

黄海夏季水域沉降颗粒物垂直通量的研究*

张岩松 章飞军[†] 郭学武^{††1)} 张曼平^{†††}

(中国水产科学研究院黄海水产研究所 农业部海洋渔业资源可持续利用重点开放实验室 青岛 266071;

中国海洋大学化学化工学院 青岛 266003)

[†](中国水产科学研究院黄海水产研究所 农业部海洋渔业资源可持续利用重点开放实验室 青岛 266071;

中国海洋大学水产学院 青岛 266003)

^{††}(中国水产科学研究院黄海水产研究所 农业部海洋渔业资源可持续利用重点开放实验室 青岛 266071)

^{†††}(中国海洋大学化学化工学院 青岛 266003)

提要 2002 年 8 月, 沿穿过黄海冷水团的青岛至济州岛断面, 在 4 个站位放置沉积物捕获器采集沉降颗粒物。镜检发现无机颗粒物、生物粪球以及混杂聚合物是本断面沉降颗粒物主要类型。测定结果显示沉降颗粒物中的颗粒有机碳(POC)、颗粒有机氮(PON)、颗粒碳(PC)、颗粒氮(PN)和颗粒磷(PP)的百分含量均呈现从表层到底层逐渐下降的趋势。采用两个改进的模型对底层颗粒物再悬浮比率进行了计算, 显示黄海海域夏季底层沉降颗粒物再悬浮比率为 90%—96%, 表明底层沉降颗粒物主要来源于沉积物的再悬浮。两模型所得结果一致, 证明用温跃层底部颗粒物沉降通量代表水体中颗粒物净沉降通量的假设是合理的。水体中颗粒物、POC 及 PON 的净沉降通量(\pm SE)分别为 $(12.65 \pm 3.55) \text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $(0.29 \pm 0.04) \text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 和 $(0.06 \pm 0.01) \text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

关键词 沉降颗粒物, 颗粒物通量模型, 沉降通量, 再悬浮比率, 温跃层, 黄海

中图分类号 P734

海洋中的沉降颗粒物(settling particulate matter, SPM)具有重要的生态系统功能。海洋对大气中 CO_2 的调节主要是通过生物泵的作用完成的。浮游生物吸收空气中的 CO_2 , 并通过一系列的生物、化学作用将一部分碳元素转化为颗粒态形式(如各级生物的粪球、蜕皮和残体等)沉入海底, 从而完成固碳过程(沈国英等, 1990)。水体中产生的颗粒有机物通过沉降、湍流和平流的运输沉降到海底表面, 成为底栖生物的食物源。在浅海区, 海洋沉积物极易在风浪、潮汐以及生物扰动等作用下产生再悬浮。再悬浮的颗粒物, 一方面由于降解、矿化和平移等作用以营养盐形式重新进入水体, 促进植物生长; 另一方面增加了水体混浊度, 抑制植物的光合作用, 从而对生态系统产生影响(Bloesch, 1995; Wainright *et al.*,

1997)。因此, 颗粒物垂直通量是海洋通量研究的重要内容。

国际上对海洋颗粒物沉降通量的研究始于 20 世纪 70 年代(Bishop *et al.*, 1977)。美国伍兹霍尔海洋研究所收集观察了 Sargasso 海 5000m 水深处的颗粒物, 发现这些颗粒物是产生于真光层的聚合物, 且大部分为上部水层浮游生物的粪便。细小、轻微的颗粒并不是单独沉降, 而是集合成大颗粒以更快的速度沉入深海(Honjo, 1997)。研究表明, 浮游生物和原生动物的粪便颗粒的组成和降解对颗粒物的垂直通量产生重大影响(Caron *et al.*, 1989)。中德合作项目中, 运用大孔径时间系列沉积物捕获器对南海北部的沉降颗粒物进行采集并分析, 证明沉降颗粒物中有机质主要来自近期生长的海洋浮游生物(陈建芳等, 1996)。东海

* 国家重点基础研究发展规划项目, G19990437 号。张岩松, 硕士研究生, E-mail: zhangyansong1978@sohu.com

1) 通讯作者, 郭学武, E-mail: guoxw@ysfri.ac.cn

收稿日期: 2003-10-28, 收修改稿日期: 2004-01-18

的沉降颗粒物主要来源于浮游生物(詹滨秋等, 1993), 碳在东海陆架垂直转移主要依赖于颗粒物, 且底表沉积物的再悬浮对底层颗粒物沉降通量及化学组成产生重要影响(宋金明, 1997)。

1 材料与方法

1.1 研究海域

2002年8月,“北斗号”调查船在黄海中南部海域,沿青岛至济州岛断面(图1)进行了包括海洋颗粒物沉降通量在内的多学科综合调查,调查断面穿过黄海冷水团。黄海冷水团来源于冬季滞留的海水,当春季上层水增温后,于底层中央槽区被保留下来;由于水体的层化作用,这一海区在春夏季存在明显的温度跃层(苏育篙, 1986)。冷水团在黄海槽中心和其西侧斜坡上分别形成两个冷中心(翁学传等, 1988),这两个冷中心在本次调查期间依然存在(图1)。黄海中南部海域,不仅受冷水团的影响,还长期受到黄海暖流、黄海沿岸流以及长江冲淡水等物理海洋过程的影响。

黄海冷水团在形成期表层存在一个大尺度的气旋环流,毛汉礼等(1986)认为这是黄海暖流与黄海沿岸流相互作用的结果。

1.2 采样与分析

沿调查断面在4个站位(1-3站、1-5站、1-7站和1-8站)投放沉积物捕获器。1-7站位于冷水团东部中心,1-5站位于两中心之间,而1-3站和1-8站则分列于两个冷中心外侧(图1)。沉积物捕获器为柱形多管式,每个捕获器携带5支采样管,采样管高度为100cm,内径为6.5cm,这种采样器的有效性已被实验所证明(Bloesch *et al.*, 1980)。沉积物捕获器以表层链式式(surface tethered)悬挂水中,捕获器分别放置在温跃层顶部、温跃层底部和水体底层。为避免捕获器触底造成沉积物再悬浮,底层捕获器放置在离底表4—6m处。捕获器放置时间为27—34h(表1)。回收后,小心去除采样管内的大部分上清液,将底部剩余的约500ml水样移至聚乙烯瓶中,加入3%迭氮化钠,

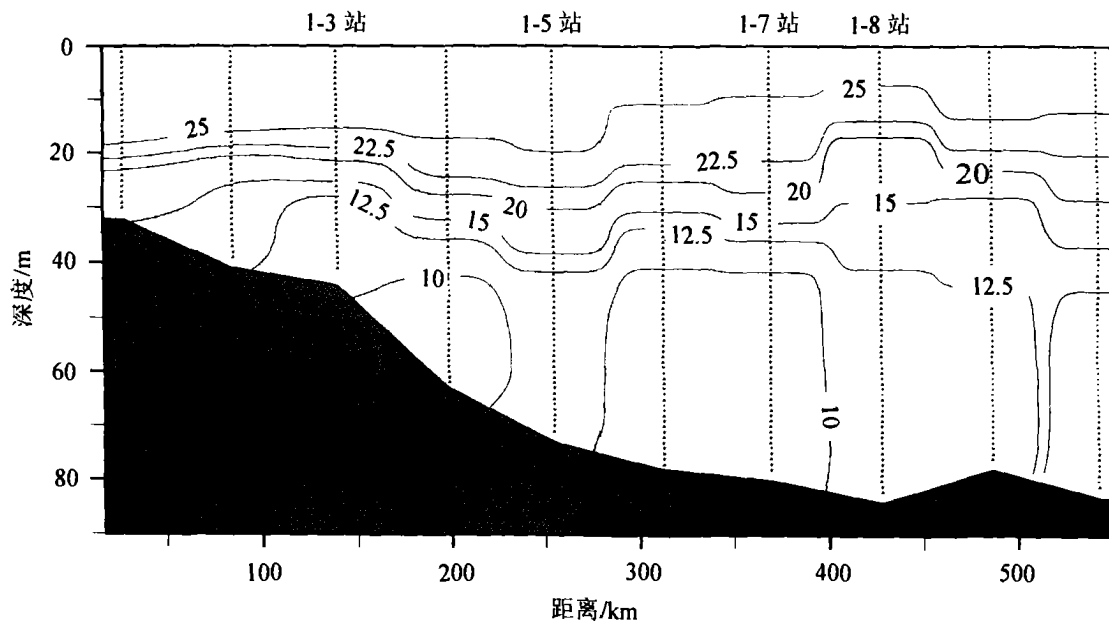


图1 采样断面水温(°C)的垂直分布

Fig.1 Vertical distribution of water temperature (°C) across the sampling section

图中10°C等温线显示黄海冷水团的两个冷中心

表1 沉积物捕获器的放置站位、时间及深度

Tab.1 Exposure station, time and depth of sediment traps

站位	经纬度	放置日期(月·日)	放置时间(h)	水深(m)	温跃层深度(m)	放置深度(m)
1-3	121°59.310'E, 35°23.275'N	08.25—26	27.5	44	15—30	15,30,40
1-5	122°59.581'E, 34°45.316'N	08.24—25	29.5	73	21—48	21,48,68
1-7	123°59.419'E, 34°8.160'N	08.22—23	27	81	15—40	15,40,75
1-8	124°29.897'E, 33°49.178'N	08.20—21	34	80	12—38	15,40,75

0—4℃冷藏保存(Honjo, 1978)。实验室内将样品用预先经 450℃灼烧并称重的玻璃纤维膜(GF/F, Whatman)过滤, 在 60℃下烘干至恒重、称量, 经玛瑙研钵磨碎并搅匀, 干燥器中保存备用。

用芯样底质采集器(MIDICORER-II)采集各站位未扰动的底表沉积物, 取表层 0—3cm 沉积物, 冷冻保存。实验室内将沉积物样品在 60℃下烘干至恒重, 研磨均匀, 置于干燥器中保存备用。

颗粒碳(PC)、颗粒氮(PN)、颗粒有机碳(POC)和颗粒有机氮(PON)的含量用 CHN 元素分析仪(P-E240C)测定。颗粒磷(PP)的含量用酸性 K₂S₂O₈ 热压消化转化为活性磷酸盐, 依照海洋调查规范用磷钼蓝法测定(顾传昱等, 1999)。

取冷藏保存的未经过滤的沉降颗粒物样品进行光镜观察分析。

1.3 颗粒物沉降通量的计算

海洋颗粒物的沉降通量根据下式计算:

$$F = \frac{M}{H \cdot V} \quad (1)$$

$$F_C = \frac{M \cdot f_C}{H \cdot V} \quad (2)$$

式中, F 表示颗粒物沉降通量, M 表示采样管中颗粒物干重, V 表示采样管截面积, H 表示采样时间, F_C 表示颗粒物中某组分的沉降通量, f_C 表示颗粒物中某组分的百分含量。

1.4 再悬浮比率的计算

应用以下两个颗粒物通量模型对再悬浮比率进行计算并比较。

模型 I

此模型由 Bloesch(1982)提出:

$$\alpha_r = \frac{R}{S} \times 100\% = \frac{S - N}{S} \times 100\% \quad (3)$$

式中, α_r 表示颗粒物再悬浮比率, R 表示颗粒物再悬浮通量, S 表示到达海底的总沉降通量, N 表示到达海底的净沉降通量(图 2)。鉴于目前尚无成熟方法确定陆架海颗粒物的净沉降通量, 本文中假设: (1) 海水中的颗粒物由海洋自身生成的颗粒物和再悬浮颗粒物两部分组成; (2) 颗粒物从温跃层底部沉降至海底过程中不发生降解、矿化和分解; (3) 温跃层底部收集的颗粒物为采样水柱中水体自身生成的全部颗粒物, 即到达海底的净沉降通量。

模型 II

模型 II 是近年来计算再悬浮比率常用的方

法(Bloesch, 1995; 詹滨秋等, 1997; Jiménez *et al.*, 2002), 它基于以下假设: (1) 水体自身生成的颗粒物化学组分在沉降过程中不发生变化; (2) 沉积物再悬浮后, 其化学组分也不发生变化。于是

$$R = S - N \quad (4)$$

$$R \cdot f_R = S \cdot f_S - N \cdot f_N \quad (5)$$

式中 f_R 、 f_S 和 f_N 分别表示再悬浮颗粒物、总沉降颗粒物和净沉降颗粒物中某组分的百分含量(图 2)。联立方程(4)和(5)得:

$$\alpha_r = \frac{R}{S} \times 100\% = \frac{f_S - f_N}{f_R - f_N} \times 100\% \quad (6)$$

计算时, f_R 、 f_S 和 f_N 分别取底表沉积物、水体底层颗粒物和温跃层顶部颗粒物中 POC 的百分含量。

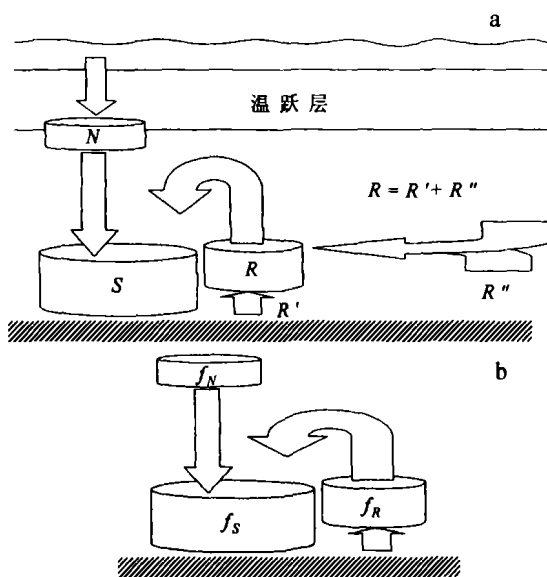


图 2 颗粒物通量模型示意图

Fig.2 Schematic view of particulate flux models

a. 模型 I; b. 模型 II

1.5 再悬浮颗粒物来源分析

根据模型 I, 再悬浮通量(R)中既有来自观测站附近底表沉积物的部分(R'), 也有来自其它区域的部分(R'')。再悬浮颗粒物中的某一组分的百分含量(f_R), 以 POC 为例, 可表示为:

$$f_R = \frac{R_{POC}}{R} = \frac{S \cdot f_S - N \cdot f_N}{S \cdot \alpha_r} \quad (7)$$

或者

$$f_R = X \cdot f_{R'} + (1 - X) \cdot f_{R''} \quad (8)$$

式中, R_{POC} 表示 POC 的再悬浮通量, X 表示站附近底表沉积物再悬浮通量占总再悬浮通量的百分比, $f_{R'}$ 表示站附近再悬浮颗粒物中 POC 百分含量, $f_{R''}$ 表示从其它区域移入的颗粒物中 POC 百

分含量。根据实验所得数据及再悬浮比率(α_r),由方程(7)求得 f_R 。根据方程(8),

$$X = \frac{f_R - f_{R'}}{f_{R'} - f_{R''}} \quad (9)$$

于是,

$$R' = R \cdot X \quad (10)$$

$$R'' = R \cdot (1 - X) \quad (11)$$

计算时, f_R 取底表沉积物中 POC 百分含量, N 取温跃层底部颗粒物沉降通量, f_N 取温跃层底部颗粒物中 POC 百分含量。由于 R'' 是由底部平流作用产生的再悬浮通量,故 $f_{R'} \ll f_N$,取 f_N 作为 $f_{R'}$ 的最大值,由方程(9)可获得 X 的最小值。

2 结果

2.1 沉降颗粒物类型

镜检显示,温跃层顶部采集的颗粒物主要由硅藻和生物碎屑组成,温跃层底部采集的颗粒物主要由完整的生物粪球、硅藻、浮游动物壳及其它混杂聚合物组成,水体底层采集的样品则主要是无机颗粒物、破碎的生物粪球、硅藻、浮游动物壳及其他混杂聚合物。

2.2 沉降颗粒物及底表沉积物中各组分百分含量

沉降颗粒物中的 POC、PON、PC、PN 和 PP 含量均呈现从表层到底层逐渐下降的趋势(表 2),在温跃层顶部和底部之间 POC 的百分含量存在

显著性差异($t = 5.219$, $P = 0.001$)。温跃层顶部的 POC、PON 含量在 1-3 站和 1-8 站均较高,1-7 站最低。温跃层底部颗粒物中各组分的含量在不同站位间基本相当。水体底层颗粒物及沉积物中各组分含量在站位间变化不大。

颗粒有机态 C/N 原子数比值的计算结果显示,1-3 站各水层 C/N 比较稳定,平均(\pm SE)为 $7.84(\pm 0.13)$,而其它三个站位 C/N 比在水层间变化较大,随着水层的增加,呈现由高转低再转高的波动形式(表 2)。

2.3 沉降颗粒物及各组分垂直通量

根据公式(1)、(2)的计算结果,4 个调查站位的颗粒物沉降通量在温跃层顶部为 $1.69-3.07\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,在温跃层底部为 $4.97-20.84\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,在底层为 $80.98-313.92\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,底层颗粒物通量比中上层大十几倍至数十倍(表 3)。温跃层底部和水体底层通量最大值 [$20.84\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 和 $313.92\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$] 皆出现在 1-5 站,最小值 [$4.97\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 和 $80.98\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$] 则出现在 1-3 站。4 个站位温跃层底部的颗粒物、POC 和 PON 沉降通量平均值(\pm SE)分别为 $(12.65 \pm 3.55)\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 、 $(0.29 \pm 0.04)\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 和 $(0.06 \pm 0.01)\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。

2.4 再悬浮比率

根据两种模型计算出的底层颗粒物再悬浮比率基本一致,无显著性差异($t = 1.587$,

表 2 各水层及沉积物中颗粒物组分含量和 C/N 比

Tab.2 Components of particulates and C/N ratio in different layers and sediment

站位	深度(m)及沉积物	POC(%)	PON(%)	PC(%)	PN(%)	PP(%)	C/N
1-3	15	11.93	1.71	16.14	1.73	0.08	8.14
	30	3.54	0.52	6.38	0.62	0.07	7.94
	40	1.50	0.23	2.08	0.54	0.04	7.61
	沉积物	0.59	0.09	0.60	0.13		7.65
1-5	21	7.83	0.83	10.04	5.41	0.05	11.01
	48	1.63	0.24	2.48	0.27	0.04	7.92
	68	1.30	0.17	1.77	0.50	0.04	8.92
	沉积物	0.88	0.11	1.32	0.18		9.33
1-7	15	5.53	0.62	14.95	2.62	0.12	10.41
	40	2.14	0.59	4.94	0.63	0.07	4.23
	75	1.28	0.17	1.71	0.99	0.04	8.78
	沉积物	0.79	0.14	1.27	0.17		6.58
1-8	15	12.58	1.37	15.15	2.25		10.71
	40	3.46	0.68	4.16	0.78	0.06	5.94
	75	1.51	0.24	2.31	0.66	0.04	7.34
	沉积物	0.90	0.16	1.64	0.18		6.56

表 3 沉降颗粒物(SPM)及各组分的垂直通量

Tab.3 Vertical fluxes of settling particulate matter (SPM) and its components

站位	深度(m)	SPM[g/(m ² ·d)]	POC[mg/(m ² ·d)]	PON[mg/(m ² ·d)]	PC[mg/(m ² ·d)]	PN[mg/(m ² ·d)]	PP[mg/(m ² ·d)]
1-3	15	3.07	366	52	495	53	2
	30	4.97	176	26	317	31	3
	40	80.98	1215	186	1684	437	32
1-5	21	1.53	120	12	153	82	1
	48	20.84	340	50	517	56	8
	68	313.92	4081	533	5556	1570	126
1-7	15	1.97	109	12	295	51	2
	40	15.96	342	94	789	101	11
	75	266.45	3410	453	4556	2638	106
1-8	15	1.69	213	23	257	38	
	40	8.83	305	60	367	69	5
	75	206.52	3118	496	4770	1363	83

$P = 0.211$), 4 个站位再悬浮比率介于 90%—96% 之间(表 4)。表 5 列出了调查站位附近底表沉积物再悬浮通量(R')、从其它区域移入的颗粒物通量(R'')以及底表沉积物再悬浮通量占总再悬浮通量的百分比(X)。 X 值在 1-3 站、1-7 站和 1-8 站相当(平均 73.7%), 1-5 站最低(47.1%)。

表 4 使用两个颗粒物通量模型获得的水体底层再悬浮比率

Tab.4 Resuspension ratios in bottom layer derived from two particulate flux models

站位	模型 I	模型 II	站位	模型 I	模型 II
1-3	93.86	91.98	1-7	94.01	89.66
1-5	93.36	93.96	1-8	95.73	94.78

表 5 再悬浮通量的参数估算值

Tab.5 Estimated parameters of resuspension flux

站位	R_{POC} [g/(m ² ·d)]	R [g/(m ² ·d)]	f_R (%)	X (%)	R' [g/(m ² ·d)]	R'' [g/(m ² ·d)]
1-3	1.04	76.01	1.37	73.6	55.94	20.07
1-5	3.74	293.06	1.28	47.1	138.03	155.03
1-7	3.07	250.49	1.23	67.8	169.83	80.66
1-8	2.81	197.69	1.42	79.6	157.36	40.33

注: X 表示调查站位附近底表沉积物再悬浮通量占总再悬浮通量的百分比、 R' 表示调查站位附近底表沉积物再悬浮通量、 R'' 表示从其它区域移入的颗粒物通量

3 讨论

3.1 颗粒物的类型与来源

大洋颗粒物沉降通量的绝大部分是由“海雪”引起的(Shanks *et al.*, 1980), 这一假设已被众多研究证实(Angel, 1984; Walsh *et al.*, 1992)。浮游植物细胞、浮游动物的粪便及生物碎屑等颗粒物在下降过程中, 由于物理与化学作用而聚集增大, 形成所谓“海雪”的颗粒物聚合物, 以加快下沉速度(Honjo *et al.*, 1978; Eppley *et al.*, 1979; Alldredge *et al.*, 1988b)。“海雪”通常定义为直径 ≥ 0.5 mm 的颗粒物聚合物(Alldredge *et al.*, 1988a)。

Allredge(1998)根据聚合体的主要组分将大洋“海雪”分为四类:住囊(larvacean houses)类、粪球聚合物(fecal aggregates)、硅藻聚合物(diatom aggregates)和混杂聚合物(miscellaneous aggregates)。在陆架浅海区, 受沉积物再悬浮的影响, 再悬浮颗粒物一般是此类海区沉降颗粒物的主要组成部分。镜检发现无机颗粒物、生物粪球以及混杂聚合物是本断面沉降颗粒物主要类型, 其中具有底表沉积物特征的无机颗粒物是底层沉降颗粒物的主要组成部分。研究结果也显示, 黄海中南部海域底层颗粒物中再悬浮的比率高达 90%—96%。

温跃层是黄海夏季水体自身产生颗粒物的主

要区域。陆架海海水中的沉降颗粒物主要由水体自身产生的颗粒物和再悬浮产生的颗粒物两部分组成,前者主要是一些生物碎屑、粪球和混杂聚合物(Eppley *et al.*, 1979; Honjo, 1997),因此水体中生物量的大小对这部分颗粒物量的产生具有决定作用。由于温跃层对下部营养盐的向上输运具有阻隔作用,在浮游植物水华末期,温跃层上部营养盐消耗殆尽,浮游植物生长受到抑制(王保栋, 2000),而温跃层底部处于上部贫营养盐区与下部富营养盐区的交界,十分有利于植物生长,浮游动物也容易聚集在这里(Jones *et al.*, 1998)。镜检发现温跃层底部沉降颗粒物中存在大量生物粪球,亦表明这一水层有大量的生物活动。

3.2 不同水层颗粒物组分的变化

1-3 站和 1-8 站温跃层顶部颗粒物各组分含量较高可能是分别受到黄海沿岸流和黄海暖流影响的结果。1-3 站和 1-8 站温跃层顶部颗粒物 POC、PON 百分含量明显高于 1-5 站和 1-7 站(表 2)。这可能是由于 1-5 站、1-7 站位于南黄海冷水团中央区,春季浮游植物水华期过后,营养盐消耗殆尽,到夏季底部营养盐由于温度、密度跃层的阻挡很难向上扩散,因此跃层顶部的浮游植物生长受到限制。而 1-3 站、1-8 站位于冷水团两侧,其表层海水可能分别受到黄海沿岸流和黄海暖流营养盐的补充,较易成为浮游植物活跃的区域。

Parsons(1975)发现大洋深层颗粒物的 C/N 比高于表层水,认为这是颗粒物下降过程中, N 分解较快所致,这一观点在一些浅海区也得到证实(Yanada *et al.*, 1978; Overnell *et al.*, 1995)。Yanada 等(1978)将 Funka 海湾水体分为高生产力水层(上层)和低生产力水层(下层)两部分,并发现下层水体中颗粒物 C/N 比达 12.8,是上层的 2—3 倍,而沉积物中 C/N 比仅为 4 左右。Overnell 等(1995)也发现 C/N 比由表层到底层增加的趋势,但在沉积物中却达到最高值 12。本文中,颗粒物 C/N 比在 1-5 站、1-7 站和 1-8 站的三个采样水层间呈现波动状态,且在底层与沉积物之间相接近。在这三个站位温跃层顶部, C/N 比皆最大(> 10),明显偏离 Redfield 值(6.6)(Redfield *et al.*, 1963)。这可能是由于水华期过后, N 元素大量消耗,且受温跃层阻隔,得不到下部营养盐的补充所造成的。在温跃层底部 C/N 比最小(4—7),接近 Redfield 值,且颗粒物的生物特征也较明显,这

也反映了夏末温跃层底部是生物主要活动区域。底层颗粒物 C/N 比居中(7—9),与沉积物的(6—9)相当,这是受底部强烈的再悬浮影响的结果。1-3 站各水层 C/N 比没有明显变化,可能与水深较浅、温跃层较薄以及沿岸流有关,尚待进一步研究。

3.3 沉降通量与流场

1-3 站温跃层底部 POC 通量为 $176\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$,而其他 3 个站位相应水层 POC 通量约为 1-3 站的两倍,这可能与上升流有关。南黄海中部海区存在大面积上升流区(Hu *et al.*, 1991)。Hu 等(1991)认为上升流将底部营养盐带至上层水域,有利于浮游植物的大量繁殖,浮游动物随之聚集,水体中颗粒有机物也大量形成。参照黄海中部上升流区的范围(胡敦欣等, 2001),除 1-3 站外,其它站位均处于上升流区,可见上升流对颗粒有机碳的产生具有积极作用。

研究结果也反映出平流的作用对于陆架浅海区颗粒物沉降通量的影响。公式(9)中 X 值反映了沉积物再悬浮通量的百分比, X 越小说明底表沉积物再悬浮形成的颗粒物所占比例越小,而平流等作用移入的其他区域颗粒物所占比例越大。1-3、1-7 和 1-8 三个站位的 X 值相近,平均为 73.7%;而 1-5 站 X 值最小(47.1%),且颗粒物通量最大。在 1-5 站,平流作用带来了约 50%的沉降颗粒物,显示平流作用较强,这可能与该站处于冷水团两中心之间,环境较不稳定有关。

3.4 再悬浮模型

应用模型 I 计算底层颗粒物再悬浮比率时,如何确定净沉降通量(N)是非常重要的。Bloesch(1982)应用此模型研究再悬浮通量时,为避免再悬浮的影响,取温跃层顶部的颗粒物通量作为净沉降通量。在本研究中,作者认为以温跃层底部的沉降通量代表净沉降通量更为合适,因为:(1) N 应尽可能代表水体自身产生的颗粒物通量的最大值,而温跃层底部颗粒物沉降通量是顶部的数倍;(2) 镜检显示,温跃层底部的颗粒物中几乎没有具底表沉积物特征的无机颗粒物,意味着绝大部分再悬浮颗粒物难以达到温跃层底部。由模型 I 和模型 II 得出的再悬浮比率无显著性差异,证明模型 I 中对净沉降通量的假设是合理的,因此在无法准确获得颗粒物净通量的情况下,可以温跃层底部颗粒物沉降通量作为净沉降通

量。

对于模型 II 中颗粒物的组分含量, f_S 可由水体底层收集的颗粒物直接测出, 而 f_R 和 f_N 却无法直接获得, 只能参考其他值。因此, α_r 是否准确取决于 f_R 和 f_N 的取值是否合理。当存在强烈的再悬浮时, 底层颗粒物的绝大部分来自底表沉积物。因此, 用底表沉积物中组分(如 POC)含量代替 f_R 不会产生太大偏差, 对此, 国内外研究者已有共识(詹滨秋等, 1997; Blomqvist *et al.*, 1992; Bloesch, 1995)。对于 f_N 有多种替代取值方法, 如 Blomqvist 等(1992)取悬浮颗粒物中的组分(AI)含量, Bloesch (1995)取温跃层颗粒物中的组分(POC、PON)含量, 詹滨秋等(1997)则取浮游生物中的组分(POC)含量。由于温跃层是黄海夏季水体自身产生颗粒物的主要区域, 取这个水层的颗粒物组分含量更接近真实值, 但颗粒物组分(POC)在温跃层顶部和底部差异显著, 所以本文取温跃层顶部的颗粒物中 POC 的百分含量代替 f_N 。

参 考 文 献

- 王保栋, 2000. 黄海冷水域生源要素的变化特征及相互关系. 海洋学报, 22(6): 47—54
- 毛汉礼, 胡敦欣, 赵保仁, 1986. 东海北部的一个气旋形涡旋. 海洋科学集刊, 27: 23—31
- 宋金明, 1997. 中国近海沉积物—海水界面化学. 北京: 海洋出版社, 198—200
- 沈国英, 施并章, 1990. 海洋生态学. 厦门: 厦门大学出版社, 176—177
- 苏育篙, 1986. 黄东海地理环境概况、环流系统与中心渔场. 青岛海洋大学学报, 16(1): 12—27
- 陈建芳, 郑连福, 唐运干等, 1996. 中德合作南海现代沉积作用过程研究进展. 南海研究与开发, 3: 512—515
- 胡敦欣, 庞重光, 2001. 黄海、东海细颗粒物质的输运沉积. 见: 胡敦欣, 杨作升主编. 东海海洋通量关键过程. 北京: 海洋出版社, 3—13
- 翁学传, 张以恩, 王从敏等, 1988. 黄海冷水团的变化特征. 海洋与湖沼, 19(4): 368—379
- 顾传昱, 王正方, 吕海燕, 1999. 海水和海洋沉积物中总磷的测定. 海洋环境科学, 18(3): 48—52
- 詹滨秋, 宋金明, 1993. 东海沉降悬浮物质的特征研究. 海洋科学集刊, 34: 107—113
- 詹滨秋, 宋金明, 1997. 东海悬浮物质再悬浮比率的初步研究. 海洋科学集刊, 38: 99—101
- Allredge A L, 1998. The carbon, nitrogen and mass content of marine snow as a function of aggregate size. Deep-Sea Res I, 45: 529—541
- Allredge A L, Gotschalk C, 1988a. In situ settling behavior of marine snow. Limnol Oceanogr, 33: 339—351
- Allredge A L, Silver M W, 1988b. Characteristics, dynamics and significance of marine snow. Prog Oceanogr, 20: 41—82
- Angel M V, 1984. Detrital Organic Fluxes Through Pelagic Ecosystems. In: Fasham M J R ed. Flows of Energy and Materials in Marine Ecosystem. New York and London: Plenum Press, 475—516
- Bishop J K B, Edmond J M, Keteen D R *et al.*, 1977. The chemistry, biology and vertical flux of particulate matter from the upper 400m of equatorial Atlantic Ocean. Deep-Sea Res I, 24(6): 511—548
- Bloesch J, 1982. Inshore-offshore sedimentation differences resulting from resuspension in the Eastern Basin of Lake Erie. Can J Fish Aquat Sci, 39: 748—759
- Bloesch J, 1995. Mechanisms, measurement and importance of sediment resuspension in lakes. Mar Freshwater Res, 46: 295—304
- Bloesch J, Burns N M, 1980. A critical review of sedimentation trap technique. Schweiz Z Hydrol, 42(1): 15—55
- Blomqvist S, Larsson U, 1992. Petrogenic Metals Tracers of Resuspended and Primary Settling Matter In A Coastal Area of the Baltic Sea. In: Blomqvist S ed. Geochemistry of Coastal Baltic Sediments: Processes and Sampling Procedures. Thesis University of Stockholm, Dept. Geology and Geochemistry, Nr. 285: 1—37
- Caron D A, Madin L P, Cole J J, 1989. Composition and degradation of salp fecal pellets: Implications for vertical flux in oceanic environments. J Mar Res, 47(4): 829—850
- Eppley R W, Peterson B J, 1979. Particulate organic matter flux and planktonic new production in the deep ocean. Nature, 282: 677—680
- Honjo S, 1978. Sedimentation of material in the Sargasso Sea at 5,367 m deep station. J Mar Res, 36: 469—492
- Honjo S, 1997. Marine Snow and Fecal Pellets The Spring Rain of Food to the Abyss. Oceanus, 40: 2—3
- Honjo S, Roman M R, 1978. Marine fecal pellets: Production, preservation and sedimentation. J Mar Res, 36: 45—57
- Hu D X, Cui M C, Li Y X, 1991. On the Yellow Sea cold water mass-related circulation. Yellow Sea Research, 4: 79—88
- Jiménez M R, Verdegem M, Zamora J E *et al.*, 2002. Organic matter sedimentation and resuspension in tilapia ponds during a production cycle. Aquacult Eng, 26: 1—12
- Jones S E, Jago C F, Bale A J *et al.*, 1998. Aggregation and resuspension of suspended particulate matter at a seasonally stratified site in the southern North Sea: Physical and Biolog-

- ical Controls. *Cont Shelf Res*, 18: 1283—1309
- Overnell J, Young S, 1995. Sedimentation and carbon flux in a Scottish Sea Loch, Loch Linnhe. *Estuar Coast Shelf S*, 41: 361—376
- Parsons T R, 1975. Particulate organic carbon in the sea. *Chem Oceanogr*, 2: 365—383
- Redfield A C, Ketchum B H, Richards F A, 1963. The influence of organisms on the composition of seawater. *The Sea*, 2: 26—77
- Shanks A L, Trent J D, 1980. Marine snow: Sinking rates and potential role in vertical flux. *Deep-Sea Res I*, 27: 137—144
- Wainright S C, Hopkinson J C S, 1997. Effects of sediment resuspension on organic matter processing in coastal environments: a simulation model. *J Marine Syst*, 11: 353—368
- Walsh I D, Gardener W D, 1992. A comparison of aggregate profiles with sediment trap fluxes. *Deep-Sea Res I*, 39: 1817—1834
- Yanada M, Maita Y, 1978. Production and decomposition of particulate organic matter in Funka Bay, Japan. *Estuar Coast Mar Sci*, 6: 523—533

VERTICAL FLUX OF THE SETTLING PARTICULATE MATTER IN THE WATER COLUMN OF THE YELLOW SEA IN SUMMER

ZHANG Yan-Song, ZHANG Fei-Jun[†], GUO Xue-Wu^{**}, ZHANG Man-Ping^{***}

(*Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Key Laboratory for Sustainable Utilization of Marine Fisheries Resource, Ministry of Agriculture, Qingdao, 266071;*
College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao, 266003)

[†](*Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Key Laboratory for Sustainable Utilization of Marine Fisheries Resource, Ministry of Agriculture, Qingdao, 266071;*
Fisheries College, Ocean University of China, Qingdao, 266003)

^{**}(*Yellow Sea Fisheries Research Institute, Chinese Academy of Fishery Sciences, Key Laboratory for Sustainable Utilization of Marine Fisheries Resource, Ministry of Agriculture, Qingdao, 266071*)

^{***}(*College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao, 266003*)

Abstract Settling particulate matter (SPM) was collected using Bloesch multi-tube sediment traps at four stations through a transect from Qingdao to Chejudo Island in August 2002. The transect crossed the Yellow Sea Cold Water Mass, which has two cold centers during the survey. The sediment traps were surface tethered and planted in three layers at each station, the upper and lower layer of the thermocline above the Cold Water Mass, and the bottom layer of the water column. Of the SPM, the types, the contents of organic carbon, organic nitrogen, total carbon, total nitrogen, and total phosphorous, the fluxes, and the resuspension ratio in the bottom layer were analyzed in this paper. Two particulate flux models (Model I and Model II) were improved and used to calculate the resuspension ratio, with a key hypothesis in Model I that the vertical flux of the SPM in the lower layer of the thermocline equals to the net vertical flux of SPM in the water column. A X value, i. e. the percent of total resuspension flux constituted by the resuspension flux from the bottom sediments surrounding the sampling station, was deduced from Model I to estimate the contribution of lateral current to the total resuspension flux. Microscopical examination showed that inorganic particulates, fecal pellets, and miscellaneous aggregates were the major types of SPM. Inorganic particulates dominated SPM in the bottom layer due to intensive sediment resuspension at whole stations. A large amount of fecal pellets were found in the lower layer of the thermocline, indicating that the thermocline is the main site of biogenic SPM production. As measured, content of organic carbon, organic nitrogen, total carbon, total nitrogen, and total phosphorous of SPM decreased with the depth of water column. Content of organic carbon and organic nitrogen in the upper layer of the thermocline was much higher at the outer stations in the Cold Water Mass than that at the middle stations. This may be because the coastal current and the warm current of the Yellow Sea influence the surface layer of the water

column at the sides of the Cold Water Mass. The organic carbon fluxes in the lower layer of the thermocline were higher at stations in upwelling areas than those at stations where no upwelling existed. This may be because the upwelling drives a greater amount of nutrients upwards. The resuspension ratios were calculated from 90% to 96% among stations, and the values were not significantly different between the two particulate flux models mentioned above. This indicates that the hypothesis in Model I is acceptable, the vertical flux of SPM in the lower layer of thermocline can be taken as the net vertical flux of SPM in the water column when the latter was unavailable. As results, the mean (\pm SE) net vertical fluxes of SPM, particulate organic carbon, and particulate organic nitrogen were valued (12.65 ± 3.55), (0.29 ± 0.04), and (0.06 ± 0.01) $g/(m^2 \cdot d)$, respectively. The X values were estimated from 47.1% to 79.6% among stations. The bottom lateral current contributed up to 52.9% of the total resuspension flux at the station between the two cold centers of the Cold Water Mass.

Key words Settling particulate matter (SPM), Particulate flux model, Sedimentation flux, Resuspension ratio, Thermocline, Yellow Sea

中国科学院海洋研究所引进 IsoPrime 稳定同位素质谱仪 基本安装调试成功

中国科学院海洋研究所新近引进的由英国 GV 公司生产的 IsoPrime 稳定同位素质谱仪已基本安装完毕,该仪器集 VG 几代同位素质谱仪的精华,是目前稳定同位素比值质谱仪中最新的设计。引进的两台质谱仪主机分别与元素分析仪(EA)和多功能制样及进样系统(Multiprep)以及双路进样系统(Dual Inlet)连接,并配备了最新型的数据处理系统(Masslynx),适用于各类微体古生物化石(包括浮游/底栖有孔虫、钙质超微化石、介形虫等)微量样品的氧碳稳定同位素分析,亦可用于各种有机及无机固体及液体样品的 N、H、O、C 等稳定同位素分析。该仪器所需样品量少,分析精度高、速度快、效率高、自动化程度高,将在很大程度上促进我所古海洋、古环境等领域研究的深入,增强我所参与国际竞争和成果产出的实力。该仪器的管理将采用国际通用模式,即严格管理、开放使用;希望得到社会各界的广泛支持。

来稿请寄:青岛市南海路 7 号《海洋与湖沼》编辑部收

E-mail:pychen@ms.qdio.ac.cn 电话:0532-2898753