

南极半岛近岸海域生物化学要素分布 特征及影响因素

付 丹, 郑晓玲*, 王保栋, 辛 明, 滕 芳, 谢琳萍

(国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266071)

摘 要: 基于中国第 30 次南极科学考察在南极半岛 ($60^{\circ}\sim 63^{\circ}\text{S}$) 近岸海域获取的调查资料, 分析了该海域生物化学要素中溶解有机碳 (DOC)、总氮 (TN) 和总磷 (TP) 分布特征并讨论地形和水团对其的影响。结果表明: 2014 年夏季南极半岛近岸海域水体 DOC 浓度变化范围为 $40.5\sim 78.1\ \mu\text{mol/L}$, 平均浓度为 $66.3\ \mu\text{mol/L}$; TN 浓度变化范围为 $4.2\sim 29.5\ \mu\text{mol/L}$, 平均浓度为 $14.9\ \mu\text{mol/L}$; TP 浓度变化范围为 $0.8\sim 2.9\ \mu\text{mol/L}$, 平均浓度为 $2.0\ \mu\text{mol/L}$ 。表层 DOC 呈现研究海域西北部 D1 断面和东南部 D5 断面浓度较高, 中部 DOC 浓度较低; 表层 TN 与 TP 浓度高值区出现在研究海域西部 D1 断面北部以及南部, 中部和东部浓度较低; DOC, TN 和 TP 浓度的垂直分布与海底地形和水团交汇密切相关, 水团运动受阻于地形致使生物化学要素在垂直方向再分布。DOC, TN 和 TP 空间分布反映了南极半岛近岸海域生物化学要素复杂的流通, 将为合理开发和利用南极资源及环境影响评价提供科学依据。

关键词: 南极半岛; 溶解有机碳; 总氮; 总磷; 分布特征

中图分类号: P734.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-3682(2017)01-0043-09

doi: 10.3969/j.issn.1002-3682.2017.01.005

南极地区是全球气候变化最敏感的区域之一, 且南大洋作为全球典型的高营养盐低叶绿素^[1] (High Nitrate Low Chlorophyll, HNLC) 的海区, 其生物化学要素直接影响南大洋的生物资源分布及生态环境变化。南大洋是全球大气 CO_2 最重要的汇, 在全球碳循环中扮演重要角色^[2]。溶解有机碳 (Dissolved Organic Carbon, DOC) 时空分布在海洋碳循环以及海洋生态系统中起着重要的作用^[3]。海洋中氮磷分布也是海洋生产量、海区肥沃性的一种重要标志^[4]。复杂的海底地形和多支流交汇导致了南极半岛近岸海域的流场和水团交换异常复杂^[5-6]。而随着人类对南极研究的深入, 对合理利用南极生物资源及南极生态环境影响程度的讨论日益增加, 探明该海域 DOC, 总氮 (Total Nitrogen, TN) 和总磷 (Total Phosphorus, TP) 及受水团的影响对南极半岛近岸海域生物地球化学循环、合理地开发利用南极生物资源及海岸工程前后海洋生态环境影响评价方面具有重要意义。

科学界对南极半岛地区生物化学的研究发现, 位于 HNLC 的南大洋系统中, 南极半岛威德尔海盆和罗斯海保持低的生产力水平^[7]。Wiebinga 和 de Baar^[8] 认为相对于世界主要大洋, 南极半岛近岸海域的 DOC 浓度较低。Guildford 和 Hecky^[9] 对海洋总态营养盐研究发现海洋中叶绿素值与 TP 显示正相关。无机营养盐能够模拟浮游植物生长, 并且能示踪表层海水的营养物的生物化学通量^[10], 有机态氮磷可能是海洋上混合层潜在的营养物质库^[11], 但是现今科学界多以无机态氮磷作为海洋营养要素研究的基础, 对海洋中总态氮磷的研究仍较少^[12]。随着南极考察的工程建设, 海岸生态环境必然受到影响, 对南极区域性环境承载力与脆弱性评价亟待深入。而工程环境影响评价体系中, 生物化学要素变化影响环境的影响程度对评价工程综合效益意义重大^[13-14]。本文利用中国第 30 次南极科学考察航次期间采集的海水样品, 分析了南极半岛

收稿日期: 2016-11-29

资助项目: 南北极环境综合考察与评估专项——南极周边海域海洋化学与碳通量考察 (CHINARE2016-01-04)

作者简介: 付 丹 (1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事海洋化学与大气化学方面研究. E-mail: fudan@fio.org.cn

*** 通讯作者:** 郑晓玲 (1962-), 女, 研究员, 博士, 主要从事极地环境科学方面研究. E-mail: zxl@fio.org.cn

(王 燕 编辑)

近岸海域 DOC, TN 和 TP 的空间分布特征,并讨论了地形和水团的影响,以期对南极半岛近岸海域环境影响评价及生物资源利用与保护提供科学依据。

1 研究方法

1.1 站位信息

根据中国第 30 次南极大洋科学考察实施方案,在 2014 年 2 月中旬至 3 月期间,利用雪龙号科考船的船载 SBE 911 PLUS CTD 搭载的 10 L Rosette 采水器,采集南极半岛近岸海域海水样品。采样区域向西以南极半岛北部和西北部陆架及陆坡为界,向东以南奥克尼群岛东部威德尔海底层水外流区为界,即 $60^{\circ}\sim 63^{\circ}\text{S}$, $45^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{W}$ 的海域布设了 28 个测站。采样层次主要以 0, 25, 50, 100, 200 m 标准水层外加 500, 1 000 m 和底层为主(以站位水深为准)。具体采样站位信息见图 1。

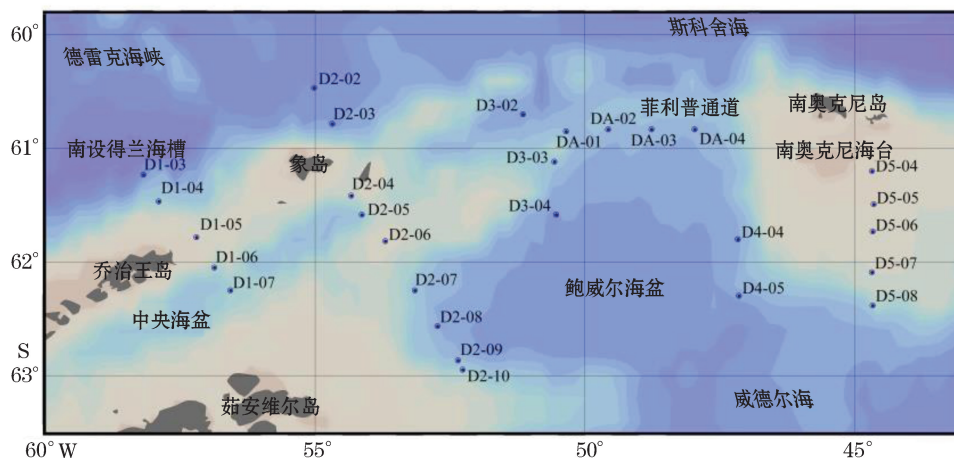


图 1 南极半岛近岸海域调查站位图

Fig.1 Survey stations in the offshore area of the Antarctic Peninsula

1.2 实验方法

样品的采集、保存及分析按照 GB/T 12763.4—2007《海洋调查规范》^[15]和 GB 17378.4—2007《海洋监测规范》^[16]进行。DOC 水样采集后立即用预先经 450°C 灼烧过的 $0.45\ \mu\text{m}$ GF/F 玻璃纤维膜过滤,收集 50 mL 滤液于 450°C 预灼烧过的棕色玻璃试剂瓶中, TN 与 TP 水样直接采集 100 mL 海水样品封存于 Nalgene 聚乙烯瓶中, -20°C 冰库冷冻保存。同时记录采样站位 CTD 温度,盐度,深度和叶绿素信息。

采用高温催化氧化法^[17]总有机碳分析仪(TOC- V_{CPH} 型,日本岛津公司产品)测定海水中 DOC 浓度。仪器法精密度相对标准偏差为 2%;再现性相对标准偏差为 2%;相对误差为 1%。采用过硫酸钾氧化法^[18]营养盐连续注射流动分析仪(SKALAR San⁺⁺型,荷兰 SKALAR 公司产品)测定海水中 TN 与 TP 浓度。TN 检出限为 $3.78\ \mu\text{mol/L}$, TN 浓度为 $20.0\ \mu\text{mol/L}$ 时,相对标准偏差为 $\pm 5\%$; TP 检出限为 $0.09\ \mu\text{mol/L}$, TP 浓度为 $1.0\sim 6.4\ \mu\text{mol/L}$ 时,相对标准偏差为 $\pm 5\%$ 。

2 结果与讨论

2.1 DOC,TN 与 TP 浓度分布特征

南极半岛近岸海域海水中 DOC,TN 与 TP 浓度测定结果(表 1)显示,DOC 变化范围为 34.3~186.7 $\mu\text{mol/L}$,主要变化范围为 40.5~78.1 $\mu\text{mol/L}$,平均浓度为 66.3 $\mu\text{mol/L}$ 。已知的南大洋 DOC 报道中,Ogawa 等^[17]于 1995 年夏季在凯尔盖朗群岛观测到的上混合层 DOC 浓度为 45~55 $\mu\text{mol/L}$ 。Wiebinga 等^[8]于 1994 年夏季在南极半岛海域(62°E,49°~66°S)得到上混合层 DOC 浓度为 51.5~63.2 $\mu\text{mol/L}$,主要变化范围为 43.0~91.0 $\mu\text{mol/L}$ 与本文研究海域的 DOC 浓度相当。相较于世界其他大洋 DOC 浓度分布(表 2),本文研究海域部分开阔区域 DOC 含量低于已报道的大洋含量,南大洋的 HNLC 性质可能是原因之一。

表 1 DOC,TN 与 TP 浓度测定结果

Table 1 Determinations of DOC, TN and TP concentrations

参 数	最小值 $\mu\text{mol/L}$	最小值 站位	水深/m	最大值 $\mu\text{mol/L}$	最大值 站位	水深/m	平均值 $\mu\text{mol/L}$
DOC(全站)	34.3	D1-05	380	186.7	D5-06	50	66.3
DOC($\leq 100\text{ m}$)	40.5	D5-05	100	186.7	D5-06	50	68.3
DOC(表层)	47.3	D1-04	0	134.7	D5-05	0	73.0
TN(全站)	4.2	DA-03	150	29.5	D1-03	0	14.9
TN($\leq 100\text{ m}$)	5.1	D5-04	25	29.5	D1-03	0	14.5
TN(表层)	6.5	D4-04	0	29.5	D1-03	0	13.0
TP(全站)	0.8	D5-06	0	2.9	D2-02	150	2.0
TP($\leq 100\text{ m}$)	0.8	D5-06	0	2.8	D2-09	50	1.9
TP(表层)	0.8	D5-06	0	2.3	D1-07	0	1.7

表 2 世界其他水域 DOC,TN 与 TP 浓度分布^[9, 19-23]

Table 2 Distributions of DOC, TN and TP concentrations in the other oceans of the world

参 数	海 域	浓度范围/ $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$	来 源
DOC	大西洋	47~97	Thomas 等, 1995 ^[19]
	赤道太平洋	35~72	Carlson 和 Ducklow, 1995 ^[20]
	太平洋	40~80	Peltzer 和 Hayward, 1996 ^[21]
	西北马尾藻海	40~71	Carlson 等, 1994 ^[22]
TN	北冰洋	21.9~38.4	Guildford, 1996 ^[23]
	马尾藻海	26.9~41.0	Guildford 等, 2000 ^[9]
	维多利亚湖	16.7~64.5	Guildford 等, 2000 ^[9]
TP	北冰洋	1.3~2.2	Guildford, 1996 ^[23]
	马尾藻海	0.5~0.8	Guildford 等, 2000 ^[9]
	维多利亚湖	1.2~8.5	Guildford 等, 2000 ^[9]

TN 变化范围为 4.2~29.5 $\mu\text{mol/L}$,平均浓度为 14.9 $\mu\text{mol/L}$;TP 浓度的变化范围为 0.8~2.9 $\mu\text{mol/L}$,

平均浓度为 $2.0 \mu\text{mol/L}$ 。已知的南大洋氮磷营养盐报道中,Blain 等^[24]于 2013 年夏季研究了南大洋凯尔盖朗群岛附近($68^\circ\sim 70^\circ\text{E}$, $48^\circ\sim 49^\circ\text{S}$)的氮磷浓度,以加和的形式得到无机氮和有机氮浓度总和变化范围约为 $25.8\sim 26.4 \mu\text{mol/L}$,无机磷浓度大于 $1.0 \mu\text{mol/L}$,本文研究海域的 TN 浓度与凯尔盖朗群岛无机氮与有机氮加和浓度相似。相较于世界其他水域 TN 与 TP 浓度分布(表 2),本文研究海域 TN 浓度低于其他大洋;TP 浓度略高于其他大洋,但是低于淡水。

2.2 表层 DOC, TN 和 TP 水平分布特征

南极半岛近岸海域表层 DOC, TN 与 TP 浓度水平分布特征见图 2。

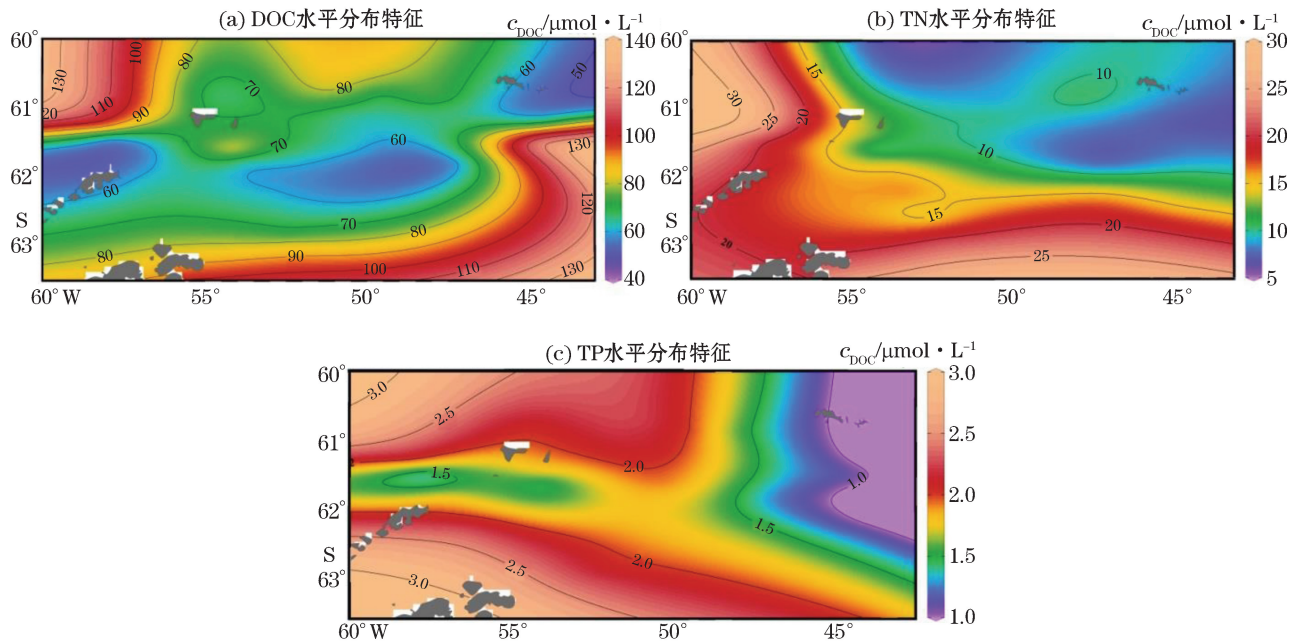


图 2 表层 DOC, TN 与 TP 浓度水平分布特征

Fig.2 Horizontal distribution characteristics of DOC, TN and TP concentrations in the surface layer

表层 DOC 浓度(图 2a)在研究海域西北部 D1 断面和东南部 D5 断面浓度较高,研究海域中部鲍威尔海盆, D2 断面, D4 断面和横向 DA 断面 DOC 浓度均较低。

D1 断面北部 D1-03 站为南设得兰海槽至德雷克海峡海域,海水温度随深度先降低再升高, $300\sim 500 \text{ m}$ 水温最高达 1.9°C , $1\,000 \text{ m}$ 水深降低至 1.3°C ; 盐度随深度增大而增大, 底层盐度保持在 34.7 。该现象表明, D1 断面北部水团是典型的南极圈水团, 从上至下依次为夏季表层水、冬季水和绕极深层水(Circumpolar Deep Water, CDW)^[6]。CDW 自西向东流动, D1 断面北部地形升高, 深层水被迫抬升, 储存在南大洋深层的碳库^[8]抬升致使表层 DOC 浓度出现高值区。D1-03 站 $0, 100 \text{ m}$ DOC 浓度均大于 $100 \mu\text{mol/L}$, 200 m DOC 浓度甚至高于 $160 \mu\text{mol/L}$ 。D1 断面南部 D1-07 站位于中央海盆, 海水温度随深度增大而先升高再降低, 50 m 水温最高达 0.8°C , $1\,000 \text{ m}$ 水深降低至 -1.3°C , 该现象表明, 由于海底地形的影响, D1-07 站与 D1-03 站的 DOC 来源不同; 该站和鲍威尔海盆 DOC 浓度均呈现较低的特征, 与史久新等^[6]报道的中央海盆可能受鲍威尔海盆水团影响相符合。

D5 断面温度垂直分布特征为随深度先降低再升高, 底层温度保持在 0.5°C 左右。盐度随深度增加而增大, 底层盐度保持在 34.6 左右, 该现象表明, D5 断面是威德尔深层水(Weddell Deep Water, WDW)^[6]。D5-04 站, D5-05 站和 D5-06 站 DOC 浓度出现异常高值均大于 $100 \mu\text{mol/L}$, 最高达 $186.7 \mu\text{mol/L}$ 。D5 断面位于南奥克尼海台, WDW 保持顺时针气旋式运动^[6], 北向越过南奥克尼海台进入斯科舍海。威德尔海深

层碳库随 WDW^[25] 运动可能是 D5 断面 DOC 浓度出现局部高值的原因之一。

D2 断面横跨范围广,北部与南部 DOC 分布呈现不同的特征。北部底层水温最高达 1.7 °C,该现象表明,D2 断面北部受 CDW 的影响,DOC 浓度最高达 88.0 $\mu\text{mol/L}$;南部位于鲍威尔海盆,整体浓度较低,南部底层温度达 0.4 °C,但是温盐在垂直方面分布均没有 D5 断面紧密相关,该现象表明,此处可能为 WDW 水团,但是受其他因素的影响导致 DOC 浓度较低。

D3 和 DA 断面温盐数据变化复杂,此处水团交汇复杂,但是均没有出现高浓度的 DOC,DOC 浓度范围为 54.1~75.3 $\mu\text{mol/L}$,具有南大洋 DOC 的低浓度特征。

表层 TN 与 TP 浓度高值区出现在研究海域西北部 D1 断面以及南部,中部和东部浓度较低(图 2b 和图 2c)。

D1 断面西北部 D1-03 站 TN 浓度范围为 21.6~29.5 $\mu\text{mol/L}$,TP 浓度范围为 2.0~2.6 $\mu\text{mol/L}$ 。中部和东部 TN 浓度范围为 7.5~14.6 $\mu\text{mol/L}$,TP 浓度范围为 0.8~2.5 $\mu\text{mol/L}$ 。与 DOC 和水团关系相似,TN 与 TP 和水团运动也存在相关性。D1 断面北部 CDW 自西向东流动时受阻于地形,上层水体显示高浓度的 TN 与 TP;南部 WDW 在威德尔海边缘地区显示较高浓度的 TN 与 TP;WDW 水团向北流至鲍威尔海盆却显示较低浓度的 TN 与 TP。

南极半岛北部和南部分布受 CDW 和 WDW 水团影响较大的近岸海域 DOC,TN 与 TP 浓度较大,中部区域浓度较小。作为生物化学要素基础的 DOC,TN 与 TP 反映了海洋生产力水平上限,是海岸工程对海洋生态影响的重要参数^[13],海岸工程前后的生物化学要素变化体现工程对近岸海域总体影响的累积效应,各阶段生物化学要素的变化是工程环境影响评价体系中重要组成部分。

2.3 DOC,TN 与 TP 垂直分布特征

由 2.2 可知南极半岛近岸海域 D1 和 D5 断面为 DOC,TN 与 TP 浓度变化较大的海域,因此,本节选取 D1(图 3a)和 D5(图 4a)断面介绍该海域 DOC,TN 与 TP 垂直分布特征。

DOC 浓度垂直分布受地形和水团影响,D1 断面北部随深度先降低后升高并趋于稳定;南部上层出现高值,随后降低,底层 DOC 浓度较低(图 3b)。D5 断面北部 DOC 普遍较高;南部表层较高,底层较低(图 4b)。

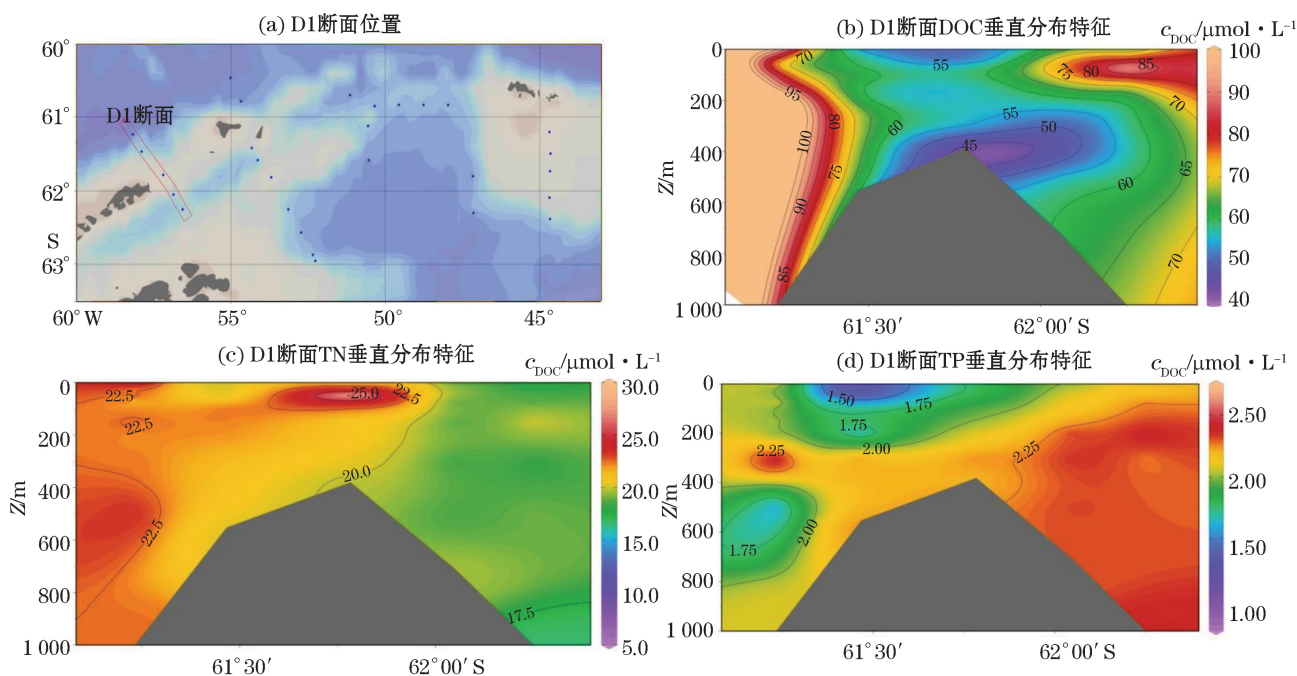


图 3 D1 断面 DOC,TN 与 TP 垂直分布特征

Fig.3 Vertical distribution characteristics of DOC, TN and TP concentrations along Section D1

D1 断面北部 D1-03 站 DOC 浓度在 25~50 m 左右降低,在 50~200 m 升高,200 m 以下水层较高且稳定,可能是因为 CDW 底层难以降解的 DOC 循环时间尺度较长,在海洋中的空间运动是海洋碳循环重要组成部分^[26]。D1 断面北部 DOC 随地形有明显抬升的趋势(图 3b),验证了 CDW 被地形抬升。相对于南部 D1-07 站和北部 D1-03,D1-05 站全水深的 DOC 浓度均较低,该站为 CDW 和中央海盆中水团交汇处,相对于该站高浓度的 TN 和 TP,反应了 D1-05 站的低生产力水平。

D5 断面北部,WDW 绕过南奥克尼海台进入斯科舍海^[6]。根据现场 CTD 叶绿素结果显示,D5 断面叶绿素值于 25 m 左右出现极大值,上混合层 DOC 浓度也较大(图 4b),这表明生物活动与上混合层较高的 DOC 有一定的相关性。D5 断面南部深层水的温度和盐度随深度逐渐增大(图 4e 和 4f),和史久新等^[6]中介绍的 WDW 属性一致,表明 WDW 也能够从南部爬上南奥克尼海台,成为 D5 断面南部 DOC 分布的主要影响因素。

TN 和 TP 浓度的垂直分布特征受地形和水团影响,D1 断面随深度先升高后降低(图 3c 和 3d),D5 断面随深度增加逐渐增大(图 4c 和 4d)。

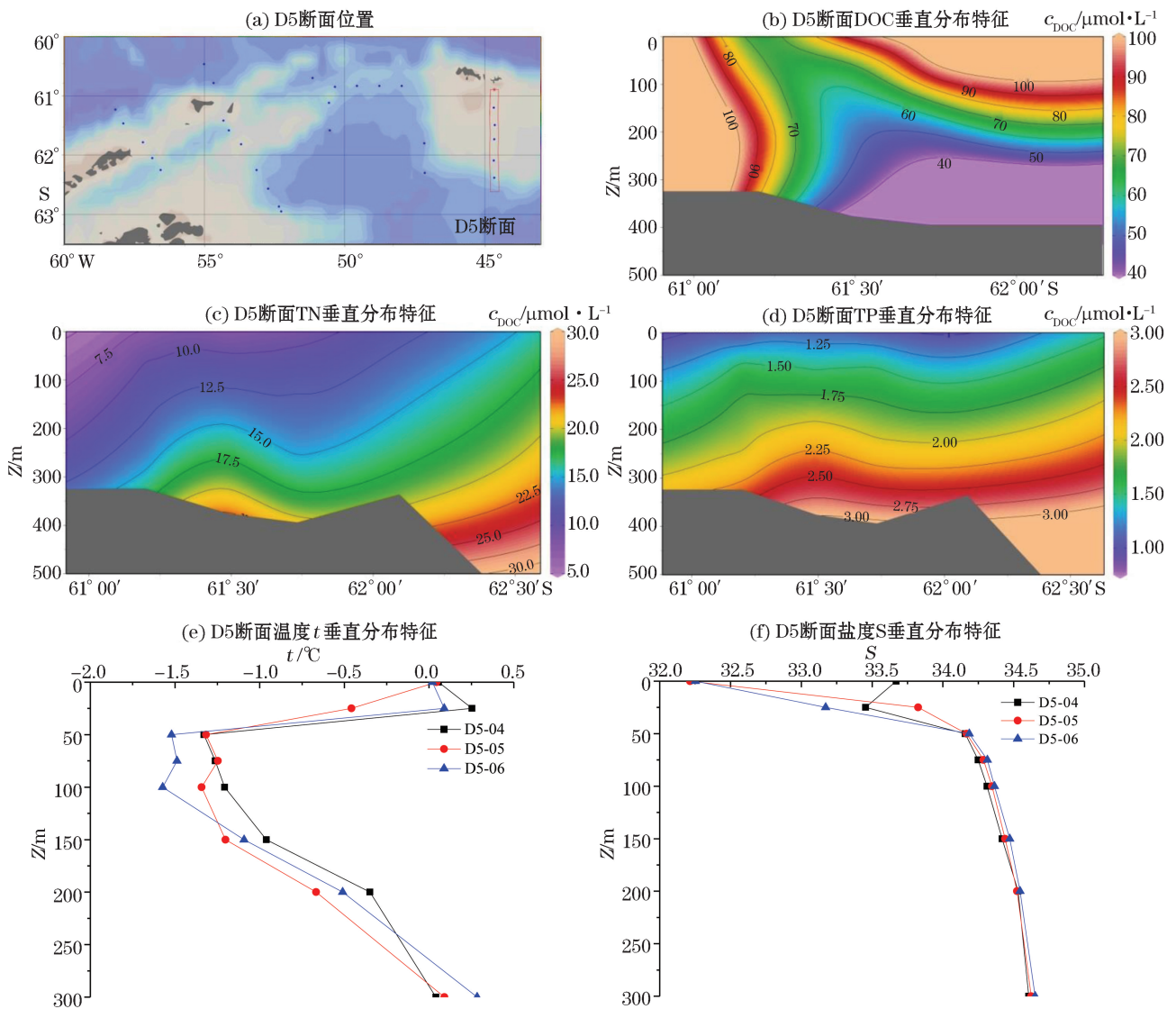


图4 D5断面DOC,TN,TP浓度与温盐垂直分布特征

Fig.4 Vertical distribution characteristics of DOC, TN and TP concentrations and the temperature and salinity along Section D5

D1 断面上混合层 TN 与 TP 变化较大, TN 和 TP 浓度在表层较高, 其在 25~200 m 升高, 200 m 以下水深较高。该海域地形复杂, 陆架陆坡等隔绝使得底层海水被阻隔抬升, 温度和盐度变化复杂, 表明不同水团在此断面上混合层进行复杂的混合。D5 断面的上混合层 TN 和 TP 普遍较低, 而底层的 TN 和 TP 值却较高, 这与 DOC 分布特征完全相反。

研究海域 DOC, TN 与 TP 浓度在 25~75 m 的急剧变化显示出温跃层对深层海水营养物质存在隔绝作用, 上混合层水平方向上 DOC, TN 与 TP 浓度变化显著, 表明上混合层水体平流对 DOC, TN 与 TP 的具有较强流通作用。温跃层以下 DOC, TN 与 TP 浓度在一定范围内相对稳定。

DOC, TN 和 TP 及地形与水团垂直分布特征反映了南极半岛近岸海水交换能力对生物化学要素的具有重要影响, 也是环境影响评价的重要依据^[27]。

2.4 $c_{\text{DOC}}/c_{\text{TN}}$ 与 $c_{\text{TN}}/c_{\text{TP}}$

海洋浮游植物多样性及生产力水平与海洋生态环境密切相关^[13], 是海岸工程对海洋生物生态影响的主要分析因子。浮游植物与海水中 C/N/P 比例近乎恒定且相等, 称为 Redfield 值^[28]。海水中营养盐摩尔比值偏离 Redfield 系数过高或过低, 均可导致浮游植物的生长受到某一相对低含量元素的限制。无机态、有机态和颗粒态氮磷均能被浮游植物吸收进行物质循环, 均在海洋氮磷循环中起着重要作用, 所以 $c_{\text{TN}}/c_{\text{TP}}$ 理论上可以合理地解释浮游植物限制作用^[12], 且 $c_{\text{TN}}/c_{\text{TP}}$ 已经被运用在计算淡水系统中氮磷的限制影响^[29], 海洋中 $c_{\text{TN}}/c_{\text{TP}}$ 仍缺乏研究, 本节研究南极半岛近岸海域 $c_{\text{DOC}}/c_{\text{TN}}$ 和 $c_{\text{TN}}/c_{\text{TP}}$ 比值, 以期研究南极半岛近岸生物资源特征与海洋资源保护提供科学依据。

研究海域近岸海域 $c_{\text{DOC}}/c_{\text{TN}}$ 与 $c_{\text{TN}}/c_{\text{TP}}$ 比值见图 5。 $c_{\text{DOC}}/c_{\text{TN}}$ 比值范围为 2~10 (图 5a), 平均值为 5.0。研究海域西部 D1 与 D2 断面 $c_{\text{DOC}}/c_{\text{TN}}$ 比值范围为 3~5; 中部 D3 与 DA 断面 $c_{\text{DOC}}/c_{\text{TN}}$ 比值范围为 5~9; 东部 D5 断面上混合层出现异常大值, $c_{\text{DOC}}/c_{\text{TN}}$ 比值达到 16~19, 可能由于 D5 断面为研究海域 DOC 浓度最高值区域。由于水团性质的影响, D5 断面不同水深比值变化较大, 比值范围为 2~19。

$c_{\text{TN}}/c_{\text{TP}}$ 比值小于 16, 比值范围为 3~16 (图 5b), 平均值为 7.7。 D1 断面 D1-03, D1-04, D1-05 站位 $c_{\text{TN}}/c_{\text{TP}}$ 比值范围为 10~21; D1-06, D1-07 与 D2 断面南部 $c_{\text{TN}}/c_{\text{TP}}$ 比值范围为 6~9, D2 断面比值由南向北有减小的趋势, 北部 D2-02 站 $c_{\text{TN}}/c_{\text{TP}}$ 值减小至 4~5; 中部 D3 与 DA 断面, $c_{\text{TN}}/c_{\text{TP}}$ 比值范围为 3~5; 东部 D5 断面 $c_{\text{TN}}/c_{\text{TP}}$ 比值相对于中部有所提高, 比值范围为 5~10。

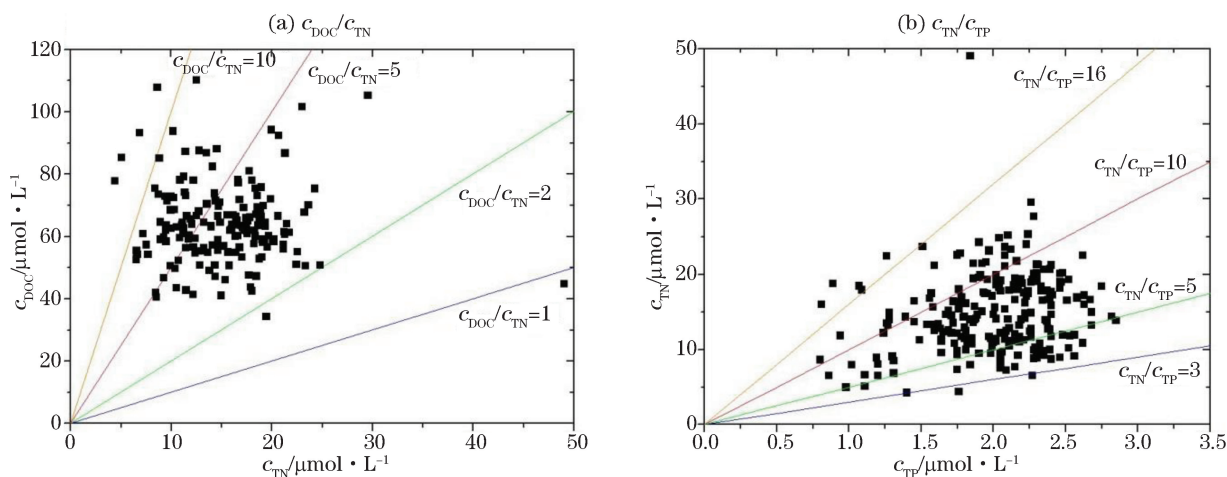


图 5 研究海域 $c_{\text{DOC}}/c_{\text{TN}}$ 与 $c_{\text{TN}}/c_{\text{TP}}$

Fig.5. The ratios of $c_{\text{DOC}}/c_{\text{TN}}$ and $c_{\text{TN}}/c_{\text{TP}}$ in the study area

3 结 论

南极半岛近岸海域水体生物化学要素中 DOC 浓度的变化范围为 $34.3 \sim 186.7 \mu\text{mol/L}$, 主要变化范围为 $40.5 \sim 78.1 \mu\text{mol/L}$, 平均为 $66.3 \mu\text{mol/L}$ 。TN 浓度的变化范围为 $4.2 \sim 29.5 \mu\text{mol/L}$, 平均为 $14.9 \mu\text{mol/L}$; TP 浓度的变化范围为 $0.8 \sim 2.9 \mu\text{mol/L}$, 平均为 $2.0 \mu\text{mol/L}$ 。研究海域 $c_{\text{DOC}}/c_{\text{TN}}$ 比值范围为 $2 \sim 10$, 总均值为 5.0 。 $c_{\text{TN}}/c_{\text{TP}}$ 比值小于 16 , 比值范围为 $3 \sim 16$, 平均值为 7.7 。

表层 DOC, TN 和 TP 浓度西北部与南部浓度较高, 中部与东部较低; DOC, TN 和 TP 浓度垂直分布与海底地形和水团交汇密切相关, 水团运动受阻于地形而被迫抬升致使生物化学要素在垂直方向再分布。生物化学要素 DOC, TN 与 TP 空间分布特征反映了海洋生产力水平上限和海水交换能力, 对科学可持续地开发和利用南极资源有重要意义, 为工程环境影响评价体系中工程综合效益的评价提供科学依据。

参考文献 (Reference):

- [1] MARTIN J H, FITZWATER S E, GORDON R M. Iron deficiency limits phytoplankton growth in Antarctic waters[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1990, 4(1): 5-12.
- [2] ORR J C, MAIER-REIMER E, MIKOLAJEWICZ U, et al. Estimates of anthropogenic carbon uptake from four three-dimensional global ocean models[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2001, 15(1): 43-60.
- [3] KIRCHMAN D L, SUZUKI Y, GARSIDE C, et al. High turnover rates of dissolved organic carbon during a spring phytoplankton bloom [J]. Nature, 1991, 352(6336): 612-614.
- [4] 田恬, 魏皓, 苏健, 等. 黄海氮磷营养盐的循环和收支研究[J]. 海洋科学进展, 2003, 21(1): 1-11.
- [5] HERNANDEZ-MOLINA F J, LARTER R D, REBESCO M. Miocene reversal of bottom water flow along the Pacific Margin of the Antarctic Peninsula: Stratigraphic evidence from a contourite sedimentary tail[J]. Marine Geology, 2006, 228(1): 93-116.
- [6] 史久新, 孙永明, 矫玉田, 等. 2011/2012 年夏季南极半岛北端周边海域的水团与水交换[J]. 极地研究, 2016, 28(1): 67-79.
- [7] DE BAAR H J W. Importance of iron for plankton blooms and carbon dioxide drawdown in the Southern Ocean[J]. Nature, 1995, 373(6513): 412-415.
- [8] WIEBINGA C J, DE BAAR H J W. Determination of the distribution of dissolved organic carbon in the Indian sector of the Southern Ocean[J]. Marine Chemistry, 1998, 61(3-4): 185-201.
- [9] GUILDFORD S J, HECKY R E. Total nitrogen, total phosphorus, and nutrient limitation in lakes and oceans: Is there a common relationship? [J]. Limnology & Oceanography, 2000, 45(6): 1213-1223.
- [10] KILHAM P, HECKY R E. Comparative ecology of marine and freshwater phytoplankton I [J]. Limnology & Oceanography, 1988, 33(4): 776-795.
- [11] JACKSON G A, WILLIAMS P M. Importance of dissolved organic nitrogen and phosphorus to biological nutrient cycling[J]. Deep Sea Research Part A: Oceanographic Research Papers, 1985, 32(2): 223-235.
- [12] DOWNING J A. Marine nitrogen: Phosphorus stoichiometry and the global N : P cycle[J]. Biogeochemistry, 1997, 37(3): 237-252.
- [13] 王勇智. 我国海洋工程海洋环境影响后评价指标体系的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
- [14] 刘大海, 于莹, 李晓璇, 等. 我国近岸围填海环境影响评价研究进展[J]. 海岸工程, 2016, 35(3): 74-82.
- [15] 海洋调查规范: 第 4 部分 海洋化学要素调查: GB/T 12763. 4—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [16] 海洋监测规范: 第 4 部分 海水分析: GB/T 17378. 4—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [17] OGAWA H, FUKUDA R, KOIKE I. Vertical distributions of dissolved organic carbon and nitrogen in the Southern Ocean[J]. Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers, 1999, 46(10): 1809-1826.
- [18] VALDERRAMA J C. The simultaneous analysis of total nitrogen and total phosphorus in natural waters[J]. Marine Chemistry, 1981, 10(2): 109-122.
- [19] THOMAS C, CAUWET G, MINSTER J F. Dissolved organic carbon in the equatorial Atlantic Ocean[J]. Marine Chemistry, 1995, 49(2): 155-169.
- [20] CARLSON C A, DUCKLOW H W. Dissolved organic carbon in the upper ocean of the central equatorial Pacific Ocean, 1992: Daily and finescale vertical variations[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 1995, 42(2-3): 639-656.

- [21] PELTZER E T, HAYWARD N A. Spatial and temporal variability of total organic carbon along 140°W in the equatorial Pacific Ocean in 1992[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 1996, 43(4-6): 1155-1180.
- [22] CARLSON C A, DUCKLOW H W, MICHAELS A F. Annual flux of dissolved organic carbon from the euphotic zone in the northwestern Sargasso Sea[J]. Nature, 1994, 371(6496): 405-408.
- [23] GUILDFORD S J, HENDZEL L L, KLING H J, et al. Effects of lake size on phytoplankton nutrient status[J]. Canadian Journal of Fisheries & Aquatic Sciences, 2011, 51(12): 2769-2783.
- [24] BLAIN S, CAPPAROS J, GUENEUGUES A, et al. Distributions and stoichiometry of dissolved nitrogen and phosphorus in the iron fertilized region near Kerguelen (Southern Ocean)[J]. Biogeosciences, 2015, 12(2): 623-635.
- [25] GYLDENFELDT A B V, FAHRBACH E, GARCIA M A, et al. Flow variability at the tip of the Antarctic Peninsula[J]. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography, 2002, 49(21): 4743-4766.
- [26] YASUHIRO Y, EIICHI T. Role of dissolved organic matter in the marine biogeochemical cycle: Studies using an ocean biogeochemical general circulation model[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1997, 11(4): 599-612.
- [27] 徐明德. 黄海南部近岸海域水动力特性及污染物输移扩散规律研究[D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [28] REDFIELD A C, KETCHUM B H, RICHARDS F A. The influence of organisms on the composition of sea-water[J]. The Sea, 1963: 26-77.
- [29] DOWNING J A, MCCAULEY E. The nitrogen: phosphorus relationship in lakes[J]. Limnology and Oceanography, 1992, 37(5): 936-945.

Distributions of Biochemical Elements and Their Influencing Factors in the Offshore Area of the Antarctic Peninsula

FU Dan, ZHENG Xiao-ling, WANG Bao-dong, XIN Ming, TENG Fang, XIE Lin-ping
(The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China)

Abstract: Based on the data obtained in the offshore area (60°~63°S) of the Antarctic Peninsula during the 30th Chinese Antarctic Research Expedition, the distribution characteristics of dissolved organic carbon (DOC), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) in the study area are analyzed and the control factors such as topography and water mass are discussed. The results show that in the summer of 2014, the concentration of DOC in the water mass of the study area varied from 40.47 to 78.08 $\mu\text{mol/L}$, with an average of 66.33 $\mu\text{mol/L}$; the concentration of TN varied from 4.24 to 29.54 $\mu\text{mol/L}$, with an average of 14.88 $\mu\text{mol/L}$; and the concentration of TP ranged from 0.80 to 2.85 $\mu\text{mol/L}$, with an average of 2.00 $\mu\text{mol/L}$. The concentration of DOC in the surface layer was higher along Section D1 in the northwest and Section D5 in the southeast and lower in the middle of the study sea. The concentrations of TN and TP in the surface layer were higher to the north and south of Section D1 and lower in the middle and eastern parts of the study area. The vertical distributions of DOC, TN and TP concentrations are considered to be closely related to the seabed topography and the water masses. The impediment of seabed topography to the water masses may cause the biochemical elements to redistribute vertically. The spatial distributions of DOC, TN and TP reflect the complex biochemical cycles in the offshore area of the Antarctic Peninsula. This study will provide scientific basis for the resources development and utilization and the environmental impact assessment in the Antarctic pole.

Key words: Antarctic Peninsula; dissolved organic carbon; total nitrogen; total phosphorus; distribution characteristics

Received: November 29, 2016