

东海 PN 断面夏季温盐及化学要素的分布特征*

刘兴泉

(中国科学院海洋研究所 青岛 266071)

提要 由东海 PN 断面夏季温盐度及化学要素 CTD 资料分析表明, 东海夏季的温跃层和盐跃层在次表层生成, 其强度随着跃层自陆架坡折区至近岸和外海的上移逐渐减弱。陆架区近表层的温度和盐度呈垂直均匀分布, 冲绳海槽次表层呈高温、高盐, 近表层呈高温、低盐, 底层呈低温、次高盐特征。溶解氧浓度自近岸到外海由低变高, 表层至底层溶解氧浓度在陆架区由高变低, 冲绳海槽区则先由低变高然后又由高变低。总二氧化碳浓度自表层至底层和自陆架坡折区到近岸和外海由低变高。磷酸盐和硅酸盐浓度自近岸至外海由高变低, 而自表层至底层由低变高。陆架区的近表层和陆架坡折区分别有一个高碱度区。温盐及化学要素的分布特征与夏季海区垂直环流的反气旋运动、长江冲淡水及黑潮水入侵和海面强热辐射有关。此外, 化学要素分布还与夏季海区的温盐结构、表混合层与大气间二氧化碳气体交换及表混合层中碳和营养盐光合作用的利用有关。

关键词 东海, 夏季, 温度, 盐度, 化学要素, 垂直分布, 反气旋环流

中图分类号 P731

东海由于受大陆沿岸水(长江径流)和外海高温、高盐水(黑潮)的影响, 其水文状况和化学特征复杂。PN 断面自东海西北角长江口到东南角琉球群岛呈西北—东南走向, 大致与纬线成 40° 夹角。该断面不但通过长江冲淡水区, 并横切冲绳海槽与黑潮主轴垂直, 因此对研究东海的水文、化学和生态特征极具代表性。关于东海水文和化学方面的研究, 中外海洋学者根据调查资料对其局部海区的温盐结构及其化学要素的分布特征已做了大量工作, 汤毓祥等(1993)对 PN 断面的黑潮流况进行了分析; 苗育田等(1993)对 PN 断面黑潮水的入侵及其西界位置的变动进行了研究; 郭炳火等(1997)通过 PN 断面 300m 水深陆架坡折区的温盐及其以北 F 断面 200m 水深的温盐和叶绿素垂直分布的分析, 论述了锋面涡旋在陆架水与黑潮水的交换中所起的作用。本研究根据日本《开洋》号调查船 1994 年夏季(8 月)PN 断面的水文及化学要素 CTD 观测资料¹⁾, 通过对温盐度及溶解氧、总二氧化碳、磷酸盐、硅酸盐和总碱度的分析, 阐述该断面夏季温盐度及化学要素的分布特征和变化规律及其与海区垂直环流、长江冲淡水和黑潮水的关系。

* 国家自然科学基金资助项目, 49476296 号。刘兴泉, 男, 出生于 1948 年 12 月, 副研究员, Fax: 0086-0532-2870882

1) Preliminary Cruise Report K94-04(July 20- August 30, 1994) R/V Kaiyo

收稿日期: 1999-03-18, 收修稿日期: 1999-06-25

1 断面的站位分布

此次观测共设 15 个站位(PN₁—PN₁₅), 这里仅取以等距设置的 12 个站, 并以 PN₁—PN₁₂表示, 站位分布如图 1 所示。自长江口以远至琉球群岛, 各站的水深分布依次为 55、51、66、86、100、116、130、278、720、930、1000 和 800m。

2 资料处理

由于 CTD 在各站所记录的温度、盐度、溶解氧、总二氧化碳、磷酸盐、硅酸盐和总碱度原始资料均为随水深变化以不等距排列, 为便于统一绘图以供进行对比分析, 使随水深变化的资料具有相同的层距间隔, 故对所有原始资料在记录与记录之间用 1m 的间隔进行线性内插, 变成层距为 1m 的有序资料。

由于该断面的最大水深为 1000m, 因此共分 1000 层。然后根据各站的水深分布和断面的最大水深从中取 30 层, 且自表层至底层取不同的层距。由表至底 1—8 层层距为 5m, 8—14 层为 10m, 14—19 层为 20m, 19—25 层为 50m, 25—30 层为 100m。为使资料在水平方向上具有更好的连续性, 又将各层在站与站之间进行线性内插, 即在两个站之间再插出 4 个值, 这样可使海区的实际地形与水平尺度更加吻合。

3 温盐结构

由图 2a 可以看出, 等温线呈在靠近大陆一侧的近岸或陆坡处上浮、靠近琉球群岛一侧的外海上凸且端部下垂而中间下凹的弧形分布。由等温线的分布特征可以看出, 夏季海区的温度分布为上层高、下层低, 且自表层至底层逐渐由高变低。表层与底层温差大, 其中在陆架区外缘近表层的最高温度可达 28.5℃, 冲绳海槽底层温度低于 7.5℃。在水平方向上, 大陆一侧的近岸或陆坡及靠近琉球群岛一侧的外海等温线上浮和上凸处温度低, 弧形等温线中间下凹及琉球群岛附近下垂处温度高。

等盐线的分布特征(图 2b)大致与等温线相似, 在次表层(100m)以上的近岸至陆架坡折区, 其等盐线呈靠近大陆一侧的近岸或陆坡处微微上浮且端部又微微下垂、靠近琉球群岛一侧的外海上翘、中间微微下凹的弧形分布。陆架坡折区至琉球群岛冲绳海槽的次表层, 等盐线呈其弧顶凸向大陆一侧、两端朝向琉球群岛且端部均下垂的半封闭弧形分布。在这种半封闭弧形等盐线以下至冲绳海槽底层, 则变成大陆一侧陆坡处微微上浮、外海微微下沉的直线分布。由等盐线的分布特征看出, 夏季东海的盐度分布, 在近岸至陆架坡折区, 表层盐度低, 底层盐度高; 靠近大陆一侧的近岸或陆坡和陆架坡折区等盐线上浮和上翘处盐度高, 中间下凹处盐度低; 而在陆架坡折区至琉球群岛的冲绳海槽, 次表层半封闭弧形等盐线分布区盐度高, 表层和底层盐度低, 且盐度自次表层到表层和底层逐渐由高变低; 低盐区在陆架区长江冲淡水外缘的近表层, 其盐度低于 34.0, 高盐区在冲绳海槽次表层, 盐度高于 34.8。

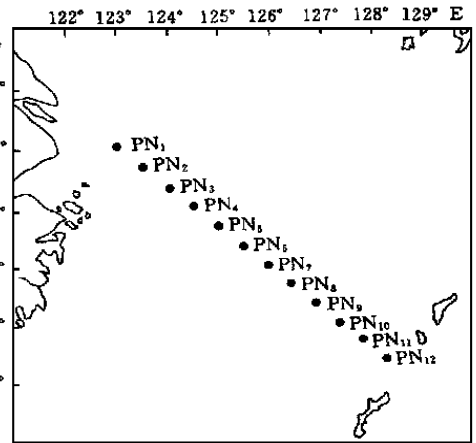


图 1 PN 断面站位分布

Fig. 1 Distribution of the stations at the PN section

由温度和盐度的分布特征表明,大陆一侧的等温线和等盐线上浮,即温度降低、盐度升高显然是由于近岸或陆坡处上升流的作用。琉球群岛一侧的外海等温线上浮和等盐线上翘,即温度降低、盐度升高是由于陆架坡折区外侧的上升流所致。等温线和等盐线在陆架坡折区的下凹,即温度升高、盐度降低则是由于陆架坡折区内侧(靠近大陆一侧)下降流的作用。而在琉球群岛附近等温线和等盐线的下垂,即温度升高、盐度降低是由于琉球群岛附近的下降流所致。陆架坡折区至琉球群岛等温线的上凸和半封闭弧形等盐线分布区的高温、高盐特征则是由于黑潮水入侵所致。

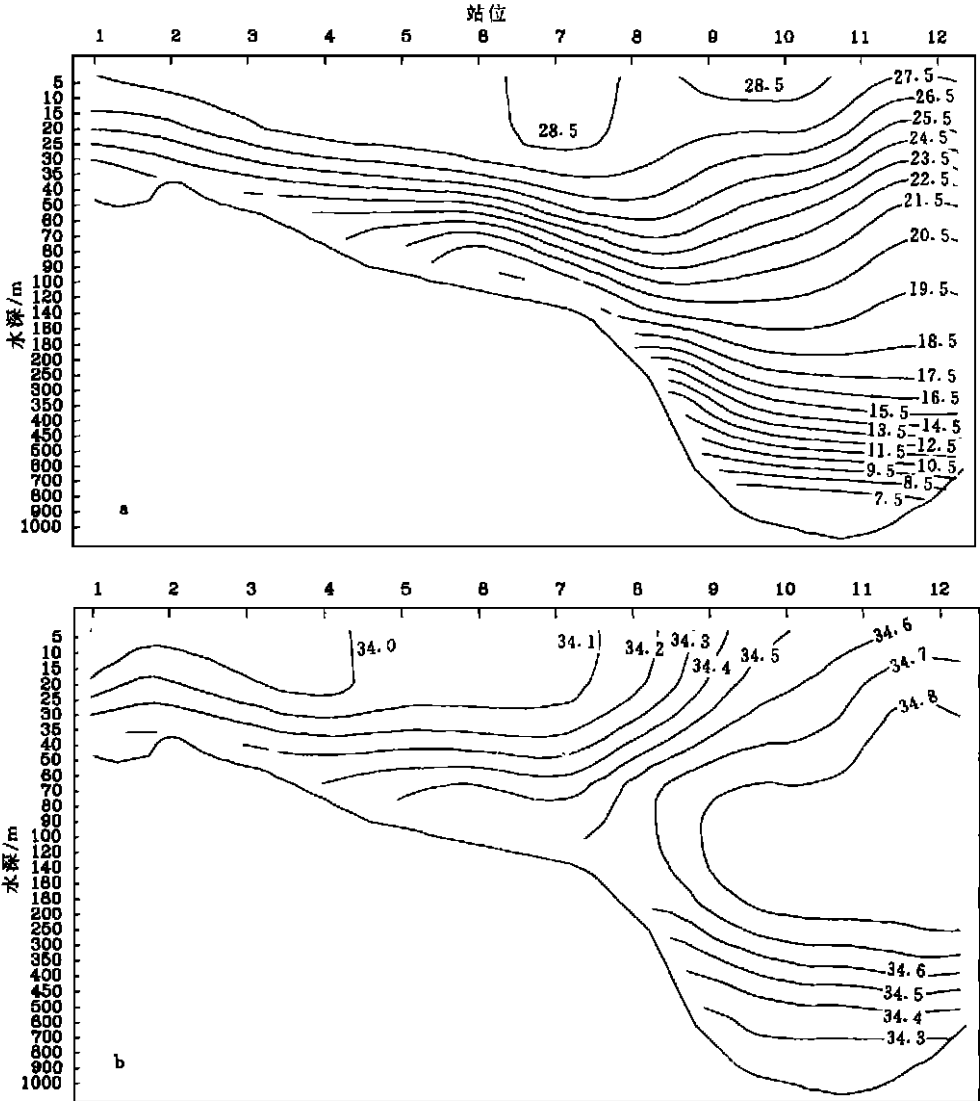


图 2 温度和盐度分布

Fig. 2 Distributions of temperature and salinity on the PN section

a. 温度(temperature) (°C) . b. 盐度(salinity)

由图 2a 和图 2b 可以看出, 弧形分布等温线和等盐线在大陆一侧近岸或陆坡处的上浮和琉球群岛一侧外海的上凸下垂及中间的下凹程度自表层至底层均随着水深的变化逐渐由大变小。由此表明, 大陆一侧近岸或陆坡处的上升流和陆架坡折区内侧的下降流及陆架坡折区外侧的上升流和琉球群岛附近的下降流的强度由表层至底层随水深变化逐渐减弱。由图 2a 和图 2b 还可以看出, 在陆架坡折区其等温线和等盐线的上浮程度大, 这表明陆架坡折区的上升流强度大, 因此上升流的强弱不仅与水深变化有关, 而且还与陆坡坡度有密切关系。

将图 2a 和图 2b 比较可以看出, 随水深变化的弧形等温线和等盐线在次表层分布密集, 表层和底层分布稀疏, 并由次表层到表层和底层随着水深的变化逐渐由密集变稀疏。由此表明, 夏季海区的温跃层和盐跃层在次表层生成, 且其强度随着跃层自陆架坡折区至近岸和外海的上移而逐渐减弱。而在冲绳海槽近表层, 由于黑潮水的影响其强度又有所增强。随着等温线和等盐线由次表层到表层和底层的由密变疏, 等温线在近表层变成 U 字形分布, 等盐线在外海的上翘也变得几乎与海面垂直, 使长江冲淡水区的温盐呈垂直均匀分布, 形成高温、低盐特征的近表混合层。在冲绳海槽底层, 等温线和等盐线则变成大致与海面平行的水平分布, 使冲绳海槽底层保持以水平均匀分布的低温次高盐特征。

由 PN 断面温度和盐度的分布特征及其变化规律可以证实, 东海夏季的垂直环流由两个反气旋涡构成。其中一个在近岸至陆架坡折区之间的陆架区, 另一个在陆架坡折区至琉球群岛之间的冲绳海槽。陆架区的反气旋环流在大陆近岸为上升流, 陆架坡折区内侧为下降流, 近表层为离岸流, 近表层以下为向岸流。涡旋中心大致位于次表层以上的近岸和陆架坡折区中间。冲绳海槽的反气旋环流, 在陆架坡折区为上升流, 琉球群岛附近为下降流。近表层为离岸流, 近表层以下为向岸流, 涡旋中心大致位于次表层的陆架坡折区至琉球群岛中间。

夏季盛行西南风, 西南风在海面产生的离岸分应力驱动表层水体并拖拽其下层水体由大陆近岸向外海输送, 使大陆近岸上层水体减少, 并在近表层形成离岸流(对琉球群岛而言为向岸流)。离岸流到琉球群岛附近, 由于受岸界或陆坡的影响, 使输送至琉球群岛近岸的水体变成沿岸界陆坡向下的输送, 从而在琉球群岛附近形成下降流。由能量守恒和质量守恒, 输送至琉球群岛附近下层的水体在近表层以下变成由外海向大陆近岸的输送, 即在近表层以下形成自外海向大陆近岸流动的向岸流(对琉球群岛而言为离岸流)。近表层以下的向岸流抵达大陆一侧的岸界, 由于受岸界的影响即变成沿岸界陆坡向上的输送, 以弥补大陆近岸表层水体的减少, 同时在大陆近岸形成上升流。由于陆架坡折区的上升流强度大, 除了沿陆坡向大陆近岸的流动外, 还在坡折区产生垂直向上的流动, 即在陆架坡折区形成与海面垂直的上升流。由于陆架坡折区上升流的切变效应, 必然在陆架坡折区上升流的内侧(靠近大陆一侧)产生与其对应的下降流, 于是陆架坡折区内侧的下降流和其外侧的上升流在坡折区形成垂直对流。陆架坡折区的垂直对流与大陆近岸的上升流、琉球群岛附近的下降流、近表层的离岸流和近表层以下的向岸流分别在陆架区和冲绳海槽区形成两个反气旋环流。由于这两个反气旋环流及长江冲淡水和黑潮高温高盐水的影响, 加之夏季的强海面热辐射, 从而在次表层生成温跃层和盐跃层。随着温跃层和盐跃层自陆架坡折区至近岸和外海的上移, 跃层强度逐渐减弱, 从而在陆架区的近表层形成

高温、低盐特征的近表混合层。黑潮水由台湾岛与琉球群岛西表岛之间的海脊处流入东海后, 仍然保持其在外海次表层呈高温、高盐, 次表层以上呈高温、低盐, 次表层以下呈低温、次高盐的基本特征。

4 化学要素分布

由图 3a 可以看出, 在冲绳海槽的近表层溶解氧等值线分布大致与等盐线相似, 其等值线为弧顶凸向近岸两端朝向外海的半封闭弧形分布。在近岸至外海的底层其等值线分布大致与海底地形平行。由图 3a 还可以看出, 与水深变化相比, 陆架区底层的等值线分布

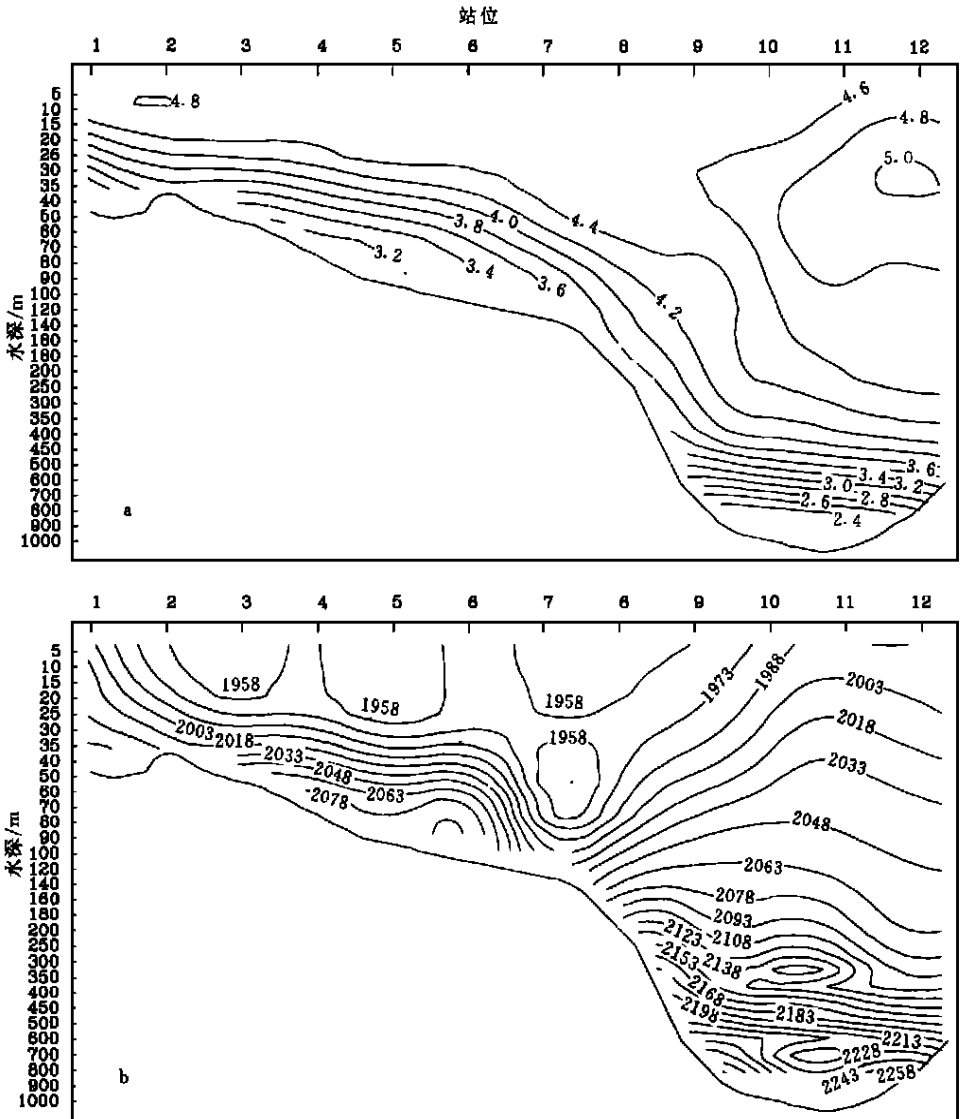


图 3 溶解氧和总二氧化碳分布

Fig. 3 Distributions of oxygen and total carbon dioxide on the PN section

a. 溶解氧 (oxygen) (ml/L) b. 总二氧化碳 (total carbon dioxide) ($\mu\text{mol/L}\cdot\text{kg}^{-1}$)

密集, 其它区域分布稀疏, 陆架区近岸至外海的表层到近表层和冲绳海槽深底层分布极为稀疏。这表明, 陆架区底层的溶解氧浓度变化显著, 陆架区近岸至外海的表层到近表层因溶解氧变化极为缓慢而其浓度呈均匀分布。由溶解氧等值线分布特征和变化趋势看出, 在陆架区溶解氧浓度为表层高、底层低, 且自表层至底层由高变低。在冲绳海槽溶解氧浓度则为近表层高, 表层和底层低, 并自近表层到表层和底层由高变低。近岸与外海相比, 近岸浓度低, 外海浓度高。溶解氧高浓度区在冲绳海槽近表层, 其封闭弧形等值线区的浓度可高达 5.0 ml/L , 低浓度区在冲绳海槽底层, 其深底层浓度可低于 2.4 ml/L 。

由图3b可以看出, 总二氧化碳等值线呈在陆架坡折区下凹, 且自陆架坡折区至近岸

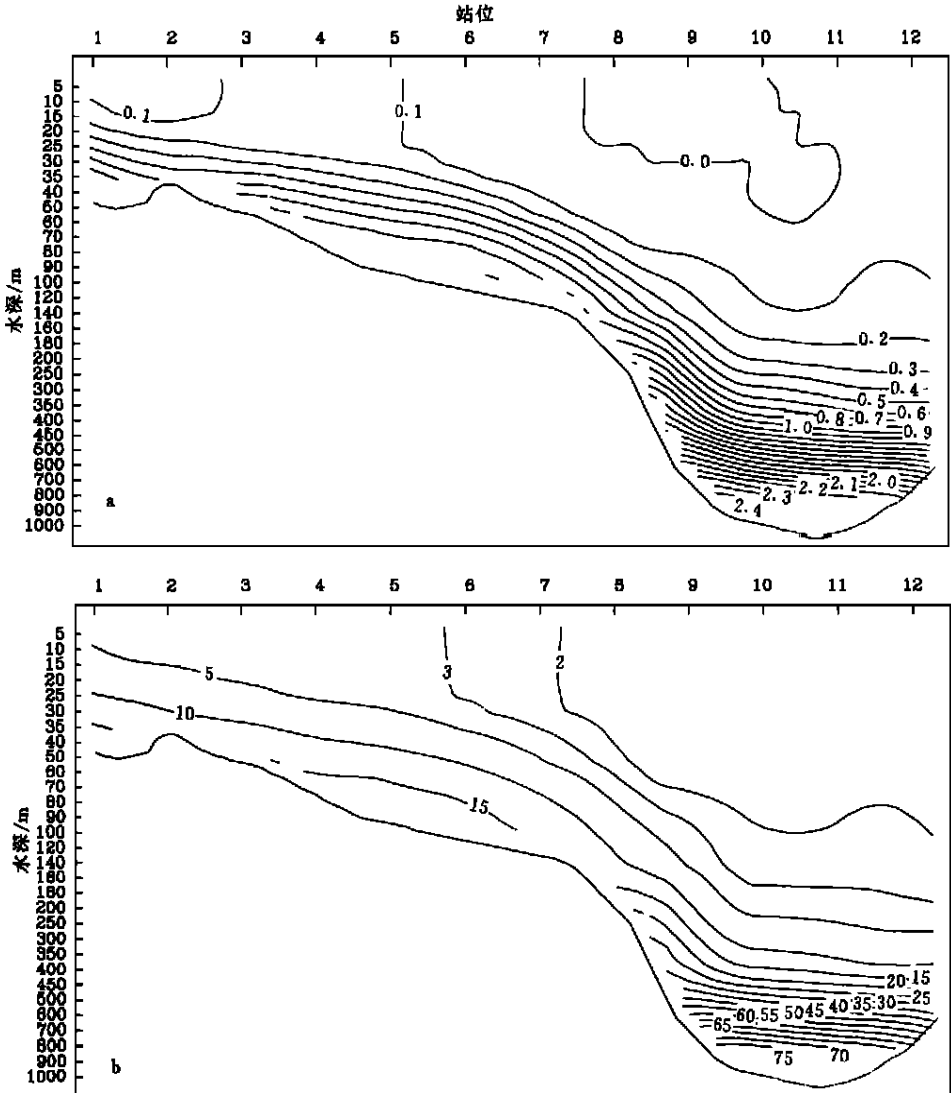


图4 磷酸盐和硅酸盐分布($\mu\text{mol/L} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Fig. 4 Distributions of phosphate and silica on the PN section ($\mu\text{mol/L} \cdot \text{kg}^{-1}$)

a. 磷酸盐(phosphate); b. 硅酸盐(silica)

和 offshore 逐渐上移的弧形分布, 其等值线的分布形式大致与等温线相似。与水深变化相比, 总二氧化碳等值线在温跃层区分布密集, 其它区域分布稀疏, 在离岸以远至陆架坡折区的表层到近表层等值线分布尤为稀疏。这表明, 除温跃层区的总二氧化碳浓度变化显著外, 其它区域变化缓慢, 在离岸以远至陆架坡折区的表层到近表层溶解氧均匀分布区的总二氧化碳浓度也大致呈均匀分布。将图 3b 与图 3a 比较可以看出, 除冲绳海槽近表层外, 夏季海区二氧化碳总的分布特征和变化趋势与溶解氧相反, 即其浓度为表层低, 底层高, 且自表层到底层由低变高。在水平方向, 陆架坡折区浓度低, 近岸和 offshore 浓度高, 并自陆架坡折区到近岸和 offshore 逐渐由低变高。二氧化碳低浓度区在陆架区离岸以远到 offshore 的表层至近表层, 其陆架坡折区附近表层浓度可低于 $1958 \mu\text{mol/L} \cdot \text{kg}^{-1}$, 高浓度区在冲绳海槽底层, 其深底层的浓度可高于 $2358 \mu\text{mol/L} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

图 4 是 PN 断面磷酸盐和硅酸盐浓度分布。由图 4a 和图 4b 看出, 磷酸盐和硅酸盐等值线走势大致与海底地形一致。其等值线在自近岸至 offshore 的表层到次表层和冲绳海槽底层分布稀疏, 近岸至陆架坡折区的底层分布密集。由磷酸盐和硅酸盐等值线分布的疏密程度表明, 除近岸至陆架坡折区底层磷酸盐和硅酸盐浓度变化显著外, 其它区域变化缓慢, 冲绳海槽的表层至次表层变化尤为缓慢且其浓度几乎呈均匀分布。由图 4a 和图 4b 还可以看出, 夏季海区磷酸盐和硅酸盐浓度均为表层低, 底层高, 而自表层至底层随着水深的变化由低变高。近岸与 offshore 相比, 近岸浓度高, offshore 浓度低, 且自近岸至 offshore 逐渐由高变低。磷酸盐和硅酸盐低浓度区在冲绳海槽的表层至次表层, 其中磷酸盐最低浓度为 $0 \mu\text{mol/L} \cdot \text{kg}^{-1}$, 而硅酸盐浓度低于 $2 \mu\text{mol/L} \cdot \text{kg}^{-1}$, 高浓度区在冲绳海槽底层, 其深底层的磷酸盐浓度可高于 $2.4 \mu\text{mol/L} \cdot \text{kg}^{-1}$, 硅酸盐浓度超过 $75 \mu\text{mol/L} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

由图 5 总碱度分布可以看出, 在陆架区近表层反气旋环流和陆架坡折区的垂直对流

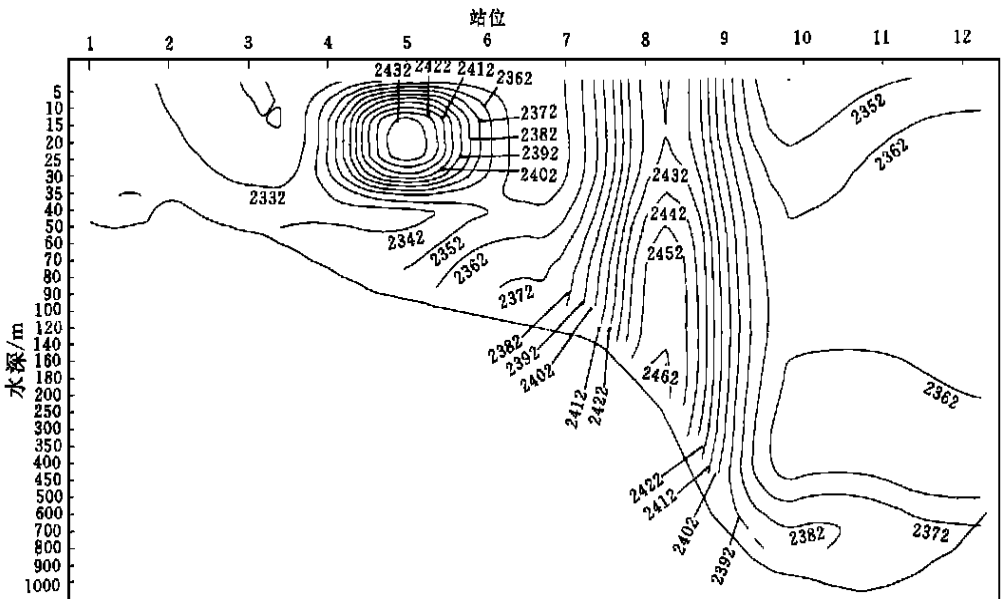


图 5 总碱度分布 (meq/L)

Fig. 5 Distributions of total alkalinity on the PN section (mmol/L)

区, 其等值线分布密集, 其它区域分布稀疏。这表明, 陆架区近表层反气旋环流和陆架坡折区垂直对流区的碱度变化显著, 其它区域的碱度变化缓慢。高碱度区恰恰在其浓度变化显著的陆架区近表层反气旋环流中心和陆架坡折区的垂直对流区, 其陆架区涡旋中心的碱度为 2432mmol/L , 而陆架坡折区落坡处的碱度高达 2462mmol/L , 这可能与涡旋中心和陆架落坡处的流速弱有关。而低碱度区在其浓度变化缓慢区, 其中冲绳海槽的碱度低于 2362mmol/L , 这似乎与黑潮流速强有关。

夏季东海表层水中二氧化碳、磷酸盐和硅酸盐浓度低, 而溶解氧浓度高, 因此夏季表层水是大气的二氧化碳的强吸收器。由化学资料分析表明, 夏季海区化学要素的分布特征和变化趋势与夏季海区垂直环流的反气旋运动、长江冲淡水及黑潮高温高盐水入侵、海面强热辐射和海区的温盐结构有密切关系。表层水中二氧化碳、磷酸盐和硅酸盐浓度低, 溶解氧浓度高, 这主要是由于夏季浅表混合层中碳和营养盐的强光合作用的利用; 此外, 还与夏季浅表混合层与大气间的二氧化碳气体交换有关 (Peng *et al.*, 1987)。

5 结论

由温度、盐度和化学要素分布特征和变化规律表明: 东海夏季的温跃层和盐跃层在次表层生成, 其强度随着跃层自陆架坡折区至近岸和外海的上移逐渐由强变弱。陆架区的近表层形成高温低盐特征的近表混合层。黑潮流入东海后, 在冲绳海槽仍保持其在外海次表层呈高温、高盐, 近表层呈高温、低盐, 底层呈低温、次高盐的基本特征。溶解氧浓度自近岸到外海逐渐由低变高, 在陆架区自表层到底层逐渐由高变低, 在冲绳海槽自表层到底层逐渐由低变高, 然后又逐渐由高变低。二氧化碳浓度自陆架坡折区到近岸和外海及自表层到底层逐渐由低变高。磷酸盐和硅酸盐浓度自近岸至外海由高变低, 而自表层至底层由低变高。在离岸以远至陆架坡折区的表层到次表层和冲绳海槽的深底层溶解氧和二氧化碳浓度大致呈均匀分布, 冲绳海槽的深底层溶解氧浓度呈均匀分布。冲绳海槽的表层至近表层及深底层磷酸盐和硅酸盐几乎呈均匀分布, 陆架区的近表层和陆架坡折区分别有一个高碱度区。夏季温盐及化学要素的分布特征与夏季海区垂直环流的反气旋运动、长江冲淡水及黑潮高温、高盐水入侵和夏季强海面热辐射有关。此外化学要素分布还与海区的温、盐结构及表混合层与大气间二氧化碳气体交换和表混合层中碳和营养盐活性光合作用的利用有关。

参 考 文 献

- 汤毓祥, 田代知二, 1993. 东海 PN 断面黑潮流况的分析. 黑潮调查论文选. 北京: 海洋出版社, 5: 69—75
- 苗育田, 于洪华, 1993. 东海 PN 断面黑潮水的入侵及其西界位置的变动. 黑潮调查论文选. 北京: 海洋出版社, 5: 242—252
- 郭炳火, 葛人锋, 1997. 东海黑潮水锋面涡旋在陆架水与黑潮水交换中的作用. 海洋学报, 19(6): 1—20
- Peng T-H, Takahashi T, Broecker W S *et al.*, 1987. Seasonal variability of carbon dioxide, nutrients and oxygen in the northern North Atlantic surface water observations and a model. *Tellus*, 39B: 439—458

DISTRIBUTION FEATURES OF *T-S* AND CHEMICAL CONSTITUENTS AT THE PN SECTION IN THE EAST CHINA SEA DURING SUMMER

LIU Xing-Quan

(*Institute of Oceanology, The Chinese Academy of Sciences, Qingdao, 266071*)

Abstract Based on the CTD data of the hydrology and chemical constituents at the PN section located in the East China Sea in August 1994, analysis for vertical distributions of the temperature, salinity, oxygen, total carbon dioxide, phosphate, silica and total alkalinity was carried out. The results show that the thermocline and halocline form in the subsurface during the summer, and their intensities become gradually weaker with their up-shift from the shelf break area to the near shore and the outside sea. The oxygen concentration increases from the near shore to the outside sea, and decreases from the surface layer to the bottom layer over the shelf area, and increases then decreases from the surface layer to the bottom layer at the Okinawa Trough. The total carbon dioxide concentration increases from the surface layer to the bottom layer, and from the shelf break area to the near shore and to the outside sea. The concentrations of phosphate and silica decrease from the near shore to the outside sea, while increase from the surface layer to the bottom layer. The concentration of total alkalinity was high in the near surface layer of the shelf area and the shelf break area. The vertical distributions of the temperature, salinity and chemical constituents are attributed to the anticyclonic flow of the vertical circulation during the summer, to the flows through of Changjiang River diluted and Kuroshio water, and to high heat radiation during the summer. In addition, the distributions of chemical constituents are related to the gas exchange of oxygen and carbon dioxide between the surface mixed layer and the atmosphere and the high photosynthetic utilization of carbon and nutrients in the surface mixed layer.

Key words East China Sea, Summer, Temperature, Salinity, Chemical constituents, Vertical distribution, Anticyclonic circulation