渤海中南部沉积物中生源要素的分布特征

李玲伟, 刘素美, 周召千, 鲁 超

(中国海洋大学 海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 山东 青岛 266100)

摘要:从化学结合形式出发,对渤海中南部海区沉积物中OC、N、P、BSi等生源要素的含量进行调查 分析,讨论了各生源要素的分布及其影响因素。结果表明:受陆源输入的影响,表层沉积物中各形态 氮、磷及有机碳均呈现"近岸高,远岸低"的分布趋势,生物硅的含量分布则与海区浮游硅藻的分布 趋势相一致;可交换态氮是总氮中较活跃的部分,占总氮的比例约为 3.7%;固定态铵是总氮的主要组 成部分,约占总氮的 38.4%,其主要与有机质含量及黏土矿物组成有关;渤海表层沉积物中 OC/BSi、 ON/BSi 以及 OP/BSi 的比值分别为 2.38、0.19、0.03,低于 Redfield 比值,说明有机质优先于生物硅分 解;OC/ON 平均值在 6.0~14.0 之间,判断渤海沉积物中有机质受陆源输入和海洋自生共同影响;其中, 有机碳主要以陆源输入为主,而有机氮在沉积物表层主要以陆源输入为主,在沉积物下层则主要来源 于海洋自生。

关键词: 有机碳; 氮; 磷; 硅; 沉积物; 渤海 中图分类号: P734.2+5 文献标识码: A

文章编号: 1000-3096(2010)11-0059-10

生源要素(碳、氮、磷、硅等)的循环是海洋生物地 球化学研究的核心内容,是全球变化研究的重要组成 部分^[1,2]。海洋沉积物作为海水中碳、氮、磷、硅重要 的"源"和"汇",其中各生源要素的含量分布对了解 海区沉积环境以及物质来源有重要意义^[3~5]。

渤海作为我国唯一的内海,是典型的半封闭浅 海,通过渤海海峡与黄海相通,总面积 7.7 × 10¹⁰ m², 平均水深 18.7 m,其中 26%的海区水深低于 10 m, 周围有黄河、海河、滦河、辽河等大量河流的输入。 近年来,随着工农业的迅速发展,渤海近岸海域污染 严重,水质恶化,生物资源衰退,赤潮频繁发生^[6]。沉 积物作为水体中碳、氮、磷、硅的重要归宿,必然对 此有所响应。本文选取渤海表层及柱状沉积物样品, 从化学结合形式出发分析探讨其中各生源要素的分 布特征、影响因素及其成岩过程。

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究所使用的沉积物样品,取自渤海 1998 年 (98BH)和 1999 年(99BH)中德合作项目调查航次,其 中表层沉积物样品取自 1998 年调查航次,柱状沉积 物样品分别取自 1998 年 G2 站和 1999 年 A2、E3 站, 具体采样站位见图 1。表层沉积物样品利用箱式采泥 器采集,封存于干净的塑料袋中,迅速冷冻;柱状沉 积物样品利用箱式采泥器采集后,插入有机玻璃管, 进行现场切割,分装于干净的塑料袋中,冷冻保存。 采集的样品带回实验室后,于烘箱内 60 °C 干燥 72 h 以上,然后用玛瑙研钵研磨,封存于洁净干燥的塑 料袋内,待测。



收稿日期: 2009-12-25; 修回日期: 2010-04-15

Marine Sciences / Vol. 34, No. 11 / 2010

项目基金: 国家自然科学基金项目(NOs.40876054,40730847); 科技部 国家重点基础研究发展计划"973"项目(NO.2006CB400602) 作者简介: 李玲伟(1984-), 女,山东烟台人,硕士研究生,主要从事海

洋生物地球化学研究, 电话: 13792471516, E-mail: Lilingwei_0307@163.com; 刘素美, 通信作者, 电话: 0532-66782005, E-mail: sumeiliu@ouc.edu.cn

1.2 分析方法

采用国际上广泛应用的分析方法测定不同形态 生源要素的含量。从化学结合形式出发,以总氮、有 机氮、无机氮(包括可交换态氮和固定态铵)三种形式 来研究沉积物中的氮。其中, N_{fix} 采用 Silva-Bremner 的 HF 提取法^[7],用次溴酸钠氧化法(手工)测定提取 液中的 NH₄-N,可交换态的氮用 0.5mol/L 的 KCL(液 固比为 500:1)溶液进行提取,提取液中的 NH₄-N 和 NO₃-N 的浓度用 Skalar 营养盐自动分析仪进行测定。 由于沉积物中可交换态 NO₂⁻-N 的含量很低,其浓度 可忽略^[7]。总氮(TN)采用 Vario EL III 元素分析仪进 行测定;总氮减去无机氮所得的差值为有机氮(ON) 的含量,即: ON=TN-N_{fix}-NH₄⁺ex-NO₃⁻ex。总氮及无 机氮测定的精密度均小于 3%。

沉积物中磷含量的测定采用 Aspila 的方法^[8], 无机磷(IP)用 1mol/L 的 HCL 连续提取 16 h,离心后取 上清液,用 40%的 NaOH 调节提取液的 pH 值。总磷 (TP)在马弗炉中 550°C 灰化 2 h,冷却后移出,进行 提取操作,方法同无机磷。提取液中 PO₄-P 浓度用磷 钼蓝法进行测定。总磷减去无机磷所得的差值为有 机磷(OP)的含量^[8]。TP 及 IP 测定的精密度分别为 0.79% 与 0.53%。

生物硅(BSi)含量的测定,采用Liu等^[9]的连续提 取法,将处理好的沉积物样品用 2 mol/L 的 Na₂CO₃ 在 85°C 恒温水浴中连续提取 8 h,提取液中 SiO₃- Si 浓度用硅钼蓝法进行测定,测定精密度为 2.63%。

有机碳(OC)含量的测定,先用 10%的盐酸对沉积 物样品进行酸化处理,除去无机碳酸盐组分,样品 经低温烘干后,使用 Vario EL III 元素分析仪测定, 测定精密度为 1.18%。

2 结果与讨论

2.1 渤海表层沉积物中 OC、N、P 及 BSi 的含量分布特征

可交换态氮(主要包括NH4⁺_{ex}和NO3⁻_{ex})是沉积物 总氮中最"活跃"的部分^[10],是沉积物-水界面之间 氮交换的主要形态,能够直接被初级生产者吸收利 用;固定态铵(N_{fix})是沉积物总氮中相对稳定的形态, 是沉积物埋藏过程中主要的氮"蓄积库"^[10],其固定 与释放对氮的供应和保存起着重要的调节作用^[11]。 有机氮(ON)是沉积物中总氮的主要组成部分,除少 量被埋藏外大部分通过微生物的矿化作用得以再生, 并通过成岩作用以各种形式向环境中释放。表1 给 出了渤海表层沉积物中各形态氮的含量及在总氮中 所占的比例。

由平面分布图 2 可看出, 表层沉积物中总氮及 有机氮的分布规律相似, 均在渤海西北部呈现高值 分布, 可交换态的氮(NH4⁺ex, NO3⁻ex)在渤海西北部及 莱州湾附近含量较高, 固定态铵(Nfix)在渤海西北部 和渤海海峡有较高含量。各形态氮的平面分布有一 共同特点, 即"近岸高, 远岸低", 这一结果与当年 水体中营养盐的分布相似^[12]。表层沉积物中有机碳 含量在 0.37%~2.1%之间, 平均含量为 1.1%。有机碳 在渤海西北部和渤海海峡有较高的含量, 黄河口附 近含量则相对较低。

海河、滦河等河流的陆源输入^[13],导致渤海西北 部海区各形态氮和有机碳含量较高。渤海西北部海 区,营养盐由水体向沉积物中迁移的通量 NH₄-N 为 $0.070 \text{ mmol/(m}^2 \cdot d)$, NO₃-N 为 2.33 mmol/(m² · d)^[14], 是造成该海区可交换态氮含量较高的另一主要原 因。在渤海西北部和渤海海峡有机碳有较高含量、研究 表明这两个区域叶绿素和脱镁叶绿素均含量较高[15], 底栖藻类以及浮游藻类死亡尸体的沉降造成区域有 机碳含量较高的原因。Ronsenfeld 曾指出^[16], 溶解态 铵、可交换态铵及固定态铵之间存在动态平衡。渤 海西北部、沉积物中可交换态铵以及间隙水中 NH₄-N^[17]均有较高的含量,是导致该海区固定态铵 含量较高的原因。Lange 等^[10]研究指出, 海洋沉积物 中固定态铵可达总氮含量的 18%~96%, 其含量与黏 土矿物中伊利石的含量呈显著正相关。渤海海峡沉 积物黏土矿物中伊利石含量高达 28.7%^[18], 是导致 该海区沉积物固定态铵较高的原因。据统计,莱州湾 地区每年有 5.8×10^7 t 的工业废水排入湾内, 其中氨

表1 表层沉积物中各形态氮的含量及在总氮中的比例 Tab 1 Concentrations of various forms of nitracon and

Tab. 1 Concentrations of various forms of merogen and then proportions in total introgen in the surface sediments							
形态氮	N_{fix}	NH^+_4 ex	$NH_3^- ex$	ON	TN		
含量(µg/g)	111.1~243.7	3.39~35.8	0.12~0.82	94.5~751.2	231.4~997.4		
平均值(μg/g)	165.9	16.8	0.42	293.1	476.2		
占总氮比例(%)	38.4	3.6	0.1	57.8	/		

60

海洋科学 / 2010 年 / 第 34 卷 / 第 11 期



Fig. 2 Distribution of OC, N, P and BSi in the surface sediments of the Bohai Sea 各形态氮及磷的浓度单位为μg/g, 有机碳及生物硅的浓度单位为%the unit for N, P is μg/g, and the unit for OC, BSi is %

Marine Sciences / Vol. 34, No. 11 / 2010

氮的排入量为 4.4 × 10² t, 加上海水养殖业的自身污染, 造成莱州湾附近海区沉积物中可交换态氮含量较高。

渤海表层沉积物中磷的存在形态以无机磷为主, 占总磷的 81.9%, 有机磷仅占总磷的 18.1%。总磷和 无机磷的含量范围及平均值分别为 291.1~665.8 μg/g 和498.1 μg/g, 255.1~596.4 μg/g 和408.1 μg/g; 有机 磷的含量在 36.0~160.5 μg/g 之间, 平均含量为 90.0 μg/g。

表层沉积物中总磷、无机磷的分布类似,均在黄 河口附近有较高的含量,在辽东湾口和渤海东部含 量则相对较低(图 2)。表层沉积物中有机磷在渤海西 北部及辽东湾口附近有较高的含量,而在黄河口和 莱州湾含量则相对较低,总磷及无机磷在黄河口和 莱州湾出现高值分布主要原因是黄河输入带来大量 的泥沙中含有高浓度的磷,其中 IP 含量为 576.1 μg/g, TP 含量为 634.9 μg/g^[19],同时沿岸人为活动产生的 废水也随河流注入海洋,从而导致该区域出现较高 的 TP、IP 分布。Li 等^[20]报道,黄河口及其临近海区 内的悬浮颗粒物中含有高浓度的总磷和无机磷,但 由于黄河携带大量的贫有机质的泥沙入海^[21],且该 海区沉积环境不稳定^[22],不利于有机质的积累,从 而造成有机磷及有机氮、有机碳在该区域的含量较 低。

渤海表层沉积物中 BSi 在辽东湾口附近海区含 量最高,其次为渤海海峡、渤海湾及黄河口附近,在 渤海中央海区则相对较低(图 2),含量在 0.11%~ 0.49%之间,平均含量为 0.33%。生物硅在沉积物中 的积累可以反映上层水体的初级生产力状况,其分 布与海区硅藻等硅质浮游植物的分布密切相 关^[23,24]。1998~1999年渤海平均硅藻对总浮游植物细 胞丰度的比率为 0.868^[25],可见硅藻是渤海浮游植物 群落的优势种群。1998年渤海浮游植物丰度及叶绿 素 a 浓度的分布 ^[26,27]与测得的表层沉积物中生物硅 的含量分布规律吻合。

2.2 渤海柱状沉积物中 OC、N、P 含量分 布特征

表 2 给出了 G2、A2、E3 站柱状样沉积物中 C、 N、P 的含量范围。沉积物中 C、N、P 的平均含量 均在 G2 站最高, E3 站次之, A2 站含量相对较低, 生 源要素的这一分布特点显示了陆源输入的影响。G2 站位于滦河口附近, 较 E3 站更接近海岸, 滦河输入 渤海的大量泥沙在沿岸水团的作用下迁移沉降^[28], 使得各生源要素的含量在 G2 站高于 E3 站。而 A2 站位于渤海海峡,水动力条件充足,不利于生源要 素的沉积,使得 C、N、P 的平均含量在该站位相对 较低。一般来说,沉积物粒度由粗到细,C、N、P 含 量 由 低 到 高^[29],柱 状样 沉 积 物 的 平 均 粒 径 为 : G2(6.12 μ m) < E3(8.29 μ m) < A2(37.5 μ m),生源要素 的含量依次由高到低。

表 2 G2、A2、E3 站柱状样沉积物中 N、P(μg/g)及 OC(%) 的含量

Tab. 2 The concentration of N_x P (μg/g) and C(%) in the core sediments at G2_x A2_y E3 stations

项目	G2	A2	E3
N _{fix}	167.4~237.2	108.5~134.0	200.3~304.9
$\rm NH_{4\ ex}^+$	16.9~28.1	10.2~27.6	10.5~16.0
NO_{3ex}^{-}	0.68~1.47	0.48~0.98	0.35~0.93
ON	480.2~998.9	296.6~927.8	366.2~560.7
TN	716.7~1192	435.8~1090	616.9~832.7
IP	392.3~434.0	373.9~431.2	394.3~528.6
OP	101.9~189.0	35.1~115.2	28.7~180.5
TP	502.7~596.7	427.9~546.4	503.5~581.8
OC	0.34~0.88	0.21~0.49	0.29~0.53

图 3~图 5 给出了 G2、A2、E3 柱状样沉积物中 C、N、P 的垂直分布。由分布图可以看出, 总氮及 有机氮均在表层有较高的含量, 随沉积深度增加而 降低; 可交换态氮随沉积深度增加亦有降低趋势, G2 站可交换态 NO₃-N 在 16 cm 以深浓度有所升高; 固定态铵随沉积深度增加浓度升高。有机碳含量随 着沉积深度的增加而降低。

G2 站总磷及有机磷均在表层有较高的含量,随 着沉积深度的增加含量有降低趋势、无机磷则在次 表层有较高的含量, 随沉积深度的增加含量基本保 持稳定: A2、E3 站总磷、有机磷及无机磷浓度均随 沉积深度的增加均有不同程度的降低。各形态氮(固 定态铵除外)、磷以及有机碳随沉积深度的增加含量 均有降低趋势。水体向沉积物中高的营养盐扩散通 量^[14],是造成表层沉积物中无机态氮、磷含量较高的 主要原因。有机氮、磷含量随沉积深度的增加而减 小,主要是由于微生物大多生存于沉积物表层,由 于微生物的分解利用导致表层有机态的氮、磷含量 会随着深度的加深而减小。沉积物中可交换态氮是 总氮中较"活跃"的部分^[10],渤海柱状沉积物中可交 换态氮占总氮的比例在 2.0%~2.9%之间, 其中可交 换态的 NH₄-N 是主要存在形式,占可交换态氮的 96%。沉积物中可交换态氮的分布与有机质含量、氧 化还原环境以及微生物活动等因素有关^[10,30,31]。有机 质的矿化产生铵是沉积物中氮循环的重要过程。在 沉积物表层溶解氧含量丰富,微生物通过氨化作用 将有机氮转化成铵态氮,铵态氮又可通过硝化作用 转化为硝态氮,因此表层沉积物可交换态氮的含量 相对较高^[32]。随着沉积深度的增加,沉积环境变得相 对还原,有利于铵态氮的积累,硝态氮含量则会逐 渐降低^[33]。研究结果表明,在柱状沉积物表层铵态氮 同样有较高的含量,可能原因是硝化作用的强度不 足以消耗全部的铵态氮,致使表层沉积物中保存一 定量的铵态氮。

固定态铵的含量与沉积物的黏土矿物组成、有 机质的含量以及间隙水中 NH4⁺浓度等因素有关。沉 积物中黏土矿物的组成是影响固定态铵含量的主要 因素之一^[10,34]。Kowalenko 等^[35]研究认为,土壤中施 入大量有机质后,固定态铵的含量会降低;固定态 铵与间隙水中的 NH4⁺存在缓慢的动态平衡^[16]。随着 沉积深度的增加,氧化环境的减弱有利于铵态氮的 积累,加之有机质含量不断降低,间隙水中 NH4⁺浓 度不断升高^[17],是造成固定态铵随沉积深度的加深 略有增加的原因。通过固定态铵含量和沉积物粒径 的相关性分析得出,在 =0.001 水准上,固定态铵 的含量与黏土粒径呈显著负相关(*r*=0.828,*n*=34),说 明沉积物中的固铵过程主要分布在小粒径沉积物 中。

2.3 沉积物中生物硅的积累及有机质来源的判断

2.3.1 沉积物中生物硅的积累

N、P 是藻类生长的必需元素,随着人类活动以 及农业耕种、污水排放的增多,水体中 N、P 的输入 增加,从而会导致硅藻生物量的增加,加速 BSi 的沉 积^[36]。随着水体中溶解态硅的不断消耗,硅藻生长减 慢,最终受到硅限制^[37]。1982~1998 年渤海的营养盐 结构的变化趋势是 N/P 比值升高, Si/N 比值下降,渤 海水域的氮限制状况正在向磷、硅限制方向转化^[38]。



Marine Sciences / Vol. 34, No. 11 / 2010



Fig. 4 The vertical distribution of OC, N, P in the core sediments at A2 station

渤海表层沉积物中 OC/BSi、ON/BSi 以及 OP/BSi 的 变化范围分别为 0.86~5.43、0.06~0.39、0.01~0.06, 平 均值分别为 2.38、0.19、0.03, 且均在渤海西北部海 区有较高的比值。渤海表层沉积物中 OC/BSi、 ON/BSi 以及 OP/BSi 都低于 Redfield 比值 (OC/BSi=6.63, ON/BSi=1.00, OP/BSi=0.06)^[39,40], 说 明在相同的条件下生物硅的分解速率要低于有机质 的分解速率,并且沉降到沉积物中的有机碳、氮、磷 大部分可以分解后返回到水体中参与再循环,从而 引起生物硅在沉积物中的积累。刘素美等^[41]研究指 出,渤海水体向沉积物中输入硅酸盐的通量大于 0.29 mmol/(m² · d),高的硅酸盐交换通量,亦会导致 生物硅在沉积物中积累。

2.3.2 沉积物中 C/N 比值的变化及有机质来源的判断

沉积物中有机质的来源主要有海洋自生和陆源 输入两种,而沉积物中的 C/N 比值可用来判断有机 质的来源。海洋浮游植物的 C/N 比值一般在 4~10 之 间,而陆生高等植物的 C/N 比值在 13~20 之间,甚至 更高^[42,43]。因此,将沉积物中 C/N 比值大于 12 的有 机质划为陆源输入, C/N 比值小于 8 的有机质划为海 洋自生有机质^[44]。由图 6 可看出, 表层及柱状沉积物 中 OC/TN 的比值均低于 OC/ON 比值, 说明总氮中保 留了一定量的无机氮, 因此应选用 OC/ON 比值来判 断有机质的来源。表层沉积物中 OC/ON 比值在 5.8~22.2 之间, 平均值为 13.2, 说明表层沉积物中有 机质的来源受陆源输入和海洋自生共同影响。3 个柱 状沉积物中 OC/ON 比值在 6.0~14.0 之间, 亦可认为 沉积物属于混源输入。

钱君龙等^[45]曾根据 C/N 比值定量估算总有机碳 中海洋自生有机碳(OC_s)和陆源输入有机碳(OC_l)以 及总有机氮中海洋自生有机氮(ON_s)和陆源输入有机 氮(ON_l)的方法。假设海洋自生和陆源输入有机质 C/N 比值分别为 5 和 20(作为零级近似),则上述参数 存在如下关系:

$$OC = OC_s + OC_l \tag{1}$$

$$ON = ON_s + ON_1 \qquad (2)$$

$$OC_s / ON_s = 3$$
 (3)
 $OC_1 / ON_1 = 20$ (4)

其中, 设 OC、ON 为测量值, 表 3 给出了依据上

海洋科学 / 2010 年 / 第 34 卷 / 第 11 期



图 5 E3 站柱状样中 OC、N、P 的垂直分布 Fig. 5 The vertical distribution of OC, N, P in the core sediments at E3 station

述公式计算渤海表层及柱状沉积物中 OC_s、OC₁、ON_s及 ON₁的相对含量。

表 3 渤海沉积物中 OC_s、OC₁、ON_s及 ON₁的相对含量(%) Tab. 3 The proportions of OC_s, OC₁, ON_s and ON₁ in the Bohai Sea sediments(%)

OCs	OC_l	ON _s	ONl
20.4	79.6	45.0	55.0
31.2	68.7	63.6	36.4
61.8	38.2	85.4	14.6
33.7	66.3	65.3	34.6
	OC _s 20.4 31.2 61.8 33.7	$\begin{array}{c c} OC_{s} & OC_{l} \\ \hline 20.4 & 79.6 \\ 31.2 & 68.7 \\ 61.8 & 38.2 \\ 33.7 & 66.3 \\ \end{array}$	$\begin{array}{c c c c c c c c c c c c c c c c c c c $

经过分析可知, 渤海表层沉积物中有机碳主要 为陆源输入, 有机氮中陆源输入亦占较大比例; 柱 状沉积物中, G2、E3 两站有机碳主要为陆源输入, A2 站有机碳则主要来于海洋自生, 而柱状沉积物中的 有机氮则主要来源于海洋自生, 在 A2 站尤为突出。

3 结语

受陆源输入的影响, 渤海中南部表层沉积物中 各形态氮、磷及有机碳均呈现"近岸高远岸低"的 分布趋势, 由于黄河携带大量贫有机质的泥沙入海, 黄河口附近有机碳、氮、磷的含量均较低; 表层沉积 物中生物硅的分布与海区浮游硅藻的分布一致, 在 辽东湾口附近含量较高, 其次为渤海海峡、渤海湾及 黄河口附近; 表层沉积物中OC/BSi、ON/BSi、OP/BSi 的比值分别为 2.38、0.19、0.03, 均低于 Redfield 比 值, 说明有机质优先于生物硅分解以及 BSi 在沉积 物中的积累; 柱状沉积物中各形态氮随沉积深度变 化不同, 说明其成岩过程的差异以及在循环中所起 的作用不同, 可交换态铵氮的垂直分布说明沉积物 表层有向上覆水体中迁移 NH₄⁺-N 的可能; OC/ON 平 均值在 6.0~14.0 之间, 判断渤海沉积物中有机质受



图 6 渤海表层及柱状沉积物中 OC/TN、OC/ON 比值分布 Fig. 6 The ratios of OC/TN and OC/ON in the surface and core sediments of the Bohai Sea

陆源输入和海洋自生共同影响,在渤海西北部海区及 渤海海峡有较高的 C/N 比值,通过对陆源输入和海 洋自生有机质含量的估算得出,渤海沉积物中有机 碳主要以陆源输入为主,而有机氮在沉积物表层主 要来源于陆源输入,在沉积物下层则主要来源于海 洋自生。

致谢:感谢张桂玲老师、任景玲老师以及中国海洋大 学海洋生物地球化学实验室同学们给予的帮助。

参考文献:

- Gabriela Friedl, Christian Dinkel, Bernhard Wehrli. Benthic fluxes of nutrients in the northwestern Black Sea[J]. Marine Chemistry, 1998, 62: 77-88.
- [2] Meon B, Amon R M W. The biogeochemistry of dissolved organic matter and nutrients in two large Arctic estuaries and potential implications for our understanding of the Arctic Ocean system[J]. Marine Chemistry, 2004, 92(1): 311-330.
- [3] Berner R A. Comments on the role of marine sediment burial as a repository for anthropogenic CO₂[J]. Global Biogeochemical Cycle, 1992, 6: 1-2.

- [4] Calvert S E, Pedersen T F, Naidu P D. On the Organic Carbon Maximum on Continental Slope of the Eastern Arabian.Sea[J]. Mar Res, 1995, 350: 692-695.
- [5] Herbert R S. Nitrogen cycling in coastal marine sediments[J]. FEMS Microbiology Reviews, 1999, 23: 563-590.
- [6] 王曙光. 中国海洋灾害公报[R]. 北京: 国家海洋局, 2001: 1-13.
- [7] Silva J A, Bremner J M. Determination and isotope-ratio analysis of different forms of nitrogen in soils.5.fixed ammonium[J]. Soil Sci Soc Am Proc, 1966, 30:587-594.
- [8] Aspila K I, Agenian H, Chan A S Y. A semi-automated method for the determination of organic and total phosphate in sediment. [J].Analyst,1976,101:187-197.
- [9] Liu Sumei, Ye Xiwen, Zhang Jing, *et al.* Problems with biogenic silica measurement in marginal seas[J]. Marine Geology, 2002,192:383-392.
- [10] Lange G J. Distribution of exchangeable, fixed, organic and total nitrogen in interbedded turbiditic/pelagic sediments of the Madeira Abyssal Plain, eastern North

海洋科学 / 2010 年 / 第 34 卷 / 第 11 期

66

Atlantic [J]. Marine Geology, 1992, 109: 95-114.

- [11] Drury C F, Beauchamp E G. Ammonium fixation, release, nitrification and immobilization in high and low fixing soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1991, 55(1): 125-129.
- [12] Zhang J, Yu Z G, Raabe T, *et al.* Dynamics of inorganic nutrient species in the Bohai Sea waters [J].Journal of Marine System, 2004, 44: 189-212.
- [13] 夏斌,张龙军,桂祖胜,等.海河流域的富营养化状况及污染物入海通量[J].中国海洋大学学报,2006, 36(Sup.II): 33-38.
- [14] Liu Sumei. Benthic nutrient recycling in shallow coastal waters of the Bohai Sea[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2004, 22(4): 365-372.
- [15] 冯士筰,张经,魏皓,等. 渤海环境动力学导论[M].北京:科学出版社. 2007: 119-237.
- [16] Rosenfeld J K. Ammonium adsorptionin near shore reducing sediments[J]. Limnol Oceanogr, 1979, 24: 356-364.
- [17] Liu Sumei, Zhang Jing, Jiang Wensheng. Pore water nutrient regeneration in shallow coastal Bohai Sea, China[J]. Journal of Oceanography, 2003, 59: 377-385.
- [18] 黄庆福. 渤海湾区工程地质与地震基础资料研究与 汇编[R]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2001, 4: 16-53.
- [19] Liu Sumei, Zhang Jing, Li Daoji. Phosphorus cycling in sediments of the Bohai and Yellow Seas[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2004, 59: 209-218.
- [20] Li Y, Yu J. Geochemical characteristics of phosphorus near the Huanghe River Estuary[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 1999, 17: 359-365.
- [21] 马红波, 宋金明, 吕晓霞. 渤海沉积物中氮的形态及 其在循环中的作用[J]. 地球化学, 2003, **32**(1): 48-54.
- [22] 吕丹梅,李元洁.黄河口及渤海中南部沉积特征变化及其环境动力分析[J].中国海洋大学学报,2004, 34(1):133-138.
- [23] Nelson D M, Treguer P, Brzezinski M A, et al. Production and dissolution of biogenic silica in the ocean:revised global estimate,comparison with regional data and relationship to biogenic sedimentation[J]. Global Biogeochemistry Cycle, 1995, 9: 359-372.
- [24] Conley D J, Schelske C L, Stoermer E F. Modification of the biogeochemical cycle of silica with eutrophica-

tion[J]. Marine Ecology Progress Series, 1993, 101: 179-192.

- [25] 孙军. 渤海中部和渤海海峡及邻近海域浮游植物群 落结构的初步研究[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(5): 461-471.
- [26] 孙军. 1998-1999 年春秋季渤海中部及其邻近海域叶
 绿素 a 浓度及初级生产力估算[J]. 生态学报, 2003,
 23(3): 517-526.
- [27] 魏皓. 渤海浮游植物生物量时空变化初析[J].中国海 洋大学学报, 2003, **33**(2): 173-179.
- [28] 李凤业, 史玉兰. 渤海南部现代沉积物堆积速率和沉积环境[J]. 黄渤海海洋, 1995, **13**(2): 33-37.
- [29] 岳维忠,黄小平.近海沉积物中氮磷的生物地球化学 研究进展[J].台湾海峡,2003,**22**(3):407-414.
- [30] Raaphorst W V, Malschaert J F P. Ammonium adsorption in superficial North Sea sediments[J]. Cont Shelf Res, 1996, 16: 1 415-1 435.
- [31] Mortimer R J G, Davey J T, Krom M D, et al. The effect ofmacrofauna on porewater profile and nutrient fluxes in the intertidal zone of the Humber Estuary[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1999, 48: 68-699.
- [32] 岳维忠,黄小平.珠江口柱状沉积物中氮的形态分布 特征及来源讨论[J].环境科学,2005,**26**(2):195-199.
- [33] Michael D K, Robert A B. The diagenesis of phosphorus in a nearshore marine sediment[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1981, 45(2): 207-216.
- [34] Drury C F, Beauchamp E G, Evansl J.Fixation and immobilization of recently added ¹⁵NH₄⁺ in selected Ontario and quebec soils[J]. Cana Jour of Soil Sci, 1989, 69: 391-400.
- [35] Kowalenko, C G, YU S. Solution, exchangeable and clay-fixed ammonium in south Coast british Columbia soils[J]. Cana Jour of Soil Sci, 1996, 76: 473-483.
- [36] Schelske C L, Stoermer E F. Eutrophication, silica depletion and predicted changes in algal quality in Lake Michigan[J]. Science, 1971, 173: 423-424.
- [37] Conley D J, Schelske C L ,Stoermer E F, *et al.* Modification of the biogeochemical cycle of silica with eutrophication[J]. Marine Ecology Progress Series, 1993, 101: 179-192.
- [38] 蒋红, 崔毅, 陈碧鹃, 等. 渤海近 20 年来营养盐变化 趋势研究[J]. 海洋水产研究, 2005, **26**(6): 61-67.
- [39] 李学刚, 宋金明, 袁华茂, 等. 胶州湾沉积物中高生

源硅含量的发现-胶州湾浮游植物生长硅限制的证据 [J]. 海洋与湖沼, 2005, **36**(6): 572-579.

- [40] Tréguer P, Nelson D M, Van Bennekom A J, *et al.* The silica balance in the world ocean: a reestimate[J]. Science, 1995, 268: 375-379.
- [41] 刘素美, 江文胜, 张经. 用成岩模型计算沉积物-水 界面营养盐的交换通量-以渤海为例[J]. 中国海洋大 学学报, 2005, 35(1): 145-151.
- [42] Emerson S, Hedges J I. Processes controlling the organic carbon content of open ocean sediments[J]. Pa-

leoceanography, 1988, 3: 621-634.

- [43] Meyers P A. Preservation of elemental and isotopic source identification of sedimentary organic matter[J]. Chemical Geology, 1994, 144: 289-302.
- [44] Milliman J D, Xie Q C, Yang Z S. Transfer of particulate organic carbon and nitrogen from the Yangtze River to the ocean[J]. American J Sci, 1984, 284: 824-834.
- [45] 钱君龙,王苏民,薛斌,等.湖泊沉积研究中一种定量估算陆源有机碳的方法[J].科学通报,1997,42(15):
 1 655-1 657.

Distribution of biogenic elements in the southern and central Bohai Sea sediments

LI Ling-wei, LIU Su-mei, ZHOU Zhao-qian, LU Chao

(Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology Ministry of Education, Ocean University of China, Qing Dao 266100, China)

Received: Dec., 25, 2009

Key words: organic carbon; nitrogen; phosphorus; silicon; sediment; Bohai Sea

Abstract: We studied the distribution of OC, N, P and BSi in the southern and central Bohai Sea sediments. The results indicated that:Because of the effect of terrigenous input, the concentrations of various forms of nitrogen, phosphorus and organic carbon were higher in the shallow coastal sediments than in the central Bohai Sea, and the distribution of Biogenic Silica had close relationship with the content of diatoms; Exchangeable nitrogen accounted for 3.7% of total nitrogen and fixed ammonium accounted for 38.4% which was affected by the content of organic carbon and the clay mineral composition in the sediments;The OC/BSi, ON/BSi and OP/BSi ratios were 2.38, 0.19 and 0.03 in the surface sediments,lower than the Redfield ratio,which indicated that the decomposition rate of BSi was lower than that of organic matter;The OC/ON ratio was from 6.0 to 14.0,indicating that the organic matter in the southern and central Bohai Sea sediments was mixing source,including terrigenous organic matter and marine source; OC was mainly terrigenous input, and ON was mainly terrigenous input in surface sediments but marine autogenic in the lower layer of sediment cores.

(本文编辑:康亦兼)