

埃及 Burullus 潟湖沉积生源要素变化: 百年来人类活动影响

麻福伟¹, 李茂田¹, 刘演¹, 赵小双¹, 陈中原¹, Alaa Salem², Abu Shama A.M.²,
Mohamed M. Elhossainy²

1. 华东师范大学河口海岸学国家重点实验室, 上海 200062

2. Geological Sciences Department, Kafrelsheikh University, Kafrelsheikh 33516, Egypt

摘要 Burullus 是尼罗河河口高封闭性潟湖, 其生源要素主要来源于尼罗河, 是研究 Aswan 大坝建成以来流域变化如何影响河口湖泊环境的最佳区域。研究通过对 Burullus 潟湖 B1 岩芯的 ²¹⁰Pb 测年、粒度、以及 TOC、TN、TP、BSi 生源要素的测试分析, 结合历史资料, 试图揭示 Aswan 建坝前后河口湖泊营养盐的差异变化, 以及这些变化对生态环境的影响。结果表明: 1) 沉积物中 TOC、TN 和 TP 含量自下而上总体增加, 表明尽管 Aswan 大坝导致营养盐通量急剧减少, 但由于下游人类排放 N、P 通量大大增加, 导致下游湖泊 N、P 浓度并没减少; 且沉积 TN/TP 均小于 16, 表明湖泊仍为 P 限制。2) 但 BSi 和 BSi/TOC 自下而上总体呈减少趋势, 表明 Aswan 大坝引起的水沙减少导致湖泊中硅藻的生物量及其总初级生产力占比都在减少, 潟湖水体生态环境将趋于恶化。

关键词 营养盐; 人类活动; Aswan 大坝; Burullus 潟湖

第一作者简介 麻福伟, 男, 1991 年出生, 硕士研究生, 自然地理学, E-mail: echo2018geo@126.com

通信作者 李茂田, 男, 副教授, E-mail: mtli@sklec.ecnu.edu.cn

中图分类号 P512.2 **文献标志码** A

0 引言

源自河流的陆源物质通量和比例变化对河口和近海生态环境的影响一直是全球变化的研究热点之一^[1]。氮(Nitrogen, N)、磷(Phosphorus, P)和硅(Silicon, Si)等营养盐是河口和海洋生态系统中所必须的生源要素^[2], 而河流输入是其最主要的来源。但近百年来流域水坝建设产生的过滤器效应对入海生源物质输送的干扰日益强烈^[3], 如: 三峡工程蓄水后, 长江口溶解硅(Dissolved silicon, DSi)含量降低约 63.37%^[4]; 铁门大坝建成后, 多瑙河向黑海输入的 DSi 通量减少 80%^[5]; 塞纳河上游 3 个水库截留了上游的 40% N、50% Si 和 60% P^[6]。另外, 尽管水库的过滤器效应滞留了大量的 N、P, 但流域内尤其是大坝下游农业施肥和生活污水排放量的急剧增加, 导致很多流域中下游 N、P 通量不但没有减少, 反而呈现迅速增加趋势。如近 60 年来长江入海 N、P 通量增加了 5~6 倍,

导致河口及近海水体日益富营养化, 赤潮灾害不断增加^[7-9]。

这种水库滞留效应带来的水沙和营养盐通量减少, 以及流域人类排放引起的营养盐通量增加, 导致了营养盐通量和比例的急剧变化, 深刻改变了下游及河口近海营养盐浓度水平及自然结构, 引起生态环境变异和脆弱性增加, 严重危及区域资源与环境的可持续发展^[3, 10-12]。因此, 研究水库化及人类排放对流域—河口资源与环境的影响及其机制, 成为国内外研究和迫切需要解决的科学问题之一。当前大部分的研究普遍关注流域入海物质通量变化对流域—河口的影响特征^[13-14], 但是入海物质通量变化是水库化和人类排放的共同结果, 这种变化因流域不同而差异较大, 如何甄别水库化和人类排放分别对流域—河口生态环境的影响和机制, 是当前流域—河口环境变化研究的难点。

收稿日期: 2019-06-17; 收修改稿日期: 2019-12-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671007, 41501005); 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2017YFE0107400)[Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41671007, 41501005; National Key Basic Research Program of China (973 Program), No.2017YFE0107400]

沉积物及其环境指标是实现甄别流域—河口生态环境之间响应关系的重要载体,其中较为常用的环境指标有总有机碳(Total organic carbon, TOC)、总氮(Total nitrogen, TN)、总磷(Total phosphorus, TP)、生物硅(Biogenic silica, BSi)等^[15]。这四个指标本质上是上层水体浮游藻类(初级生产力)死亡后的沉积记录,TOC记录了水体中所有藻类的生产量,BSi则主要记录水体中硅质浮游生物如硅藻的生产量^[16-17]。沉积物中TOC、TN和TP的含量主要取决于上层水体中N、P营养盐浓度,水体中N、P浓度的变化既受到流域水库化的影响,也会受到人类排放的影响^[18]。而沉积物中BSi含量主要取决于上层水体中DSi含量,水体中DSi含量变化则与流域水库化导致的泥沙变化密切相关^[3]。上述这四个指标及其比值的变化是当前甄别水库化和人类排放影响的主要技术手段。

Burullus是尼罗河河口高封闭性潟湖。潟湖总面积约420 km²,其中370 km²为开阔水域^[9]。水深0.5~2.5 m,西部较深,东北部靠近出海口较浅^[20]。湖水盐度为2.1‰~17.2‰^[21]。底部沉积物以有机质含量高的粉砂质黏土为主,多见贝壳及碎片^[22]。湖水与小岛之间生物群落交错,以芦苇分布最为明显。西侧通过Brimbal运河和尼罗河连通,南部和东部通过8条排水管接受周边农业、生活废水^[23],东北侧通过Boughaz通道与地中海连接。潟湖营养盐主要来源于尼罗河,但1965年Aswan大坝建成后,尼罗河水、沙和DSi通量分别减少了90%^[24]、98%^[25]、95%^[26];与此同时,潟湖周边农业和生活废水排放量却大大增加^[21,27],这两种变化可能导致潟湖营养盐比例和结构的失衡,并进而影响潟湖的生态环境。因此Burullus潟湖是甄别水库化和人类排放分别对河口生态环境影响的最佳区域。

本文利用Burullus潟湖一根浅层沉积柱的粒度、TOC、TN、TP和BSi指标,并结合²¹⁰Pb测年构建的年代学框架,来研究Aswan建坝前后营养盐含量的变化过程,并进一步揭示变化背后的人为影响因素。

1 资料与方法

1.1 样品采集

2017年10月在埃及Burullus潟湖B1点(31°26' N, 30°43' E)(水深约1.2 m)利用重力活塞取样管采集一根长85 cm的柱样(图1),柱样在Kafresheikh大学地学院实验室按1 cm间距进行分样后,装入自封袋

冷藏保存。随后,样品带回华东师范大学河口海岸科学研究院冷藏备用。

1.2 样品分析与方法

²¹⁰Pb测试与计算方法:根据沉积连续、岩性均一、颗粒较细、生物扰动较少的测年要求^[28-29],我们选取不同深度的28个样品进行测试分析。具体方法如下:样品低温烘干、研磨并过100目筛后,称取5 g放入测试管,并将开口封蜡处理,放置3周,使放射能量达到平衡。随后,样品被送到中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室,利用高纯锗井型探测器(Ortec HPGGe GWL)γ谱仪进行测定。其中,²¹⁰Pb标准样品由英国利物浦大学提供做对比标准,²²⁶Ra标准样品由中国原子能研究院提供。

²¹⁰Pb测年计算方法主要有CIC(Constant Initial Concentration)和CRS(Constant Rate of Supply)两种模式。CIC模式适用于沉积物表层受到扰动很小、沉积速率较稳定的情况,其计算需要有恒定的表层(深度为0)过剩²¹⁰Pb(²¹⁰Pb_{ex})数值;CRS模式适用于²¹⁰Pb通量恒定条件下,沉积速率随时间而变化的情况^[30]。由于B1岩芯表层受生物扰动较大,表层²¹⁰Pb_{ex}含量不恒定,加上Aswan大坝建成后由于尼罗河水沙通量变化大而导致的潟湖沉积速率不稳定,因此本研究应用CRS模式计算测年结果。

粒度测试:40℃下烘干,然后称取约0.1 g样品,放入100 mL烧杯中,先后加入10 mL 10%的H₂O₂和5 mL 10%的HCl,以去除样品中的有机质和碳酸盐;30 min后加入一定量超纯水,静置12 h后吸掉上清液,重复此过程2~3次,直至溶液近中性;然后加入10 mL 0.5 mol/L的(NaPO₃)₆溶液,并放置在超声波仪器中10 min,最后在MS—2000激光粒度仪上测试。计算每个样品的中值粒径,以及黏土、粉砂、砂的百分含量并绘制成图。

TOC、TN测试:40℃下烘干并过80目筛,然后称取约1 g左右样品,用10% HCl浸泡除去碳酸盐,再用超纯水冲洗至中性后于40℃下烘干;最后称取0.03~0.04 g样品包入锡纸,利用元素分析仪(Vario Macro CNS)进行测试。测试标准偏差<0.1%,回收率>99.5%。检出限:C为0.000 4 mg,N为0.000 1 mg。

BSi测试:40℃下烘干并过80目筛后,称取约45 mg样品,将样品放入50 mL圆底塑料离心管,注入10% H₂O₂和10% HCl去除有机质和碳酸盐,然后用超纯水洗至近中性后放入60℃烘箱中12 h;之后加入

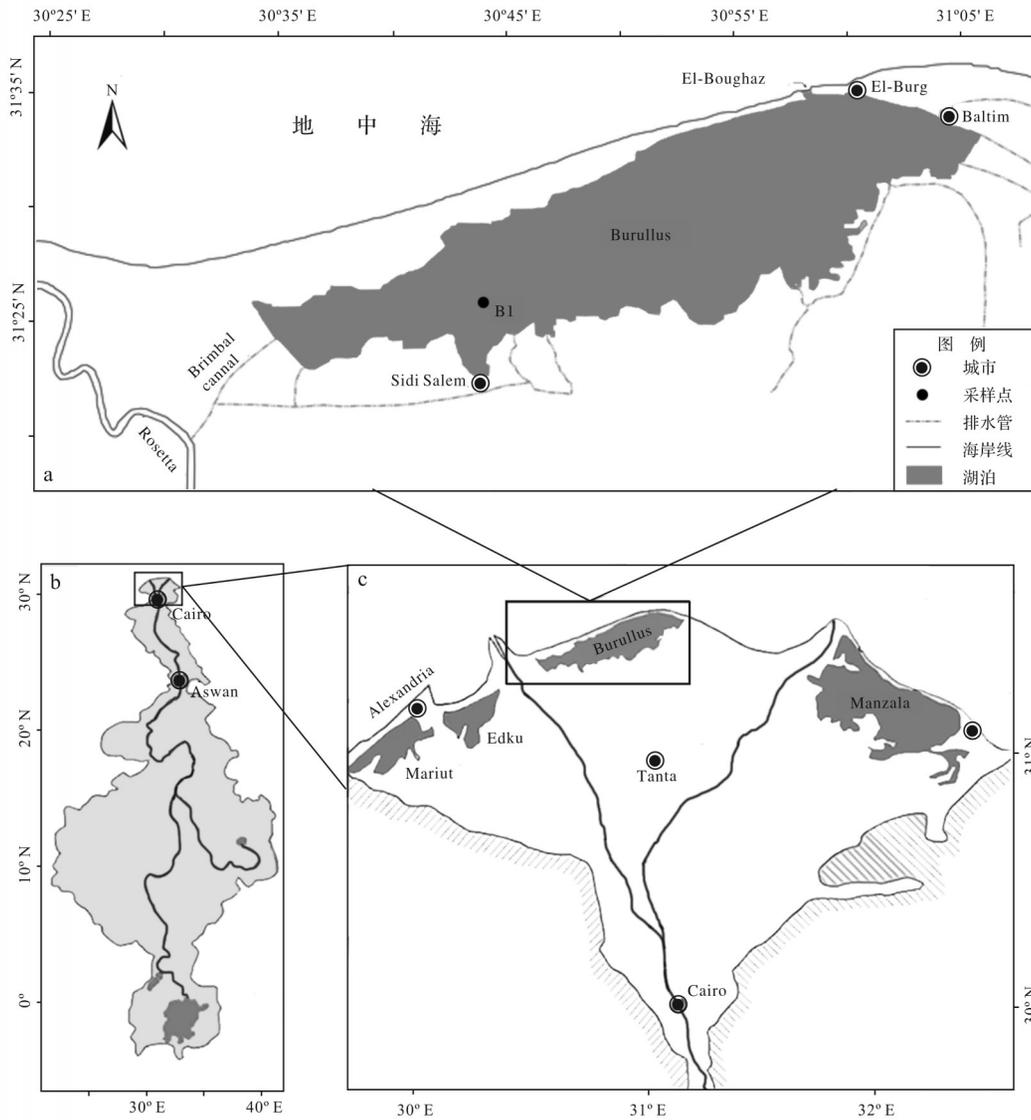


图1 研究区域与采样位置图
Fig.1 Study area and sampling location

30 mL 1 mol/L 的 Na_2CO_3 溶液,并放入 85 °C 的恒温震荡水浴锅中加热 5 h (频率 180 次/min);然后取出离心管并迅速放入离心机(离心管用保温棉包裹),以 4 000 r/min 的转速离心 5 min;再迅速取 0.2 mL 离心管上清液注入另外 50 mL 带刻度塑料离心管,并用超纯水稀释到 25 mL 刻度线;最后用硅钼蓝法测定稀释液 BSi 的浓度,并据此计算样品 BSi 的含量。

TP 测试:样品送至中国科学院西安地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室,用 Axios advanced PW4400 型 X 荧光光谱仪测试。样品测试相对偏差均 <2%,回收率 >98%。

2 结果

2.1 ^{210}Pb 测年

B1 岩芯沉积物 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 随深度增加呈现显著的指数衰减趋势。CRS 模式计算结果显示:74 cm 处沉积年代约为 1932 年;57 cm 处约为 1964 年,即 Aswan 大坝合龙年份;~50 cm 处约为 1973 年(图 2)。~50 cm 深度往下, $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 随深度衰减趋势已不明显,但根据 ^{210}Pb 的 5 个半衰期约 110 年的测年周期推算,此处不可能达到放射性平衡,平衡点应该在 90 cm 左右(根据建坝前尼罗河三角洲全新世平均沉积速率 0.5 cm/yr^[31-32])。而~50 cm 深度往下 $^{210}\text{Pb}_{\text{ex}}$ 衰减不明

显的原因可能是尼罗河三角洲降水稀少导致的沉积物中²¹⁰Pb放射性浓度低,连续性差,而难以形成规则的指数衰减曲线^[33-34]。

2.2 粒度和生源要素变化:自下而上,粒度较为稳定,C、N、P含量增加,Si含量减少

自下而上,各粒径组分变化不大,粉砂含量最高,黏土次之,砂最低。中值粒径上,60 cm以下平均为7 μm;60 cm往上平均为10 μm,轻微增加。

自下而上,TOC、TN和TP含量在60 cm左右呈现显著的增加趋势。在60 cm以下部分,TOC、TN和TP含量的平均值分别为3.18%、0.21%、0.049%;在60 cm以上部分,它们的平均值分别为4.46%、0.29%、0.068%,分别增加了40%、38%、39%(图3)。BSi含量自下而上呈现明显的减少趋势。从下方的2.60%逐渐减少到表层的1.26%,从60 cm以下均值2.44%减少为60 cm以上均值2.16%,减少了近12%(图3)。

TN/TP比值自下而上总体呈现稳定的趋势,比值均小于6;BSi/TOC的比值自下而上呈现出显著的下降趋势,从下部的0.66减少至表层的0.24(图3)。

3 讨论

3.1 大坝和人类排放对潟湖TOC、TN和TP的影响

研究表明,沉积物中的有机质具有明显的粒度效应,即沉积物颗粒越小,表面积就相对越大,其吸附有机质的能力就越强,沉积物中TOC、TN和TP含量也就越高^[35]。B1岩芯自下而上均为粉砂质黏土,粒径组分及中值粒径变化很小,总体较为稳定(图3),另外,岩芯粒度松散,无明显固结成岩作用,

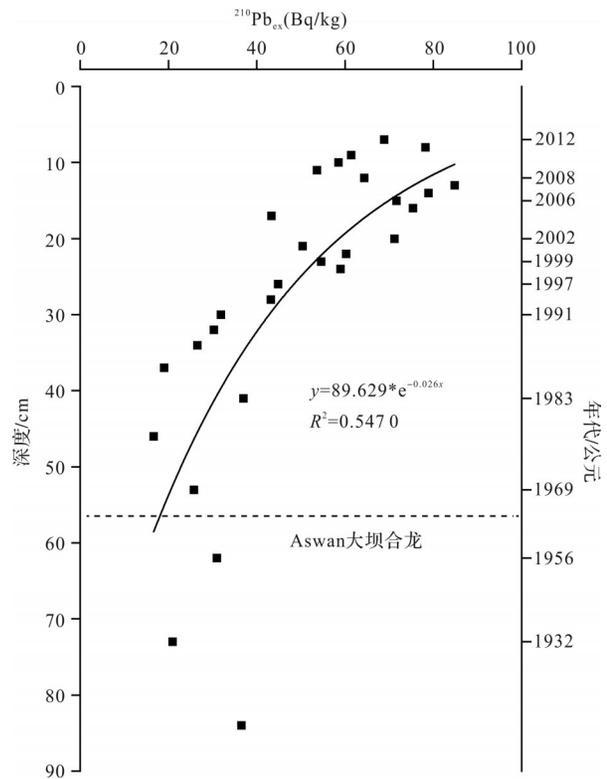


图2 B1岩芯²¹⁰Pb_{ex}-深度和年代框架图

Fig.2 B1 core of ²¹⁰Pb_{ex}-depth and age frame

在一定程度上排除了沉积物中TOC、TN和TP含量变化的粒度效应和成岩作用。

Burullus 潟湖沉积物中TOC、TN和TP在Aswan大坝修建后均有所增加(图3),表明近百年来,Burullus湖泊水体中TOC、TN和TP的浓度总体上一一直在增加。这种增加趋势明显与流域水库导致的营养盐滞留、通量减少的趋势相反。如,Aswan大坝修建后,下游径流中N、P由每年6 700 t、3 200 t减少到

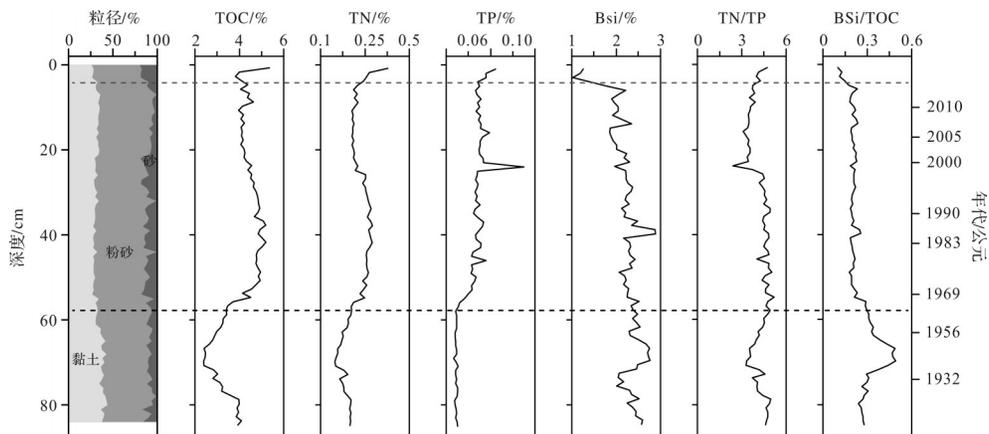


图3 B1岩芯粒度、生源要素和要素间比值垂向变化图

灰色虚线表示Aswan高坝合龙,红色虚线以上为生物扰动层

Fig.3 Vertical variation of grain size, nutrients and their ratios in B1 core.

The gray dotted line indicates the closing time of the Aswan High Dam. Above the red dotted line is the bioturbation layer

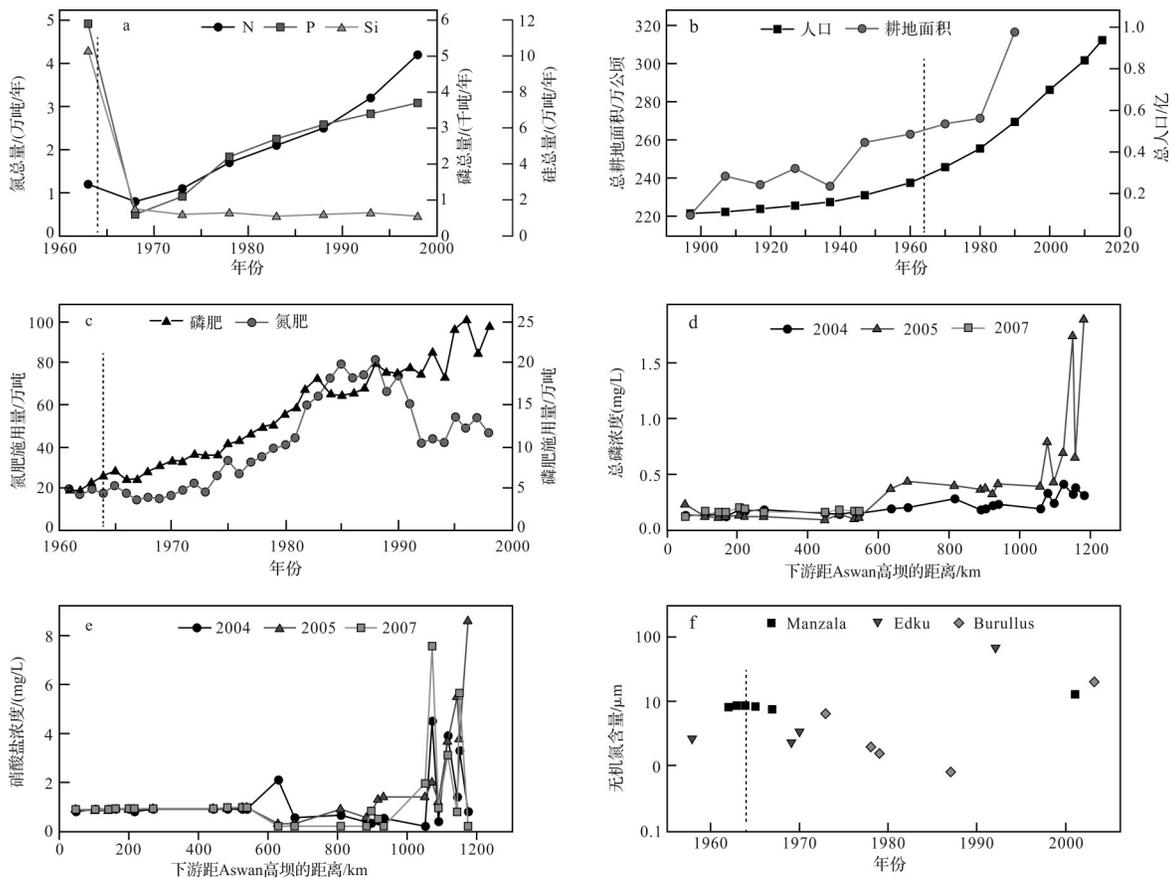


图4 尼罗河及近海水体营养盐含量变化和埃及人口、耕地变化图(虚线代表 Aswan 大坝合龙)

(a) 南地中海东部海域 N、P、Si 含量变化, 每一个数据点代表 5 年平均^[36]; (b) 埃及人口和耕地面积变化^[37]; (c) 埃及氮肥和磷肥施用量变化, 磷肥以 P₂O₅ 吨数计, 氮肥以氮吨数计^[24]; (d) Aswan 大坝以下径流中不同年份 TP 浓度与距 Aswan 大坝距离不同的变化; (e) Aswan 大坝以下径流中不同年份硝酸盐浓度与距 Aswan 大坝距离不同的变化; (f) 埃及 Manzala、Burullus、Edku 潟湖中 DIN 含量变化^[38]

Fig.4 Changes in nutrient salt content in the Nile and offshore waters and changes in population and cultivated land in Egypt (the dotted line indicates the closing time of the Aswan High Dam)

(a) Changes in N, P and Si contents in the eastern Mediterranean Sea. Each data point represents a 5-year average^[36]; (b) Changes in population and arable land in Egypt^[37]; (c) Changes in the consumption of nitrogen and phosphate fertilizers in Egypt. Phosphate fertilizers are based on P₂O₅ and nitrogen fertilizers are based on nitrogen^[24]; (d) Changes in TP concentration below Aswan dam in different years of the Nile and the distance from Aswan Dam; (e) Changes in nitrate concentration below the Aswan Dam in different years of the Nile and the distance from the dam; (f) Changes in DIN content in Manzala, Burullus and Edku Lagoon, Egypt^[38]

200 t、30 t, 98% 以上的泥沙被拦截在坝前^[25], 泥沙吸附的 P 也由每年 4 000~8 000 t 减少到近乎为 0^[24]。尼罗河河口和近海 N、P 含量也在建坝后出现急剧下降^[36](图 4a)。因此, Burullus 潟湖水体中 TOC、TN 和 TP 浓度的增加, 其主要来源应该是不断增加的人类活动排放的营养盐通量。

Aswan 建坝后, 由于埃及人口和耕地面积都在快速增加^[37](图 4b), 化肥施用量和生活污水排放量也相应地迅速增加^[24](图 4c), 导致人类排放的营养盐通量急剧增加, 尤其是占全国人口近一半的三角洲区域, 其人类排放的营养盐浓度更是远远高出上游区域近 4 倍(图 4d,e)。大开罗和亚历山大地区生活污水排放中潜在的 N、P 含量, 分别由 1965 年

5 000 t、1 100 t 增加到 1995 年 65 000 t、9 500 t^[24], 仅生活污水这一部分就已接近建坝前每年由尼罗河径流所带来的 N、P 总量。正是流域内尤其是尼罗河三角洲区域近百年来人类排放 N、P 的持续增加, 才导致 Burullus 潟湖水体中 TOC、TN 和 TP 浓度总体上不断地增加。这也是邻近两个潟湖 (Manzala、Edku) DIN 含量高于建坝前含量的原因所在^[38](图 4f), 而 N、P 的持续增加则促进了藻类生产力的持续增加, 藻类生产力的增加也正是 B1 岩芯沉积物中 TOC 含量(图 3)不断增加的原因所在。此外, 埃及对氮肥和磷肥使用量快速增加始于 1960s 后期(图 4c), 这与图 3 中 TN、TP 含量快速增加的时间点基本一致, 侧面说明了本研究 ²¹⁰Pb 测年结果的可靠性。

TN/TP 比值可以判定沉积物是受 N 限制还是 P 限制,若比值小于 16,为 P 限制^[39]。TN/TP 比值自下而上稳定且比值均小于 16 的结果(图 3),表明了 Burullus 潟湖明显地受 P 限制。

3.2 大坝对潟湖 BSi 的影响

Burullus 潟湖沉积物中 BSi 在 Aswan 大坝修建后呈现持续减少趋势(图 3),表明近百年来, Burullus 潟湖水体中 DSi 浓度一直在减少。这种减少趋势与建坝后 Naser 水库导致的 DSi 滞留和通量减少的趋势一致。如,在 Aswan 大坝修建之前,尼罗河每年给埃及地中海及沿岸潟湖等输送约 11 万吨的 Si,促进了上述水域硅藻的大量繁殖^[24],导致潟湖沉积物中 BSi 含量较高(图 3)。但在 Aswan 大坝修建后,尼罗河口 DSi 浓度减少了 200 $\mu\text{mol/L}$,减少幅度约 95%^[26]。尼罗河口及近海的 Si 含量在建坝前后由 10 多万吨降到 1 万吨以下(图 4a),导致河口及近海处于明显的 Si 限制状态^[36]。由于 DSi 主要来源于流域自然风化输入,与 N、P 人为大量输入不同,因此,建坝后 Burullus 潟湖中 BSi 的减少(图 3)主要是受上游大坝拦水拦沙以及水库对 DSi 的滞留所致。

BSi/TOC 比值可以较好地反映硅藻对总初级生产力的贡献,比值越大,硅藻贡献越大^[40]。自下而上 BSi/TOC 比值呈现明显减少趋势(图 3),说明 Aswan 大坝建设导致的水沙减少以及水库对 DSi 的滞留确实引起了 Burullus 潟湖中硅藻生物量及其占总初级生产力比值的逐步减少。DSi 的缺失会造成水体中营养盐结构及比例的变化,长期下去,将导致水体中浮游植物由硅藻向非硅藻群落的转变^[41],这种转变对于水体生态系统的健康发展显然是不利的。因为在 N、P 富集而 Si 缺乏的水体中,非硅质藻类如蓝藻等会大量繁殖,并逐渐取代硅藻成为优势种^[7]。而蓝藻的大量繁殖,不仅会大量消耗水中氧气,造成底层水缺氧,还会向水中释放有毒的微囊藻毒素,这些都会造成水中鱼虾等生物大量死亡,导致湖泊水体出现恶化,甚至最终造成水体生态系统的崩溃^[42]。

3.3 Burullus 潟湖生源要素变化与其他湖泊、流域的对比

如上讨论,在流域水库化滞留效应和人类活动排放共同影响下, Burullus 潟湖生源要素呈现 TOC、TN 和 TP 增加、BSi 减少的趋势。实际上,全球很多流域和湖泊生源要素变化都呈现出与 Burullus 潟湖相似的模式。比如,研究表明,长江河口自 1950s 以来,

沉积物中 TOC 增加了 10%~20%, BSi 减少了 6%~10%, BSi/TOC 减少~20%^[17]。这种变化与长江水库化导致的泥沙大幅度减少、流域 N、P 排放急剧增加是一致的,揭示了流域水库化和人类活动排放对河口环境的影响。另外,阿尔及利亚安纳巴湾和中国石马河河口地区 N、P 营养盐浓度在上游建坝后快速增加^[43-44]。多瑙河河口的硅酸盐在二十世纪七十年代早期多瑙河大坝建成后减少了 2/3,波罗的海河流输入 DSi 在流域建坝后也减少了 30%~40%^[45-46]。

尼罗河流域及地中海区域关于沉积物中生源要素尤其是 BSi 含量变化的研究相对缺乏,此前研究大多集中在水体和表层沉积物的生源要素分布和变化上^[24,47],而我们的研究不仅是对此区域如何甄别水库化和人类排放分别对流域—河口生态环境影响和机制的一次有利探索,也为以后此区域以及其他区域的相关研究提供了一定的参考。

4 结论

(1) Aswan 大坝的建设和下游流域内人类的排放对尼罗河三角洲潟湖不同营养盐演变的作用具有显著的差异。

(2) 尽管 Aswan 大坝滞留了大量的 N、P,但下游人类排放 N、P 通量的激增,导致 Burullus 潟湖沉积物中 TOC、TN 和 TP 近百年来总体增加。但由于 DSi 主要是流域自然风化输入, Aswan 大坝对 DSi 的滞留,导致了 Burullus 潟湖沉积物中 BSi 和 BSi/TOC 不断减少,即导致湖泊中硅藻的生物量及其总初级生产力的占比减少、硅藻向非硅藻群落的转变,引起水体生态环境的恶化。

参考文献(References)

- [1] 冉祥滨,于志刚,姚庆祯,等. 水库对河流营养盐滞留效应研究进展[J]. 湖泊科学, 2009, 21(5): 614-622. [Ran Xiangbin, Yu Zhigang, Yao Qingzhen, et al. Advances in nutrient retention of dams on river[J]. Journal of Lake Sciences, 2009, 21(5): 614-622.]
- [2] Gong G C, Chang J, Chiang K P, et al. Reduction of primary production and changing of nutrient ratio in the East China Sea: Effect of the Three Gorges Dam? [J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(7): L07610.
- [3] 李茂田,孙千里,王红,等. 长江流域水库“过滤器效应”对入海溶解硅通量的影响[J]. 湖泊科学, 2014, 26(4): 505-514. [Li Maotian, Sun Qianli, Wang Hong, et al. The

- filter effect of big reservoirs on dissolved silicate flux decrease in the Yangtze River Drainage Basin[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2014, 26(4): 505-514.]
- [4] 李磊,王云龙,蒋玫,等. 三峡工程蓄水后长江口溶解硅酸盐(DSi)、营养盐结构的变化特征及其生态影响分析[J]. *环境化学*, 2014, 33(1): 135-141. [Li Lei, Wang Yunlong, Jiang Mei, et al. Changes and impacts of dissolved silicate and nutrient structure in the Yangtze River Estuary and adjacent area after water storage of the Three Gorges Project[J]. *Environmental Chemistry*, 2014, 33(1): 135-141.]
- [5] Humborg C, Conley D J, Rahm L, et al. Silicon retention in river basins: Far-reaching effects on biogeochemistry and aquatic food webs in coastal marine environments[J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2000, 29(1): 45-50.
- [6] Jossette G, Leporcq B, Sanchez N, et al. Biogeochemical mass-balances (C, N, P, Si) in three large reservoirs of the Seine Basin (France)[J]. *Biogeochemistry*, 1999, 47(2): 119-146.
- [7] Li M T, Xu K Q, Watanabe M, et al. Long-term variations in dissolved silicate, nitrogen, and phosphorus flux from the Yangtze River into the East China Sea and impacts on estuarine ecosystem[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2007, 71(1/2): 3-12.
- [8] Li M T, Chen Z Y, Finlayson B, et al. Water diversion and sea-level rise: Potential threats to freshwater supplies in the Changjiang River estuary[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2015, 156: 52-60.
- [9] 刘宁宁. 近50年长江流域建坝与营养盐物质输送研究进展[J]. *环境化学*, 2017, 36(7): 1579-1587. [Liu Ningning. Review on the nutrients transport in Yangtze River with responses to the damming in the drainage basin in the past 50 years [J]. *Environmental Chemistry*, 2017, 36(7): 1579-1587.]
- [10] Jiao N Z, Zhang Y, Zeng Y H, et al. Ecological anomalies in the East China Sea: Impacts of the Three Gorges Dam? [J]. *Water Research*, 2007, 41(6): 1287-1293.
- [11] Klausmeier C A, Litchman E, Daufresne T, et al. Optimal nitrogen-to-phosphorus stoichiometry of phytoplankton [J]. *Nature*, 2004, 429(6988): 171-174.
- [12] 周建军,张曼,李哲. 长江上游水库改变干流磷通量、效应与修复对策[J]. *湖泊科学*, 2018, 30(4): 865-880. [Zhou Jianjun, Zhang Man, Li Zhe. Dams altered Yangtze River phosphorus and restoration countermeasures[J]. *Journal of Lake Sciences*, 2018, 30(4): 865-880.]
- [13] 陈沈良,陈吉余. 河流建坝对海岸的影响[J]. *科学*, 2002, 54(1): 12-15. [Chen Shenliang, Chen Jiyu. Impacts of river dam construction on coast[J]. *Science*, 2002, 54(1): 12-15.]
- [14] 孟宪伟,刘焱光,王湘芹. 河流入海物质通量对海、陆环境变化的响应[J]. *海洋科学进展*, 2005, 23(4): 391-397. [Meng Xianwei, Liu Yanguang, Wang Xiangqin. Material flux from river to sea and its response to land and sea environment changes[J]. *Advances in Marine Science*, 2005, 23(4): 391-397.]
- [15] Marin A, Montoya S, Vita R, et al. Utility of sea urchin embryo - larval bioassays for assessing the environmental impact of marine fishcage farming [J]. *Aquaculture*, 2007, 271(1/2/3/4): 286-297.
- [16] 叶曦雯,刘素美,张经. 生物硅的测定及其生物地球化学意义[J]. *地球科学进展*, 2003, 18(3): 420-426. [Ye Xiwen, Liu Sumei, Zhang Jing. The determination of biogenic silica and its biogeochemistry significance [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18(3): 420-426.]
- [17] Li M T, Wang H, Li Y M, et al. Sedimentary BSi and TOC quantifies the degradation of the Changjiang Estuary, China, from river basin alteration and warming SST[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2016, 183: 392-401.
- [18] 季婧,曾令晗,卞昊昆,等. 近50年以来的洞庭湖沉积物中氮磷硅元素变化与区域环境演变[J]. *第四纪研究*, 2018, 38(4): 1017-1023. [Ji Jing, Zeng Linghan, Bian Haokun, et al. Variations in sedimentary nitrogen, phosphorus and silicon and regional environmental changes in East Dongting Lake in recent 50 years[J]. *Quaternary Sciences*, 2018, 38(4): 1017-1023.]
- [19] Hereher M E, Salem M I, Darwish D H. Mapping water quality of Burullus Lagoon using remote sensing and geographic information system [J]. *Journal of American Science*, 2010, 7(1): 138-143.
- [20] Shaltout K H, Khalil M T. Lake burullus: Burullus protected area [M]. Cairo: Publication of National Biodiversity Unit, 2005: 29-32.
- [21] Zalat A, Vildary S S. Distribution of diatom assemblages and their relationship to environmental variables in the surface sediments of three northern Egyptian lakes [J]. *Journal of Paleolimnology*, 2005, 34(2): 159-174.
- [22] Coutellier V, Stanley D J. Late Quaternary stratigraphy and paleogeography of the eastern Nile Delta, Egypt [J]. *Marine Geology*, 1987, 77(3/4): 257-275.
- [23] Ameen N, El Beialy S, Ayyad S, et al. Environmental and human impact on the microbiotic assemblage in the Burullus Lagoon, North Nile Delta, Egypt [J]. *Micropaleontology*, 2013, 59(2-3): 133-144.
- [24] Nixon S W. Replacing the Nile: Are anthropogenic nutrients providing the fertility once brought to the Mediterranean by a great river? [J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2003, 32(1): 30-39.
- [25] Stanley D J. Nile delta: Extreme case of sediment entrapment on a delta plain and consequent coastal land loss [J]. *Marine Geology*, 1996, 129(3/4): 189-195.

- [26] Whaby S D, Bishara N F. The effect of River Nile on Mediterranean water before and after the construction of the High Dam at Aswan [M]//Matin I M, Burton J D, Eisma D. River inputs to ocean systems. New York: United Nations, 1980: 311-318.
- [27] Ramdani M, Flower R J, Elkhiahi N, et al. North African wetland lakes: Characterization of nine sites included in the CASSARINA Project [J]. *Aquatic Ecology*, 2001, 35 (3/4): 281-302.
- [28] Appleby P G, Birks H H, Flower R J, et al. Radiometrically determined dates and sedimentation rates for recent sediments in nine North African wetland lakes (the CASSARINA Project) [J]. *Aquatic Ecology*, 2001, 35 (3/4): 347-367.
- [29] Chen Z Y, Salem A, Xu Z, et al. Ecological implications of heavy metal concentrations in the sediments of Burullus Lagoon of Nile Delta, Egypt [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2010, 86 (3): 491-498.
- [30] Appleby P G, Oldfield Z F. The assessment of ^{210}Pb data from sites with varying sediment accumulation rates [J]. *Hydrobiologia*, 1983, 103 (1): 29-35.
- [31] Stanley D J. Subsidence in the northeastern Nile Delta: Rapid rates, possible causes, and consequences [J]. *Science*, 1988, 240 (4851): 497-500.
- [32] Stanley D J. Recent subsidence and northeast tilting of the Nile delta, Egypt [J]. *Marine Geology*, 1990, 94 (1/2): 147-154.
- [33] Siegel F R, Slaboda M L, Stanley D J. Metal pollution loading, Manzalah lagoon, Nile delta, Egypt: Implications for aquaculture [J]. *Environmental Geology*, 1994, 23 (2): 89-98.
- [34] 顾家伟. ^{210}Pb 和 ^{137}Cs 计年在尼罗河三角洲的应用现状与适用性分析 [J]. *地球与环境*, 2014, 42 (3): 279-285. [Gu Jiawei. Chronological application of ^{210}Pb and ^{137}Cs in the Nile Delta and its practical implication [J]. *Earth and Environment*, 2014, 42 (3): 279-285.]
- [35] Dunn R J K, Welsh D T, Teasdale P R, et al. Investigating the distribution and sources of organic matter in surface sediment of Coombabah Lake (Australia) using elemental, isotopic and fatty acid biomarkers [J]. *Continental Shelf Research*, 2008, 28 (18): 2535-2549.
- [36] Ludwig W, Dumont E, Meybeck M, et al. River discharges of water and nutrients to the Mediterranean and Black Sea: Major drivers for ecosystem changes during past and future decades? [J]. *Progress in Oceanography*, 2009, 80 (3/4): 199-217.
- [37] Dumont H J, El-Shabrawy G M. Lake Borullus of the Nile Delta: A short history and an uncertain future [J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2007, 36 (8): 677-682.
- [38] Oczkowski A, Nixon S. Increasing nutrient concentrations and the rise and fall of a coastal fishery; a review of data from the Nile Delta, Egypt [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2008, 77 (3): 309-319.
- [39] Lin R G, Yoon W D, Wu J Y, et al. The N/P ratio in the northern South Yellow Sea in Autumn [J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2002, 20 (4): 384-388.
- [40] 王朝晖, 李友富, 牟德海. 大亚湾大鹏澳海域 C、N、BSi 的沉积记录研究 [J]. *海洋环境科学*, 2010, 29 (1): 1-7. [Wang Zhaohui, Li Youfu, Mu Dehai. Study on sedimentary record of TOC, TN and BSi in Dapengao area of Daya Bay [J]. *Marine Environmental Science*, 2010, 29 (1): 1-7.]
- [41] 李茂田, 程和琴. 近 50 年来长江入海溶解硅通量变化及其影响 [J]. *中国环境科学*, 2001, 21 (3): 193-197. [Li Maotian, Cheng Heqin. Changes of dissolved silicate flux from the Changjiang River into sea and its influence since late 50 years [J]. *China Environmental Science*, 2001, 21 (3): 193-197.]
- [42] Garnier J, Beusen A, Thieu V, et al. N:P:Si nutrient export ratios and ecological consequences in coastal seas evaluated by the ICEP approach [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2010, 24 (4): GB0A05.
- [43] Gao L, Wang Z W, Shan J J, et al. Aquatic environmental changes and anthropogenic activities reflected by the sedimentary records of the Shima River, southern China [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 224: 70-81.
- [44] Ounissi M, Amira A B, Dulac F. Riverine and wet atmospheric inputs of materials to a North Africa coastal site (Annaba Bay, Algeria) [J]. *Progress in Oceanography*, 2018, 165: 19-34.
- [45] Humborg C, Ittekkot V, Cociasu A, et al. Effect of Danube River dam on Black Sea biogeochemistry and ecosystem structure [J]. *Nature*, 1997, 386 (6623): 385-388.
- [46] Humborg C, Smedberg E, Medina M R, et al. Changes in dissolved silicate loads to the Baltic Sea -The effects of lakes and reservoirs [J]. *Journal of Marine Systems*, 2008, 73 (3/4): 223-235.
- [47] Krom M, Kress N, Berman-Frank I, et al. Past, present and future patterns in the nutrient chemistry of the eastern Mediterranean [M]//Goffredo S, Dubinsky Z. *The Mediterranean Sea: Its history and present challenges*. Dordrecht: Springer, 2014: 49-68.

Changes of Nutrient Salts Deposited in the Burullus Lagoon, Egypt: Effects of Human Activity over the Past Century

MA FuWei¹, LI MaoTian¹, LIU Yan¹, ZHAO XiaoShuang¹, CHEN ZhongYuan¹, Salem Alaa²,
M Abu Shama A.², Elhossainy Mohamed M.²

1. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China

2. Geological Sciences Department, Kafrelsheikh University, Kafrelsheikh 33516, Egypt

Abstract: Burullus Lagoon is a high, closed lagoon at the mouth of the Nile River, whose nutrients were mainly from the Nile. It is a critical area for studying how the changes in the Nile Basin has affected the lake environment of the Nile estuary after the Aswan Dam was built. This study investigated the changes of ²¹⁰Pb dates, grain size, total organic carbon (TOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and biogenic silica (BSi) in the B1 core from Burullus Lagoon, combined with historical data, to reveal the changes of nutrient salts in estuarine lakes and the impact of these changes on the ecological environment following construction of the Aswan Dam. The results showed that: (1) The content of depositional TOC, TN and TP increased from bottom to top, indicating that although the Aswan Dam led to a sharp decrease in nutrient flux, the TN/TP concentration in the downstream lakes did not decrease due to the greatly increased TN/TP flux discharged by human activity downstream of the dam. Also, TN/TP was less than 16, indicating that the lake was still P-restricted. (2) However, BSi and BSi/TOC generally decreased from bottom to top, indicating that the reduction of water and sediment caused by the Aswan Dam has led to a decrease in the biomass of diatoms and the ratio of total primary productivity in the lake. The ecological environment of the lake tends to be deteriorating.

Key words: nutrient salt; human activities; Aswan Dam; Burullus Lagoon