

春季东海溶存氧化亚氮的分布和海气交换通量

马 啸, 张桂玲, 曹兴朋, 宋国栋, 王 岚, 刘素美

(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: 于 2011 年 5 至 6 月在东海采集不同深度海水样品, 研究了其中溶存氧化亚氮(N_2O)的分布并估算其海-气交换通量。结果表明, 春季东海表层海水中溶存 N_2O 浓度范围为 6.31~11.88 nmol/L, 平均值为 (9.13 ± 1.45) nmol/L; 底层海水中 N_2O 浓度范围为 7.53~39.75 nmol/L, 平均值为 (13.71 ± 7.76) nmol/L。随着深度的增加, N_2O 浓度逐渐升高。温度是影响春季东海 N_2O 分布的主要因素, N_2O 浓度与温度呈负相关关系。长江冲淡水 and 黑潮水是东海 N_2O 的重要来源。东海表层海水中 N_2O 的饱和度范围为 92.5%~139.3%, 平均值为 $118.5\% \pm 10.3\%$, 绝大多数站位都处于过饱和状态, 因此, 春季东海是大气 N_2O 的净源。利用 LM86 公式和 W92 公式求得东海的海-气交换通量分别为 (4.96 ± 6.12) $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 和 (10.25 ± 17.18) $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 初步估算出东海年释放 N_2O 通量约为 0.061~0.127 Tg/a, 占全球海洋释放总量的 2.0%, 远高于其所占的面积比 0.2%。

关键词: 春季; 东海; 氧化亚氮; 分布; 海-气交换通量

中图分类号: O656 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2014)02-0021-08

doi:10.11759/hyxx20121122003

氧化亚氮(N_2O)是氮循环中氧化还原反应的一个中间媒介。它作为一种温室气体, 对大气化学有十分重要的影响。 N_2O 在大气中能够存留 114 年, 其单分子的温室效应是 CO_2 的 320 倍^[1]。在平流层中它能够发生光解和光氧化反应, 提供 NO 自由基, 不断消耗臭氧层^[2]。

大气中 N_2O 浓度由工业革命前的 270×10^{-9} 上升到 2005 年的 319×10^{-9} ^[1], 自 1750 年至今急剧升高了约 19%, 目前仍在以 0.7×10^{-9} /a 的速度增长^[3], 这表明工业革命以来, 人类活动导致大气中 N_2O 的源汇失衡。含氮化肥的大量使用、农田释放、化石燃料的消耗以及工业排放等人为污染, 是大气中 N_2O 浓度增加的主要原因^[3-4]。

海洋是大气 N_2O 的第二大自然源, 由海洋释放的 N_2O 约占全球 N_2O 排放总量的 25%^[5], 其中河口和陆架等近岸海区受人类活动影响较大, 是 N_2O 产生和释放的活跃区域, 虽然它们只占到整个海洋表面积的 18%, 但是其释放的 N_2O 大约占到海洋释放总量的 15%~61%^[6-7], 因此研究陆架区溶存 N_2O 的分布与释放具有十分重要的意义。

东海是受人类活动影响较大的典型陆架海区, 本文主要对东海溶存 N_2O 的分布规律进行了分析, 并估算了其海-气交换通量。

1 材料与方法

1.1 研究区域和样品采集

于 2011 年 5 月 10 日至 6 月 5 日搭乘“实验 3 号”调查船对东海进行了大面调查, 采样站位如图 1 所示。各个层次的海水通过装有 CTD 的 10L Niskin 梅花采水器采集。采样前先用海水冲洗样品瓶, 然后用硅胶管将海水缓慢平稳的注入 56.5 mL 的样品瓶中, 避免产生气泡和漩涡, 当溢出的海水大约是瓶体积的 1.5 到 2 倍时, 缓慢抽出硅胶管, 加入 0.5mL 饱和氯化汞溶液以抑制微生物活动, 用带聚四氟乙烯内衬的橡胶塞和铝盖将瓶口密封, 样品置于低温避光条件下保存, 并尽快带回陆地实验室进行测定。船载 CTD 在采样时同步获取现场水温、盐度等数据, 并利用船上的自动气象站测量风速。

1.2 样品分析

海水中溶存 N_2O 的测定采用静态顶空-气相色谱

收稿日期: 2012-11-22; 修回日期: 2013-04-22

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2011CB409802); 国家自然科学基金项目(41076067); 科技部国际合作项目(2010DFA91350)

作者简介: 马啸(1987-), 山东济宁人, 硕士研究生, 主要从海洋温室气体方面研究, E-mail: jxth834409@163.com; 张桂玲, 通信作者, E-mail: guilingzhang@ouc.edu.cn

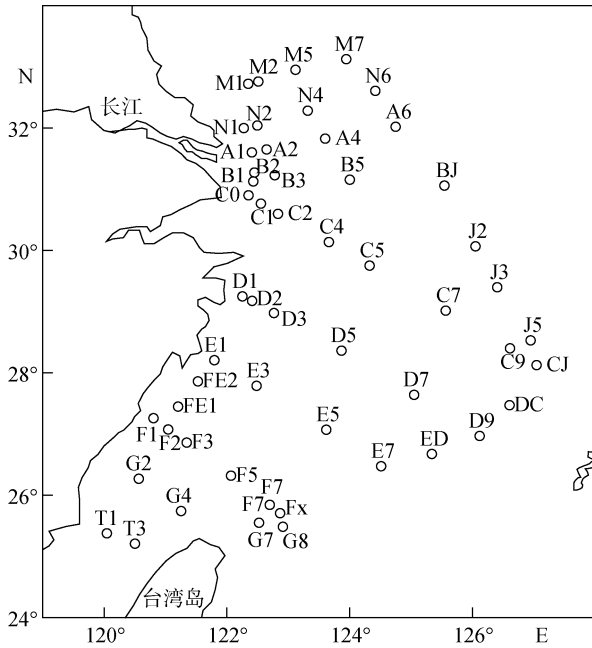


图1 2011年5月东海采样站位图

Fig.1 Sampling locations in East China Sea in May 2011

谱法^[8]。首先用气密性注射器向玻璃样品瓶内注入 5.0 mL 高纯氮气(>99.999%), 同时排出等体积的水以形成瓶内顶空。在室温下使用漩涡混合器剧烈振荡 3 min, 然后静置 3 h 以上, 使气液两相达到平衡, 抽取顶空气注入气相色谱仪(Agilent H6890, 配有 ECD 检测器)进行分离和测定。色谱柱为 3 m×3 mm 的不锈钢填充柱(内填 80/100 目的 Porapark-Q), 柱温设置为 40℃, 检测器为 300℃。所用载气为高纯氮气, 流量为 25 mL/min。样品测定开始前使用 3 种不同浓度的标准气体(0.291、0.619 和 4.900×10^{-6} N₂O/N₂, 国家标准物质中心)进行校正, 得出峰面积与标准气体浓度的线性关系。测样过程中记录室温和气压, 利用 Weiss 等^[9]提供的溶解度数据, 计算出样品中溶解 N₂O 的浓度。该方法测定海水中 N₂O 的检测限为 1.0 nmol/L, 精密度约为 2%。

1.3 饱和度及海-气交换通量的计算

海水中溶存 N₂O 的饱和度和海-气交换通量分别由下列公式计算:

$$R = C_{\text{obs}} / C_{\text{eq}} \times 100\%$$

$$F = k \times (C_{\text{obs}} - C_{\text{eq}})$$

其中 C_{obs} 为测得的溶存气体在表层海水中的浓度; C_{eq} 是表层海水与大气达到平衡时该气体在海水中的浓度; k 为气体交换速率, 可根据经验公式计算得到, 通常用 Liss and Merlivat 1986 公式^[10]或

Wanninkhof 1992 公式^[11](以下分别简称为 LM86 和 W92 公式)计算, 两者分别反映了海-气交换通量估算结果的较低值与较高值。

2 结果与讨论

2.1 春季东海表、底层 N₂O 的水平分布

春季东海表、底层的温度、盐度和 N₂O 浓度分布如图 2 所示。表层温度的分布由北向南逐渐升高, 盐度由长江口及近岸向外海递增, 这主要是受到长江冲淡水的影响。东海东南部表现出高温、高盐的特征, 可能是受到黑潮水入侵的影响。长江口以南沿岸温盐的分布都呈现近岸低、外海高的趋势, 主要是受到浙闽沿岸流的影响, 表层 N₂O 的分布也由长江口南岸向外海逐渐降低。表层 N₂O 的浓度范围在 6.31~11.88 nmol/L, 平均值为 (9.13 ± 1.45) nmol/L。由北向南随着温度升高, N₂O 浓度逐渐降低, 表明温度是影响其分布的主要因素。水温大约每降低 1℃时, N₂O 在水中的溶解度升高 3%^[9]。底层温度的分布主要受到水深的影响, 在大陆坡随着深度的增加, 水温迅速降低。盐度由长江口向外逐渐升高, 在陆架中部与陆坡盐度均较高(>34)。底层 N₂O 的浓度由近岸向外海逐渐升高, N₂O 的浓度范围在 7.53~39.75 nmol/L, 平均值为 (13.71 ± 7.76) nmol/L。表、底层 N₂O 浓度与温度呈显著的负相关关系, 其相关系数为 $r^2=0.76$ ($n=55$)(图 3)。春季末期, 东海大部分海域已经出现不同程度的层化(可参见 2.2 节的垂直分布), 在一定程度上阻止了底层水体中高浓度的 N₂O 向表层扩散。底层 N₂O 浓度的最高值出现在处于陆坡边缘的 CJ、ED、DC、G8 等站位, 根据其温度、盐度和密度数据作出 T-S 曲线如图 4 所示, 温盐的分布呈现明显的反 S 型, 表明这些站位受到黑潮水的影响^[12]。黑潮水向陆架的入侵使得 N₂O 浓度沿着陆坡向陆架逐渐扩散降低, 黑潮水是东海 N₂O 的一个重要来源。

2.2 春季东海 N₂O 的垂直分布

东海的水文条件比较复杂, 受到陆地径流和来自开阔大洋高温、高盐的外海水影响, 长江冲淡水、台湾暖流、黑潮、沿岸流和对马暖流等都对整个东海的物质运输和循环起到重要作用^[13]。本文分别选取了 N、C、D、E、F 几个典型断面对东海溶存 N₂O 的垂直分布进行分析。

N 断面位于东、黄海分界线上, 由近岸向外海温度逐渐降低, 盐度逐渐升高。N 断面的温盐分布与其

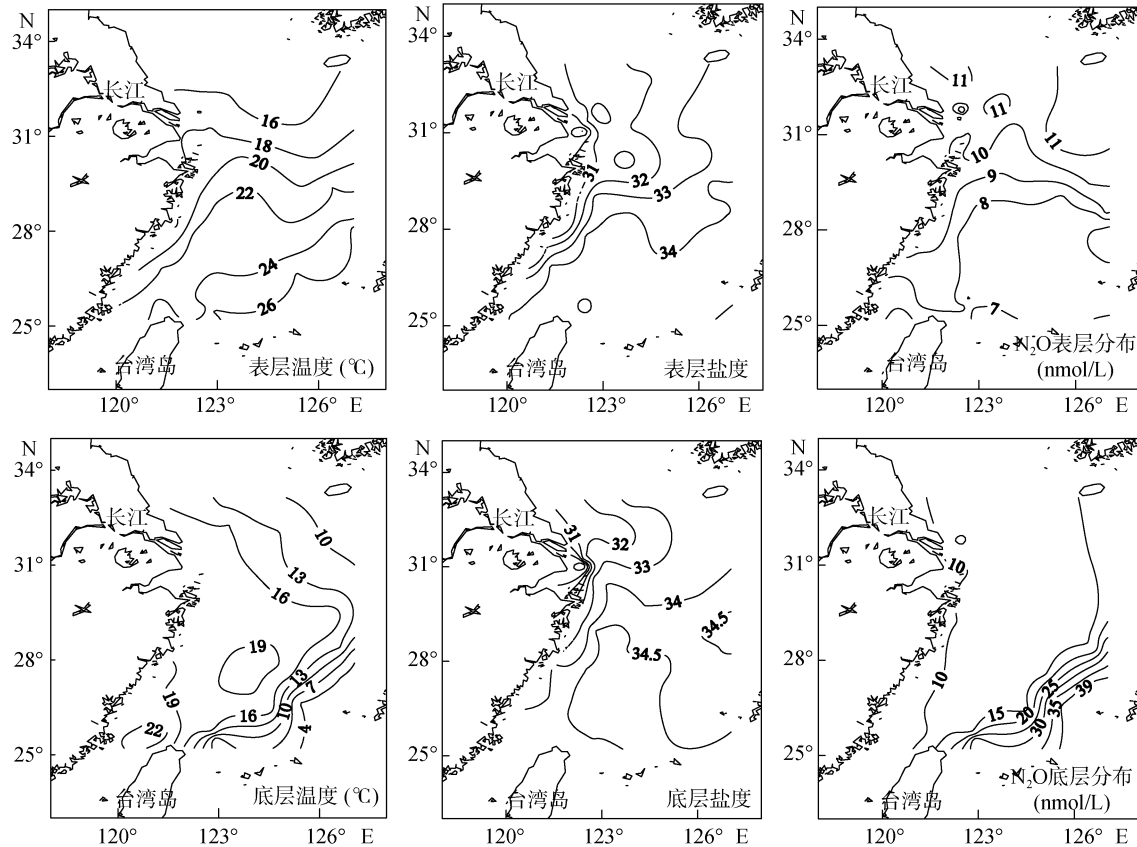


图 2 春季东海表、底层温度、盐度和 N_2O 浓度分布

Fig. 2 Horizontal distributions of temperature, salinity and N_2O concentration in surface and bottom waters in the East China Sea

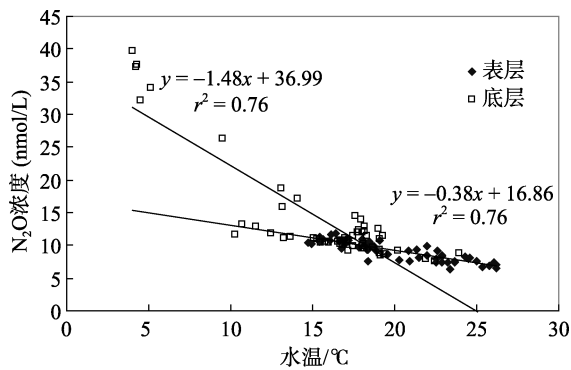


图 3 东海表、底层 N_2O 浓度与水温的相关性分析

Fig. 3 Correlations between N_2O concentration and temperature in surface and bottom waters of the East China Sea

他断面有很大区别,等值线大都和底层垂直,没有出现明显的层化,垂向混合十分均匀,这可能是受到长江冲淡水的影响。三月和四月期间,长江冲淡水的主流从长江口直下东南;进入五月以后水舌开始北抬,轴线指向东或东北^[14],影响范围甚至可以延伸到济州岛。在底层温盐的分布图上可以看出,在长江口向济州岛方向有一个较弱的水舌延伸,N断面刚

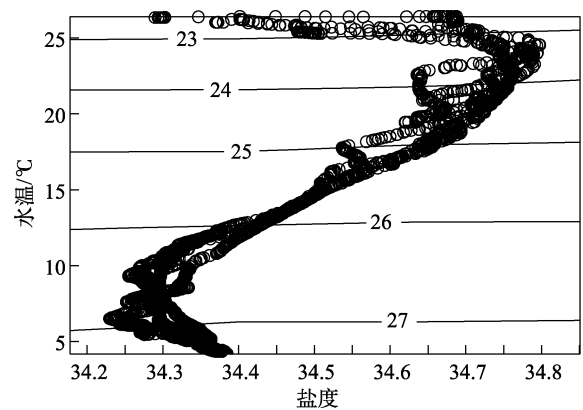


图 4 CJ、DC、G8、ED 站位的 T-S 曲线 (等值线是 Sigma-t 数据,单位为 kg/m^3)

Fig. 4 Temperature-Salinity distribution of stations CJ, DC, G8 and ED (The isoline is sigma-t in kg/m^3)

好处处于长江冲淡水的主轴上。N 断面 N_2O 的浓度范围是 10.23~12.88 nmol/L, N_2O 的分布与温盐类似,垂向混合均匀,由东部底层高浓度向近岸扩散降低,而近岸站位 N_2O 浓度较为一致,都在 10.5 nmol/L 左右。

C 断面自东海西北部长江口向西南延伸,不仅经过长江冲淡水区,而且横切冲绳海槽,与黑潮主

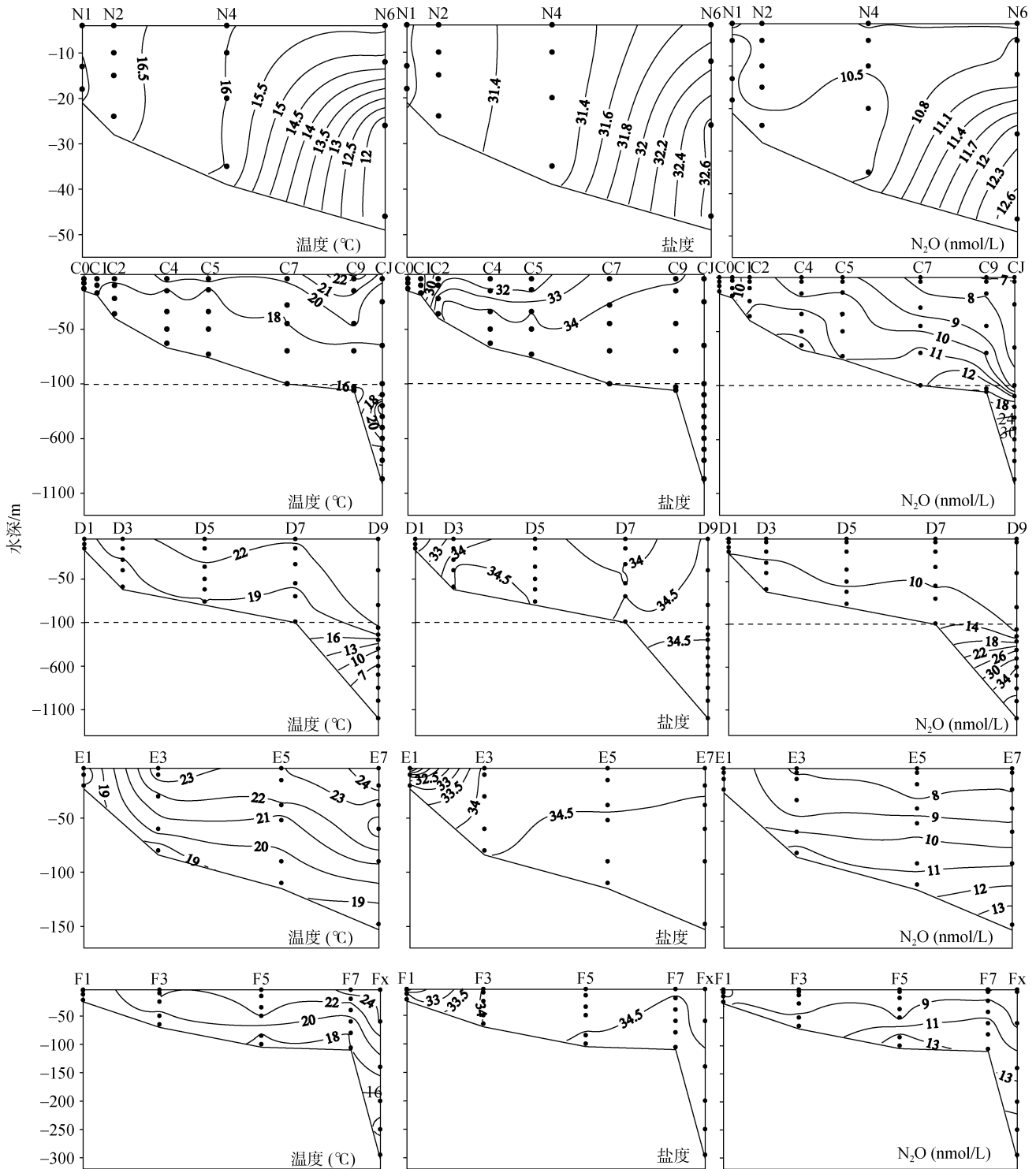


图 5 N、C、D、E、F 断面温度、盐度和 N_2O 的垂直分布

Fig. 5 Vertical distributions of temperature, salinity and N_2O concentration along section S N, C, D, E and F

轴垂直, 对整个东海的水文和化学要素的研究具有十分重要的意义。受陆源输入的影响, 盐度由近岸向外海逐渐增大。C 断面温度分布由表层向下逐渐降低, 但是在 CJ 站的中层出现温度的高值, 其水温比周围

高出 3~6°C, 此处也对应盐度的最大值, 这主要是受到高温高盐的黑潮水的影响。从 C4 站向外水深 100 m 内的温盐分布相对均衡, 等值线比较平整, 表明春季东海东部已经开始出现层化现象。CJ 站表层水温

等值线加密, 此处可能受到不同水团混合的影响。由 C 断面的 N_2O 分布可以看出, 由近岸向外海 N_2O 的浓度逐渐降低, 同时 100 m 水深范围内, N_2O 的低值也与温度的高值相对应, 说明温度仍然是影响陆架区水体中 N_2O 分布的主要因素。在 CJ 站, 100 m 以下 N_2O 浓度随深度逐渐增加, 最高值可达 35.66 nmol/L, 主要是受到富 N_2O 的黑潮次表层水的影响。

D 断面与 C 断面平行, 横跨整个东海陆架, 并且向东南延伸至冲绳海槽。温度随着深度的增加逐渐降低, 盐度受到沿岸流的影响在近岸出现低值。 N_2O 的分布呈现出由表层到底层浓度逐渐增加的趋势, 但是层化在一定程度上阻止了 N_2O 向上层水体的扩散和向大气的释放。D9 站的底部出现 N_2O 浓度的最高值, 达到 40.75 nmol/L, 主要是受到富含 N_2O 的黑潮水的影响。

E 和 F 断面位于 D 断面的南部, 横跨整个东海陆架与 D 断面平行。随着深度的增加, 温度逐渐降低。盐度分布也大致相似, 在近岸区域出现低值。通过温盐分布能够看出比较明显的层化现象。E、F 两个断面 N_2O 浓度均呈现由表到底逐渐升高的趋势, 与温度的分布趋势相反, 温度是影响这两个断面 N_2O 分布的主要因素。

从以上各断面垂直分布可以看出, 黑潮水是东海 N_2O 的重要来源, 温度是影响 N_2O 分布的主要因素。长江冲淡水携带大量的 N_2O ^[15] 注入东海, 也是东海 N_2O 的一个重要来源。有研究提出, 近岸海域水体中约 40% 的 N_2O 可能来自沉积物的释放^[16], 东海陆架区 N_2O 的垂直分布呈现随深度增加逐渐上升的趋势, 但是这些高浓度的 N_2O 究竟来源于黑潮、底层的沉积物释放还是现场的生物产生, 还有待于进一步的实验确定。

2.3 东海 N_2O 的饱和度和海-气交换通量

根据 2005 年大气中 N_2O 的浓度 319×10^{-9} ^[1], 以及 $0.7 \times 10^{-9}/a$ 的增长速度^[3], 可以估算出 2011 年大气中 N_2O 的浓度约为 323×10^{-9} 。利用测得的表层海水中溶解 N_2O 的浓度和现场水温、盐度, 计算得出 5 月东海表层海水中溶解 N_2O 的饱和度范围是 92.5%~139.3%, 平均值为 $118.5\% \pm 10.3\%$ 。除了 T3 和 L1 站处于轻微的不饱和状态, 其他所有站位都处于饱和状态, 因此东海是大气 N_2O 的一个净源。

文献发表的部分近岸和陆架海域的表层 N_2O 浓度、饱和度及海-气通量如表 1 所示。本文的测定结

果在中国近海 N_2O 浓度范围内, 整体上黄海和东海的 N_2O 浓度比南海高, 主要是受到温度的影响。东海 N_2O 浓度波动范围较大, 有明显的季节和年际变化, 这与其复杂的水文条件和生物因素密切相关。2003 年 9 月的观测结果比本航次略高。秋季初期海水的层化还比较显著, 而随着长江径流量的降低, 2003 年 9 月注入东海的长江冲淡水平均 N_2O 浓度达到 15.9 nmol/L^[21], 是秋季东海表层海水 N_2O 浓度大幅度提升的主要原因。2006 年 11 月的结果比本文略低, 但是相差不大。2007 年 2 月观测到的结果最高, 这一方面是因为冬季水温较低, 海水中 N_2O 的溶解度较高^[9]。另一方面, 冬季黑潮水的入侵较强, 而且陆架区水体的垂向混合剧烈, 有利于底层高浓度 N_2O 向表层的扩散。

根据本航次现场测得的瞬时风速, 分别利用 LM86 公式和 W92 公式计算得到各个站位海-气交换通量的范围为 $-4.04 \sim 37.63 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 和 $-8.89 \sim 118.28 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 平均值分别是 $(4.96 \pm 6.12) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 和 $(10.25 \pm 17.18) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, 使用 W92 公式的计算结果大约是 LM86 公式的 2 倍。从表 1 可以看出, 不同海域不同季节 N_2O 海-气交换通量有很大差异, 但是大都表现为大气 N_2O 的源。根据本航次 N_2O 海-气交换通量结果和东海的面积 (77 万平方公里), 初步估算出东海 N_2O 的年释放量为 0.061~0.127 N_2O/a , 占全球海洋年释放 N_2O 总量的 2.0%, 远高于东海占全球海洋面积的 0.2%, 表明人为活动、现场生物产生以及黑潮入侵、长江冲淡水输入等各种因素的综合影响, 使得东海成为 N_2O 释放的活跃海域。本文的计算结果在世界各陆架海海-气交换通量的范围内, 但是仍具有很大的不确定性, 这主要是由气体交换速率常数 k 的估算引起的, 而 k 与所采用的风速有关。本文使用的是现场测定的瞬时风速, Morell 等^[20] 研究发现, 使用长期的风速数据求得的通量比使用现场风速要高出 50% 以上, 因此本文得到的只是比较保守的结果。

3 结论

1) 东海溶存 N_2O 的分布主要受到长江冲淡水输入、黑潮水与陆架水的交换、沉积物释放、水团混合等多种因素的影响。

2) 春季东海陆架水体中 N_2O 的垂直分布特征基本一致, 即: N_2O 浓度随着深度的增加逐渐升高。温度是影响春季东海 N_2O 分布的主要因素, N_2O 的分布

表 1 世界部分陆架海溶存 N₂O 的浓度、饱和度和海-气交换通量

Tab.1 Summary of N₂O measurements in coastal areas in the literatures

研究海域	时间	表层浓度 (nmol/L)	表层饱和度(%)	海-气交换通量 ($\mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$)	风速(m/s)	参考文献
阿拉伯海	1994 年 4 月-5 月		105±8	0.06±0.79 ^a		[17]
	1995 年 2 月-3 月		132±5	5.11±4.12 ^a		
	1995 年 7 月-8 月		133±15	10.01±6.68 ^a		[18]
	1996 年 8 月		130±3	15.32±7.66 ^a		
黑海西北陆架区	1995 年 7 月-8 月	7.9±0.8	111±9	2.7 ^a ; 4.4 ^b		[19]
加勒比海	1995 年 4 月	7.14±0.21	120±4	1.58±1.98 ^a	5.8±3.4	[20]
	1996 年 6 月	6.60±0.55	114±9	2.49±1.92 ^a	7.3±1.0	
东海	2003 年 9 月	11.5±4.5	191±74	9.8±16.0 ^a 17.1±26.4 ^b	4.7±3.0	[21]
	2006 年 11 月	8.76±1.30	123±13	4.43±3.60 ^a 7.44±6.32 ^b		[22]
	2007 年 2 月	16.17±6.82	208±104	23.68±31.61 ^a 41.44±52.40 ^b		
	2011 年 5 月-6 月	9.13±1.45	119±10	4.96±6.12 ^a 10.25±17.18 ^b	8.8±4.8	本文
南海东北部	2004 年 9 月	8.40±0.79	123±12	0.72±0.36 ^a	9	[23]
北黄海	2005 年 3 月	11.94±2.88	90±22	-1.3±4.0 ^a -1.9±6.2 ^b	4.4±3.7	[24]
	2006 年 4 月	11.78±1.84	96±16	-0.4±2.8 ^a -0.7±4.5 ^b	6.8±1.4	
	2006 年 8 月	11.68±3.34	163±45	6.5±8.3 ^a 11.3±13.4 ^b	5.0±2.2	
	2007 年 4 月	11.56±0.82	106±7	0.9±1.3 ^a 1.5±2.0 ^b	5.9±2.3	
	2007 年 10 月	11.90±1.62	149±20	7.9±8.2 ^a 13.8±14.3 ^b	6.4±2.8	
				9.07±11.24 ^a 14.78±18.07 ^b		
南海北部	2005 年 4 月-5 月	9.6±3.0	163±45			[25]

注: a 表示使用 LM86 公式; b 表示使用 W92 公式

与温度呈明显的负相关关系。

3) 春季东海表层海水大都处于过饱和状态, 是大气 N₂O 的净源。粗略估算东海 N₂O 的年释放量约占全球海洋排放总量的 2.0%, 是 N₂O 产生与释放的活跃海域。

致谢: 感谢国家海洋局第二海洋研究所黄大吉老师提供温盐数据。

参考文献:

[1] Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Climate change 2007: The physical science basis[C]//IPCC. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York, USA: Cambridge University Press,

2007: 1-212.

[2] Ravishankara A R, Daniel J S, Portmann R W. Nitrous oxide (N₂O): The dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century[J]. Science, 2009, 326(5949): 123-125.

[3] Montzka S A, Dlugokencky E J, Butler J H. Non-CO₂ greenhouse gases and climate change[J]. Nature, 2011, 476(7358): 43-50.

[4] Rao S, Riahi K. The role of non-CO₂ greenhouse gases in climate change mitigation: Long-term scenarios for the 21st century[J]. Energy Journal, 2006, Special Issue 3: 177-200.

[5] Nevison C D, Weiss R F, Erickson D J. Global oceanic

- emissions of nitrous oxide[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1995, 100(C8): 15809-15820.
- [6] Bange H W, Rapsomanikis S, Andreae M O. Nitrous oxide in coastal waters[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1996, 10(1): 197-207.
- [7] Seitzinger S P, Kroeze C. Global distribution of nitrous oxide production and N inputs in freshwater and coastal marine ecosystems[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1998, 12(1): 93-113.
- [8] 杨晶, 张桂玲, 赵玉川, 等. 胶州湾河口潮滩沉积物中 N_2O 的产生和释放及其影响因素[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(12): 2723- 2732.
- [9] Weiss R F, Price B A. Nitrous oxide solubility in water and seawater[J]. *Marine Chemistry*, 1980, 8(4): 347-359.
- [10] Liss P S, Merlivat L. Air-sea exchange rates: introduction and synthesis[C]// Buat-Menard P. The role of air-sea exchange in geochemical cycling. New York, USA: D. Reidel Publishing Company, 1986: 113-127.
- [11] Wanninkhof R. Relationship between wind speed and gas exchange over the ocean[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992, 97(C5): 7373-7382.
- [12] 于洪华, 袁耀初, 苏纪兰, 等. 1997 年夏季台湾岛以东黑潮及其附近海域水文特征[C]//国家海洋局科学技术司. 中国海洋学文集——西北太平洋副热带环流研究(二). 北京: 海洋出版社, 2000: 39-45.
- [13] 苏纪兰. 中国近海的环流动力机制研究[J]. *海洋学报*, 2001, 23(4): 1-16.
- [14] 赵保仁. 长江冲淡水的转向机制问题[J]. *海洋学报*, 1991, 13(5): 600-610.
- [15] Zhang G L, Zhang J, Liu S M, et al. Nitrous oxide in the Changjiang (Yangtze River) Estuary and its adjacent marine area: Riverine input, sediment release and atmospheric fluxes[J]. *Biogeosciences*, 2010, 7: 3505-3516.
- [16] De Angelis M A, Gordon L I. Upwelling and river runoff as sources of dissolved nitrous oxide to the Alsea estuary, Oregon[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1985, 20(4): 375-386.
- [17] Lal S, Patra P K, Venkataramani S, et al. Distribution of nitrous oxide and methane in the Arabian Sea[J]. *Current Science*, 1996, 71(11): 894-899.
- [18] Lal S, Patra P K. Variabilities in the fluxes and annual emissions of nitrous oxide from the Arabian Sea[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1998, 12(2): 321-327.
- [19] Amouroux D, Roberts G, Rapsomanikis S, et al. Biogenic gas (CH_4 , N_2O , DMS) emission to the atmosphere from near-shore and shelf waters of the north-western Black Sea[J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2002, 54(3): 575-587.
- [20] Morell J M, Capella J, Mercado A, et al. Nitrous oxide fluxes in Caribbean and tropical Atlantic waters: evidence for near surface production[J]. *Marine Chemistry*, 2001, 74(2-3): 131-143.
- [21] Zhang G L, Zhang J, Ren J L, et al. Distributions and sea-to-air fluxes of methane and nitrous oxide in the North East China Sea in summer[J]. *Marine Chemistry*, 2008, 110: 42-55.
- [22] 郑立晓. 中国近海部分典型海洋环境中溶存氧化亚氮的分布及海-气交换通量研究[D]. 青岛, 中国海洋大学, 2008.
- [23] 徐继荣, 王友绍, 张凤琴, 等. 南海东北部海水中 N_2O 分布与产生机制的初步研究[J]. *热带海洋学报*, 2006, 25(4): 66-74.
- [24] 杨晶, 张桂玲, 郑立晓, 等. 北黄海溶解氧化亚氮的分布与通量的季节变化[J]. *环境科学*, 2009, 30(3): 656-662.
- [25] 郑立晓, 张桂玲, 许洁, 等. 春季南海溶存 N_2O 的分布特征和海气交换通量[J]. *海洋环境科学*, 2009, 28(3): 233-237.

Distribution and air-sea fluxes of dissolved nitrous oxide in the East China Sea in spring

MA Xiao, ZHANG Gui-ling, CAO Xing-peng, SONG Guo-dong, WANG Lan, LIU Su-mei

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

Received: Nov., 22, 2012

Key words: spring; the East China Sea; nitrous oxide; distribution; sea-to-air fluxes

Abstract: In this manuscript, the distribution and air-sea fluxes of nitrous oxide (N_2O) in the East China Sea during May-June 2011 were investigated. The N_2O content increased from surface to bottom in the water column. The distribution of dissolved N_2O showed a negative correlation with the temperature. The Changjiang diluted water and Kuroshio were the major sources of dissolved nitrous oxide in the East China Sea. The N_2O saturation in the surface waters ranged from 92.5% to 139.3%, with an average of $118.5\% \pm 10.3\%$. The sea-to-air fluxes of N_2O were estimated to be $(4.96 \pm 6.12) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ and $(10.25 \pm 17.18) \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$, using the LM86 and W92 equations, respectively. The annual emission of N_2O from the East China Sea was estimated to be 0.061~0.127 Tg $\text{N}_2\text{O}/\text{a}$, which accounted for about 2.0% of the global annual oceanic N_2O fluxes, suggesting that the East China Sea is an active area for N_2O emission and a net source of atmospheric N_2O .

(本文编辑: 康亦兼)