

苏州河沉积物中硅藻的垂直分布与水质变化

顾咏洁¹, 吕亚红²

(1. 华东师范大学环境科学系, 上海市城市化生态过程与生态恢复重点实验室, 上海 200062; 2. 华东勘测设计研究院, 杭州 310014)

摘要:分析了苏州河 2 个柱状沉积物样品中硅藻种类和丰度的垂直变化, 同时采用²¹⁰Pb 测年法推测沉积物的沉积速率, 并进行了有机质含量分析, 以了解苏州河在不同年代的水质变化。结果表明, 2 个柱状沉积物中硅藻的优势属为小环藻属、直链藻属、舟形藻属、圆筛藻属和针杆藻属。优势种为梅尼小环藻、瞳孔舟形藻和变异直链藻。就硅藻丰度而言, 总趋势是上层最多, 平均 $4.04 \sim 25.18 \times 10^4 \text{ ind/g}$; 下层其次, 平均 $1.41 \sim 4.43 \times 10^4 \text{ ind/g}$; 中层最少, 平均 $0.91 \sim 2.30 \times 10^4 \text{ ind/g}$ 。硅藻种类数变化虽无明显规律, 但种类最少的样品仍出现在中层, ²¹⁰Pb 测年数据表明中层为 20 世纪 60~80 年代。相关分析表明硅藻丰度与有机质含量呈显著正相关 ($p < 0.01$)。本文结果表明, 沉积物中硅藻可以反映苏州河的污染历程: 20 世纪 40~50 年代初, 水质尚可, 但已有富营养化现象, 表现在硅藻数量和丰度均较高; 50 年代中后期开始出现较严重的工业污染, 到 20 世纪 70~80 年代污染加重, 表现在中层沉积物中硅藻种类和数量均减少; 进入 20 世纪 90 年代, 水质有所改善, 上层沉积物中硅藻种类和数量又逐渐增多, 这与 90 年代以后加大对苏州河治理力度有关。

关键词:硅藻; 沉积物; 垂直变化; 有机质含量; 水质变化; 苏州河

文章编号: 1000-0933(2006)11-3617-07 中图分类号: Q949.27 文献标识码: A

The vertical distribution of diatoms in the sediments and water quality change of Suzhou Creek

GU Yong-Jie^{1,*}, LÜ Ya-Hong² (1. East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. Shanghai Key Laboratory for Ecology of Urbanization Process and Eco-restoration, Shanghai 200062, China; 3. East China Investigation & Design Institute, Hangzhou 310014, China). Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(11): 3617~3623.

Abstract: This article describes the vertical distribution of diatom taxa and their abundance in two sediment cores collected from Suzhou Creek. ²¹⁰Pb analysis was used to estimate the sedimentary rate of the two cores. The dominant genera in the cores were *Cyclotella*, *Aulacoseira*, *Navicula*, *Coscinodiscus* and *Synedra*, and the dominant species were *Cyclotella meneghiniana*, *Navicula pupula* and *Aulacoseira varians*. The diatom abundance in the two cores had similar trends, that is, the highest abundance occurred in the upper layers, with a range of $4.04 \sim 25.18 \times 10^4$ individuals/g. The bottom layers had a range of $1.41 \sim 4.43 \times 10^4$ individuals/g, and the lowest abundance occurred in the middle layers (with a range of $0.91 \sim 2.30 \times 10^4$ individuals/g). No obvious trend was found for the species richness in either column; however, the lowest species number occurred in the middle layers of the sediments, which corresponded to the decades between the 1960s and the 1980s. The results of a linear regression showed that the organic matter content was positively correlated with diatom abundance ($p < 0.01$) in both cores. Our results indicate that diatoms in the sediments can be used to trace the pollution history of Suzhou Creek. During the 1940's, the high abundance of diatoms in the bottom sediments indicated mildly eutrophic conditions. However, due to industrial pollution, the water quality deteriorated from the middle of the 1950's to the 1980's, and this is indicated by the decrease in

基金项目:上海市重点学科资助项目

收稿日期:2005-12-27; **修订日期:**2006-07-18

作者简介:顾咏洁(1950~), 女, 上海市人, 副教授, 主要从事环境生物学与污染生态学研究. E-mail: yjgu@des.ecnu.edu.cn

致谢:本研究的²¹⁰Pb 测年工作由河口海岸国家重点实验室张卫国博士协助完成, 特此致谢。

Foundation item: The project was financially supported by the Shanghai Priority Academic Discipline

Received date: 2005-12-27; **Accepted date:** 2006-07-18

Biography: GU Yong-Jie, Associate Professor, mainly engaged in environmental biology and pollution ecology. E-mail: yjgu@des.ecnu.edu.cn

diatom abundance in the middle layer of the sediments. The increase in diatom abundance in the upper layer of the sediments indicates the water quality improvement since the 1990's, which is related with the intensive implement of restoration efforts in Suzhou Creek.

Key words: diatom; sediment; vertical distribution; content of organic matter; water quality change; Suzhou Creek

硅藻在一般水体中都存在,它们对环境变化非常敏感,是指示环境状况的理想指标^[1,2]。硅藻的细胞壁含有丰富的硅质,藻体死亡后,藻壳能够留存在水底,并能得到较好的保存^[3],从而为监测海洋、湖泊、河流的污染状况和研究历史演变提供了十分重要的信息。因此,硅藻常被用来研究过去环境的变迁^[4~6],尤其是对于有机污染的河流^[7],在许多水环境领域得到应用。2000 年欧盟水框架指南将硅藻推荐为在当前水环境整治决策中可以用来确定营养水平的一个行之有效的生物指标^[8]。

我国大陆地区对沉积硅藻的研究也有一些报道,如对黄海-渤海的表层沉积硅藻的研究,解释海洋环境的变化及地质意义^[9,10],有对南海晚第四纪硅藻的研究,分析硅藻种类与生态环境之间的关系^[11],以及采用沉积硅藻组合特征变化来研究环境变化^[12,13]。也有采用硅藻研究水体的营养状况、pH,进而了解古湖沼生态及其历史演变过程^[3]。董旭辉等对湖泊不同营养状态特征和规律,进行了现代沉积硅藻的生态学研究^[14]。而用沉积硅藻进行河流环境的研究报道较少,尤其是以沉积硅藻推测河流水质污染变化则更少。

苏州河是贯穿上海的一条主要河流,由于上海的工业快速发展,人口迅速增长,苏州河被严重污染,但有关苏州河水质近几十年历史变迁的研究甚少。由于硅藻的种类、数量与水质有一定的关系,并且沉积物中硅藻的遗骸能充分反映当时活体群的种类组成^[14,15]。通过研究沉积物的垂直变化,有可能提供污染变化的历史信息^[16]。因此本文拟从苏州河沉积物中硅藻的种类、丰度和有机质含量的垂直变化,结合²¹⁰Pb 测年方法,推测苏州河近几十年来的水质变化。

1 研究方法

1.1 样品采集

在苏州河污染严重的工业区—北新泾和苏州河中游的盲端—盘湾里二处钻孔取柱状样(图 1),采样深度一般到苏州河底部自然泥层处,柱样长度分别为 105cm 和 170cm。采样后将样品置于塑料管中,北新泾柱样每 2cm 为一个样品,盘湾里柱样每 5cm 为一个样,共获样品 80 份,用自封袋密封放入冰柜低温保存备用。

1.2 样品处理

湿样用 15% 过氧化氢处理一昼夜,加入 1mol/L HCl 煮沸处理 20min 以去除样品中的有机物。再用 2.5mmol/L Na₄P₂O₇ 去除样品中的粘土物质,重复多次,转至塑料瓶中后加蒸馏水,使总体积为 30ml,再加 2~3 滴酒精,保存备用^[17]。

1.3 硅藻鉴定和数量统计

硅藻鉴定在光镜下进行,由于沉积硅藻只能保存藻体特征,因此一般鉴定到属,优势种类鉴定到种。硅藻数量按浮游生物计数法^[18]进行统计,统计结果换算成每克干样中的硅藻个体数,计算公式如下:

$$N = C \cdot V / [S \cdot (1 - W)]$$

式中, C 为每毫升样品中硅藻数, S 为土样湿重, W 为土样含水率, V 为样品体积。

土壤含水率采用 MA30 型土壤水分测定仪测定。

1.4 ²¹⁰Pb 测年

准确称取约 3g 样品,装入样品管中,压实、蜡封后放置 3 周,然后使用 ORTEC 高纯锗井型探头(GWL-120210-S)进行放射性同位素测量,柱状样样品通过测量²¹⁰Pb 放射性比活度的垂直分布,采用 C. I. C 模式求出

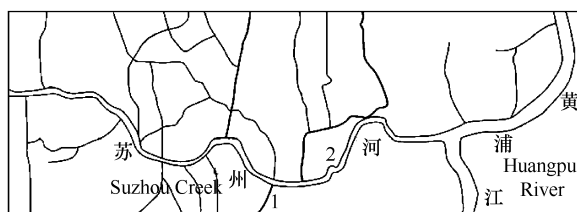


图 1 苏州河采样点示意图

Fig. 1 The sampling sites along Suzhou Creek

1 = 北新泾 Bei Xinjing; 2 = 盘湾里 Pan Wanli

其沉积速率和沉积年龄。计算公式^[19]如下:

$$D_R = \frac{H\lambda}{\ln \frac{I_0}{I_s}}$$

式中, D_R 为沉积速率, H 为深度, λ 为²¹⁰Pb 的衰变常数, I_0 为表层²¹⁰Pb 放射性活度, I_s = 深度为 H 处的²¹⁰Pb 放射性活度。

1.5 有机质含量测定

按中国科学院南京土壤所《土壤理化分析》^[20]中的方法进行。

2 结果与分析

2.1 柱状样的沉积速率和沉积年龄

2 个柱状样由于沉积速率不同,故不同深度代表的年代不尽相同,北新泾柱状样的平均沉积速率为 1.943cm/a。因此这段沉积物最底层的沉积时间可以回溯到 20 世纪 40 年代。盘湾里柱状样的平均沉积速率为 3.14cm/a,沉积物最底层的沉积时间也可以回溯到 20 世纪 40 年代中期。

2.2 沉积物中硅藻的属种组成和丰度分布的总趋势

盘湾里柱样共有 32 属 83 种,北新泾柱样共有 31 属 73 种。分析 2 个柱状样中硅藻种类出现的频率,有 5 个属的藻类在各柱状样的样品中出现频率较高,它们是小环藻属(*Cyclotella*)、直链藻属(*Aulacoseira*)、舟形藻属(*Navicula*)、圆筛藻属(*Coscinodiscua*)、针杆藻属(*Synedra*),其中圆筛藻属出现最多,达 100%,即 2 个柱状样共 80 个样品中每个样品都有圆筛藻属的藻种出现。其次是小环藻属,出现频率为 97%,最低的是针杆藻属为 72%(表 2)。从丰度分布来看,小环藻属个体数最多,占总数的 35%以上,最少的是针杆藻属(表 2)。

表 1 2 个柱样沉积物中优势硅藻属的丰度、百分比和出现频率

Table 1 The statistics for diatoms in the sediments of two cores

	北新泾 Bei Xinjing			盘湾里 Pan Wanli		
	丰度 Abundance (ind/g) ×10 ⁵	频率 Frequency (%)	占总个体数百 分比 Percentage in the total (%)	丰度 Abundance (ind/g) ×10 ⁵	频率 Frequency (%)	占总个体数百 分比 Percentage in the total (%)
小环藻属 <i>Cyclotella</i>	12.60	92.68	38.20	4.25	100	51.14
舟形藻属 <i>Navicula</i>	4.90	78.05	14.91	0.44	87.18	5.27
直链藻属 <i>Aulacoseira</i>	4.37	68.26	13.28	1.37	89.74	16.46
圆筛藻属 <i>Coscinodiscua</i>	3.01	100	9.34	0.64	100	7.70
针杆藻属 <i>Synedra</i>	2.20	70.73	6.69	0.34	69.23	4.11

2.3 沉积物中硅藻种类数和丰度的垂直变化

根据沉积物不同深度及其所对应的不同年代,将 2 个柱状样自下而上分成 4 层,分析硅藻种数(图 2)和丰度(图 3)的分布特点。

下层:北新泾柱样 104~79cm(20 世纪 40~50 年代)除了个别样品外,硅藻种类数保持在 10 种左右,丰度基本稳定在 1.1 ×10⁴ind/g,盘湾里柱样 168~130 cm(20 世纪 40~50 年代)处硅藻种类数减少,尤其是埋深 138~130cm 处,减少速度加快,由 24 种减少到 8 种,硅藻丰度也同时快速下降,但中间出现了一个峰值,丰度达到 6.19 ×10⁴ ind/g。然后又逐渐下降,由 3.2 ×10⁴ind/g 减到 1.3 ×10⁴ind/g。

中层(B):北新泾柱样 77~59cm(60 年代)硅藻种类数在该层段逐渐减少,大部分样品有 10 种左右。盘湾里柱样 124~96cm(60 年代)基本维持在 11~14 种。2 个柱样的硅藻丰度变化趋势基本相似,都出现一些变化范围不大的小波动。

中层(A):北新泾柱样 57~39cm(20 世纪 70 年代)硅藻种类数量呈锯齿状逐步增加,同时丰度也缓慢增加,盘湾里柱样 94~34cm(20 世纪 70~80 年代)硅藻种类数出现波动,大都分样品在 9~14 种之间,硅藻丰度也出现振荡,但以小幅增加为主。

上层:北新泾柱样 39~5cm(20 世纪 80~90 年代)种类数在 26~40 种之间波动,盘湾里柱样硅藻种类数基本呈上升趋势,即越接近表层,种类越多,盘湾里柱样 34~5cm(20 世纪 80 年代末到 90 年代)从 7 种增加到 23 种。北新泾柱样硅藻丰度变化较大,先升高,硅藻丰度最大可达 $46.0 \times 10^4 \text{ ind/g}$,然后下降,再慢慢上升,到达近表层时,升至 $28.8 \times 10^4 \text{ ind/g}$,盘湾里柱样硅藻丰度的变化趋势是快速上升,从 $0.5 \times 10^4 \text{ ind/g}$ 上升到 $7.0 \times 10^4 \text{ ind/g}$ 。

2.4 沉积物中有机质含量及与硅藻丰度的关系

2 个柱样中有机质含量见图 4。北新泾柱样下层有机质含量较低(图 4a),硅藻数量也不多,上层有机质含量较高,硅藻数量也明显增加,盘湾里柱样也出现类似的情况,如在 140cm 处有机质含量出现一个峰值(图 4b),相应地种类和丰度在此处也出现一个峰值,2 个柱样有机质与丰度的变化趋势基本一致。相关分析表明,2 个柱样中有机质含量与硅藻丰度存在极显著的正相关($p < 0.01$),北新泾和盘湾里沉积物柱样中有机质和硅藻丰度的相关系数分别达到 0.5119 和 0.6309。

2.5 沉积物中主要优势种密度的垂直分布

根据表 1 可知,小环藻属、舟形藻属、直链藻属不仅出现频率高,而且个体数也多,在小环藻属中绝大部分是梅尼小环藻(*Cyclotella meneghiniana*)。舟形藻属中以瞳孔舟形藻(*Navicula pupula*)为主,直链藻属中是变异直链藻(*Aulacoseira varians*)占优势。北新泾柱样该 3 个藻种的优势度分别为 0.343、0.036、0.022,盘湾里柱样该 3 个藻种的优势度分别为 0.490、0.019、0.100,密度垂直分布见图 5、图 6。

优势种密度随深度而变化的趋势与总的硅藻丰度分布趋势类似,各柱样下层的硅藻密度稍有不同,北新泾柱样优势种密度无明显变化,盘湾里柱样在 140cm 处梅尼小环藻、瞳孔舟形藻和变异直链藻都出现一个峰值,这与总丰度相吻合,表明样品中以这 3 种硅藻为主。中层(A 层和 B 层)3 种硅藻的数量均较少,无明显变化。上层变化幅度较大,可能是由于苏州河刚开始治理,水质不太稳定,导致水中硅藻数量时多时少。

3 讨论

苏州河 2 个沉积物柱样中硅藻丰度的垂直变化呈现相似的变化规律,上层最多,平均 $4.04 \times 10^4 \sim 25.18 \times 10^4 \text{ ind/g}$;下层其次,平均 $1.41 \times 10^4 \sim 4.43 \times 10^4 \text{ ind/g}$;中层最少,平均 $0.91 \times 10^4 \sim 2.53 \times 10^4 \text{ ind/g}$ 。种类数的变化在 2 个柱样有所不同,但种类最少的都处于中层(A 或 B),尤其是北新泾柱样的 66cm 处,种类最少,仅有 4 种,丰度为 $0.5 \times 10^4 \text{ ind/g}$,盘湾里柱样的 66cm 处种类为 5 种,丰度为 $0.6 \times 10^4 \text{ ind/g}$ 。对照²¹⁰Pb 测年结果,柱

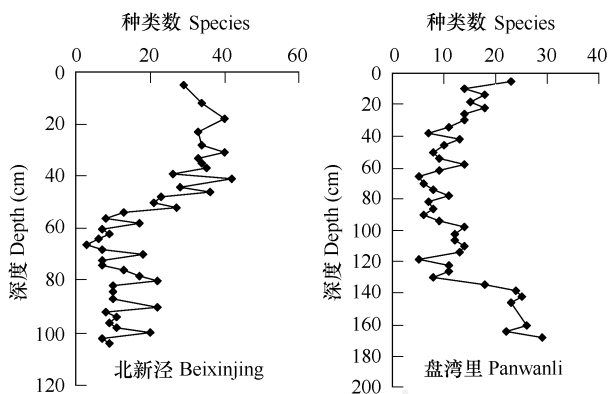


图 2 沉积物中硅藻种类数的垂直变化

Fig. 2 The vertical diversification of the diatom types in sediments

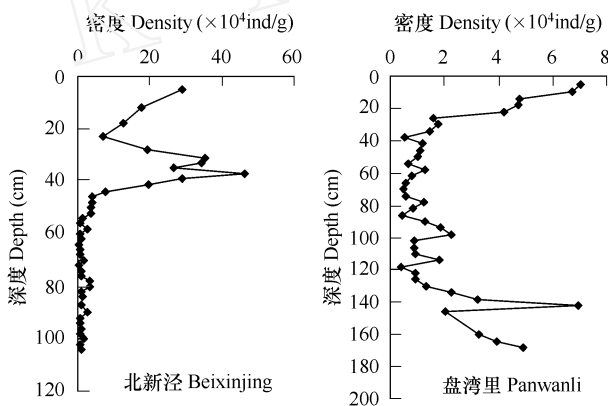


图 3 沉积物中硅藻丰度的垂直变化

Fig. 3 The vertical distribution of the diatom abundance in sediments

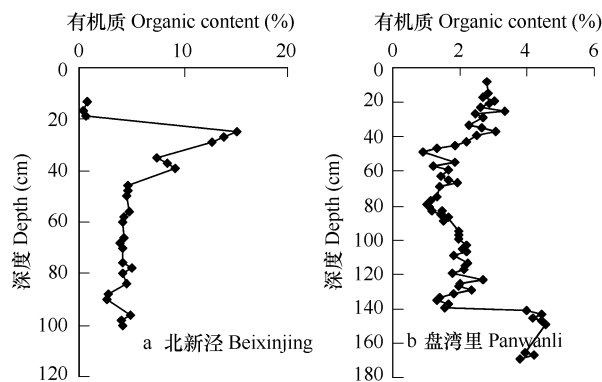


图 4 沉积物中有机质含量的垂直变化

Fig. 4 The vertical distribution of the organic contents in sediments

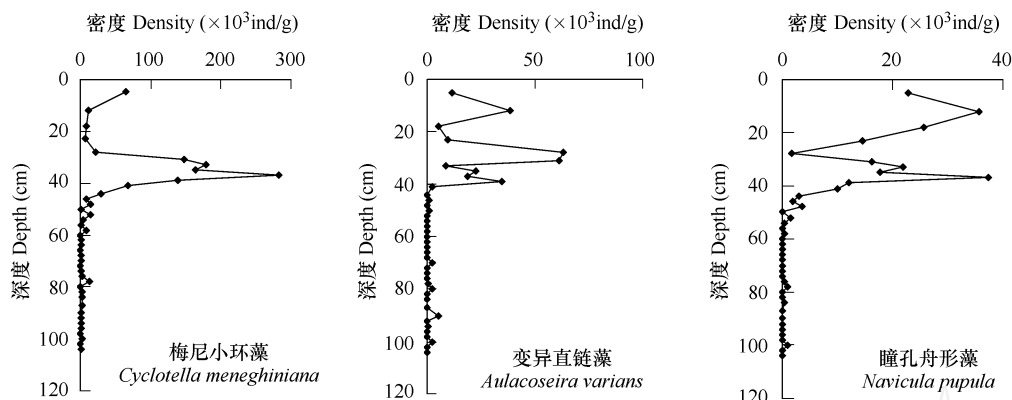


图5 北新泾优势种密度的垂直变化

Fig. 5 The vertical distribution of dominant species density in Beijinjing

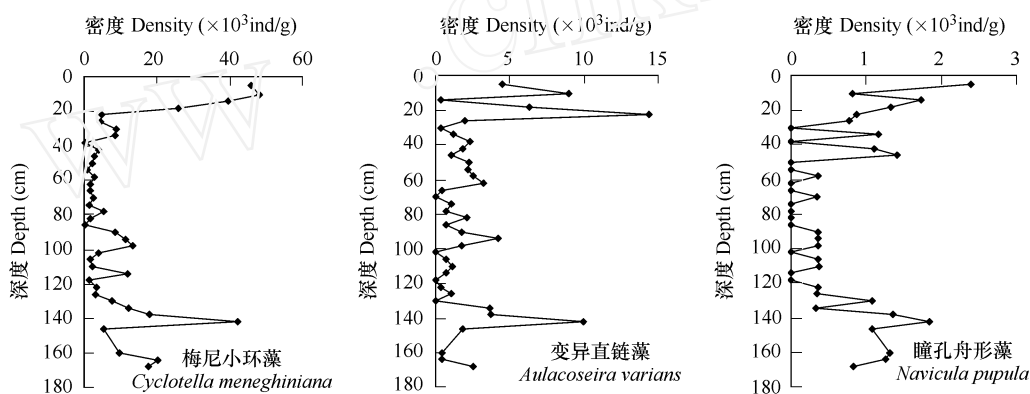


图6 盘湾里密度优势种密度的垂直变化

Fig. 6 The vertical distribution of dominant species density in Panwanli

样的上层处于 20 世纪 80~90 年代中期。

自 1988 年起上海市政府开始对苏州河进行治理,1993 年苏州河污水合流一期工程开始投入运行后,苏州河水质有了一定程度的改善,所以硅藻的种类和丰度都有所增加。中层的沉积时间大约为 20 世纪 60 年代和 70 年代,这一阶段苏州河两岸污染严重的化工、印染、造纸工厂兴起,使苏州河水质污染日趋严重,导致大部分敏感水生生物不能适应而死亡,同时硅藻种类和密度也相应减少。盘湾里的柱状样中 140cm 处沉积物中的硅藻种类和丰度都出现一个峰值,也是与苏州河水质有关,由²¹⁰Pb 测年数据推算,这段沉积物大约在 1950 年以前沉积下来的,当时苏州河水质较好,藻类生长基本不受影响,种类和丰度都较高,而北新泾下层未出现峰值,据了解 1950 年之前此处已建有部分工厂,可能当时水质已受到影响。富营养程度高于盘湾里,可能以绿藻、蓝藻为主,所以硅藻种类和丰度没有出现峰值。然而在 20 世纪 50 年代中后期,苏州河两岸工业快速发展,大量工业废水和居民生活废水排入苏州河,水质受到一定程度影响,所以在该层段种类和密度都有所下降。

根据已有研究,梅尼小环藻为 $\alpha\beta$ 中污带指示物种,瞳孔舟形藻为 α 中污带指示物种,变异直链藻是 β 中污带指示物种^[21],这 3 种硅藻在有机污染的河流中经常出现^[22]。从该 3 种硅藻密度在近表层的分布来看,数量波动较大,而从苏州河的监测指标来看,反映出水体以有机污染为主,大部分河段综合类别为 V 类水^[23]。由此从另一个侧面反映了苏州河的污染状况。

沉积物中硅藻种类和丰度变化主要与沉积年代水体质量有关,一般认为影响硅藻种类和数量的因素主要

有 N、P、有机质等^[24,25]。杨洪等人^[26]发现武汉东湖沉积物中硅藻的分布与相应的总氮、总磷、总有机碳关系密切,在中富营养到富营养初期,硅藻种类较丰富^[14],从而反映了人类活动的影响。本文研究表明,硅藻的丰度与有机质含量有关,这一结论与 Denys^[27]的一致。

由于沉积物具有时间上连续的特点,因此,利用沉积物中硅藻可以追溯河流、湖泊水质的变化历史。吴俊宗及其合作者^[1~3]根据沉积物中硅藻的变化,重建了台湾湖泊水质变化历史,并以其中硅藻种类和数量的垂直变化反映了不同年代的水质变化。本研究也反映了苏州河的污染历程:20 世纪 40~50 年代初及更早时期,水质尚可,但已有富营养化现象,表现在硅藻数量和丰度均较高;50 年代中后期已开始出现较严重的工业污染,并且到 20 世纪 70~80 年代污染加重,致使硅藻很难生存,表现在中层沉积物中硅藻种类和数量均减少;进入 90 年代,水质有所改善,上层沉积物中硅藻种类和数量又逐渐增多,这与 90 年代以后对苏州河治理力度加大,沿岸工厂大量搬迁,废水达标排放或纳入合流污水管是一致的。

References :

- [1] Wu J T, Chang S C. Relation of the diatom assemblages in the surface sediments to the pH values of an alpine lake in Taiwan. *Arch Hydrobiol*, 1996, 137: 551~563.
- [2] Luc Denys. Relation of abundance-weighted averages of diatom indicator values to measured environmental conditions in standing freshwaters. *Ecological Indicators*, 2004, 4: 255~275.
- [3] Su H, Wu J T. Paleolimnological environment indicate by the diatom and pollen assemblages in an alpine lake in Taiwan. *Journal of Paleolimnology*, 1999, 22: 149~158.
- [4] Wu J T, Chuang P P, Wu L Z, *et al.* Diatom as indicators of environmental changes: a case study in Great Ghost Lake. *Proc. Natl. Sci. Counc.*, 1997, 21: 112~119.
- [5] Gao Y H, Chen C P, Liang J R. Preliminary Studies on Nanodiatoms in Sedimental Samples of Wenzhou City and Zhenhai City in Zhejiang Province and Jiulong River in Fujian Province. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2004, 43(2): 237~243.
- [6] Zhi C Y, Wang K F. Diatom Ecotype of Habitation and Their Distribution in Surface Sediments around Xiamen Island and in Taiwan Straits. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2005, 33(7): 971~975.
- [7] Sládeček V. Diatoms as indicators of organic pollution. *Arch Hydrochim Hydrobiol*, 1986, 14: 555~566.
- [8] Tommi Kauppila, Teppo Moisioet, Veli Pekka Saionen. A diatom-based inference model for autumn epilimnetic total phosphorus concentration and its application to a presently eutrophic boreal lake. *J paleolim.*, 2002, 27: 261~273.
- [9] Wang K F. The diatom assemblage in the top layer of sediments in the Yellow Sea and their zoning. *The Proceeding of the first Chinese alge conference.* Beijing: Geological Press, 1985. 17~24.
- [10] Cheng G F, Cao Y Q. The quantitative study of the diatoms in surface sediments of central southern part of Bo Hai Sea. *Journal of Ocean University of Qingdao*, 1991, 21(4): 57~73.
- [11] Lan D Z. Late quaternary diatom remains in South China Sea and their geological significance I Diatom species and their ecological environments. *Journal of Oceanography in Taiwan Strait*, 1993, 12: 393~401.
- [12] Wang K F, Zhi C Y, Tao M H. Study on Diatom Assemblage in Surface Sediment Profile of Tidal Beach Near Xiamen. *Marine Science Bulletin*, 2003, 22(5): 15~19.
- [13] Zhi C Y, Wang K F. Study of the relationship between diatom assemblage and paleoenvironment of the late quaternary in the Taiwan channel and Xiamen island. *Acta Micropalaeontologica Sinica*. 2003, 20(3): 244~252.
- [14] Dong X H, Yang X D, Pan H X. Distribution of Modern Lake Sediment Diatoms in the Middle and Lower Reaches of Yangtze River Catchment. *Journal of Lake Sciences*, 2004, 16(4): 298~304.
- [15] Itan K. translated by Wang K F. Guo X M. Diatom. Beijing: Geology Press, 1984. 44~53.
- [16] Meyers A Philip. Applications of organic geochemistry to paleolimnological reconstructions: a summary of examples from the Laurentian Great Lakes. *Organic Geochemistry*, 2003, 34(2): 261~289.
- [17] Yōkichi Takayanagi. translated by Ying F. The guideline of the fossil. Beijing: Geology Press, 1984. 67~70.
- [18] Zhang Z S, Huang X F. The Research Method for the fresh water Plankton. Beijing: Science Press, 1991. 336~339.
- [19] Li F Y, Gao S, Jia J J. Contemporary deposition rates of fine-grained sediment in the Bo Hai and Yellow Seas. *Oceanologia Etlimnologia Sinica*, 2002, 33(4): 364~369.

- [20] Institute of soil science, Chinese academy of science. The physical and chemical analyses for soils. Shanghai: Shanghai Science And Technology Press, 1978. 448~449.
- [21] Japanese ecology society special committee on environment, translated by Lu Q Z. Environment and indicator species. Beijing: China Environmental Science Press, 1987.
- [22] Lin B Q, Xie S Q. Aquatic alga and water pollution monitoring. Shenyang: Liao Ling University Press, 1988. 231~234.
- [23] Ruan R L. Research of Water Environment in Shanghai. Beijing: Science Press, 2000.
- [24] Kristiina Vuorio, Annika Lagus, Jaana M. Lehtimäki, *et al.* Phytoplankton community responses to nutrient and iron enrichment under different nitrogen to phosphorus ratios in the northern Baltic Sea. Journal of experimental Marine Biology and Ecology, 2005, 322: 39~52.
- [25] Chen S Y, Yu X Q, Wu A Q. Lake nutrients accumulation process from lacustrine records in the Middle and Lower reaches of the Yangtze River. Ecology and Environment, 2005, 14(4): 526~529.
- [26] Yang H, Yi C L, Xie P, *et al.* Records of human activities in the sediments of lake Donghu, Wuhan. China Environmental Science, 2004, 24(3): 261~264.
- [27] Denys L. Environmental changes in man-made coastal dune pools since 1850 as indicated by sedimentary and epiphytic diatom assemblages (Belgium). Aquatic Conservation, 13: 191~211.

参考文献:

- [5] 高亚辉, 陈长平, 梁君荣, 等. 浙江温州、镇海和福建九龙江沉积微型硅藻的初步研究. 厦门大学学报(自然科学版), 2004, 43(2): 237~243.
- [6] 支崇远, 王开发. 台湾海峡表层沉积硅藻栖性生态类型及其分布. 同济大学学报(自然科学版), 2005, 33(7): 971~975.
- [9] 王开发. 黄海表层沉积的硅藻组合及分区. 中国第一届藻类学术会议选集. 北京: 地质出版社, 1985. 17~24.
- [10] 程广芬, 曹玉强. 渤海中、南部表层沉积硅藻的定量分析. 青岛海洋大学学报, 1991, 21(4): 57~73.
- [11] 蓝东兆. 南海晚第四纪硅藻遗体及其地质意义 I. 硅藻种类及其生态环境. 台湾海峡, 1993, 12(4): 393~401.
- [12] 王开发, 支崇远, 陶明华. 厦门附近潮滩表层沉积剖面硅藻组合研究. 海洋通报, 2003, 22(5): 15~19.
- [13] 支崇远, 王开发, 蓝东兆, 等. 闽南第四纪晚期沉积硅藻组合与古环境研究. 微体古生物学报, 2003, 20(3): 244~252.
- [14] 董旭辉, 羊向东, 潘红玺. 长江中下游地区湖泊现代沉积硅藻分布基本特征. 湖泊科学, 2004, 16(4): 298~304.
- [15] 小泉格编, 王开发, 郭蕃民译. 硅藻. 北京: 地质出版社, 1984. 44~53.
- [17] 高柳杨吉编, 尹付译. 微体化石研究指南. 北京: 地质出版社, 1984. 67~70.
- [18] 章宗涉, 黄祥飞. 淡水浮游生物研究方法. 北京: 科学出版社, 1991. 336~339.
- [19] 李风业, 高抒, 贾建军, 等. 黄、渤海泥质沉积区现代沉积速率. 湖泊与海洋, 2002, 33(4): 364~369.
- [20] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析. 上海: 上海科学技术出版社, 1978. 448~449.
- [21] 日本生态学会环境问题专门委员会编, 卢全章译. 环境和指示生物. 北京: 中国环境科学出版社, 1987. 60~67.
- [22] 林碧琴, 谢淑琦. 水生藻类与水体污染监测. 沈阳: 辽宁大学出版社, 1988. 231~234.
- [23] 阮仁良. 上海市水环境研究. 北京: 科学出版社, 2000. 87~97.
- [25] 陈诗越, 于兴修, 吴爱琴. 长江中下游湖泊富营养化过程的湖泊沉积记录. 生态环境, 2005, 14(4): 526~529.
- [26] 杨洪, 易朝路, 谢平, 等. 人类活动在武汉东湖沉积物中的记录. 中国环境科学, 2004, 24(3): 261~264.