

ISSN 1000-0933

CN 11-2031/Q

生态学报

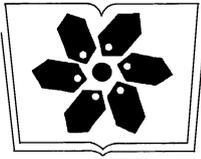
Acta Ecologica Sinica



第32卷 第5期 Vol.32 No.5 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 5 期 2012 年 3 月 (半月刊)

目 次

淀山湖富营养化过程的统计学特征	程 曦, 李小平, 陈小华 (1355)
拟水狼蛛对食物中镉的吸收和排泄及生物学响应	张征田, 张光铎, 张虎成, 等 (1363)
接种后共培养时间对丛枝菌根喜树幼苗喜树碱含量的影响	于 洋, 于 涛, 王 洋, 等 (1370)
沙尘暴发生日数与空气湿度和植物物候的关系——以民勤荒漠区为例	常兆丰, 王耀琳, 韩福贵, 等 (1378)
西藏牦牛 mtDNA D-loop 区的遗传多样性及其遗传分化	张成福, 徐利娟, 姬秋梅, 等 (1387)
红松阔叶混交林林隙土壤水分分布格局的地统计学分析	李 猛, 段文标, 陈立新, 等 (1396)
黄土丘陵区子午岭不同植物群落下土壤氮素及相关酶活性的特征	邢肖毅, 黄懿梅, 黄海波, 等 (1403)
毛竹高速生长期土壤碳氮动态及其微生物特性	王雪芹, 张奇春, 姚槐应 (1412)
长期 N 添加对典型草原几个物种叶片性状的影响	黄菊莹, 余海龙, 袁志友, 等 (1419)
接种 AMF 对菌根植物和非菌根植物竞争的影响	张宇亭, 王文华, 申 鸿, 等 (1428)
福州大叶榕隐头果内的小蜂群落结构与多样性	吴文珊, 陈友铃, 蔡美满, 等 (1436)
不同生境朝鲜淫羊藿生长与光合特征	张永刚, 韩 梅, 韩忠明, 等 (1442)
基于日均温度的华山松径向生长敏感温度研究	封晓辉, 程瑞梅, 肖文发, 等 (1450)
长江三峡库区蝶类群落的等级多样性指数	马 琦, 李爱民, 邓合黎 (1458)
甜瓜幼苗叶片光合变化特性	韩瑞锋, 李建明, 胡晓辉, 等 (1471)
双季稻田种植不同冬季作物对甲烷和氧化亚氮排放的影响	唐海明, 肖小平, 帅细强, 等 (1481)
古尔班通古特沙漠西部地下水位和水质变化对植被的影响	曾晓玲, 刘 彤, 张卫宾, 等 (1490)
流溪河水库颗粒有机物及浮游动物碳、氮稳定同位素特征	宁加佳, 刘 辉, 古滨河, 等 (1502)
采用本土蔬菜种子替代水藓评价污泥有机肥腐熟度	刘颂颂, 许田芬, 吴启堂, 等 (1510)
人为营养物质输入对汉丰湖不同营养级生物的影响——稳定 C、N 同位素分析	李 斌, 王志坚, 金 丽, 等 (1519)
流沙湾海草床海域浮游植物的时空分布及其影响因素	张才学, 陈慧妍, 孙省利, 等 (1527)
福寿螺的过冷却研究	赵本良, 章家恩, 罗明珠, 等 (1538)
水稻生育期对褐飞虱和白背飞虱卵巢发育及起飞行为的影响	陈 宇, 傅 强, 赖凤香, 等 (1546)
绿盲蝽越冬卵的耐寒能力	卓德干, 李照会, 门兴元, 等 (1553)
陆桥岛屿环境下社鼠种群数量的估算方法	张 旭, 鲍毅新, 刘 军, 等 (1562)
北京市居民食物消费碳足迹	吴 燕, 王效科, 逯 非 (1570)
社会经济系统磷物质流分析——以安徽省含山县为例	傅银银, 袁增伟, 武慧君, 等 (1578)
内陆河流域试验拍卖水权定价影响因素——以黑河流域甘州区为例	邓晓红, 徐中民 (1587)
专论与综述	
台风对森林的影响	刘 斌, 潘 澜, 薛 立 (1596)
海洋酸化对珊瑚礁生态系统的影响研究进展	张成龙, 黄 晖, 黄良民, 等 (1606)
三种外来入侵斑潜蝇种间竞争研究进展	相君成, 雷仲仁, 王海鸿, 等 (1616)
沉积物生源要素对水体生态环境变化的指示意义	于 宇, 宋金明, 李学刚, 等 (1623)
异化 Fe(III) 还原微生物研究进展	黎慧娟, 彭静静 (1633)
问题讨论	
锡林郭勒盟生态脆弱性	徐广才, 康慕谊, Marc Metzger, 等 (1643)
研究简报	
哥斯达黎加外海夏季表层浮游动物种类组成及分布	刘必林, 陈新军, 贾 涛, 等 (1654)



封面图说: 气候变暖下的北极冰盖——自从 1978 年人类对北极冰盖进行遥感监测以来, 北极冰正以平均每年 8.5% 的速度持续缩小, 每年 1500 亿吨的速度在融化。这使科学家相信, 冰盖缩小的根本原因是全球变暖。北极的冰盖消失, 让更大面积的深色海水暴露出来, 使海水吸收更多太阳热辐射反过来又加剧冰盖融化。由于北极冰的加速融化, 北冰洋的通航已经成为 21 世纪初全球最重要的自然地理事件和生态事件。从这张航片可以看到北极冰缘正在消融、开裂崩塌的现状。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201101170088

于宇, 宋金明, 李学刚, 袁华茂, 李宁. 沉积物生源要素对水体生态环境变化的指示意义. 生态学报, 2012, 32(5): 1623-1632.

Yu Y, Song J M, Li X G, Yuan H M, Li N. Indicative significance of biogenic elements to eco-environmental changes in waters. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(5): 1623-1632.

沉积物生源要素对水体生态环境变化的指示意义

于 宇^{1,2}, 宋金明^{1,*}, 李学刚¹, 袁华茂¹, 李 宁¹

(1. 中国科学院海洋研究所生态与环境科学重点实验室, 青岛 266071; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:受人类活动影响,输入到湖泊、河口中的营养盐剧增,导致水体富营养化、食物链结构改变、底质季节性缺氧等生态环境变化。这些环境变化会在沉积物中留下记录,沉积物中生源要素及其稳定同位素的变化是指示水域古生产力、营养盐水平的有效指标。总结归纳了沉积物中生源要素(碳、氮、磷、硅)指标对水体环境中初级生产力、物质来源、营养盐水平 3 方面变化的指示作用。沉积物中 TOC、TN、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 CaCO_3 和 BSi 可以反映水体沉降有机质含量和浮游植物的生长状况,是指示水域初级生产力水平的有效指标。根据不同类型植物来源的有机质中 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 和 C/N 的差异,可以追踪沉积物中有机质的来源。有效地区分有机质来源对于研究人类活动对水体环境的影响及水体富营养化具有重要的价值。沉积物中 TN、 $\delta^{15}\text{N}$ 、TP 和非磷灰石磷 (NAIP) 含量的升高直接反映了陆源输入氮、磷的增加。BSi 在指示浮游植物生长状况的同时,还反映了水体溶解硅浓度水平和富营养化状况。水体中的生源物质在沉降和埋藏的过程中,会受到早期成岩作用、水动力搬运等众多因素的作用,使沉积物记录的环境变化信息发生改变,从而干扰其对水体环境演变的重建作用。因此综合分析各生源要素指标反映的环境变化信息及其可能的干扰因素,方能正确地反映水域的环境变化过程。

关键词:生态环境变化;生源要素;沉积物

Indicative significance of biogenic elements to eco-environmental changes in waters

YU Yu^{1,2}, SONG Jinming^{1,*}, LI Xuegang¹, YUAN Huamao¹, LI Ning¹

1 Key Laboratory of Ecology and Environment, Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266071, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The increasing input of nutrients to lakes and estuaries by the anthropogenic activities has resulted in the aquatic eco-environment changes, such as the change of food chain, eutrophication and frequently seasonal hypoxia in bottom waters, which can be recorded in sediments. The biogenic elements and their stable isotopes in sediments are effective proxies to reflect the paleoproductivity and nutrient level in waters. The indicative significance of biogenic elements (C, N, P, Si) to the change of primary production, material sources and nutrient levels was reviewed in this paper. TOC, TN, $\delta^{13}\text{C}$, CaCO_3 and BSi in sediments reflecting the content of organic matter and the growth of phytoplankton, can be used as effective proxies to indicate the primary production level. Source identification of organic matter by the differences of $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ and C/N values between different types of plants has important value to study the influence of anthropogenic activities on the aquatic environment and eutrophication. The increasing trend of TN, $\delta^{15}\text{N}$, TP and non-apatite phosphorus (NAIP) in sediments reflects the increasing input of terrestrial nitrogen and phosphorus to coastal waters. BSi can reflect the phytoplankton growth, and further indicate the Si concentration variations and eutrophication in waters. Biogenic elements

基金项目:中国科学院知识创新方向群项目(KZCX2-YW-Q07-02);国家海洋局环境评价项目(DOMEP (MEA) -01-01);国家基金委创新群体项目资助(41121064)

收稿日期:2011-01-17; 修订日期:2011-07-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jmsong@ms.qdio.ac.cn

are influenced by many factors in their deposition and burial, such as diagenesis and hydrodynamic conditions, which can disturb the sedimentary records of biogenic elements and then hinder the proper indication of environmental changes by these proxies. Consequently, in order to exactly understand the aquatic environmental changes, it is essential to comprehensively analyze the information of environmental changes provided by multiple biogenic element proxies and to fully consider the potential interference factors for the paleoenvironmental reconstructions.

Key Words: eco-environmental changes; biogenic elements; sediments

水体中颗粒物沉降到海底后,其反映的环境信息也保存在沉积记录中,因此利用沉积物中各生物、化学等指标能够反映水体古环境变化。水体颗粒物有两大来源:外源输入及海洋生物活动产生。沉积记录反映的环境信息一般也分为物质输入及初级生产力或营养状况两大方面。对于物质输入信息的反映,主要根据不同来源的物质具有的不同特征,来追踪沉积物中的物质来源,并要求这些特征要能较稳定地保存在沉积记录中。沉积物中较常用来指示物质来源的指标有地球化学指标(营养盐及其同位素)^[1-3]、生物指标(硅藻、有孔虫、花粉等生物微化石、生物标志物)^[4-5]、地质动力学指标(沉积物粒度、沉积速率)^[6-7]等。沉积物中能反映水体的营养状况及初级生产力水平的指标很多,主要有地球化学指标和生物指标两大类。地球化学指标主要包括营养盐(C, N, P, Si)和各种植物色素的含量或沉积通量,以及有机质同位素($\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$)等。生物指标主要指保存在沉积物生物体化石中的物种丰度、种属结构等信息。由于硅藻、摇蚊种属、象鼻蚤等生物种对营养盐水平或其它环境变化较为敏感,因而是生物指标中较常选取的生物种类。

由于近百年来工农业发展、人口增加与城市化扩张,生活污水与工农业污水大量输入到湖泊、河口及近岸水域中,造成水体富营养化和营养盐结构的改变,对水体生态环境造成很大的影响^[8-9]。建于河流上的大坝、水电站等水利工程,因阻碍了溯游性生物的洄游产卵而使其生物量下降,造成河口食物链改变^[10]。在 20 世纪中后期,许多国家认识到湖泊、河口等生态环境的恶化,实施了控制污染排放等措施来改善水体环境。这些措施在一些湖泊中初见成效,生产力有所恢复^[3, 11]。但在其它一些水域中富营养化继续加剧,未见生产力和营养盐输入有下降的趋势。可见水体富营养化改善、生态环境的恢复仍需要较长时期的努力和更全面的修复措施。众多沉积物古环境研究表明,沉积物中生源要素指标与水体富营养化等环境变化有很好的对应关系,可以根据沉积物生源要素指标的变化来反映水体环境变化的信息。因此在长时间尺度、缺乏水体监测记录的情况下,应用沉积物生源要素指标指示水体环境变化具有重要价值。

对于河口的沉积物研究不同于大洋、湖泊中,河口中颗粒物的垂直、水平方向的转移与交换作用强烈而复杂,与之相比,大洋、湖泊中的水动力条件则弱很多。湖泊中浮游植物碎屑直接沉降于附近区域海底,物质沉积很大程度上受水体自主输入或陆地输入的影响。而河口的物质沉积除了受物质来源影响外,还受到水动力搬运的影响。另外,河口强烈的水动力条件造成沉积物再悬浮和物质交换作用显著,使得有机质的成岩分解强于湖泊中。水动力搬运和早期成岩作用,使得沉积物生源要素指标在反映河口古环境信息时变得更加复杂。因此在研究河口古环境时需充分考虑水动力条件的影响。相比于河口,湖泊沉积物则更好地保存了沉降有机质及其它富营养化记录,沉积物生源要素指标比河口中能更可靠地反映环境变化信息^[12]。

1 指示水体生产力变化的生源要素指标

1.1 有机碳指标(TOC)

湖泊、河口中的有机质来源主要包括水体自生来源——浮游植物或生物的残体及碎屑,和陆源来源——陆地高等动物、植物的碎屑或排泄物。通常用总有机碳(TOC)来代表沉积物中有机质含量(有机物一般含有大约 50% 的碳原子,因此有机物的质量是 TOC 的 2 倍)。沉积物中的 TOC 反映了湖泊、河口中自生或外源输入有机质的含量。湖泊系统相比河口受陆源输入的影响较小,并且湖泊系统在短时间尺度内,陆源输入较为稳定,此时沉积物中的 TOC 的变化则反映了水体中生物量的变化,可以用来指示水域的初级生产力水平。在

美国的 Laurentian Great Lakes 水系中,自 19 世纪后期受沿岸森林砍伐、工业发展和人口剧增的影响,土壤中的磷和来自生活、工业污水中的磷大量输入到湖泊中,引起湖泊初级生产力大幅增加,反映在沉积物中 TOC 的含量和埋藏通量呈显著上升趋势^[13]。在中国的南四湖,沉积物中 TOC 含量增加也反映出了 20 世纪中期以后水体富营养化加剧,初级生产力的增加的环境变化^[9]。

沉积物中 TOC 的含量不仅取决于初级生产力的大小,同时受到有机质成岩作用的重要影响。有机质在从水体沉降的过程中一部分会被分解进入水体。在沉降后,一般在沉积物上层 5—6 cm 以内,受微生物的作用继续被分解。强烈的水动力条件及底栖生物的扰动会加速 TOC 的矿化分解过程,并且在氧充足条件下有机质的氧化分解速率远大于缺氧条件下通过 $\text{SO}_4\text{-Fe-Mn}$ 还原体系或甲烷生成作用的分解速率^[14-15]。有机质强烈的成岩矿化作用有时会严重干扰其对初级生产力的指示。早期成岩作用过于强烈,使有机质完全分解至近于本底值,则可能完全抹去沉积物 TOC 记录的生产力信息。例如在一些水动力强烈或底栖动物丰富的河口区,在沉积物较深处,TOC 的成岩作用进行完全后含量基本没有垂直变化^[12]。然而在成岩作用较缓和的湖泊中,TOC 则是较可靠的反映古生产力的指标^[16]。但值得注意的是,缓和的成岩作用一方面使得 TOC 较好地保存了古生产力信息,另一方面也会使沉积物上层成岩作用未来得及完全进行,从而对 TOC 指示生产力信息造成干扰。如在对 Lake Ontario 沉积物的研究显示,自 1975 年以后,由于政府对排放到湖泊中的磷进行了有效的控制,湖泊的初级生产力水平降低,恢复到了未受人类活动影响时的水平,这在沉积物 C/N、 $\delta^{13}\text{C}$ 指标的减小上均有体现。但 TOC 在 1975 年后并没有出现减小的趋势,仍逐年增加。TOC 与 C/N、 $\delta^{13}\text{C}$ 指标在反映初级生产力变化时的矛盾,很可能是因为上层的早期成岩作用还没有进行完全,使得上层 TOC 含量高于下层,因此未能反映出初级生产力下降的趋势^[16]。

TOC 含量还与沉积物粒度密切相关,一般细粒度沉积区域 TOC 含量较高^[17]。因此,最终埋藏于沉积物中的 TOC 受物质来源、沉积物粒径、成岩过程、底栖生物扰动和氧化还原环境等多种因素的影响。TOC 的埋藏通量是比其含量更为有效的指示有机物输入和保存的指标^[3, 16]。有机碳埋藏通量 ($\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$) 表示每年每平方米的沉积区域保留下来的有机碳量,综合了沉积速率、沉积物密度、有机碳百分含量等多种因素来表现有机物在沉积物中的保存信息,因此更能反映当时的沉积环境及初级生产力水平。

1.2 碳的稳定同位素指标($\delta^{13}\text{C}$)

海洋浮游植物的光合作用会优先吸收溶解无机碳中的轻碳组分(^{12}C)。当浮游植物生长加快时,水体中的 ^{12}C 被消耗处于低浓度水平,此时浮游植物对 ^{12}C 和 ^{13}C 的选择性降低,开始吸收 ^{13}C 。这些含 ^{13}C 较多的植物体沉降后,使沉积物中有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 增加^[3]。因此,初级生产力增大会体现在沉积物有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 正偏离背景值上。沉积物中 $\delta^{13}\text{C}$ 和 TOC 一样,作为可靠的反演古生产力的指标,在许多湖泊、河口等水域的古环境研究中发挥了重要作用^[11, 18-19]。在丹麦 Mariager 海湾中,沉积物中 $\delta^{13}\text{C}$ 自 1920s 以来从 -23‰ 增加到了 -19.63‰ ,反映了海湾因营养盐输入增加(主要是氮的输入)造成水体初级生产力升高的环境变化^[18]。在美国的 Lake Erie,沉积物中 $\delta^{13}\text{C}$ 在 19 世纪初开始增加,20 世纪 40—70 年代间增幅显著,反映了由于森林砍伐、城市化、含磷洗涤剂使用、排污口增加等人类活动的影响,使输入到湖中的磷大量增加,造成湖泊初级生产力增加的变化。而在 70 年代中期后,沉积物中 $\delta^{13}\text{C}$ 开始下降,体现了磷的排放得到控制后湖泊初级生产力的下降趋势^[11]。

$\delta^{13}\text{C}$ 不仅受初级生产力的控制,还受到其它生物作用的影响,从而干扰其反映初级生产力的信息。浮游植物种群结构的改变会影响 $\delta^{13}\text{C}$ 值^[9],因此沉积 $\delta^{13}\text{C}$ 的偏移还可能表明浮游植物种群结构发生了变化。另外,细菌的化学自养和甲烷营养过程,会产生低 $\delta^{13}\text{C}$ 的 CO_2 ,这些 CO_2 扩散到水体中被浮游植物吸收,植物体沉降后造成沉积物中有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值降低^[20]。但与 TOC 相比而言, $\delta^{13}\text{C}$ 在水体沉降和沉积后的埋藏过程中几乎不受有机质成岩作用的影响^[3, 21],其原始沉积记录能较完整地保存在沉积物中。因此 $\delta^{13}\text{C}$ 往往是比 TOC 更可靠的反映初级生产力的指标。

1.3 无机碳指标(CaCO_3)

沉积物中的无机碳主要是碳酸盐(CaCO_3),其来源包括陆地岩石风化产生后随径流输入水体,以及湖泊、河口生物、化学过程产生的碳酸盐沉淀。在湖泊中,陆源输入物质较少,沉积物中 CaCO_3 主要来源于自生沉淀。浮游植物光合作用的增强会大量吸收水体中 CO_2 ,使温跃层中的 CaCO_3 与 CO_2 的平衡向 CaCO_3 沉积方向移动,促进 CaCO_3 的沉淀(生物成因 CaCO_3)。可见水体中 CaCO_3 的沉积和有机质的沉降密切相关,沉积物中 CaCO_3 含量变化在一定程度上反映了湖泊初级生产力的变化^[3, 13, 22]。在关于 Lake Ontario 的研究中,沉积物中 CaCO_3 含量与 TOC 含量呈显著正相关。 CaCO_3 埋藏通量的变化有效地指示了湖区受人为活动影响而造成的初级生产力的变化^[3, 22]。但河口等近海环境通常受陆地径流影响较大,陆源输入的碳酸盐含量高。因此可以推测在河口等近海环境中,沉积 CaCO_3 在反映初级生产力方面的作用则要弱于湖泊中,这也使得很少见到应用 CaCO_3 来反映近海古环境变化的研究实例。

引起温跃层中 CaCO_3 沉淀的因素不仅有初级生产力,还包括温度、pH 值、蓝细菌等一系列复杂的环境条件。受众多环境因素的影响,沉积物中 CaCO_3 并非总能正确地反映湖泊初级生产力变化,有时甚至表现出与 TOC 相反的变化趋势。在美国 Lake Eire 中,20 世纪 80 年代后由于磷的输入得到有效控制,一直较高的生产力水平逐渐得到恢复,沉积物中 TOC 含量降低,但 CaCO_3 呈增加趋势。 CaCO_3 的变化与初级生产力变化趋势的矛盾可能与 CaCO_3 沉淀或溶解需要的环境条件有关。如温度、pH 值、形成时期等均可能造成 CaCO_3 与 TOC 不同的沉积过程^[23]。可见影响 CaCO_3 沉淀的因素众多,只有正确认识其沉淀机制及影响因素,才能决定其是否可以用于反映水体初级生产力变化。

1.4 总氮指标(TN)

沉积物中氮的优势形态是有机态,通常占总氮的 60% 以上,而无机氮主要以 NH_4^+ 的形式存在^[24]。湖泊、河口中的有机氮除一部分来源于陆地有机氮外,大部分主要来源于藻类的残体碎屑、水生动物代谢物和残体以及细菌体产生的有机氮。因此沉积物中的有机氮往往与生物过程有关,其在一定程度上可以反映湖泊、河口的初级生产力水平。沉积物中 TN 的变化通常与 TOC 变化趋势非常一致,二者共同反映了水域的初级生产力变化。在众多的受人类活动影响的湖泊或河口水域中,如澳大利亚 Alexandrina 湖,中国的南四湖,中国东海的长江口等,TN 含量的不断增加反映了水域富营养化加剧、初级生产力水平升高的环境变化^[9, 19, 25]。

沉积物中 TN 同样是物质输入和早期成岩过程共同作用的结果,成岩作用会对沉积物中氮造成很大影响。输入到水体中和新生成的氮大约只有 35% 会最终保留于沉积物中,其余在早期成岩过程中被分解重新加入循环^[26]。有机氮会在从水体沉降的过程中和沉积后由于微生物或化学作用分解为无机氮重新加入生物地球化学循环。无机氮同样会在微生物作用下发生形态转变。缺氧环境中,硝态氮会经反硝化作用转化为 N_2 或 N_2O 。有氧条件下,铵态氮经过硝化作用转化为硝态氮(NO_3^-)或亚硝态氮(NO_2^-)。氮的成岩作用同时与环境的氧化还原条件密切相关。另外沉积物粒度也是影响 TN 含量分布的重要因素,有机氮和氨氮易吸附于细粒沉积物中而含量较高^[27]。早期成岩作用、沉积物粒度、氧化还原环境等因素会影响沉积物中 TN 分布,从而干扰其对初级生产力的指示。并且相对于有机碳而言,有机氮更易在早期成岩作用中被微生物分解掉^[2]。因此应用沉积物中 TN 反映初级生产力变化时,需要考虑众多环境因素的影响,最好参考其它指标反映的环境信息,才能正确地反映水域初级生产力变化。

1.5 生源硅指标(BSi)

沉积物中 BSi 是无定形硅被硅质生物(硅藻、硅鞭藻、放射线虫类、海绵等)吸收后进入生物体外壳,并随着生物体碎屑一起沉降的硅,其与硅质生物活动密切相关。BSi 直接反映了海洋硅质生物(大部分为硅藻)的生长状况,可以有效地指示硅藻的生产力状况以及浮游植物的种群结构^[28]。沉积物中生源硅相比其它生源要素而言,较少地受到微生物对其的分解作用,但其很大一部分会在沉降和埋藏的过程中溶解而重新进入水体^[29]。但总的来说,湖泊中 BSi 记录的信息可以较好地保存下来,是较可靠的指示硅藻生产力和浮游植物种群的指标。如在美国马萨诸塞州的 New Bedford Harbor 港口,沉积物中的 BSi 有效地反映了 18 世纪中期至 20

世纪末期,港口生态环境和硅藻生产力受人类活动影响不断变化的演变历程,显示了沉积物 BSi 是反映水体硅藻生产力的有效指标^[30]。

硅藻是浮游植物的主要种属,平均占浮游植物生物量的 60% 以上。因此水体硅藻生产力在一定程度上可以反映初级生产力水平。然而受人类活动影响,水体富营养化造成营养盐结构发生改变,从而影响硅藻生长并造成浮游植物种属结构的改变^[31],此时沉积物 BSi 不能指示初级生产力变化。但 BSi 与 TOC 的比例关系(即硅藻占浮游植物生物量的比例)可以用于指示浮游植物的种群结构的变化。

2 指示水体物质来源的生源要素指标

2.1 有机碳同位素指标($\delta^{13}\text{C}$)

植物在进行光合作用时优先吸收轻碳组分(^{12}C),从而使植物体有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 低于大气 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值 (-8‰)。C₃、C₄ 和 CAM 类植物因固定 CO_2 的效率不同,其体内有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值各不相同(C₃ 植物: -32‰ — -21‰ ; C₄ 植物: -17‰ — -9‰ ; CAM 植物: -28‰ — -11‰)^[1]。水生植物同样优先吸收 ^{12}C ,当浮游植物光合作用增强大量吸收 ^{12}C 而使其浓度降低时,开始吸收 ^{13}C ;而当水体 CO_2 也被消耗时,浮游植物植物会吸收水体中的 HCO_3^- ,而 HCO_3^- 具有较高的 $\delta^{13}\text{C}$ (0‰)。因此水生植物体内有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 一般要高于陆生植物的 $\delta^{13}\text{C}$ 。并且由于海洋水体 pH 值高于淡水, HCO_3^- 与 CO_2 含量之比高于淡水中,所以海洋植物比淡水植物具有更高的 $\delta^{13}\text{C}$ ^[1]。但需注意的是,细菌和淡水藻类有机质会影响沉积物 $\delta^{13}\text{C}$ 值,但因这类有机质易被分解掉,其影响作用可能较小。总体上有有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值可以用于指示沉积物有机质的来源,其已经成为应用最为广泛的物质来源判别指标之一。例如在美国北卡罗来纳州的 Albemarle 河口系统中,沉积物中 $\delta^{13}\text{C}$ 近 200—300 a 以来逐渐减小,反映了河口系统由主要受海洋影响的咸水环境逐渐转变成受陆源输入影响、变化剧烈的淡水环境的演变过程^[32]。

研究中常用一个简单的二元混合模型,来估算陆源有机物和水体自生有机物分别所占的比例^[33-34]。公式如下:

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{measured}} = x \cdot \delta^{13}\text{C}_{\text{allo}} + (1 - x) \cdot \delta^{13}\text{C}_{\text{auto}}$$

$$x = (\delta^{13}\text{C}_{\text{auto}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{measured}}) / (\delta^{13}\text{C}_{\text{auto}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{allo}}) \times 100\%$$

式中, x 代表沉积物中陆源有机质占总有机质的比例, $\delta^{13}\text{C}_{\text{measured}}$ 、 $\delta^{13}\text{C}_{\text{allo}}$ 和 $\delta^{13}\text{C}_{\text{auto}}$ 分别代表了沉积物中实测 $\delta^{13}\text{C}$ 值、陆源有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值、和水体自生来源有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值。尽管此二元混合模型采用单一的陆源和自生有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 值进行计算有些绝对,但仍可以作为估算湖泊、河口有机质来源的大致比例的一个有效方法。

2.2 有机质碳/氮比值指标(OC/ON)

藻类富含蛋白质而缺乏纤维素,而脉管类等陆地高等植物体内纤维素含量高,蛋白质含量较低。因此海洋植物有机质 C/N 比较低,通常在 4—10 左右;而陆地植物有机质 C/N 较高,通常大于 20 或更高^[16]。利用陆生植物和海洋植物有机质 C/N 值的差异,可以区分沉积物中有机质来源。C/N 和有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 往往共同使用,来确定水体有机质的来源(图 1)。应用 $\delta^{13}\text{C}$ 和 C/N 值区分海洋沉积物中有机质来源,对于推测古生产力变化及人类活动对海洋、湖泊环境的影响具有重要的意义。在受人类活动影响、氮磷过量输入的水域中,沉积物中的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 C/N 指标在近年来呈逐步增大趋势,表

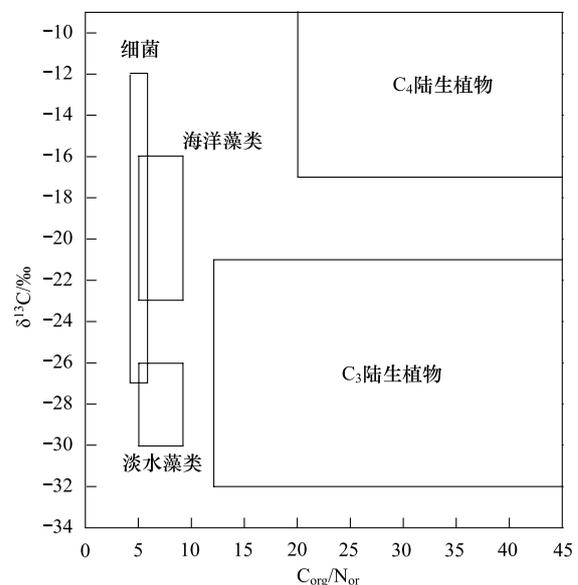


图 1 陆源和海洋自生来源有机质的 $\delta^{13}\text{C}$ 和 C/N 值^[1]

Fig. 1 $\delta^{13}\text{C}$ and C/N ratios of terrestrial and marine organic matter^[1]

明水体自生来源的有机质沉积通量逐渐增加,反映了水体富营养化、初级生产力增大的环境变化^[19]。

沉积物中有机质 C/N 同样会受成岩作用、沉积物粒度等多种因素的影响,其中有机质的早期成岩作用是最主要的影响因素。有机氮活性较有机碳高,会被成岩作用优先分解^[35],从而使沉积物中 C/N 值增大;并且水体细菌、藻类来源的有机质较不稳定,成岩作用对其的分解速率高于脉管植物,使得沉积物中 C/N 增大^[1]。沉积物 C/N 值增高使得自生来源有机质的贡献被低估。因此在利用有机质 C/N 反映物质来源信息时需充分考虑有机质成岩作用的影响。另外,细颗粒沉积物对有机质或 NH_4^+ 的吸附作用同样会改变沉积物 C/N 比值,干扰 C/N 比值指示物质来源。

钱君龙^[36]提出了一个有机质 C/N 的二元混合模型,通过沉积物中 C/N 比值,以及外源和自生有机质各自的 C/N 值,来确定两种来源分别所占的比例。公式如下:

$$C(i) = C_{\text{allo}}(i) + C_{\text{auto}}(i)$$

$$N(i) = N_{\text{allo}}(i) + N_{\text{auto}}(i)$$

$$R_{\text{allo}}(i) = C_{\text{allo}}(i)/N_{\text{allo}}(i)$$

$$R_{\text{auto}}(i) = C_{\text{auto}}(i)/N_{\text{auto}}(i)$$

式中, $C(i)$ 、 $C_{\text{allo}}(i)$ 、 $C_{\text{auto}}(i)$ 分别为沉积物中有机碳浓度、外源有机碳浓度和自生有机碳浓度; $N(i)$ 、 $N_{\text{allo}}(i)$ 、 $N_{\text{auto}}(i)$ 为氮的相应浓度; $R_{\text{allo}}(i)$ 和 $R_{\text{auto}}(i)$ 为外源和自生来源各自的 C/N 比值。在确定了外源和海洋自生有机质 C/N 值后,即可根据此二元模型计算外源和自生来源有机碳和有机氮各自的比例。这一模型也在估算陆源和海洋自生来源有机质各自的贡献中得到了一定的应用^[37]。

2.3 氮的稳定同位素指标($\delta^{15}\text{N}$)

氮的同位素 $\delta^{15}\text{N}$ 指示沉积物有机质来源的原理同 $\delta^{13}\text{C}$ 相似,但又有所不同。浮游植物优先吸收溶解氮的轻组分(^{14}N),在大量消耗 ^{14}N 后使水体溶解氮的 $\delta^{15}\text{N}$ 增大。从而浮游植物再吸收溶解氮时其体内有机质 $\delta^{15}\text{N}$ 增大,通常在+8.5‰左右。而陆生植物靠微生物作用固定大气中的 N_2 ,体内 $\delta^{15}\text{N}$ 通常较水生植物低,通常在+2‰左右^[16]。因此利用浮游植物体与陆生植物体有机质中 $\delta^{15}\text{N}$ 值的差异,可以追踪沉积物中有机质来源。但要使浮游植物 $\delta^{15}\text{N}$ 增大有一个重要条件,即水体中溶解氮处于相对低浓度水平而成为限制性营养盐。此时浮游植物对 N 的选择性吸收才足以对水体中剩余 NO_3^- 的 $\delta^{15}\text{N}$ 产生影响^[38]。然而很多水体溶解氮浓度较高,尤其是外源氮的输入使水体溶解氮更加充足,这可能限制了沉积物 $\delta^{15}\text{N}$ 在区分有机质来源中的应用。

另外,海洋中氮的来源和生物地球化学过程复杂,使沉积物有机质 $\delta^{15}\text{N}$ 易受很多因素影响,从而干扰其对有机质来源的指示作用。引起沉积物中 $\delta^{15}\text{N}$ 增大的原因可能是水体初级生产力的增加,还可能是受污水排放的影响。农田地表径流及生活污水通常含有较高的 $\delta^{15}\text{N}$ (+10‰—+25‰)^[38],这些重氮组分排入海洋、湖泊中被浮游植物吸收,或吸附于沉积颗粒中,使沉积物中 $\delta^{15}\text{N}$ 增大。另外,海洋中固氮的蓝细菌因吸收 N_2 而使细菌体有机质 $\delta^{15}\text{N}$ 偏小,因此当固氮蓝细菌占据一定的生长优势后,会使沉积物中有机质 $\delta^{15}\text{N}$ 变小^[39]。海洋自养生物的有机质 $\delta^{15}\text{N}$ 轻于异养生物,因此不同季节中浮游植物和异养生物种群的演替也会使沉积物中 $\delta^{15}\text{N}$ 发生改变^[3]。另外,超微型和微型浮游植物体具有较低的 $\delta^{15}\text{N}$,其碎屑也会降低沉积物中 $\delta^{15}\text{N}$ 的值。氮的早期成岩作用也会影响沉积物 $\delta^{15}\text{N}$ 值。在氮的反硝化过程中, $^{14}\text{N}_2$ 被优先释放而造成水体或沉积物中 $\delta^{15}\text{N}$ 增大^[3, 38, 40]。如果沉积物有机质 $\delta^{15}\text{N}$ 的原始值在-4‰—4‰,那反硝化作用可使其增大到 10‰—30‰^[38]。在有机质的矿化分解过程中,藻类有机质比陆生脉管植物有机质更易于分解,会被优先分解掉,使沉积物中 $\delta^{15}\text{N}$ 降低,从而低估海洋自生来源有机质的贡献。

综上所述,初级生产力、外源氮输入、早期成岩作用、固氮细菌和浮游植物的营养类型等均会对沉积物中 $\delta^{15}\text{N}$ 造成影响,并且在不同的水域中主导作用各不相同。 $\delta^{15}\text{N}$ 的影响因素众多一方面决定了其在指示初级生产力时的不稳定性及复杂性,另一方面,如果能恰当解析沉积物 $\delta^{15}\text{N}$ 信息,则可以用其反映外源氮输入、底质溶解氧、浮游植物对水体溶解氮的利用等其它环境信息^[38, 40]。

2.4 磷及其各形态指标

沉积物中的磷通常以无机磷为主^[40-41]。通过分级浸取,可以根据磷在沉积物中结合强度、形成机制等差异将无机磷分为不同的结合形态,是研究磷的循环及环境意义有效的方法之一。根据磷在沉积物中的结合状态,通常可将其可交换态类磷(Ex-P)、铁结合态磷(Fe-P)、铝结合态磷(Al-P)、自生钙结合态磷(包括自生钙磷灰石磷、生源磷灰石磷和碳酸钙结合态磷)、以及碎屑磷灰石磷(Det-P)几种形态^[42-43]。Ex-P 是沉积物中与水体溶解态磷保持吸附-溶解平衡的活性磷。Fe-P 是可在还原环境中从沉积物释放的磷。Al、Fe 是主要的陆源要素,因此 Al-P 和 Fe-P 主要来自陆源输入,其在一定程度上反映了陆源输入的大小及变化^[40]。沉积物中自生钙结合态磷(ACa-P)来自于上层水体中钙质生物颗粒的沉积和早期成岩作用中通过化学沉积产生的氟磷灰石,代表了海洋自生来源的磷酸盐^[41-42]。Det-P 主要来自流域内岩石风化产生的矿物碎屑,其含量变化反映了陆源输入颗粒的变化。

但沉积物中磷的含量不仅取决于其来源,粒度效应也是影响磷的含量和分布的一个重要因素。吸附态磷如 Ex-P、Al-P 和 Fe-P,易在细粒沉积物中富集,而碎屑态磷(Det-P)在粗粒沉积区域含量较高^[44]。因此应用这几种形态的磷指示物质来源时,同时需要考虑粒度效应的影响。

3 指示水体营养状况的生源要素指标

3.1 总氮及其稳定同位素指标(TN、 $\delta^{15}\text{N}$)

氮是浮游植物生长必需的营养元素,在很多水域中属于限制性营养盐。近年来受人类活动的影响,输入到水体中的氮逐年增加,极大地促进了浮游植物的生长,使沉积下来的有机氮含量增加;另一方面,水体溶解氮浓度升高,使吸附于沉积物颗粒上的无机氮含量增加。这两方面的共同作用使得沉积物中 TN 升高。因此沉积物中总氮(TN)含量反映了氮的输入和水体氮浓度水平,是指示水体中氮富营养化的有效指标。例如在北卡罗莱纳州的 Pamlico 河口和 Neuse 河口,沉积物中 TN 显著上升,反映了近五六十年间由于点源氮和大气氮的大量输入,导致河口水体富营养化的环境变化^[5]。

由前述可知,水体富营养化使初级生产力增高,沉积物中 $\delta^{15}\text{N}$ 增大;浮游植物大量生长繁殖,沉降下来的有机质氧化分解大量消耗底层水体溶解氧,易造成底质缺氧环境,此时氮的反硝化作用可使沉积物 $\delta^{15}\text{N}$ 进一步增大^[38,40]。因此沉积物有机质 $\delta^{15}\text{N}$ 增大可以反应水体的富营养化状况。另外,由于农田地表径流及生活污水通常含有较高的 $\delta^{15}\text{N}$ (+10‰—+25‰)^[38],因此沉积物 $\delta^{15}\text{N}$ 的高值还可能反映了外源氮的输入。例如在瑞士的 Baldeggersee 湖,沉积物中 $\delta^{15}\text{N}$ 在水体通气良好的情况下仍持续增大,反映了 Baldeggersee 湖在近几十年来来由于农田径流高 $\delta^{15}\text{N}$ 氮的输入,一方面使水体溶解氮 $\delta^{15}\text{N}$ 不断增大,另一方面使水体 NO_3^- 浓度增大的环境变化^[38]。另外, Teranes^[38] 通过对比 1970—1994 年间水体 NO_3^- 浓度和沉积物有机质 $\delta^{15}\text{N}$ 年际变化发现二者具有反向的变化关系。沉积物 $\delta^{15}\text{N}$ 高时水体 NO_3^- 浓度很低,且此年有藻华爆发。沉积物 $\delta^{15}\text{N}$ 记录了溶解氮被浮游植物大量消耗而处于低浓度水平的环境状况。可见沉积物 $\delta^{15}\text{N}$ 在特定情况下对水体溶解氮的消耗和浓度具有一定的指示作用。然而如前所述,影响沉积物中 $\delta^{15}\text{N}$ 的因素众多,除了外源氮输入、反硝化作用、浮游植物生长、固氮蓝细菌和植物的营养类型等也会使沉积物 $\delta^{15}\text{N}$ 发生改变。因此在应用其指示水体富营养化状况和溶解氮浓度时需充分考虑这些因素的影响,谨慎得出结论。

3.2 总磷及非磷灰石磷指标(TP、NAIP)

磷是浮游植物另一必需的营养要素,在许多水域中由于含量相对较低而成为浮游植物生长的限制因子。磷的输入对这些水域中浮游植物生长的促进作用尤为明显。近百年来由于含磷洗涤剂和农药、化肥的广泛使用,以及工业污水的排放等,陆源输入到水体中的磷大量增加,极大地促进了浮游植物包括有害藻华的生长,表现在沉积物中 TP 的埋藏通量显著上升^[3, 11, 45]。因此沉积物中 TP 的含量和沉积速率在一定程度上反映了外源输入磷的多少及水体的富营养化状况。

但沉积下来的颗粒物中包括一部分矿物磷,主要是流域内岩石风化产生而输入到水体中以及在沉积过程中经早期成岩作用中形成的磷灰石磷(apatite),通常不能被生物所利用。真正与水体中浮游植物生长相关的

是非磷灰石无机磷(non-apatite inorganic P; NAIP),包括可交换态磷(Ex-P)、铁结合态磷(Fe-P)、铝结合态磷(Al-P)和碳酸钙结合态磷($\text{CaCO}_3\text{-P}$)^[45-46]。NAIP 是可以从颗粒物和沉积物中释放到水体中参与再循环的活性磷。因此 NAIP 是比 TP 更好的指示磷的输入和水体营养盐状况的指标。在许多受人类活动影响的水体中,发现沉积物中 NAIP 的变化与外源磷的输入和水体营养盐水平有很好的对应关系^[3,11,13]。并且 NAIP 中的 Fe-P 和 Al-P 一般认为主要来自于陆源输入,使得 NAIP 更能反映人为活动造成的磷输入的变化。

3.3 生源硅指标(BSi)

硅藻生长的受到溶解硅和其它营养盐很大的影响,沉积物中 BSi 能有效地反映水域的营养状况。氮、磷营养盐输入的增加,促进硅藻植物的快速生长,消耗水体中的溶解硅。在溶解硅输入受限,而硅藻持续生长的情况下,则会出现季节性的硅限制情况,又抑制了硅藻的生长。硅藻生长的这种变化反映到沉积物中即表现出生源硅(BSi)先增大,出现峰值后又减小的变化趋势^[28](图2),BSi 峰值对应于硅藻生物量最大的时期。可见沉积物中 BSi 不仅可以指示水体中硅的营养状况,还可以间接反映氮、磷的浓度水平。

在美国 Lake Erie 的东部盆地中,自 20 世纪 40 年代沉积物中 BSi 增大,至 70 年代到达最大值,70 年代后磷浓度仍较高时 BSi 开始逐渐减小。反映了水体中由于磷的输入促进硅藻生长,逐渐消耗溶解硅后又限制硅藻生长的环境变化^[40]。但如果水域中溶解硅的来源充足,能够满足硅藻大量生长的需要,则不会出现硅限制的情况。同样在 Lake Erie,中部盆地一直接受从 Lake Huron 输入的溶解硅,水体中溶解硅充足。在 70 年代后输入磷持续增加的情况下,沉积物 BSi 仍一直增大,指示了水体磷的富营养化以及较高的溶解硅浓度^[28]。

4 结语

近百年来受人类活动的影响,输入到湖泊、河口中的氮、磷营养盐增加,造成水体富营养化、初级生产力增加、季节性底质缺氧等一系列生态环境的改变。而这些环境变化随着水体悬浮颗粒物的沉积,在沉积物中留下记录。沉积物中碳、氮、磷、硅营养盐及其稳定同位素可反映初级生产力水平、水体物质来源和水体营养状况 3 个方面的环境信息,在沉积物古环境的研究中得到了广泛应用。本文即从这三方面的水体环境变化分别阐述了湖泊、河口等水域的沉积物生源要素,在反映近百年来由人类活动造成的水体环境变化中的指示作用。

沉积物中 TOC、TN、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 CaCO_3 和 BSi 指标由于与水体生物活动密切相关,可以指示水体初级生产力水平。在众多的湖泊、河口的古环境研究中,沉积物中 TOC、TN、 $\delta^{13}\text{C}$ 、 CaCO_3 和 BSi 指标较好地指示了 18 世纪以来水体由于富营养化而造成的初级生产力增高的环境变化。同时反映了 20 世纪末期,由于实施了诸如限制磷排放等环境保护措施后,初级生产力水平的恢复。

在利用沉积物生源要素指示湖泊、河口的古生产力、富营养化等环境变化时,物质来源的确定必不可少。根据不同类型植物体内有机质 $\delta^{13}\text{C}$ 、 $\delta^{15}\text{N}$ 和 C/N 的差异,可以追踪沉积物有机质的来源。但沉积物中 $\delta^{15}\text{N}$ 的影响因素众多,其反映的环境信息有时复杂难辨,相比而言 $\delta^{13}\text{C}$ 反映的有机质来源往往比 $\delta^{15}\text{N}$ 更加可靠。关于沉积物磷的研究中,分级浸取为研究不同形态磷的来源提供了有效的研究方法。铁结合态磷(Fe-P)、铝结合态磷(Al-P)和碎屑态磷(Det-P)反映了磷的陆源输入,而自生钙结合态磷(ACa-P)是水体自生形成。

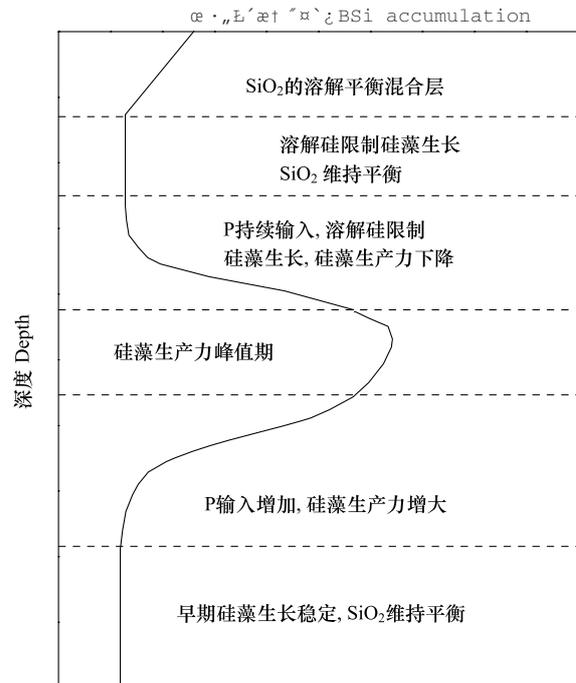


图2 磷输入持续增加的水域中,沉积物生源硅埋藏记录的理论模型^[28]

Fig. 2 Hypothetical model of BSi accumulation in the sediment record in waters with low-level phosphorus enrichment^[28]

近年来水体环境变化主导诱因即是氮、磷的大量输入,导致水体富营养化。营养盐的输入变化和水体的营养水平反映在了沉积物 TN、 $\delta^{15}\text{N}$ 、TP 和非磷灰石磷 (NAIP) 和 BSi 指标的变化中。沉积物 TN、TP、 $\delta^{15}\text{N}$ 和 NAIP 指示了水体氮、磷的输入和水体的营养水平。沉积物中 BSi 反映硅藻的生长,其峰状典型分布指示了氮、磷营养盐增加而导致的水体溶解硅限制状况。

颗粒物在沉降过程和沉积后的埋藏过程中,会受到多种因素如有机质矿化分解、再悬浮和水平搬运、粒度效应、温度、pH 值、氧化还原条件等环境因素的影响,而使最初的沉积纪录被改变,对沉积物记录反演古环境变化造成干扰。碳、氮、磷、硅 4 种生源要素物质的活性——即对成岩作用和环境条件变化的响应程度各不相同。一般来讲,其活性由大到小的顺序依次为 P、N、C、Si。磷最易受成岩作用影响,易从沉积物释放到水体中参与再循环。因此使得沉积物磷成为水体中生物可利用磷的重要来源和储库。同时,磷的高活性决定了其在反演古环境时的不确定性及复杂性。各形态的磷受到众多环境因素的影响,且在不同水域中主导因素常发生变化,使得各形态磷的环境意义不甚明确,应用磷来反演古环境变化的研究并不多见。所以,从各生源要素的活性顺序上也可以看出各指标反演环境的可靠性顺序,一般硅和碳的指标 (BSi、TOC、 $\delta^{13}\text{C}$) 比较稳定可靠,而氮的指标 (C/N、 $\delta^{15}\text{N}$) 可靠性则较差。因此,综合利用多指标共同反映环境信息对于得出准确合理的环境变化结论非常重要。另外,生物指标和地质动力学指标从不同侧面为指示水体环境变化提供了依据。并且一些新的具有环境意义的指标,如生物微化石、痕量金属元素,烷烃、芳烃、生物标志物等,也是非常潜力的古环境反演指标。如生物微化石中硅藻种属结构,在研究水体浮游植物种群结构和水域富营养化中发挥了重要的作用,已在许多河口的古环境重建中得到应用。综合这些生物指标、地球化学指标和地质动力学指标,共同应用于古环境变化的重建中,具有非常重要的意义,是古环境研究的发展趋势。

References:

- [1] Lamb A L, Wilson G P, Leng M J. A review of coastal palaeoclimate and relative sea-level reconstructions using $\delta^{13}\text{C}$ and C/N ratios in organic material. *Earth-Science Reviews*, 2006, 75(1/4): 29-57.
- [2] Meyers P A. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter. *Chemical Geology*, 1994, 114(3/4): 289-302.
- [3] Hodell D A, Schelske C L, Fahnenstiel G L, Robbins L L. Production, sedimentation, and isotopic composition of organic matter in Lake Ontario. *Limnology and Oceanography*, 1998, 43(2): 200-214.
- [4] Logan B, Taffs K H, Eyre B D, Zawadski A. Assessing changes in nutrient status in the Richmond River estuary, Australia, using paleolimnological methods. *Journal of Paleolimnology*, 2010, doi: 10.1007/s10933-010-9457-x.
- [5] Cooper S R, Mcglothlin S K, Madritch M, Jones D L. Paleoeological evidence of human impacts on the Neuse and Pamlico Estuaries of North Carolina, USA. *Estuaries and Coasts*, 2004, 27(4): 617-633.
- [6] Hori K, Saito Y, Zhao Q H, Chen X R, Wang P X, Sato Y, Li C X. Sedimentary facies of the tide-dominated paleo-Changjiang (Yangtze) estuary during the last transgression. *Marine Geology*, 2001, 177(3/4): 331-351.
- [7] Lario J, Spencer C D, Plater A J, Zazo C, Goy J L, Dabrio C J. Particle size characterisation of Holocene back-barrier sequences from North Atlantic coasts (SW Spain and SE England). *Geomorphology*, 2002, 42(1/2): 25-42.
- [8] Fabricius K E. Effects of terrestrial runoff on the ecology of corals and coral reefs; review and synthesis. *Marine Pollution Bulletin*, 2005, 50(2): 125-146.
- [9] Liu E F, Shen J, Zhang E L, Wu Y H, Yang L Y. A geochemical record of recent anthropogenic nutrient loading and enhanced productivity in Lake Nansihu, China. *Journal of Paleolimnology*, 2010, 44(1): 15-24.
- [10] Köster D, Lichter J, Lea P D, Nurse A. Historical eutrophication in a river-estuary complex in mid-coast Maine. *Ecological Applications*, 2007, 17(3): 765-778.
- [11] Schelske C L, Hodell D A. Using carbon isotopes of bulk sedimentary organic matter to reconstruct the history of nutrient loading and eutrophication in lake Erie. *Limnology and Oceanography*, 1995, 40(5): 918-929.
- [12] Vaalgamaa S, Korhola A. Geochemical signatures of two different coastal depositional environments within the same catchment. *Journal of Paleolimnology*, 2007, 38(2): 241-260.
- [13] Schelske C L, Robbins J A, Gardner W S, Conley D J, Bourboinniere R A. Sediment record of biogeochemical responses to anthropogenic perturbations of nutrient cycles in Lake Ontario. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1988, 45(7): 1291-1303.
- [14] Froelich P N, Klinkhamer G P, Benders M L, Luedtke N A, Heath G R, Cullen D, Dauphin P, Hammond D, Hartman B, Maynard V. Early oxidation of organic matter in pelagic sediments of the eastern equatorial Atlantic: suboxic diagenesis. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1979, 43(7): 1075-1090.
- [15] Song J M, Li X G, Shao J B, He Z P, Zhang N X. Biogeochemical characteristics of nitrogen and phosphorus in the South Yellow Sea sediments. *Oceanologia et Limnologia Sinica*, 2006, 37(4): 370-376.
- [16] Meyers P A. Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions; a summary of examples from the Laurentian Great Lakes. *Organic Geochemistry*, 2003, 34(2): 261-289.

- [17] Zhu C, Wang Z H, Xue B, Yu P S, Pan J M, Wagner T, Pancost R D. Characterizing the depositional settings for sedimentary organic matter distributions in the Lower Yangtze River-East China Sea Shelf System. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2010, 93(3): 182-191.
- [18] Ellegaard M, Clarke A L, Reuss N, Drew S, Weckström K, Juggins S, Anderson N J, Conley D J. Multi-proxy evidence of long-term changes in ecosystem structure in a Danish marine estuary, linked to increased nutrient loading. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2006, 68(3/4): 567-578.
- [19] Feng X W, Jing X L, Yu X G, Li H L, Chen J L, Qian J C. Sedimentary records of eutrophication in the Changjiang Estuary upwelling area over last 100 a. *Acta Oceanologica Sinica*, 2008 27(6): 49-61.
- [20] Hollander D J, Smith M A. Microbially mediated carbon cycling as a control on the $\delta^{13}\text{C}$ of sedimentary carbon in eutrophic Lake Mendota (USA): New models for interpreting isotopic excursions in the sedimentary record. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2001, 65(23): 4321-4337.
- [21] Meyers P A, Eadie B J. Sources, degradation and recycling of organic matter associated with sinking particles in Lake Michigan. *Organic Geochemistry*, 1993, 20(1): 47-56.
- [22] Hodell D A, Schelske C L, Fahnenstiel G L, Robbins L L. Biologically induced calcite and its isotopic composition in Lake Ontario. *Limnology and Oceanography*, 1998, 43(2): 187-199.
- [23] Lu Y H, Meyers P A, Eadie B J, Robbins J A. Carbon cycling in Lake Erie during cultural eutrophication over the last century inferred from the stable carbon isotope composition of sediments. *Journal of Paleolimnology*, 2010, 43(2): 261-272.
- [24] Reddy K R, Patrick W H, Broadbent F E. Nitrogen transformations and loss in flooded soils and sediments. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 1984, 13(4): 273-309.
- [25] Herczeg A L, Smith A K, Dighton J C. A 120 year record of changes in nitrogen and carbon cycling in Lake Alexandrina, South Australia: C:N, $\delta^{15}\text{N}$ and $\delta^{13}\text{C}$ in sediments. *Applied Geochemistry*, 2001, 16(1): 73-84.
- [26] Kemp A L W, Mudrocho A. Distribution and forms of nitrogen in a Lake Ontario sediment core. *Limnology and Oceanography*, 1972, 17(6): 855-867.
- [27] Lu X X, Song J M, Yuan H M, Li X G, Than T R, Li N, Gao X L, Shi X F. Grain size related distribution in Southern Yellow Sea surface sediments. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2005, 23(3): 306-316.
- [28] Schelske C L, Stoermer E F, Kenney W F. Historic low-level phosphorus enrichment in the Great Lakes inferred from biogenic silica accumulation in sediments. *Limnology and Oceanography*, 2006, 51(1): 728-748.
- [29] Nelson D M, Tréguer P, Brzezinski M A, Leynaert A, Quéguiner B. Production and dissolution of biogenic silica in the ocean-revised global estimates, comparison with regional data and relationship to biogenic sedimentation. *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, 9(3): 359-372.
- [30] Chmura G L, Santos A, Pospelova V, Pajojevic Z, Lam R, Latimer J S. Response of three paleo-primary production proxy measures to development of an urban estuary. *Science of the Total Environment*, 2004, 320(2/3): 225-243.
- [31] Zhou M J, Shen Z L, Yu R C. Responses of a coastal phytoplankton community to increased nutrient input from the Changjiang (Yangtze) River. *Continental Shelf Research*, 2008, 28(12): 1483-1489.
- [32] Corbett D R, Vance D, Letrick E, Mallinson D, Culver S. Decadal-scale sediment dynamics and environmental change in the Albemarle Estuarine System, North Carolina. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 2007, 71(3/4): 717-729.
- [33] Eadie B J, Mckee B A, Lansing M B, Robbins J A, Metz C, Trefry J H. Records of nutrient-enhanced coastal ocean productivity in sediments from the Louisiana continental shelf. *Estuaries and Coasts*, 1994, 17(4): 754-765.
- [34] Hu J F, Zhang G, Li K C, Peng P A, Chivas A R. Increased eutrophication offshore Hong Kong, China during the past 75 years: evidence from high-resolution sedimentary records. *Marine Chemistry*, 2008, 110(1/2): 7-17.
- [35] Herczeg A L. Early diagenesis of organic matter in lake sediments; a stable carbon isotope study of pore waters. *Chemical Geology: Isotope Geoscience Section*, 1988, 72(3): 199-209.
- [36] Qian J L, Wang S M, Xue B, Chen R X, Ke S Z. A method of quantitatively calculating amount of allochthonous organic carbon in lake sediments. *Chinese Science Bulletin*, 1997, 42(21): 1821-1823.
- [37] Lu C W, He J, Sun H M, Xue H X, Liang Y, Bai S, Sun Y, Shen L L, Fan Q Y. Application of allochthonous organic carbon and phosphorus forms in the interpretation of past environmental conditions. *Environmental Geology*, 2008, 55(6): 1279-1289.
- [38] Teranes J L, Bernasconi S M. The record of nitrate utilization and productivity limitation provided by $\delta^{15}\text{N}$ values in lake organic matter—a study of sediment trap and core sediments from Baldeggensee, Switzerland. *Limnology and Oceanography*, 2000, 45(4): 801-813.
- [39] Neumann T, Stögbauer A, Walpersdorf E, Stüben D, Kunzendorf H. Stable isotopes in recent sediments of Lake Arendsee, NE Germany: response to eutrophication and remediation measures. *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 2002, 178(1/2): 75-90.
- [40] Lu Y H, Meyers P A, Johengen T H, Eadie B J, Robbins J A, Han H J. $\delta^{15}\text{N}$ values in Lake Erie sediments as indicators of nitrogen biogeochemical dynamics during cultural eutrophication. *Chemical Geology*, 2010, 273(1/2): 1-7.
- [41] Cha H J, Lee C B, Kim B S, Choi M S, Ruttnerberg K C. Early diagenetic redistribution and burial of phosphorus in the sediments of the southwestern East Sea (Japan Sea). *Marine Geology*, 2005, 216(3): 127-143.
- [42] Ruttnerberg K C. Development of a sequential extraction method for different forms of phosphorus in marine sediments. *Limnology Oceanography*, 1992, 37(7): 1460-1482.
- [43] Jensen H S, Mcglathery K J, Marino R, Howarth R W. Forms and availability of sediment phosphorus in carbonate sand of Bermuda seagrass beds. *Limnology and Oceanography*, 1998, 43(5): 799-810.
- [44] He H J, Chen H T, Yao Q Z, Qin Y W, Mi T Z, Yu Z G. Behavior of different phosphorus species in suspended particulate matter in the Changjiang estuary. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2009, 27(4): 859-868.
- [45] Benitez-Nelson C R. The biogeochemical cycling of phosphorus in marine systems. *Earth-Science Reviews*, 2000, 51(1/4): 109-135.
- [46] Wang S R, Jin X C, Zhao H C, Wu F C. Phosphorus fractions and its release in the sediments from the shallow lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River area in China. *Colloids and Surfaces A-Physicochemical and Engineering Aspects*, 2006, 273(1/3): 109-116.

参考文献:

- [15] 宋金明, 李学刚, 邵君波, 贺志鹏, 张乃星. 南黄海沉积物中氮、磷的生物地球化学行为. *海洋与湖沼*, 2006, 37(4): 370-376.
- [16] 钱君龙, 王苏民, 薛滨, 陈如松, 柯善哲. 湖泊沉积物中一种定量估算陆源有机碳的方法. *科学通报*, 1997, 42(15): 1655-1658.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 5 March, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

- Statistical characteristics of eutrophication process in Dianshan Lake CHENG Xi, LI Xiaoping, CHEN Xiaohua (1355)
- Cadmium assimilation and elimination and biological response in *Pirata subpiraticus* (Araneae: Lycosidae) fed on Cadmium diets
..... ZHANG Zhengtian, ZHANG Guangduo, ZHANG Hucheng, et al (1363)
- Effect of co-cultivation time on camptothecin content in *Camptotheca acuminata* seedlings after inoculation with arbuscular
mycorrhizal fungi YU Yang, YU Tao, WANG Yang, et al (1370)
- Relationship between frequency of sandstorms and air humidity as well as plant phenology: a case study from the Minqin desert
area CHANG Zhaofeng, WANG Yaolin, HAN Fugui, et al (1378)
- Genetic diversity and evolution relationship on mtDNA D-loop in Tibetan yaks
..... ZHANG Chengfu, XU Lijuan, JI Qiumei, et al (1387)
- Geostatistical analysis on spatiotemporal distribution pattern of soil water content of forest gap in *Pinus koraiensis* dominated
broadleaved mixed forest LI Meng, DUAN Wenbiao, CHEN Lixin, et al (1396)
- Soil nitrogen and enzymes involved in nitrogen metabolism under different vegetation in Ziwuling mountain in the Loess Plateau,
China XING Xiaoyi, HUANG Yimei, HUANG Haibo, et al (1403)
- Soil carbon, nitrogen and microbiological characteristics during bamboo high-speed growth
..... WANG Xueqin, ZHANG Qichun, YAO Huaiying (1412)
- Effects of long-term increased soil N on leaf traits of several species in typical Inner Mongolian grassland
..... HUANG Juying, YU Hailong, YUAN Zhiyou, et al (1419)
- Influence of arbuscular mycorrhizal associations on the interspecific competition between mycorrhizal and non-mycorrhizal plants
..... ZHANG Yuting, WANG Wenhua, SHEN Hong, et al (1428)
- Structure and biodiversity of fig wasp community inside syconia of *Ficus virens* Ait. var. *sublanceolata* (Miq.) Corner in Fuzhou ...
..... WU Wenshan, CHEN Youling, CAI Meiman, et al (1436)
- Growth and photosynthetic characteristics of *Epimedium koreanum* Nakai in different habitats
..... ZHANG Yonggang, HAN Mei, HAN Zhongming, et al (1442)
- The critical temperature to Huashan Pine (*Pinus armandi*) radial growth based on the daily mean temperature
..... FENG Xiaohui, CHENG Ruimei, XIAO Wenfa, et al (1450)
- The analysis of grade diversity indices of butterfly community in the Three Gorges Reservoir Area of Yangtze River
..... MA Qi, LI Aimin, DENG Heli (1458)
- Research on dynamic characteristics of photosynthesis in muskmelon seedling leaves
..... HAN Ruifeng, LI Jianming, HU Xiaohui, et al (1471)
- Effects of different winter covering crops cultivation on methane (CH₄) and nitrous oxide (N₂O) emission fluxes from double-
cropping paddy field TANG Haiming, XIAO Xiaoping, SHUAI Xiqiang, et al (1481)
- Variations in groundwater levels and quality and their effects on vegetation in the western Grubantonggut Desert
..... ZENG Xiaoling, LIU Tong, ZHANG Weibin, et al (1490)
- Carbon and nitrogen stable isotope characteristics of particulate organic matter and zooplankton in Liuxihe Reservoir
..... NING Jiajia, LIU Hui, GU Binhe, et al (1502)
- Selection of vegetable seeds native in China instead of the cress seed for evaluating the maturity of biosolids
..... LIU Songsong, XU Tianfen, WU Qitang, et al (1510)
- Effects of anthropogenic nutrient input on organisms from different trophic levels in Hanfeng Lake: evidence from stable carbon
and nitrogen isotope analysis LI Bin, WANG Zhijian, JIN Li, et al (1519)
- Temporal and spatial distribution of phytoplankton in Liusha Bay ZHANG Caixue, CHEN Huiyan, SUN Xingli, et al (1527)
- Study on the supercooling of golden apple snail (*Pomacea canaliculata*)
..... ZHAO Benliang, ZHANG Jia'en, LUO Mingzhu, et al (1538)
- The effects of rice growth stages on the ovarian development and take-off of *Nilaparvata lugens* and *Sogatella furcifera*
..... CHEN Yu, FU Qiang, LAI Fengxiang, et al (1546)
- Cold tolerance of the overwintering egg of *Apolygus lucorum* Meyer-Dür (Hemiptera: Miridae)
..... ZHUO Degan, LI Zhaohui, MEN Xingyuan, et al (1553)
- A suggestion on the estimation method of population sizes of *Niviventer confucianus* in Land-bridge island
..... ZHANG Xu, BAO Yixin, LIU Jun, et al (1562)
- The carbon footprint of food consumption in Beijing WU Yan, WANG Xiaoke, LU Fei (1570)
- Anthropogenic phosphorus flow analysis of Hanshan County in Anhui Province
..... FU Yinyin, YUAN Zengwei, WU Huijun, et al (1578)
- A laboratory study of auctions for water rights transactions in inland river basin: a case study of irrigation areas of Heihe river
basin DENG Xiaohong, XU Zhongmin (1587)
- Review and Monograph**
- A review of the effect of typhoon on forests LIU Bin, PAN Lan, XUE Li (1596)
- Research progress on the effects of ocean acidification on coral reef ecosystems
..... ZHANG Chenglong, HUANG Hui, HUANG Liangmin, et al (1606)
- Interspecific competition among three invasive *Liriomyza* species
..... XIANG Juncheng, LEI Zhongren, WANG Haihong, et al (1616)
- Indicative significance of biogenic elements to eco-environmental changes in waters
..... YU Yu, SONG Jinming, LI Xuegang, et al (1623)
- Recent advances in studies on dissimilatory Fe(III)-reducing microorganisms
..... LI Huijuan, PENG Jingjing (1633)
- Discussion**
- Ecological vulnerability research for Xilingol League, Northern China XU Guangcai, KANG Muye, Marc Metzger, et al (1643)
- Scientific Note**
- Spatial distribution and species composition of zooplanktons in the eastern tropical Pacific Ocean off Costa Rica
..... LIU Bilin, CHEN Xinjun, JIA Tao, et al (1654)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 5 期 (2012 年 3 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 5 2012

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add: 18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071	Published by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100071, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100071 电话:(010)64034563 E-mail: journal@espg.net	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100071, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@espg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元