 1995 – 2003 年(恢复期)两个阶段, 总磷从 217 μg/L 下降到 153 μg/L, 叶绿素 a 浓度从 100 μg/L 下降到 71 μg/L, 总悬浮物从 93 mg/L 下降到 66 mg/L, 这些指标均下降了 29%. 透明度平均增加了 3 cm, 总氮也有所下降<sup>①</sup>. 据统计, 历年来美国联邦政府、佛罗里达州政府、Apopka 湖所在县和圣约翰斯河水资源管理局总共为 Apopka 湖整治投入了  $1.46 \times 10^8$  美元, 大部分资金用于购买农场, 其余用于研究和项目实施<sup>①</sup>.

## 2 Apopka 湖富营养化研究的主要领域

近 20 年来, 圣约翰斯河水资源管理局和佛罗里达大学有关研究人员围绕 Apopka 湖的富营养化机制和恢复措施进行了全方位的研究, 以便制定水质指标和有效的恢复措施. 现将主要研究成果介绍如下.

### 2.1 Apopka 湖原始状态(Pristine Condition)的研究

生态恢复可定义为使生态系统返回或接近遭受破坏前的状态. 确立生态恢复指标必须了解生态系统过去的状态. 显而易见, 了解湖泊过去的状态可以避免把恢复指标定得过高或过低. 佛罗里达州地表水营养和透明度标准是自然值和自然背景值. Lowe 等<sup>[4]</sup>根据参考湖泊目前数据, 各种经验模型和质量平衡模型推算的 Apopka 湖原始状态的一些参数(表 2), 结果表明, Apopka 湖原非富营养型湖泊, 目前总磷和叶绿素浓

① 圣约翰斯河水资源管理局, 未发表资料.

度分别是原始状态平均值的数倍之多.

表 2 不同方法估算的 Apopka 湖原始状态的营养类型. 参考湖和经验模型的数值(范围)为最可能数值<sup>[4]</sup>

Tab. 2 Estimated pristine conditions of Lake Apopka<sup>[4]</sup>

方法	总磷浓度(μg/L)	叶绿素浓度(μg/L)	透明度(m)
1. 参考湖	46(11 - 76)	8(3 - 25)	1.39(2.87 - 0.60)
2. 经验模型	32(8 - 77)	18(2 - 75)	1.00(2.09 - 0.66)
3. 质量平衡和经验模型	51	38	0.76

2.2 浮游植物区系

Apopka 湖的浮游植物区系主要由超微型浮游蓝藻组成,生物量占浮游植物总量的 90% 以上<sup>[12]</sup>. 微囊藻等群体藻类生物量比较低,这可能与砂囊鲃的大量滤食有关. 同时, Apopka 湖湖底存在着大量的处于休眠状态的阶段性浮游植物,主要由硅藻组成(61%). 这些藻类在湖底形成了一个厚约 5 cm 的群落,其叶绿素 a 浓度和初级生产力分别是水层的 50 倍和 4 倍. 这些阶段性浮游植物在适合的光照条件下能够正常生长,光合作用率与水层的浮游植物相当<sup>[12]</sup>.

2.3 限制元素和浮游植物对氮和磷的吸收

研究表明, Apopka 湖水层总磷过剩,氮是浮游植物的主要限制性营养元素. Aldridge 等<sup>[13]</sup>用营养添加生物测定(Nutrient Enrichment Bioassay)证明,在实验中添加磷不能刺激浮游植物生长. 但是,浮游植物对添加氮有显著反应. 他们认为, Apopka 湖浮游植物生长受氮元素限制是长期以来该湖接受大量磷输入的结果. Carrick 等<sup>[14]</sup>把经过浓缩的浮游植物放在各种浓度的培养液中培养. 在没有稀释的 Apopka 湖湖水添加氮可以明显地刺激浮游植物生长. 在除去 30% - 60% 悬浮物的湖水中,浮游植物生长受磷限制. 由于 Apopka 湖大部分磷以颗粒存在,降低湖中的悬浮物可以改善水质. Newman 等<sup>[15]</sup>通过测定浮游植物对营养添加的反应,碱性磷酸酶活性(APA)和细胞内热水可提取磷(HEP)等实验证明, Apopka 湖浮游植物受氮限制. 在培养过程中还出现了氮和磷共同限制. 浮游植物生长首先吸收水中的溶解磷酸盐(SRP),然后把多余的 SRP 转化成聚合磷储藏起来,当水中的 SRP 用完后,浮游植物开始利用细胞内的聚合磷. 当聚合磷耗尽后,浮游植物分泌磷酸酶,通过水解有机磷(HESP)来满足本身对营养的需求.

2.4 Apopka 湖初级生产力和碳收支平衡

Apopka 湖是富营养湖泊,藻类现存量和初级生产力都很高. 据 Gale 和 Reddy 报道<sup>[16]</sup>, Apopka 湖浮游植物毛初级生产力为 1400 g/(m<sup>2</sup> · a),净初级生产力为 200 g/(m<sup>2</sup> · a). 有机物沉积率为 118 g/(m<sup>2</sup> · a). 大气 CO<sub>2</sub>溶入是 Apopka 湖水柱的主要碳源(42%),其次为沉积物的厌氧分解(21%)和农业用水输入(25%). 有机物沉积(>90%)是最大的输出<sup>[17]</sup>.

Bachmann 等<sup>[18]</sup>利用前人的研究数据和他们在 Apopka 湖测定的溶解氧昼夜变化数据,对该湖氧的生产和消耗进行了计算. 他们的结果表明, Apopka 湖氧的消耗大于生产,所以该湖是异养型(Heterotrophy)湖泊. 同时, Bachmann 等对 Apopka 湖有机物的输入和输出也作了计算,发现有机物收支基本平衡. 由此认为微生物分解所依赖的有机物来源于沉积物,并认为 Apopka 湖没有沉积物积累,只有消耗. 然而, Schelske 等<sup>[19]</sup>最近发表了他们在 1992 年对 Apopka 湖的初级生产力测定的结果: Apopka 湖的日净初级生产力高达 1 - 2 g/(m<sup>2</sup> · d). 笔者等<sup>[17]</sup>对 Apopka 湖的 CO<sub>2</sub>通量进行了计算,发现 Apopka 湖自由 CO<sub>2</sub>分压大大低于大气的 CO<sub>2</sub>分压,1994 - 1995 年从大气溶解到 Apopka 湖的 CO<sub>2</sub>达 108 g/(m<sup>2</sup> · a).

2.5 Apopka 湖沉积物结构,碳氮磷蕴藏量,沉积率和分解率的研究

Apopka 湖沉积物上层 50 cm 非常松垮,上层 5 cm 间隙率为 98.5%, 5 - 50 cm 为 95%, 50 cm 以下为 90% - 92%,松垮沉积物覆盖了 90% 的湖底面积<sup>[20,21]</sup>. 沉积物有机物含量高达 65%, 据估算,1946 - 1995 年 50 年间沉积物的总磷蕴藏量为 2250 t,有机物为 140000 t<sup>[21]</sup>. 在过去的 20 年里,沉积物以每年 1.15 cm 的速度增加. 碳,氮和磷的沉积率分别为 91,7.1 和 2.9 g/(m<sup>2</sup> · a). 在有氧条件下,沉积物有机物年分解率为 25%. 在无氧条件下,有机物年分解率为 8.6%<sup>[22]</sup>.

2.6 Apopka 湖富营养化的古湖沼学证据

湖泊沉积物的主要生物地球化学组份往往记录了湖泊水层和流域的生物和化学过程. 研究这些组份在

沉积物里的时空变化可以了解湖泊的历史,例如营养状态的变化等.对 Apopka 湖沉积物的研究为了解该湖的富营养化机制和生态恢复提供了有力的证据.对沉积物的硅藻和甲壳动物残骸种类组成和数量分布分析表明,底栖藻类和底栖甲壳动物在沉水植物期间大量出现,其数量随着沉水植物的消失而下降.而在富营养化期间,浮游生物群落占绝对优势<sup>[23,24]</sup>.

Apopka 湖富营养化最直接的证据是沉积物总磷浓度的时间变化.沉积物总磷浓度沿岩芯上升,证明输入到 Apopka 湖的营养物随时间增加<sup>[23]</sup>.沉积物总磷浓度从沉水植物期间的 0.5 mg/g 上升至浮游植物期间的 1.3 mg/g<sup>[17]</sup>,但总磷浓度的增加开始于浮游植物成为优势群落之前,表明最初磷输入的增加并没有导致藻类水华,而是促进了沉水植物生长.

Kenney 等<sup>[25]</sup>用沉积物中聚合磷浓度的变化验证了 Apopka 湖的富营养化过程.如上所述,浮游植物在水中磷浓度高时能够在细胞内储藏聚合磷,以备后用.沉积物中的聚合磷浓度随时间次序增加,表明 Apopka 湖磷负荷不断加大并且超出浮游植物的需求,聚合磷/总磷比值的上升也说明了 Apopka 湖从磷限制转变为氮限制.

沉积物的 C/N 比值也是 Apopka 湖从沉水植物向浮游植物转型的有力证据.沉水植物由于拥有大量的支持结构,含 C 量高,所以其 C/N 比值远远高于浮游植物. Apopka 湖沉积物的 C/N 比值在沉水植物时期为 13,40 年代末和 50 年代初, C/N 比呈上升趋势,沉积物顶部的 C/N 比值下降到 10,表明这阶段浮游植物占绝对优势,为沉积物的主要有机碳源<sup>[17,23]</sup>.

稳定同位素技术是追踪物质来源和去向的有力工具,因为来源不同的有机物往往拥有不同的碳稳定同位素天然丰度( $\delta^{13}\text{C}$ ).此外,植物的  $\delta^{13}\text{C}$  值与其光合作用强度有关. Apopka 湖沉积物的  $\delta^{13}\text{C}$  值 50 年代前后有明显区别,这是沉水植物和浮游植物利用两个  $\delta^{13}\text{C}$  值不同的碳源和具有不同的同位素分差所致.浮游植物时期沉积物的  $\delta^{13}\text{C}$  值随时间而上升,表明 Apopka 湖生产力逐步增加,富营养化程度加剧<sup>[17]</sup>.

## 2.7 风力作用对沉积物再悬浮的影响

风力作用对大型浅水湖泊水层的生物物理和化学状态有重大影响. Bachmann 等<sup>[26]</sup>用湖泊的动力比(Dynamic Ratio,为湖面积( $\text{km}^2$ )的平方根除以平均湖深(m))对包括 Apopka 湖在内的 36 个佛罗里达浅水湖泊的面积、深度、风浪引起的水运动和沉积物悬浮,水质变化之间的关系进行了分析.当某湖的动力比大于 0.8 时,整个湖的沉积物都有可能受制于波浪骚动. Apopka 湖的动力比高达 6.96,每年 70% 的时段有 50% 的沉积物受风力骚动而悬浮. Apopka 湖沉积物的再悬浮是湖水层主要有机碳来源<sup>[16]</sup>.研究发现, Apopka 湖水层的叶绿素 a 浓度季节变化主要受风力影响.休眠在湖底的阶段性浮游植物在风力作用下悬浮是水层叶绿素 a 浓度变化的主要原因<sup>[12]</sup>.阶段性浮游植物受风力的影响而悬浮能够影响水层的叶绿素 a 浓度,浮游植物种类组成,湖水的透明度和初级生产力,这可能是富营养化浅水湖泊的普遍现象<sup>[12]</sup>.

## 2.8 Apopka 湖的磷负荷和恢复目标

上世纪 40 年代, Apopka 湖北岸约 80  $\text{km}^2$  的湿地被围垦用于农业生产.过量的使用化肥成为主要的磷的来源.加上污水处理厂和柑橘加工厂向湖中排放处理过的生活污水和有机物,农业水的排放占 Apopka 湖总磷输入的 85% (相当于 0.42  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ),其它点源占 <4% (约 0.06  $\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ ),非点源占 12%.农业水排放输入的总磷是 Apopka 湖原始状态的 7 倍<sup>[27]</sup>.

总磷输入或磷负荷的估算证明农业用水是 Apopka 湖的主要磷源. Brezonik 等<sup>[8]</sup>认为,农业排放总磷的输入在 36880–51000  $\text{kg/a}$  之间.圣约翰斯河水资源管理局<sup>①</sup>计算结果为 53.08  $\text{kg/a}$ .然而,1947 年以前(湖泊转型前) Apopka 湖的总磷负荷比较低. Battoe 等<sup>[27]</sup>根据一个土地使用模型估算出总磷负荷为 14700  $\text{kg/a}$ <sup>[27]</sup>. Canfield 等<sup>[28]</sup>利用 Schelske<sup>[21]</sup>的  $^{210}\text{Pb}$  和沉积物总磷含量数据推算出 Apopka 湖原始状态磷负荷为 14000  $\text{kg/a}$ ,这与他们根据原始状态湖水总磷浓度(20  $\mu\text{g/L}$ )和排水总磷损失率(1300  $\text{kg/a}$ )推算出的磷负荷(15000  $\text{kg/a}$ )和 Battoe 等<sup>[27]</sup>的结果非常接近.

Apopka 湖的恢复目标是通过降低藻类现存量,提高水体透明度,给沉水植物生长提供足够的光照.为

① Stites D, Coveney M, Battoe L, et al. An external phosphorus budget for Lake Apopka. Draft Technical Memorandum. St. Johns River Water Management District. Palatka, 1997: 85.

了实现这个目标,首先必须降低总磷浓度,因为佛罗里达湖泊叶绿素 a 浓度,总磷浓度,水的消光系数和透明度密切相关<sup>[29]</sup>. 回归分析表明,当总磷浓度下降为 55  $\mu\text{g/L}$  时,叶绿素 a 浓度为 28  $\mu\text{g/L}$ ,湖底光密度仅为湖面的 1%. 沉水植物能够在此光照条件下正常生长. Schelske 等<sup>[23]</sup> 根据 Lambert-Beers 消光定律推算出湖底光密度达到 3% 和 1% 的湖底面积为 82% - 28%. 即使沉水植物生长要求 3% 的光照,具有 3% 光照的湖底面积也有 35  $\text{km}^2$ .

### 3 围绕 Apopka 湖恢复的学术争论

佛罗里达大学 Bachmann 等<sup>[30]</sup> 和 Canfield 等<sup>[28]</sup> 对圣约翰斯河水资源管理局采用降低磷的输入来降低藻类水华,提高水透明度,最终达到恢复沉水植物和大口鲈渔业的恢复方案提出了质疑. 他们认为:(1)降低外源磷输入不能降低内部磷输入和水中磷的浓度(含磷丰富的沉积物不断在风力作用下转化成悬浮物);(2)即使水中磷的浓度可以降低,藻类生物量下降,透明度也不会改善(悬浮物主要由沉积物组成,沉积物不断受风力作用而悬浮,用过滤湿地清除 75 cm 沉积物需要 500 年时间);(3)即使透明度能够改善,沉水植物区系也不能重建(松垮的沉积物底质不能支持沉水植物生长).

圣约翰斯河水资源管理局,南佛罗里达水资源管理局和佛罗里达大学多位科研人员对 Bachmann 等人的观点进行了反驳<sup>[31]</sup>,他们的主要观点是:(1)在切断外源磷供给后,高内源磷输入最多维持 5 年.(2)降低磷输入可以降低叶绿素 a 浓度,在近期内显著地改善水透明度(悬浮物由浮游生物及其碎屑和其它沉积物组成).(3)沿岸带已出现多个沉水植物群落.

对于 Lowe 等的反驳,Bachmann 等<sup>[32]</sup> 在同期的《Hydrobiologia》上进行了答复. 他们认为,沿岸带具有硬底质,适合沉水植物生长. 但这些沉水植物群落只占整个湖面积的 0.02%,而占湖面积 90% 的松垮湖底并没有沉水植物出现. 同时,Apopka 湖磷的年负荷和湖水的总磷浓度没有相关关系,叶绿素 a 和其它水质因子的变化并没有随磷年负荷的变化而变化. 最近的水质改善可能是捕捞底栖鱼类的结果或者是水质的正常波动. 他们认为,沉水植物不能在松垮湖底生长. 由于 Apopka 湖水浅,沉积物在风浪作用下频繁悬浮,不消除所有的沉积物透明度无法改善. 而且,目前的过滤湿地效率太低. 退一步来说,即使没有松垮的沉积物,目前总磷降低指标(55  $\mu\text{g/L}$ )对恢复沉水植物区系也是太高了.

20 世纪 80 年代初,有人提出 Apopka 湖的中心问题不是化学(营养)问题,而是生物问题. Apopka 湖的治理必须直接从恢复沉水植物入手<sup>[2]</sup>. Canfield 等<sup>[28]</sup> 认为, Apopka 湖治理的最终目标是恢复大口鲈渔业,而不是改善水质. 目前,大口鲈种群数量极低,主要原因是幼鱼没有了象沉水植物那样的庇护所躲避捕食者的攻击. 但是,高浮游植物生物量对大口鲈的生长并没有直接影响<sup>[33]</sup>. 为此, Canfield 等<sup>[28]</sup> 提出如下以恢复大口鲈渔业为中心的 Apopka 湖治理建议:(1)在沿岸带投放人工鱼礁(碎石和旧轮胎等),用作大口鲈幼鱼的庇护所,成鱼的产卵场所和饵料生物栖息地. 在人工鱼礁内可以种植沉水植物.(2)在原来的农场建造一个大口鲈苗种场,每年生产 10 万尾 10 cm 的大口鲈鱼种. 这些鱼种在投放到 Apopka 湖 2 年后可以达到性成熟,预计 5 年内大口鲈可以形成一个相当的种群,10 年内种群可以自我维持,苗种场可以停止生产.

### 4 存在问题和建议

Apopka 湖富营养化已经持续了将近 60 年,围绕该湖富营养化发生机制、生态学和生物地球化学多年来进行了一系列的基础研究,取得了多项成果. 在治理方面也作了许多探讨和实践,为大型浅水湖泊富营养化的研究和恢复积累了许多的经验. 笔者在此针对过去的工作可能存在的问题和今后的治理工作提出几点看法:

(1) Apopka 湖整治的最终目的是恢复游钓渔业,主要整治手段是降低营养和浮游植物,以提高水的透明度,为沉水植物生长提供条件. 沉水植物生长又为大口鲈种群恢复提供产卵基质和幼鱼庇护所. 但是,有些学者对恢复游钓渔业是否必须非要经过降低营养和浮游植物这一环节提出了质疑. 向湖里投放大规模鱼种和人工鱼礁也许可以重建大口鲈种群. 这个设想可以在小型富营养浅水湖泊进行验证.

(2) 沉水植物的生长和群落的形成除了需要营养和光照以外,湖底底质结构也非常重要,尤其是像 Apopka 湖这样的大型浅水湖泊更是如此. 遗憾的是,沉水植物(美洲苦草和伊利洛斯基眼子菜等)在松垮底质的

生长试验都没有进行过. Apopka 湖营养降低后是否沉水植物就可以生长起来还是一个未知数. 建议开展沉水植物在松垮底质的生长试验.

(3)目前的过滤湿地是用于清除水中的悬浮物,以达到除磷和提高透明度的目的. 由于沉积物受风力影响而不断悬浮,过滤湿地的作用还不甚明了. 因此,应该加强对沉积物悬浮机制的研究,此外,应该考虑直接抽取松垮沉积物,即便是清除一个湖区的松垮沉积物,也可以为部分湖区沉水植物提供良好的生长条件.

## 5 结语

Apopka 湖受人类活动的影响已达 100 多年,从沉水植物型湖泊转变成浮游植物型湖泊也将近 60 年,对 Apopka 湖富营养化的研究和恢复已经进行了 40 年. 但是,大量的研究和资金投入是近 20 年来的事情. 尽管对 Apopka 湖富营养化的原因和恢复手段存在不同看法, Apopka 湖长期接受高浓度的磷输入是不争的事实. 水质分析和生物地球化学证据表明, Apopka 湖的浮游植物,水层和沉积物都有过量的磷储存. 恢复沉水植物和大口鲈渔业是普遍的共识. Apopka 湖实施 5 大恢复措施已经将近 10 年,水质有明显的改善. 但是,水生植物的重现仅限于沿岸带. 由于 90% 的湖底被松垮沉积物所覆盖,水透明度改善后也不能保证沉水植物能够在敞水区扎根生长. 目前和今后的工作重点应该放在研究在松垮湖底种植沉水植物的技术和建立一个可以自我维持的大口鲈渔业. 采取投放人工鱼礁、建造防波堤和放养大规模大口鲈鱼种等辅助措施也许能够加快沉水植物和大口鲈渔业的恢复.

致谢 圣约翰斯河水资源管理局提供部分水质数据,缪世利博士审阅本文初稿并提出许多宝贵意见,在此一并表示感谢.

## 6 参考文献

- [1] Schelske C L & Brezonik P. Restoration Case Studies. Can Lake Apopka be restored? In: Restoration of Aquatic Ecosystems; Science, Technology, and Public Policy. Report of Committee on Restoration of Aquatic Ecosystems. Washington: National Research Council. National Academy Press, 1992: 393 – 398.
- [2] Shofner J H. History of Apopka and northwest Orange County, Florida. Apopka Historical Society. Tallahassee; Rose Printing Co, 1982: 357.
- [3] Clugston J P. Lake Apopka, Florida: A changing lakes and its vegetation. *Q J Fla Acad Sci*, 1963, **26**: 168 – 174.
- [4] Lowe E F, Battoe L E, Coveney M, *et al.* Setting water quality goals for restoration of Lake Apopka: Inferring past conditions. *J Lake and Reserv Manage*, 1999, **15**: 103 – 120.
- [5] Schelske C L, Coveney M F, Lowe E F, *et al.* Abrupt biological response to hydrologic and land-use changes in Lake Apopka, Florida(USA). *AMBIO*, 2005( in press)
- [6] Schelske C L, Coveney M F, Aldridge F J, *et al.* Wind or nutrients; historic development of hypereutrophy in Lake Apopka, Florida. *Arch Hydrobiol Special Issues Advances in Limnology*, 2000, **55**: 543 – 563
- [7] Schneider R F, Little J A. Rise and fall of Lake Apopka: A case study in reservoir mismanagement. In: Ackerman W C ed, Man-Made Lakes: Their Problems and Environmental Effects. Washington: American Geophysical Union, 1973: 690 – 694.
- [8] Brezonik P L, Pollman C D, Crisman T C, *et al.* Limnological and water quality studies on Lake Apopka and downstream lakes in the Upper Oklawaha River Basin. Historical trends and current status. Report. No. Env – 07 – 78 – 01. Department of Environmental Engineering Science, University of Florida, Gainesville, 1978: 283.
- [9] Crisman T L, Kennedy H M. The role of gizzard shad (*Dorosomacepedianum*) in eutrophic Florida lakes. Pub No. 64, Water Resources Research Center, University of Florida, Gainesville. 1982: 83.
- [10] Amasek Inc. A Practical Concept for the Restoration of Lake Apopka. Cocoa, Fla: Amasek Inc, 1985: 38.
- [11] Coveney M F, Stites D L, Lowe E F, *et al.* Nutrient removal from eutrophic lake water by wetland filtration. *Ecol Eng*, 2002, **19**: 141 – 159.
- [12] Carrick H J, Aldridge F J, Schelske C L. Wind influences phytoplankton biomass and composition in a shallow, productive lake. *Limnol Oceanogr*, 1993, **38**: 1179 – 1192.
- [13] Aldridge F J, Schelske C L, Carrick H J. Nutrient limitation in a hypereutrophic Florida lake. *Arch Hydrobiol*, 1993, **127**: 21 – 37.

- [14] Carrick H J, Schelske C L, Aldridge F J. Assessment of phytoplankton nutrient limitation in productive waters: application of dilution bioassays. *Can J Fish Aquat Sci*, 1993, **50**: 2208 – 2221.
- [15] Newman S, Aldridge F J, Philips E J, *et al.* Assessment of phosphorus availability for natural phytoplankton populations from a hypereutrophic lake. *Arch Hydrobiol*, 1994, **130**: 409 – 427.
- [16] Gale P M, Reddy K R. Carbon flux between sediment and water column of a shallow, subtropical, hypereutrophic lake. *J Environ Qual*, 1994, **23**: 965 – 972.
- [17] Gu B, Schelske C L, Hodell D H. Extreme  $^{13}\text{C}$  enrichments in a hypereutrophic lake: Implications for carbon cycling. *Limnol Oceanogr*, 2004, **49**: 1152 – 1159.
- [18] Bachmann R W, Hoyer M V, Canfield Jr D E. Internal heterotrophy following the switch from macrophytes to algae in Lake Apopka. *Hydrobiologia*, 2000, **418**: 217 – 227.
- [19] Schelske C L, Coveney M F, Aldridge F J, *et al.* Phytoplankton community photosynthesis and primary production in a hypereutrophic lake, Lake Apopka, Florida. *Arch Hydrobiol*, 2003, **157**: 145 – 172.
- [20] Reddy K R & Graetz D A. Internal nutrient budget for Lake Apopka. Final Report on Project No. 15 – 150 – 01 – 43 – 213 – SWIM. St. Johns River Water Management District, Palatka, Florida, 1991.
- [21] Schelske C L. Sediment and phosphorus deposition in Lake Apopka. Special Pub. SJ97 – SP21 of the St. Johns River Water Management District, Palatka, 1997: 97.
- [22] Gale P M, Reddy K R, Graetz D A. Mineralization of sediment organic matter under anoxic conditions. *J Environ Qual*, 1992; **21**: 394 – 400.
- [23] Schelske C L, Donar C M, Stoermer E F. A test of paleolimnologic proxies for the planktonic/benthic ratio of microfossil diatoms in Lake Apopka. In: Mayams I & Koizumi eds, 14th Diatom Symposium 1996. Kownigstein: Koelz Scientific Books, 1999: 367 – 382.
- [24] Shumate B C, Schelske C L, Chrisman T L, *et al.* Response of the cladoceran community to trophic state change in Lake Apopka, Florida. *J Paleolimno*, 2002, **27**: 71 – 77.
- [25] Kenney W F, Schelske C L, Chapman A D. Changes in polyphosphate sedimentation: a response to excessive phosphorus enrichment in a hypereutrophic lake. *Can J Fish Aquat Sci*, 2001, **58**: 879 – 887.
- [26] Bachmann R W, Hoyer M V, Canfield Jr D E. The potential for wave disturbance in shallow Florida lakes. *J Lake and Reserv Manage*, 2000, **16**: 281 – 291.
- [27] Battoe L E, Coveney M F, Lowe E F, *et al.* The role of phosphorus reduction and export in the restoration of Lake Apopka, Florida. In: Reddy K R, O'Connor G A, Schelske C L eds, Phosphorus Biogeochemistry of Subtropical Ecosystems. Boca Raton: Lewis Publishers, 1999: 511 – 526.
- [28] Canfield D E Jr, Bachmann R W, Hoyer M V. A management alternative for Lake Apopka. *Lake and Reserv Manage*, 2000, **16**: 205 – 221.
- [29] Brown C D, Hoyer M V, Bachmann R W, *et al.* Nutrient-chlorophyll relationships: an evaluation of empirical nutrient-chlorophyll models using Florida and north temperate lakes data. *Can J Fish Aquat Sci*, 2000, **57**: 1574 – 1583.
- [30] Bachmann R W, Hoyer M V, Canfield Jr D E. The restoration of Lake Apopka in relation to alternative stable states. *Hydrobiologia*, 1999, **394**: 219 – 232.
- [31] Lowe E F, Battoe L E, Coveney M, *et al.* The restoration of Lake Apopka in relation to alternative stable states: an alternative view to that of Bachmann *et al.* (1999). *Hydrobiologia*, 2001, **448**: 11 – 18.
- [32] Bachmann R W, Hoyer M V, Canfield Jr D E. Evaluation of recent limnological changes at Lake Apopka. *Hydrobiologia*, 2001, **448**: 19 – 26.
- [33] Bachmann R W, Jones B L, Fox D D, *et al.* Relations between trophic state indicators and fish in Florida (U. S. A.) lakes. *Can J Fish Aquat Sci*, 1996, **53**: 842 – 855.