

茅尾海沉积物营养物质空间分布特征研究

吴文成^{1,2}, 任露陆³, 蔡信德¹

(1.环境保护部华南环境科学研究所, 广州 510655; 2.中山大学生命科学学院, 广州 510006; 3.广东环境保护工程职业学院, 广东佛山, 528216)

摘要:弄清沉积物中营养物质(如氮和磷)的迁移富集规律,对于海域的渔业资源保护和利用、疏浚沉积物综合利用与生态环境功能恢复都非常重要。2010年1月在茅尾海设置7个采样点,分层采集0~30 cm的沉积物样品,研究了茅尾海沉积物中有机质、总氮、无机氮、总磷和溶解性磷酸盐等营养物质的空间分布特征,并利用有机指数法对其营养水平进行了评价。结果表明,有机质、总氮与无机氮含量自茅尾海湾内至湾外呈显著下降的空间变化趋势,有机质在垂向分布上变化不明显,总氮与无机氮含量呈现逐渐增大的趋势,但不显著,3种营养物质之间均有极显著的正相关关系($P<0.01$);而总磷与溶解性磷酸盐在水平与垂向分布上总体均呈现“低-高-低”波浪型的变化趋势,两项指标在湾内与湾外、各层次间未出现显著性差异,而两者间有极显著的正相关关系($P<0.01$),且相关系数高达0.96,表明有机质、总氮与无机氮,总磷与溶解性磷酸盐两组营养物质各有同源性。调查海域的有机指数平均值为0.06,属高营养,且位于湾内的3个站点均超过0.08,处于严重污染的高营养状态;C/N值表明,调查海域的营养物质除少量来源于藻类和浮游生物外,多数来源于周边的陆生环境。

关键词:茅尾海;沉积物;氮;磷;有机指数

中图分类号:X524 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2014)01-0162-10 doi:10.11654/jaes.2014.01.021

Spatial Distribution of Nutrients in Sediments of the Maowei Sea

WU Wen-cheng^{1,2}, REN Lu-lu³, CAI Xin-de¹

(1.South China Institute of Environmental Sciences, MEP, Guangzhou 510655, China; 2.College of Life Science, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510006, China; 3.Guangdong Vocational College of Environmental Protection Engineering, Foshan 528216, China)

Abstract: Understanding environmental processes of nutrients (e.g., nitrogen and phosphorus) in sediments is crucial for fishery, environmental protection and management. Spatial distribution patterns of organic matter (OM), total nitrogen (TN), inorganic nitrogen (IN), total phosphorus (TP) and soluble reactive phosphate (SRP) were investigated in surface sediments (0~30 cm) sampled at seven sites of the Maowei Sea in January 2010. Concentrations of OM, TN and IN decreased from the inner bay to the outer parts. Organic matter did not change at different depths, but concentrations of TN and IN tended to decrease with depths. Significant positive relationships were found amongst OM, TN and IN. Total phosphorus and SRP had low-high-low patterns from the inner to the outer and along depths, and were significantly correlated ($r=0.96$, $P<0.01$). The nutrient index was averagely 0.06 across the sampling sites, with greater than 0.08 at three sites located in the inner bay, indicating high pollution of these sites. High C/N ratio suggested that nutrients in the sediments mainly came from terrestrial ecosystems.

Keywords: Maowei Sea; sediment; nitrogen; phosphorus; organic index

沉积物是水体污染负荷的重要源和库。近岸海域,尤其是狭长型或半封闭型海湾在长期的外源输入和水生生物残渣的沉积过程中,大量有机质、含氮物质

富集于沉积物中,当环境发生改变时,会重新释放到水体,这也常是导致海水出现富营养化的主要原因^[1-2]。因此,弄清海域沉积物中营养物质的时空分布规律对于海域的渔业资源保护和利用、沉积物疏浚和综合利用以及海域生态环境功能恢复都是非常重要的。

茅尾海位于广西壮族自治区钦州市南部海域,面积约135 km²,海湾内宽口窄,呈椭圆形,东西北三面为陆地包围,水深较浅,北部有钦江、茅岭江注入丰富

收稿日期:2013-06-04

基金项目:中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金课题(zx_200809_17);国家环境保护公益科研专项(201109020)

作者简介:吴文成(1981—),男,广东英德人,博士研究生,工程师,从事生态环境研究。E-mail:wuwencheng@scies.org

的营养物质和矿物质,使茅尾海成为中国最大的近江牡蛎天然采苗区,渔业养殖面积超过 10 km²。但近年来,由于茅尾海海洋工程的建设、养殖业的过度发展,以及上游钦江、茅岭江带来的工业、生活与采矿污水,使茅尾海的污染日益加重^[3]。有研究者^[4]利用该海域 2003—2010 年不同水期的数据,分析发现茅尾海的水质从贫营养往中度富营养和重富营养化发展,已属于轻度污染。2008 年经国务院批复的《广西北部湾经济区发展规划》明确提出,要“建设茅尾海海洋生态保护区”,当地政府拟加大整治力度,力求恢复该海域的生态功能。然而,前人对茅尾海的研究主要集中在水体重金属污染与富营养化水平^[4-6],尚未见对其沉积物中营养物质的调查报道。本研究通过柱层采样,分析了该海域表层(0~30 cm)沉积物中有机质(organic matter, OM)、总氮(total nitrogen, TN)、无机氮(inorganic nitrogen, IN)、总磷(total phosphorus, TP)和溶解性磷酸盐(soluble reactive phosphate, SRP)的空间分布特征,并对它们之间的相关关系及沉积物的综合营养水平进行探讨,不仅可以揭示主要营养物质在该海域的空间分布规律,还可以对茅尾海渔业资源保护和利用、疏浚沉积物综合利用与生态环境功能恢复产生重要意义。

1 材料与方法

1.1 样品采集及处理

基于茅尾海的水文水质特点、海湾形状、沿程污染源分布以及沉积物的沉积特征,共设置 7 个采样点(图 1),其中海湾内 3 个(1#~3#),海湾外 4 个(4#~7#)。试验于 2010 年 1 月进行,利用采样器(直径 8 cm)于各采样点分别采集 2 至 3 柱沉积物平行样,现场按 0~2、2~

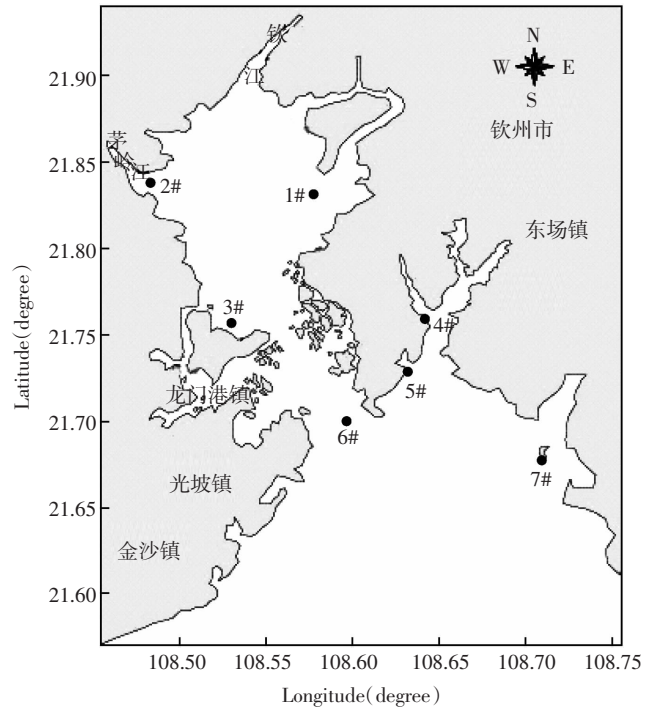


图 1 采样站点分布

Figure 1 Sampling locations in the Maowei Sea

4、4~6、6~8、8~10、10~15、15~20、20~30 cm 切割、混合得到分层样品;样品储于双层聚乙烯袋中,4℃保存。所有样品均在 48 h 内测定氨氮(NH₄⁺-N)、硝态氮(NO₃⁻-N)和亚硝态氮(NO₂⁻-N)等,然后将沉积物样品-80℃冷冻干燥,剔除杂物后研磨至适宜粒径大小备用。各点沉积物样品基本理化性质的研究结果见表 1。

1.2 样品分析方法

本研究中无机氮包含氨氮、硝态氮和亚硝态氮 3 种形态。沉积物样品分析除粒径组成采用欧美克粒度仪外,其他均参照《土壤农化分析》^[7]的方法;pH 采用

表 1 茅尾海沉积物理化性质

Table 1 Physic-chemical characteristics of the sediments from the Maowei Sea

编号	粒径组成/%					pH	氨氮/ mg·kg ⁻¹	硝态氮/ mg·kg ⁻¹	亚硝态氮/ mg·kg ⁻¹
	粘粒 (<0.002)	细粉粒 (0.002~0.005)	中粉粒 (0.005~0.01)	粗粉粒 (0.01~0.05)	砂粒 (>0.05)				
1	3.19	8.36	15.63	61.59	11.23	7.22±0.32	209.85±113.62	2.97±1.61	0.16±0.06
2	3.73	7.57	13.12	63.02	12.56	6.82±0.14	219.31±111.41	1.71±0.83	0.18±0.13
3	3.24	7.84	12.35	62.9	13.67	8.01±0.13	244.22±77.30	2.45±2.35	0.13±0.05
4	2.67	7.64	15.33	61.08	13.28	7.20±0.21	125.85±29.82	3.73±1.32	0.10±0.03
5	2.43	6.60	16.69	64.03	10.25	7.74±0.42	90.31±19.59	4.00±3.66	0.11±0.04
6	3.76	8.50	15.69	60.72	11.33	8.27±0.10	149.57±17.76	1.03±1.14	0.04±0.02
7	2.56	6.43	11.08	64.35	15.58	8.58±0.07	118.19±25.68	2.30±2.12	0.05±0.01

注:表中各个采样点的数据为所有层次沉积物的平均值(0~30 cm);pH 与各形态氮指标表示为平均值±标准偏差。
Note: Values were means over different depths(0~30 cm), and pH, NH₄⁺, NO₃⁻ and NO₂⁻ were mean±SD.

pH 计法,有机质采用重铬酸钾-外加热法,总氮采用半微量开氏法、无机氮中的氨氮采用纳氏试剂分光光度法、硝态氮采用酚二磺酸分光光度法、亚硝态氮采用 N(1-萘基)乙二胺分光光度法,总磷采用高氯酸-硫酸酸溶-钼锑抗比色法、溶解性磷酸盐采用 NaHCO₃ 浸提-钼锑抗分光光度法测定。试验所用器皿均使用稀酸浸泡 24 h 以上,比色过程所用仪器为上海佑科仪器仪表有限公司生产的 752 型分光光度计,分析用水为 Milli-Q,利用平行样(每个样品做 3 次平行测定)与空白样(每批样品设置两个空白)进行质量控制,平行样品之间的相对标准偏差均小于 3%,空白样品的含量低于 0.01 ppm。

1.3 沉积物营养水平计算方法

采用有机指数法^[8]对茅尾海近岸海域沉积物营养状况进行评价。其计算方法如下:

有机指数 = $w(\text{有机碳}) \times w(\text{有机氮})$

式中: $w(\text{有机碳}) = w(\text{有机质}) / 1.724$; $w(\text{有机氮}) = w(\text{总氮}) \times 0.95$

上述计算式中各物质质量分数的单位均为%。沉积物营养水平评价分级标准见表 2。

表 2 沉积物营养水平评价分级标准^[8]

Table 2 Assessment classification for nutrition status in sediments

有机指数	<0.03	0.03-0.05	>0.05
类型	贫营养	中营养	高营养
等级	I 级	II 级	III 级

1.4 数据分析方法

采用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS16.0 统计软件进行数据分析。统计分析前,数据先进行对数变换,以满足方差齐次性和正态分布的要求。用多因素方差分析(ANOVA)对不同站点及不同深度的沉积物营养物质含量差异进行显著性分析发现,不同站点存在显著差异($P < 0.01$),但不同深度没有显著差异($P > 0.05$)。然后用 Student-Newman-Keuls(S-N-K 法)开展不同位点的差异分析,统计显著水平 $\alpha = 0.05$ 。各营养物质相关性采用非参数分析中 Spearman 秩相关系数进行分析。

2 结果与讨论

2.1 营养物质水平分布特征

研究海域沉积物各营养物质的水平空间分布变化如图 2。可以看出,调查海域沉积物中 OM 含量的变化范围在 $8.84 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (出现在 5#)至 $35.77 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (出现在 2#)之间,平均值为 $17.29 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; TN 含量变化范

围由 $0.17 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (出现在 6#)至 $1.34 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (出现在 3#),平均值为 $0.52 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; IN 含量在 $0.06 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (出现在 4#)至 $0.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (出现在 2#)之间,平均值为 $0.17 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; TP 含量变化范围为 $0.49 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (出现在 5#)至 $7.60 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (出现在 2#),平均值为 $4.23 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; SRP 含量变化范围 $0.05 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (出现在 5#)至 $0.52 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (出现在 2#),平均值为 $0.31 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。可见,各营养物质的最高值均出现在湾内,而最低值均在湾外。

对不同点位各营养物质的含量进行多重比较方差分析(表 3)可知,调查海域沉积物中 OM、TN 与 IN 等营养物质含量自湾内至湾外呈现出明显下降的空间变化趋势,且在不同站点间的差异较大:在湾内的 3 个站点 OM 平均含量为 $23.86 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,而湾外平均含量仅为 $13.36 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,达 0.8 倍的差距,2# 点作为最大值分布区,显著高于其他站点($P < 0.05$,下同),同时,湾内的 1#、3# 站点也显著高于湾外的其余站点,不同站点间的变异系数为 40.53%。类似地,湾内 1# 至 3# 的 TN 平均含量为 $0.76 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,其余点平均含量为 $0.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,差距为 1.2 倍,从具体站点看,1# 至 3# 间无显著性差异,但这三个点的 TN 含量均显著高于 4#、6# 及 7#,而与 5# 的差异并不显著,不同站点间的变异系数高达 46.87%。1# 至 3# 的 IN 平均含量为 $0.23 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,其余点平均含量 $0.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,差距也达 0.8 倍,最大值位于 3#,与 1# 及 2# 间无显著性差异,但这 3 个站点显著高于 4#、5#、7#,与 6# 的差异不显著,不同站点间的变异系数为 34.87%。研究海域沉积物中 TP 与 SRP 含量总体较高,在空间分布上,这两项指标的变化趋势很接近,尽管最高值、最低值仍分别出现在湾内、湾外,但总体上无明显规律,均呈现“低-高-低”波浪型的变化趋势。从多重比较结果看(表 3),TP 与 SRP 在 2#、4#、7# 间均无显著性差异,而显著高于其余站点,这两项指标的变异系数较其他指标小,分别为 23.89% 和 21.56%。

一般而言,海洋沉积物中的氮、磷主要来自陆源碎屑和海洋生物代谢^[9]。本研究海域沉积物营养盐所呈现的上述分布特点,与该海域的海湾形状、水动力条件以及污染源排放密切相关,1#、2# 及 3# 站点因处于湾内,湾内外有“瓶颈”控制,海水交换频率较低,不能及时地对营养物质进行扩散、传输,且外海的潮汐与波浪对湾内水面影响较小,以致水流平缓,有机颗粒物更易在此发生沉积^[10]。与此相反,在湾外则受潮汐与波浪的双重影响,容易形成湍流,从而减缓了营养物质的沉积,加快了通过沉积物-水界面向水体

扩散的过程^[11]。同时,湾内许多区域已是存在多年的养殖区,大量饵料、鱼虾粪便以及生物残体等有机物质迅速沉降至沉积物中,不断发生累积,是沉积物与水体污染的主要来源之一^[12-13]。此外,钦江、茅岭江在湾内北部汇入,这两条河流目前已受到工业废水、生活污水的共同影响,水质长期处于V类,甚至超V类状态^[14-15],为茅尾海海域输送的营养物质占入海污染物总量的79%以上^[17],这也是直接导致湾内沉积物的有机质、总氮与无机氮含量远超过湾外站点的原因。有学者对黑海的研究表明^[16],对于半封闭式的海湾而言,人为的外源营养盐输入是海湾氮、磷物质的重要来源,并且营养物质累积速度还会随着经济高速发展

而呈现出快速上升趋势。还有研究指出^[9],沉积速率的大小通过控制氮、磷的早期成岩作用而影响其在沉积物中的浓度分布。与氮相比,沉积物中磷的形态类型更为丰富,总体上分为无机磷和有机磷,无机磷又分为交换态磷、铝磷、铁磷、闭蓄态磷、自生钙磷和碎屑态磷^[18],因此它与环境之间的关系也更为复杂。本调查海域磷所呈现的分布特征,可能是受钙、铁等地质元素、外源输入、水生生物、沉积物微生物、酸碱度及溶解氧等因素共同影响^[19-20]。

2.2 营养物质垂向分布特征

沉积物中营养物质含量的垂向分布特征反映着研究海域的污染历史与变化过程,研究海域各营养物

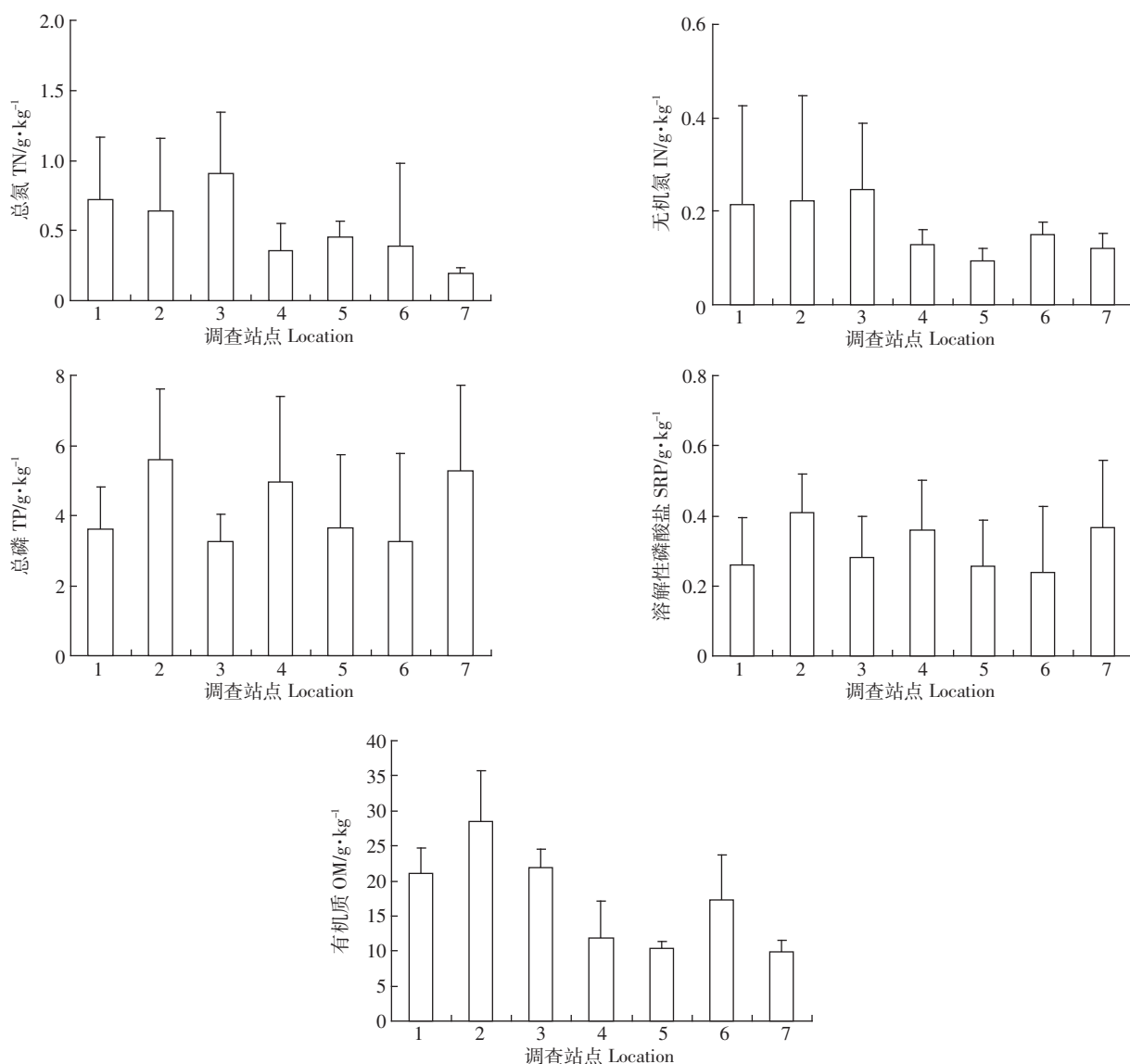


图2 沉积物营养物质水平分布特征

Figure 2 Horizontal distribution patterns of nutrients in sediments

表3 沉积物营养物质水平分布特征

Table 3 Horizontal distribution patterns of nutrients in sediments

站点 Sites	OM/g·kg ⁻¹	TN/g·kg ⁻¹	IN/g·kg ⁻¹	TP/g·kg ⁻¹	SRP/g·kg ⁻¹
1	21.11±2.51c	0.72±0.36cd	0.21±0.11cd	3.60±0.97a	0.26±0.08a
2	28.55±3.95d	0.64±0.36bcd	0.22±0.11cd	5.60±1.56b	0.41±0.10b
3	21.94±1.85c	0.91±0.30d	0.25±0.08d	3.26±0.48a	0.28±0.05a
4	11.88±3.04a	0.35±0.13b	0.13±0.03ab	4.95±1.68b	0.36±0.12b
5	10.42±0.80a	0.45±0.06bc	0.09±0.02a	3.66±1.82a	0.26±0.12a
6	17.26±5.96b	0.39±0.26b	0.15±0.02bc	3.24±1.95a	0.24±0.13a
7	9.87±0.86a	0.19±0.02a	0.12±0.03ab	5.28±1.80b	0.37±0.14b
平均值	17.29	0.52	0.17	4.23	0.31
标准偏差	7.01	0.25	0.06	1.01	0.07
变异系数/%	40.53	46.87	34.78	23.89	21.56

注:不同的字母上标表示不同站点间的差异($P<0.05$);表中各指标数据表示为所有层次(0~30 cm)的均值±标准偏差。

Note: Means were the average over different depths (0~30 cm), shown as mean±SD. Different superscript letters indicate significant differences amongst sites ($P<0.05$).

质的垂向空间分布变化特征以及多重比较结果见表4与图3。可以看出,0~30cm沉积物中OM含量的变化范围在15.78 g·kg⁻¹ (4~6 cm)至18.38 g·kg⁻¹之间(8~10 cm),在不同深度间含量的变化程度很小(变异系数为4.74%),也无显著性差异。TN与IN含量的变化范围分别为0.38 g·kg⁻¹ (20~30 cm)~0.71 g·kg⁻¹ (0~2 cm)和0.13 g·kg⁻¹ (20~30 cm)~0.25 g·kg⁻¹ (0~2 cm)。从垂向分布趋势看,沉积物TN与IN含量在0~10 cm中随深度增加而出现了较明显的下降趋势,不同深度间的含量变化程度较大(变异系数分别为24.48%和25.36%),但10 cm以下趋于稳定,多重比较结果显示,各层含量未出现显著性的差异。TP与SRP的垂向分布特征也很一致,其变化范围分别为3.63 g·kg⁻¹ (15~20 cm)~4.94 g·kg⁻¹ (4~6 cm)和0.26 g·kg⁻¹ (15~20

cm)~0.36 g·kg⁻¹ (4~6 cm),不同深度间含量变化程度不大(变异系数分别为11.37%和9.93%),各层含量间无显著性的差异。

可见,近年来研究海域的有机质含量变化不明显,而总氮含量却有逐渐增大的趋势,无机氮也随之有类似的变化特征,暗示着研究海域含氮物质在近年来有累积增加的趋势。茅尾海沉积物中的无机氮以氨氮为主(表1),在通常情况下,沉积物中氨氮含量与可降解有机物含量、沉积环境及水动力状况有关,沉积物环境的还原性会随深度增加而增强^[21],还原环境中,由有机氮经氨化作用释放出来的氨氮极易累积。因此,沉积物的氨氮通常表现为自表层向下层逐渐升高的趋势^[22-23]。但在本研究中,氨氮呈现出自表层至下层下降的相反趋势,其原因可能是本次采样的深度较

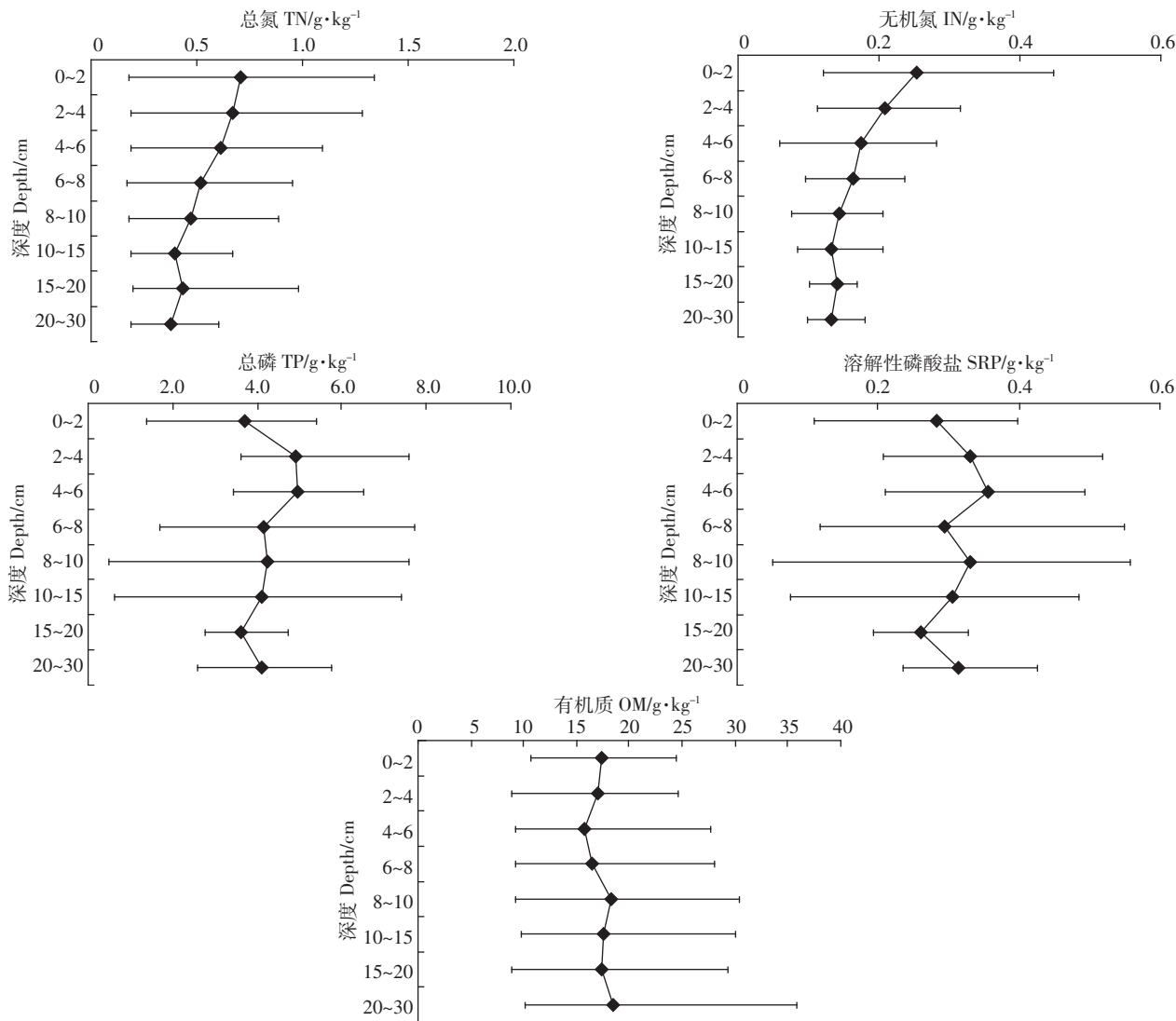
表4 沉积物营养物质垂向分布

Table 4 Vertical distribution patterns of nutrients in sediments

分层/cm	OM/g·kg ⁻¹	TN/g·kg ⁻¹	IN/g·kg ⁻¹	TP/g·kg ⁻¹	SRP/g·kg ⁻¹
0~2	17.42±6.32a	0.71±0.49a	0.25±0.16a	3.72±1.44a	0.28±0.11a
2~4	16.95±7.24a	0.67±0.43a	0.21±0.10a	4.91±1.38a	0.33±0.10a
4~6	15.78±7.69a	0.61±0.37a	0.17±0.09a	4.94±1.15a	0.34±0.09a
6~8	16.55±7.39a	0.52±0.32a	0.16±0.05a	4.17±2.48a	0.29±0.17a
8~10	18.36±8.10a	0.47±0.25a	0.14±0.05a	4.22±2.68a	0.33±0.20a
10~15	17.55±7.56a	0.40±0.16a	0.13±0.05a	4.11±2.33a	0.31±0.15a
15~20	17.33±7.92a	0.43±0.27a	0.14±0.03a	3.63±0.81a	0.26±0.06a
20~30	18.38±8.83a	0.38±0.16a	0.13±0.03a	4.13±1.10a	0.31±0.06a
平均值	17.25	0.52	0.17	4.23	0.31
标准偏差	0.88	0.13	0.04	0.48	0.03
变异系数/%	4.74	24.48	25.36	11.37	9.93

注:不同的字母表示不同层次间的差异($P<0.05$);表中各指标数据表示为所有位点同一层次的均值±标准偏差。

Note: Means were the average over different sites, shown as mean±SD. Different superscript letters indicate significant differences amongst depths ($P<0.05$).



各个黑点表示所有站点在同一层次的平均值,误差线右限与左限表示该层次的最大值和最小值

图 3 沉积物营养物质垂向空间分布特征

Figure 3 Vertical distribution patterns of nutrients in sediments

浅(为 30 cm),而在该海域水动力条件下,沉积速率可能较大,本次采样深度范围内尚不足以形成较强的还原条件,导致下层的还原作用较小以至于有机氮的矿化作用不明显;并且,由于外源污染物持续性输入,沉积物中无机氮的积累还同时受到了水体中氨氮的影响^[16]。本研究中,氮随深度变化的程度比磷大,这是由于氮的早期成岩活性比磷强,也就是氮比磷更易受环境的影响。氮、磷物质垂直分布的共同特点是在一定深度以下,其含量基本趋于稳定,但氮含量趋于稳定所对应的沉积物深度(10~15 cm)比磷(6~8 cm)大,即磷含量趋于稳定对应的深度更靠近沉积物-水界面。有研究表明,滇池马村湾和海东湾^[24]、武汉东湖庙湖区^[25]以及鄱阳湖^[26]沉积物磷含量存在表层富集现

象,且在 0~10 cm 层随深度增加迅速下降,10 cm 以下则趋于稳定。但本研究海域沉积物磷的表层富集现象并不明显,表层含量反而较低,最大值出现在 4~6 cm 层,这可能是 0~2 cm 表层位于沉积物-水交换界面,磷尚处于沉积的上升阶段。对比氮磷的垂向分布特征,在沉积过程中呈现出不同的累积趋势,在一定程度上暗示两者的来源不一致。

2.3 各营养物质含量间相关性

从表 5 沉积物各营养物质的相关系数可以看出,OM 与 TN($r=0.55$)、OM 与 IN($r=0.54$)、TN 与 IN($r=0.84$)间均呈现极显著的正相关关系($P<0.01$,图 4),表明在沉积物中上述三种营养物质的含量具有相同的变化趋势,验证了前文的研究结果,也说明这些污

表5 沉积物营养物质含量相关系数

Table 5 Correlation coefficients of nutrients in sediments

营养物质	OM	TN	IN	TP	SRP
OM	1				
TN	0.55**	1			
IN	0.54**	0.84**	1		
TP	-0.02	-0.01	0.00	1	
SRP	0.05	0.06	0.08	0.96**	1

注: * $P<0.05$, ** $P<0.01$, $n=56$ 。

染物具有一定的同源性。同时还看到 TP 与 SRP ($r=0.96$) 也呈现极显著正相关关系 ($P<0.01$, 图 4), 且相关系数更大, 这也反映了两者的同源性。从表 5 还可以看出, 磷与有机质、氮之间基本无相关性, 再次验证了前文对于总磷在茅尾海的空间分布特征与有机质、氮存在差异的研究结果, 也说明磷在该海域沉积物中的来源与有机质、氮不一致, 与许多前人在不同地区的研究结果相似。宋金明等^[9]在南黄海的研究发现, 该海域中氮主要来自海洋生物代谢, 而磷主要受陆源碎屑的控制; 李学刚等^[27]在胶州湾的研究发现, 该海域中氮主要来自海洋生物代谢, 但磷同时受陆源汇入与海洋自生源控制。总体而言, 沉积物中含氮物质的来源相对较为单一, 且与有机物关系密切,

而磷因形态繁多, 其来源也更趋于多样化, 除部分来自生物体外, 可能更多来自地球化学早期作用、人类采矿与冶炼、含磷肥料施用等过程, 这些过程产生的含磷物质往往是以无机形态所存在, 故磷与有机质及氮的相关性较弱。

2.4 沉积物营养水平

根据各采样点位的营养物质 0~30 cm 平均值计算得到本研究海域沉积物的营养水平(表 6), 可以看出, 研究海域整体的有机指数较高, 其平均值为 0.06, 属于高营养状态。而从局部分布上看, 在茅尾海湾内的 1# 至 3# 站点有机指数最高, 最大值为 0.11, 属于严重污染的高营养状态, 湾外其余站点中, 4#、7# 属贫营养, 5#、6# 属中营养。与国内其他水域相比(表 7), 本研究海域的总氮含量低于东湖、梅梁湖、南四湖、珠江广州河段等内陆湖泊与河流, 但高于胶州湾, 与南黄海基本持平; 研究海域的总磷含量较高, 低于珠江广州河段, 与梅梁湖基本持平, 显著高于胶州湾、南黄海等水域。

磷在该海域的分布成因, 一方面可能受地区生物地球化学过程与早期成岩速率影响, 含有低溶解态的铝磷或磷灰石^[28-29], 使磷在沉积物中出现较高浓度的背景值, 因而在本研究中, 表现出不同站点、不同深度

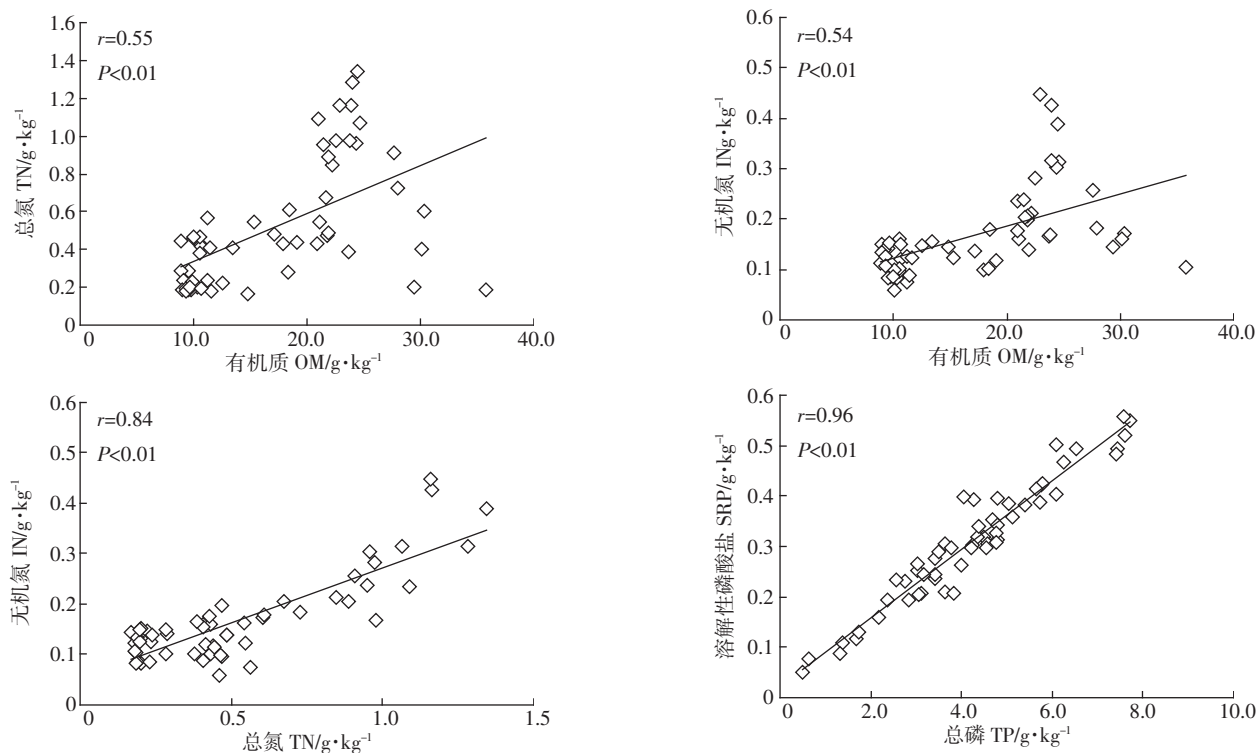


图4 沉积物营养物质含量显著相关关系

Figure 4 Correlationship amongst nutrients in sediments

表 6 沉积物有机碳、有机氮含量与有机指数
Table 6 Contents of organic carbon and organic nitrogen and organic indexes in sediments

站点	有机质/%	有机碳/%	总氮/%	有机氮/%	有机指数	总磷/%	碳氮比 C/N
1	2.11	1.22	0.072	0.069	0.08	0.36	16.9
2	2.86	1.66	0.064	0.061	0.10	0.56	25.9
3	2.19	1.27	0.091	0.086	0.11	0.33	14.0
4	1.19	0.69	0.035	0.034	0.02	0.50	19.7
5	1.04	0.60	0.045	0.043	0.03	0.37	13.3
6	1.73	1.00	0.039	0.037	0.04	0.32	25.6
7	0.99	0.57	0.019	0.019	0.01	0.53	30.0
平均	1.73	1.00	0.052	0.050	0.06	0.42	20.8

表 7 茅尾海与其他水域沉积物氮磷含量比较
Table 7 Comparison of TN and TP concentrations in sediments
between Maowei Sea and other waters

研究区域	总氮含量/g·kg ⁻¹	总磷含量/g·kg ⁻¹	调查时间
本研究海域	0.52	4.23	2010 年 1 月
南黄海 ^[9]	0.54	0.31	2004 年 10 月
胶州湾 ^[27]	0.31	0.27	2003 年 9 月
南四湖 ^[34]	3.03	2.15	2009 年 9 月
梅梁湖 ^[35]	2.78	4.04	1996 年 7 月
东湖 ^[36]	3.40	0.69	2002 年 4 月
珠江广州河段 ^[37]	1.90	6.31	2004 年 7 月

中总磷含量均较高,而溶解性磷酸盐仅占 7.3%;其次,可能也受到陆源碎屑汇入影响,与当地采矿、磷肥生产过程排放废水、未经处理生活污水以及农田施用淋失有着重要关系^[30],广西目前已探明的磷矿资源储量与年产量均位居全国前列,在茅尾海所在的钦州市上游,也建成多个磷化工项目,这些采矿业与冶炼业在生产过程所排放的废水部分通过河流进入了茅尾海海域;此外,还与茅尾海大规模的牡蛎网箱养殖有关,作为中国最大的近江牡蛎养殖区,多年来所投入的大量饵料,以及牡蛎与其他生物残体、骨骼中均含有较高的磷,在分解过程中不断在沉积物中发生沉积。研究表明^[31],磷是藻类生产繁殖的重要营养物质,水体中磷负荷量的增加,是造成富营养化的重要原因之一。对于本研究海域而言,一旦环境发生改变(如风浪扰动、温度升高等^[32]),沉积物中所积累的大量磷(尤其是容易被生物直接利用的溶解性磷酸盐)将会重新释放到水体,从而为藻类的大量繁殖提供必要条件,并极易引起富营养化,尤需引起重视。

因生物种类及有机物来源不同,C/N 值(碳氮比值)也会不同,所以沉积物中 C/N 值在某种程度上可反映营养物质的来源,水生生物的 C/N 值为 2.8~3.4,

浮游动物与浮游植物为 6~13,藻类为 5~14,高等植物大于 14^[9]。茅尾海沉积物中 C/N 值介于 13.3~30.0 之间,平均值为 20.8,表明茅尾海营养物质除少量站点(如 3#、5#)来源于藻类和浮游生物外,其余多数来源于周边的陆生环境,陆源汇入可能仍是本研究海域营养物质的重要来源。外源与自生源的比例取决于海域周边污染物汇入量、养殖区分布、水动力条件等状况,有学者对渤海湾近岸海域及部分河流汇入口沉积物营养物质调查发现^[33],通过河流汇入渤海湾沿海区域的氮磷等营养物质占 51%~87%,即外源输入在该海域也同样占据了大部分乃至绝大部分的比例,并且往往是以河流作为重要途径。可见,茅尾海北部的钦江与茅岭江为茅尾海氮磷营养物质积累所贡献的负荷强度不可忽视。

3 结论

- (1)在调查海域沉积物中营养物质的水平空间分布上,有机质、总氮与无机氮含量自湾内至湾外呈现出显著下降的变化趋势,有机质在垂向分布上变化不明显,而总氮与无机氮含量却有逐渐增大的趋势,但不显著,3 种营养物质之间均有极显著的正相关关系;总磷与溶解性磷酸盐在水平与垂向空间上均无明显变化规律,两项指标在湾内与湾外、各层次间未出现显著性差异,而两者间呈现极显著正相关关系,且相关系数达 0.96。结果表明有机质、总氮与无机氮,总磷与溶解性磷酸盐各有同源性,而这两组营养物质间有着不一致的来源。
- (2)有机指数法的评价结果表明,调查海域的有机指数总体较高,平均值为 0.06,属于高营养范畴,而位于湾内的 3 个站点均超过 0.08,处于严重污染的高营养状态;研究海域的总氮含量低于东湖、梅梁湖、珠江广州河段等内陆湖泊与河流,但明显地高于胶州湾

海域,与南黄海基本持平;研究海域总磷含量较高,低于珠江广州河段,与梅梁湖基本持平,显著高于胶州湾、南黄海等水域,可能会诱发水体藻类的过度繁殖,引起富营养化。沉积物中的 C/N 值表明,调查的海域营养物质除少部分来源于藻类和浮游生物外,多数可能来源于周边的陆生环境。

参考文献:

- [1] Jesnen M H, Lomstein E, Sorensen J. Benthic NH_4^+ and NO_3^- flux following sedimentation of spring phytoplankton bloom in Aarhus Bight, Denmark[J]. *Marine Ecology Progress Series*, 1990, 61: 87-96.
- [2] Smith S V, Swaney D P, Talaue-McManus L, et al. Humans, hydrology, and the distribution of inorganic nutrient loading to the ocean[J]. *Bio-science*, 2003, 53: 235-245.
- [3] 林桂兰, 许江, 于东生, 等. 广西茅尾海河口湾资源环境演变趋势和综合整治初探[J]. 海洋开发与管理, 2012, 1: 91-97.
LIN Gui-lan, XU Jiang, YU Dong-sheng, et al. The evolution trend of resources and environment and preliminary study on comprehensive improvement in Maowei Sea Estuary, Guangxi[J]. *Ocean Development and Management*, 2012, 1: 91-97.
- [4] 蓝文陆, 彭小燕. 茅尾海富营养化程度及其对浮游植物生物量的影响[J]. 广西科学院学报, 2011, 27(2): 109-112.
LAN Wen-lu, PENG Xiao-yan. Eutrophication status and its impact on phytoplankton biomass in the Maowei Sea[J]. *Journal of Guangxi Academy of Sciences*, 2011, 27(2): 109-112.
- [5] 宋志魁. 广西茅尾海 2 种养殖牡蛎重金属含量评价[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(1): 317-319.
SONG Zhong-kui. Evaluation of heavy metals in two cultivated oysters from Maowei Gulf in Guangxi, China [J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2011, 39(1): 317-319.
- [6] 雷富, 张荣灿, 许铭本, 等. 茅尾海表层沉积物重金属污染及潜在生态危害[J]. 广西科学院学报, 2010, 26(1): 59-61.
LEI Fu, ZHANG Rong-can, XU Ming-ben, et al. Heavy metals pollution and potential ecological risk in surface sediment in Maowei Sea[J]. *Journal of Guangxi Academy of Sciences*, 2010, 26(1): 59-61.
- [7] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO Shi-dan. Methods of soil analysis[M]. the 3rd edition. Beijing: Agricultural Publishing House of China, 2000.
- [8] 王永华, 钱少猛, 徐南妮, 等. 巢湖东区底泥污染物分布特征及评价[J]. 环境科学研究, 2004, 17(6): 22-26.
WANG Yong-hua, QIAN Shao-meng, XU Nan-ni, et al. Characteristics of distribution of pollutants and evaluation in sediment in the east area of Chaohu Lake[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2004, 17(6): 22-26.
- [9] 宋金明, 李学刚, 邵君波, 等. 南黄海沉积物中氮、磷的生物地球化学行为[J]. 海洋与湖沼, 2006, 37(4): 370-376.
SONG Jin-ming, LI Xue-gang, SHAO Jun-bo, et al. Biogeochemical characteristics of nitrogen and phosphorus in the south Yellow Sea sediments[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2006, 37(4): 370-376.
- [10] 李如忠, 张亮. 巢湖十五里河不同水力特性区沉积物及间隙水营养盐的分布特征[J]. 环境科学学报, 2012, 32(12): 2960-2968.
LI Ru-zhong, ZHANG Liang. Distribution characteristics of nutrients in core sediments and interstitial water from different hydraulic property zones in Shiuli Stream, Chaohu Lake[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(12): 2960-2968.
- [11] Wang J N, Zhao L, Wei H. Variable diffusion boundary layer and diffusion flux at sediment-water interface in response to dynamic forcing over an intertidal mudflat[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2012, 32(12): 2960-2968.
- [12] 吕成功, 程波, 高素兰, 等. 桑沟湾表层沉积物中全氮、有机质和磷的分布及其与水产养殖的关系[J]. 黄渤海海洋, 1983, 1(1): 67-73.
LÜ Cheng-gong, CHENG Bo, GAO Su-lan, et al. The Distribution of total nitrogen, organic matter and phosphorus in surface sediments from Sanggou Bay and the relation of their distributions to aquaculture[J]. *Journal of Oceanography of Huanghai & Bohai Seas*, 1983, 1(1): 67-73.
- [13] 李纯厚, 黄洪辉, 林钦, 等. 海水对虾池塘养殖污染物环境负荷量的研究[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(3): 545-550.
LI Chun-hou, HUANG Hong-hui, LIN Qin, et al. Environmental carrying capacity of the pollutants from the prawn seawater culture ponds[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(3): 545-550.
- [14] 谭庆梅. 钦江流域水污染状况与水环境保护[J]. 广西水利水电, 2009, 1: 49-52.
TAN Qing-mei. Water pollution and water environment protection of Qinjiang river basin[J]. *GX Water Resources & Hydropower Engineering*, 2009, 1: 49-52.
- [15] 蓝文陆, 杨绍美, 苏伟. 环钦州湾河流入海污染物通量及其对海水生态环境的影响[J]. 广西科学, 2012, 19(3): 257-262.
LAN Wen-lu, YANG Shao-mei, SU Wei. Variation of river pollutant fluxes around Qinzhou Bay and their environmental impacts [J]. *Guangxi Science*, 2012, 19(3): 257-262.
- [16] Teodoru C R, Friedl G, Friedrich J, et al. Spatial distribution and recent changes in carbon, nitrogen and phosphorus accumulation in sediments of the Black Sea[J]. *Marine Chemistry*, 2007, 105(1): 52-69.
- [17] 龙颖贤, 檀笑, 韩保新, 等. 茅尾海营养状况及其来源研究[J]. 生态科学, 2012, 31(5): 572-576.
LONG Ying-xian, TAN Xiao, HAN Bao-xin, et al. Research on status and sources of nutrients in the Maowei Sea[J]. *Ecological Science*, 2012, 31(5): 572-576.
- [18] Yu Y, Song J M, Li X G, et al. Distribution, sources and budgets of particulate phosphorus and nitrogen in the East China Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 2012, 43: 142-155.
- [19] Rydin E, Malmaeus J M, Karlsson O M, et al. Phosphorus release from coastal Baltic Sea sediments as estimated from sediment profiles[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2011, 92: 111-117.
- [20] 刘涛, 胡志新, 杨柳燕, 等. 江苏西部湖泊沉积物营养盐赋存形态和释放潜力差异性分析[J]. 环境科学, 2012, 33(9): 3057-3063.
LIU Tao, HU Zhi-xin, YANG Liu-yan, et al. Analysis on the forms and release potential of nutrients in sediments from lakes in the west Jiangsu province[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(9): 3057-3063.

- [21] 岳维忠, 黄小平. 珠江口柱状沉积物中氮的形态分布特征及来源探讨[J]. 环境科学, 2005, 26(2):195-199.
- YUE Wei-zhong, HUANG Xiao-ping. Distribution characteristics of nitrogen and its source in core sediments from Pearl River Estuary[J]. *Environmental Science*, 2005, 26(2):195-199.
- [22] Mortimer R J G, Davey J T, Krom M D, et al. The effect of macrofauna on pore water profile and nutrient fluxes in the intertidal zone of the Humber Estuary[J]. *Estuarine, coastal and Shelf Science*, 1999, 48: 683-699.
- [23] 吴文成, 吴群河, 梁明易, 等. 珠江广州河段沉积物无机氮的分布特征和界面交换通量[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3):1128-1133.
- WU Wen-cheng, WU Qun-he, LIANG Ming-yi, et al. Distribution characteristics of inorganic nitrogen in core sediments and diffusion fluxes in interface from Guangzhou Reach of the Pearl River[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3):1128-1133.
- [24] 吴永红, 胡俊, 金向东, 等. 滇池典型湖湾沉积物氮磷化学特征及疏浚层推算[J]. 环境科学, 2005, 26(4):77-82.
- WU Yong-hong, HU Jun, JIN Xiang-dong, et al. Chemical characteristics of nitrogen and phosphorus in the sediments of the typical bays in Dianchi Lake and calculation of their dredging layers[J]. *Environmental Science*, 2005, 26(4):77-82.
- [25] Liu J T, Chen P Y, Fang T, et al. Distribution of nitrogen and phosphorus in sediment cores and overlying water of Donghu lake[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2006, 15(7):603-608.
- [26] Xiang S L, Zhou W B. Phosphorus forms and distribution in the sediments of Poyang Lake, China[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2011, 26(2):230-238.
- [27] 李学刚, 宋金明, 李宁, 等. 胶州湾沉积物中氮与磷的来源及其生物地球化学特征[J]. 海洋与湖沼, 2005, 36(6):562-571.
- LI Xue-gang, SONG Jin-ming, LI Ning, et al. Source and biogeochemical characteristics of nitrogen and phosphorus in Jiaozhou Bay sediments[J]. *Oceanologia Et Limnologia Sinica*, 2005, 36(6):562-571.
- [28] Pedro T, Kimberley S, Fernando P. Dynamics of phosphorus in sediments of a naturally acidic lake[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2013, 28(1):90-102.
- [29] Su M L, Jing Z, Dao J L. Phosphorus cycling in sediments of the Bohai and Yellow Seas[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2004, 59: 209-218.
- [30] DOU Y G, Li J, Zhao J T, et al. Distribution, enrichment and source of heavy metals in surface sediments of the eastern Beibu Bay, South China Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 67:137-145.
- [31] 黄亮, 吴乃成, 唐涛, 等. 水生植物对富营养化水系统中氮、磷的富集与转移[J]. 中国环境科学, 2010, 30(S1):1-6.
- HUANG Liang, WU Nai-cheng, TANG Tao, et al. Enrichment and removal of nutrients in eutrophic water by aquatic macrophytes[J]. *China Environmental Science*, 2010, 30(S1):1-6.
- [32] House W A, Denison F H. Factors influencing the measurement of equilibrium phosphate concentrations in river sediments[J]. *Water Research*, 2000, 34(4):1187-1200.
- [33] Gao X L, Yang Y W, Wang C Y. Geochemistry of organic carbon and nitrogen in surface sediments of coastal Bohai Bay inferred from their ratios and stable isotopic signatures[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, 64:1148-1155.
- [34] 赵莹, 成杰民, 鲁成秀. 不同生态类型富营养化湖泊沉积物中有机质赋存形态[J]. 环境化学, 2012, 31(3):302-307.
- ZHAO Xuan, CHENG Jie-min, LU Cheng-xiu. Distribution of organic matter species in the sediments of three ecological characteristics eutrophic lakes in China[J]. *Environmental Chemistry*, 2012, 31(3):302-307.
- [35] 范成新, 秦柏强, 孙越. 梅梁湖和五里湖水-沉积物界面的物质交换[J]. 湖泊科学, 1998, 10(1):73-78.
- FAN Cheng-xin, QIN Bo-qiang, SUN Yue. Substance exchange across water-sediment interface in Meiliang bay and Wuli lake[J]. *Journal of Lake Sciences*, 1998, 10(1):73-78.
- [36] 杨洪, 易朝路, 谢平, 等. 武汉东湖沉积物碳氮磷垂向分布研究[J]. 地球化学, 2004, 33(5):507-514.
- YANG Hong, YI Chao-lu, XIE Ping, et al. Vertical distribution of carbon, nitrogen and phosphorus of sediments at Stations I and II in Lake Donghu, Wuhan[J]. *Geochemica*, 2004, 33(5):507-514.
- [37] 牛红义, 吴群河, 陈新庚. 珠江(广州河段)表层沉积物中营养物质的分布特征及肥力评价[J]. 海洋环境科学, 2008, 27(4):348-351.
- NIU Hong-yi, WU Qun-he, CHEN Xin-geng. Distribution characteristics and fertility assessment of nutrients in surface sediment in Guangzhou section of Pearl River[J]. *Marine Environmental Science*, 2008, 27(4):348-351.