

# 湾流及邻近海区 15 m 层流场特征分析

徐以正<sup>1</sup>,熊学军<sup>1,2\*</sup>,郭延良<sup>1</sup>,于 龙<sup>1</sup>

(1. 国家海洋局 第一海洋研究所, 山东 青岛 266061;

2. 青岛海洋科学与技术国家实验室 区域海洋动力学与数值模拟功能实验室, 山东 青岛 266061)

**摘 要:**基于 1979—2017 年共 38 a 的水帆位于 15 m 层的 Argos 漂流浮标资料,分析了湾流及邻近海区表层的多年年平均、夏半年和冬半年平均流场特征,主要包括湾流的流动路径、流速变化、支流分布以及邻近海区的涡旋运动等。湾流的流动路径是由若干个弯曲流段与平直流段共同组成的,从佛罗里达海峡至哈特勒斯角的流段路径基本沿着美国东部海岸线,夏半年与冬半年平均的流动路径基本一致,而从哈特勒斯角以东至纽芬兰浅滩的流段路径较为平直,在纽芬兰浅滩附近海域出现多次弯曲过程,该流段在夏半年弯曲较为明显,冬半年相对平直。汇入湾流的支流与流出的分支在夏半年与冬半年的流速存在一定差异;湾流邻近海区的涡旋运动多发生在流动方向的右侧,且冬半年涡旋运动略强于夏半年。湾流的流速分布呈现出平直流段的高流速区段和弯曲流段的低流速区相互交错的状态,且夏半年流速整体强于冬半年。

**关键词:**漂流浮标;湾流;邻近海区;流场

**中图分类号:**P731.2

**文献标识码:**A

**文章编号:**1002-3682(2018)02-0030-11

**doi:**10.3969/j.issn.1002-3682.2018.02.004

沿着北美开放海岸的整个西边界流系统被称为湾流系统<sup>[1]</sup>,湾流是世界上主要的洋流之一,流动过程中把大量的高温、高盐水从低纬度海区输运到高纬度海区,影响着北美洲以及西北欧地区的天气过程与气候变异。关于湾流及邻近海区流场特征的研究不仅具有深刻的理论意义,而且对于海洋航运、海洋渔业生产以及海上突发事件应急处理及灾害预警等实际应用也有非常重要的现实意义。

海洋航运方面,北大西洋航线是世界八大海上航线中最为繁忙的航线,该航线从墨西哥湾、美国、加拿大东海岸各港口起,向东穿越大西洋,此航线的大体路径与湾流及北大西洋流的流动路径在很大程度上吻合,对湾流及邻近海区表层流场的特征研究有助于海洋航运路线的选择与优化,能够大幅节约航运的时间,降低资源消耗;海洋渔业生产方面,由于湾流与寒冷的拉布拉多寒流交汇,在纽芬兰岛附近海域形成了世界著名的纽芬兰渔场,该海域营养盐丰富,浮游生物大量繁殖,鱼类的饵料充足,对该海域流场的特征分析有利于渔业资源的合理开发和有效利用;另外,对湾流及邻近海区流场的特征分析,还有助于人类对一些海上突发事

**收稿日期:**2018-03-26

**资助项目:**国家科技重大专项科研任务——南海北部内波流监测、预报、预警系统研究及应用(2016ZX 05057015);海洋工程装备科研项目——500 米水深油田生产装备 TLP 自主研发-内波流预警方案研究及内波流监测系统研制;国家自然科学基金项目——黄海暖流的多时相特征及其发生机制研究(41376038);国家自然科学基金委员会-山东省人民政府海洋科学研究中心联合资助项目——海洋环境动力学和数值模拟(U1606405);国家海洋局全球变化与海气相互作用专项子课题——黑潮结构时空变化特征对中国近海环流的影响分析(GASI-03-01-01-02),黑潮不稳定性及多核结构(GASI-IPOVAI-01-05),东印度洋南部水体综合调查夏季航次(GASI-02-IND-STSum);国家重大科学研究计划——太平洋印度洋对全球变暖的响应及其对气候变化的调控作用—热带太平洋印度洋海洋观测(2012CB955601);海洋公益性行业科研专项——常用海底声纳测量仪器计量检测关键技术研究与示范应用(200905024);国家自然科学基金青年基金项目——东海黑潮三维结构及季节变化研究(40406009);国家重大科学仪器设备开发专项——自容式声学多普勒流速剖面仪开发(2012YQ12003908);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金资助项目——黄海东北部开敞性海湾余流特征及形成机制研究(2015P02)

**作者简介:**徐以正(1992-),男,硕士研究生,主要从事区域海洋动力学及调查技术方面研究. E-mail: xuyizheng@fio.org.cn

\* **通讯作者:**熊学军(1976-),男,研究员,博士,博士生导师,主要从事区域海洋动力学及调查技术方面研究. E-mail: xiongxi@fio.org.cn

(王 燕 编辑)

件(如船舶、石油平台漏油事故等)迅速采取有效的应急措施,一旦发生海洋溢油等突发事件,可以根据该区域流场特征准确地预测污染物质的漂移与扩散过程,做到提前预防与有效控制,减少经济损失和生态破坏。

20 世纪 80 年代以前,由于卫星遥感等观测技术的限制,人们对海洋水文要素的调查研究主要基于船舶水文调查,数据资料的时间尺度和空间尺度都具有一定的局限性。20 世纪 80 年代以后,遥感技术的迅速发展和漂流浮标观测的广泛应用为全球海洋的长期系统观测提供了有力保障。前人关于湾流及邻近海区表层流场的研究主要采用卫星高度计资料、数值模式模拟并结合漂流浮标资料的方式,开展了大量的研究工作并取得了丰富的研究成果。邱云和胡建宇<sup>[2]</sup>利用 1993-04—2001-03 的 TOPEX/Poseidon 卫星高度计资料分析了热带大西洋表层环流结构及其月变化特征,发现热带大西洋表层环流系统大部分流系月变化和季节变化不明显,部分流系具有明显月际波动和季节振荡。Huang 和 Shukla<sup>[3]</sup>利用环流模型研究了在多年实测海表面风应力和海表面热通量驱动下的热带大西洋低频变化。Richardson<sup>[4]</sup>通过对 110 个漂流浮标的速度与运动轨迹进行分析,进一步对北大西洋表层流场的涡动能进行分析。Rossby 等<sup>[5]</sup>通过对少量的漂流浮标运动进行分析,对湾流的动力学特征以及路径演变进行了研究。Song 等<sup>[6]</sup>通过对 1988—1990 年在哈特勒斯角东部的湾流流域释放的 75 个漂流浮标数据对湾流及其周围水体的流速变化以及平均动能和涡动能进行分析。Fratantoni<sup>[7]</sup>利用 1990—1999 年的漂流浮标资料对北大西洋表层流场的平均流速及涡动能进行了分析。Leterme 和 Pingree<sup>[8]</sup>利用 SLA 和 SeaWiFS 资料对湾流区域的环状结构以及北大西洋涡旋结构进行了分析,并利用 Argos 漂流浮标运动轨迹对涡旋结构特征进行检验。然而,目前采用大量的漂流浮标资料对湾流及邻近海区表层流场进行比较系统的分析却较少涉及,前人已经在黑潮及其邻近海区表层流场研究过程中系统地运用了漂流浮标资料。胡筱敏等<sup>[9]</sup>利用大量的卫星跟踪海表面漂流浮标资料对黑潮及其邻近海域的多年年平均和季节平均表层流场分布特征进行了系统分析;于龙等<sup>[10]</sup>利用 1979-02—2012-03 的漂流浮标资料并运用特征线法提取了黑潮 15 m 层流路的时空变化。这些研究为本文开展湾流及邻近海区表层流场的研究工作起到了很好的启发作用。

随着全球范围内 Argos 漂流浮标时间、空间覆盖率的不断增加,以及观测质量的逐渐提高,漂流浮标为我们进一步研究表层大洋环流提供了更好的基础。本文利用 1979—2017 共 38 a 的水帆位于 15 m 层的 Argos 漂流浮标资料,对湾流及邻近海区表层流场特征进行比较系统的分析。

## 1 资料和方法

Argos 漂流浮标是利用拉格朗日法则连续观测表层海流及水温的海洋观测仪器,它具有三段式结构,上部浮球主要负责把浮标的位置信息以及传感器信息传输到实验室;中部的缆线负责连接浮球和水帆;下部的水帆位于 15 m 水层并受海流拖拽运动,因此可以由漂流浮标的位置数据得到 15 m 水层的流场数据,并将其作为海洋表层流场的参考。

本文收集了 1979—2017 年期间全球范围内共计 21 590 个漂流浮标的 6 h 时间间隔的空间位置资料,该实验室已对所有漂流浮标原始数据进行了整合、质量控制和插值。将  $100^{\circ}\text{W}\sim 20^{\circ}\text{E}$ ,  $30^{\circ}\text{S}\sim 65^{\circ}\text{N}$  的海域确定为湾流及邻近海区范围,如图 2 所示。按照  $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$  划分网格,对每个网格内的海流数据进行正态分布检验,去掉大于两倍方差的数据,将包含 3 个及以上数据的网格视为有效网格,各网格点内流速资料数量分布情况如图 1 所示。然后对网格内的流速数据进行平均作为该海域的表层平均流速,最后把所有网格的平均流速集合起来就能够得到整个研究区域的流场数据。

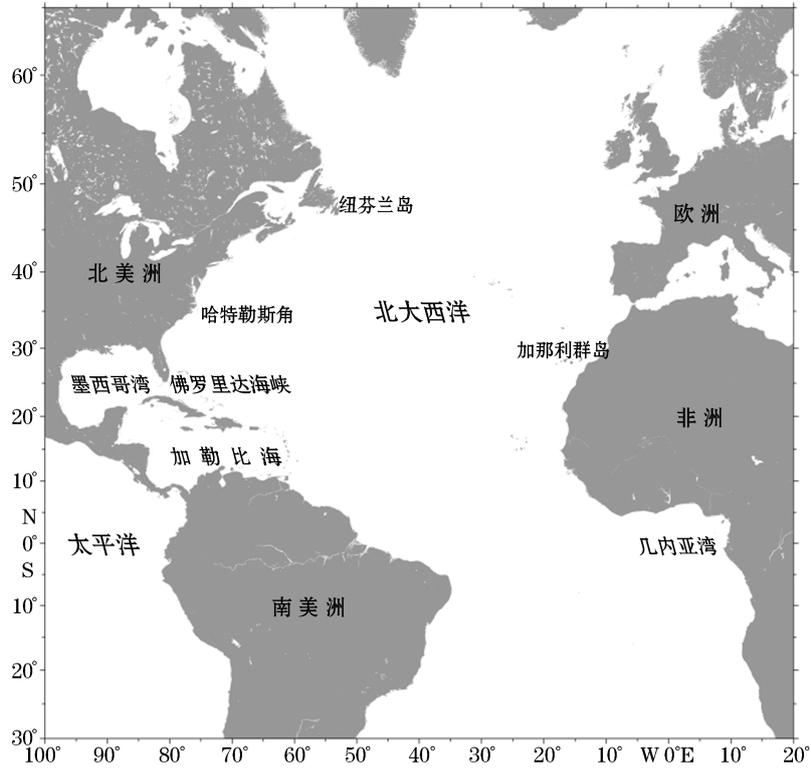


图1 湾流及邻近海区概况

Fig.1 Outlines of the Gulf Stream and its adjacent sea areas

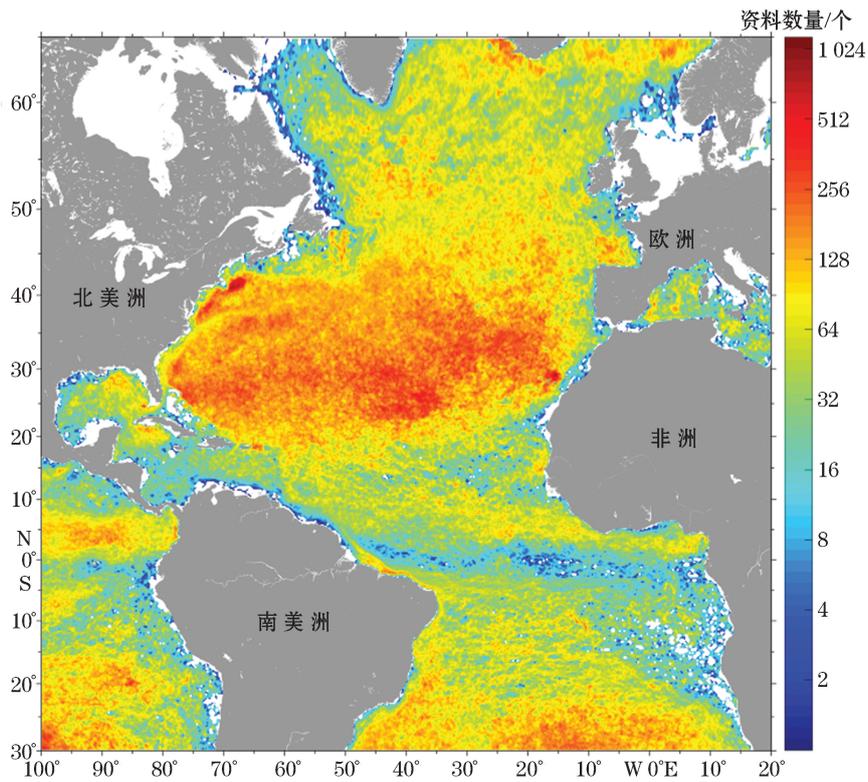


图2 网格点内流速资料数量分布情况

Fig.2 The distribution of the quantity of the flow velocity data within the grid points

## 2 湾流及邻近海区多年平均表层流场特征分析

根据 Arogs 漂流浮标资料绘制湾流及邻近海区 15 m 层多年平均的流场分布,如图 3 所示。湾流的流动路径非常清晰而稳定。从多年平均的角度看,湾流从佛罗里达海峡至哈特勒斯角的路径基本沿着美国东部海岸线,其路径的几个弯曲与陆地岸线以及陆架坡变化有关,该流段的流速平均在 100 cm/s 以上,为湾流的高流速区。湾流在哈特勒斯角以东至纽芬兰浅滩的路径较为平直,流速逐渐减弱,并在纽芬兰浅滩附近海域出现多次弯曲过程,随后逐渐汇入北大西洋流。

湾流的流动路径是湾流最主要的形态特征。哈特勒斯角以南,湾流基本沿着美国东部海岸线流动。湾流由西向东穿越佛罗里达海峡后,向左做逆时针偏转沿着地形走势进入佛罗里达半岛以东海区,如图 4 中的弯曲 I 所示,这是湾流在离开墨西哥湾后发生的第 1 个弯曲(佛罗里达海峡以东弯曲)。该弯曲的东南方向,有一支西北向流动在佛罗里达海峡东南约  $79^{\circ}\text{W}$ ,  $24^{\circ}30'\text{N}$  附近汇入湾流,该流动为北赤道流穿越大安德列斯群岛的一个分支,成为湾流水体的来源之一。在佛罗里达半岛以东,湾流基本沿正北方向流动,在  $79^{\circ}\text{W}$ ,  $28^{\circ}\text{N}$  附近,另一支源于北赤道流的分支也汇入湾流,成为湾流水体的另一个来源。到达佛罗里达半岛东北约  $80^{\circ}\text{W}$ ,  $30^{\circ}\text{N}$  附近海域后,如图 4 中的弯曲 II 所示,湾流沿顺时针方向发生第 2 个弯曲(佛罗里达半岛东北弯曲)。经过该弯曲过程,湾流由正北方向的平直流动变为东北方向的弧线形流动。大约在  $78^{\circ}\text{W}$ ,  $32^{\circ}\text{N}$  附近海域,如图 4 中的弯曲 III 所示,湾流再次向左做逆时针偏转,这是湾流第 3 个弯曲(哈特勒斯角西南弯曲),经过该弯曲过程,湾流变为东北方向的平直流动。弯曲 II 与弯曲 III 的东侧,是一个涡旋运动的多发海区,该区域表层流场的多年平均结果显示在湾流流动方向的右侧同时存在着气旋式涡旋与反气旋式涡旋,部分涡旋的产生大多与湾流路径的弯曲有关,但一些涡旋是从东向西传来的。湾流到达哈特勒斯角以东海域后,其流动路径逐渐发生顺时针偏转而远离海岸,如图 4 中的弯曲 IV 所示,这是湾流路径的第 4 个弯曲(哈特勒斯角东北弯曲)。该弯曲还伴随着支流的汇入,在哈特勒斯角东北沿岸,有一支西南方向流动的沿岸流汇入湾流,后随湾流离岸向东偏北方向流动。

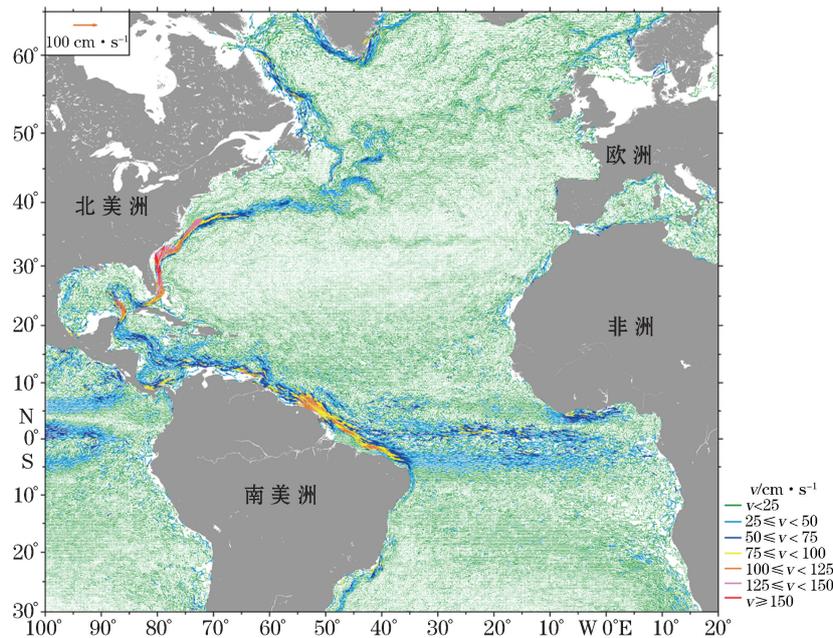
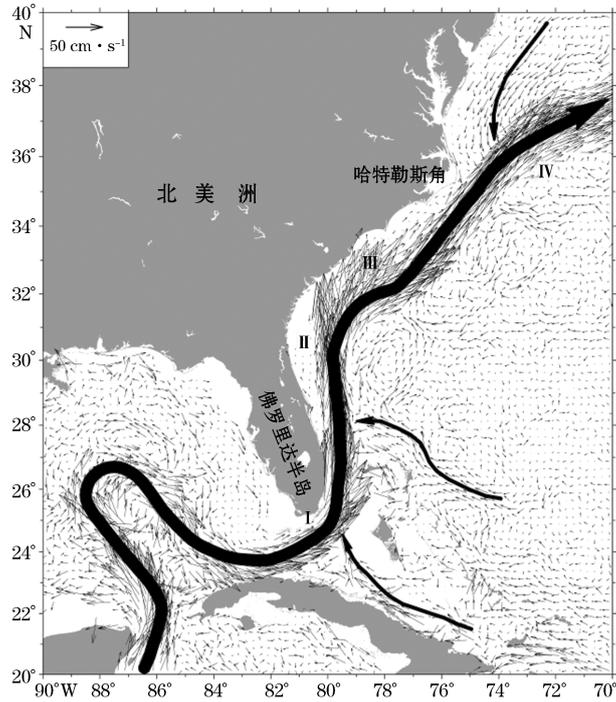


图 3 湾流及邻近海区 15 m 层多年平均流场分布图

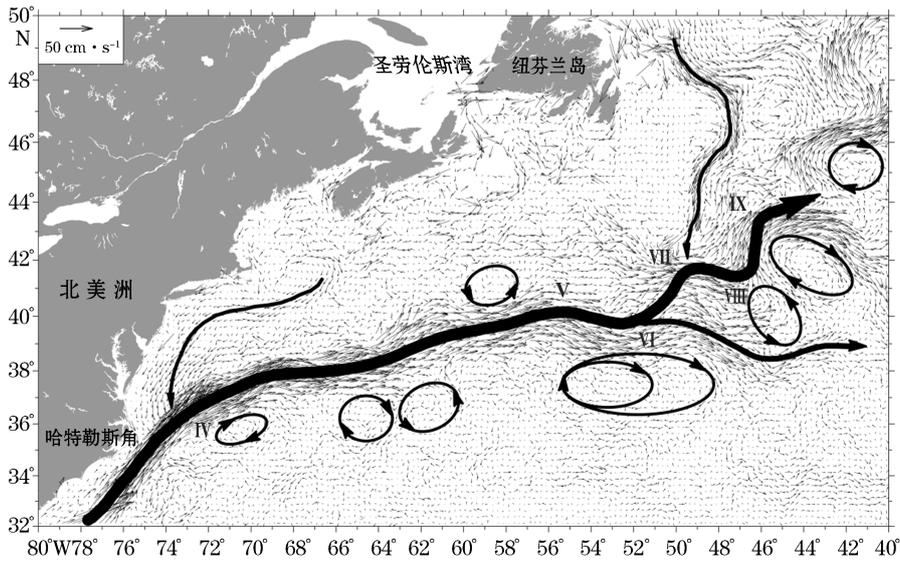
Fig.3 The distribution of the multi-year averaged 15 m laminar current field of the Gulf Stream and its adjacent sea areas



注：I 为佛罗里达海峡以东弯曲；II 为佛罗里达半岛东北弯曲；  
III 为哈特勒斯角西南弯曲；IV 为哈特勒斯角东北弯曲

图 4 哈特勒斯角以南湾流及其邻近海域多年平均的表层流场主要特征

Fig.4 Main characteristics of the multi-year averaged surface current field of the Gulf Stream and its adjacent sea areas to the south of Cape Hatteras



注：IV 为哈特勒斯角东北弯曲；V, VI, VII, VIII 和 IX 为纽芬兰浅滩处湾流路径弯曲

图 5 哈特勒斯角以东湾流及其邻近海域多年平均的表层流场主要特征

Fig.5 Main characteristics of the multi-year averaged surface current field of the Gulf Stream and its adjacent sea areas to the east of Cape Hatteras

湾流经过第 4 个弯曲后,在出现第 5 次弯曲之前一直沿东偏北方向平直流动,没有较为明显的弯曲。但该流动路径邻近海域为气旋式涡旋与反气旋式涡旋的多发海区,在弯曲Ⅳ的东侧存在着涡旋中心位于  $70^{\circ}30'W, 36^{\circ}N$  附近的反气旋型涡,在湾流路径的右侧约  $66^{\circ}\sim 60^{\circ}W, 35^{\circ}\sim 37^{\circ}N$  范围内同时存在着一个反气旋型涡和一个气旋型涡,而在湾流路径左侧存在一个中心位置约为  $59^{\circ}W, 41^{\circ}N$  的反气旋型涡。随后湾流向右做顺时针偏转,如图 5 中的弯曲Ⅴ所示,这是湾流第 5 个较为明显的弯曲。在短暂地向东偏南方向流动后,湾流再次向左做逆时针偏转发生第 6 次弯曲(图 5 中的弯曲Ⅵ),随后向东北方向流动。在弯曲Ⅵ的南部,存在着纬向跨度较大的反气旋型涡旋,同时在该弯曲处,湾流向东侧海域入侵现象较为显著,有一条分支从湾流的右侧不断分离出来向东流向大西洋中部。湾流经过弯曲Ⅵ后到达  $50^{\circ}W, 41^{\circ}N$  附近海域时与纽芬兰岛东侧向南流动的拉布拉多寒流相遇,湾流向右做顺时针偏转形成第 7 次弯曲(图 5 中的弯曲Ⅶ)。在弯曲Ⅶ之后,湾流又发生了一系列弯曲过程,如图 5 中弯曲Ⅷ和弯曲Ⅸ,同时在弯曲Ⅷ的东南部海域存在气旋式涡旋,在弯曲Ⅸ的东南部与东北部海域存在反气旋式涡旋。湾流在纽芬兰浅滩处发生弯曲过程后,流速逐渐减弱,整体向东北方向汇入北大西洋流。

综合分析表明,湾流大致沿陆架坡流动,同时也发生较轻微的弯曲过程,其中弯曲Ⅰ,Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ和Ⅴ主要与陆架坡变化有关,而弯曲Ⅵ,Ⅶ,Ⅷ和Ⅸ主要由于湾流进入北大西洋中部深水区,失去陆架坡的制约,流动呈扇形展开,流动路径不稳定,产生多个分支和弯曲,且伴随着中尺度涡旋。

为了方便观察湾流在流动过程中流速的变化情况,绘制出湾流及邻近海区 15 m 层多年平均的流速等值线分布,如图 6 所示。可以看出,湾流流动路径上的流速较邻近海区显著偏大,但湾流流速并不是沿着流动方向持续不变的,而是呈现出较平直流段的高流速区段和弯曲流段的低流速区相互交错的状态,弯曲流段流速偏低是由于部分水体脱离湾流主干造成的。哈特勒斯角以南的流段,湾流在弯曲Ⅰ和Ⅱ之间以及弯曲Ⅱ和Ⅲ之间的平直流段的流速高于  $140\text{ cm/s}$ ,而路径弯曲处(如弯曲Ⅰ和弯曲Ⅲ)流速约为  $110\text{ cm/s}$  左右,此流段流程约为  $1\ 200\text{ km}$ ,流幅狭窄,流动路径较稳定。哈特勒斯角以东至纽芬兰浅滩的流段,流程约为  $3\ 500\text{ km}$ ,湾流流速呈现出逐渐减弱的过程,哈特勒斯角东部近岸海域流速约为  $100\text{ cm/s}$  左右,而纽芬兰浅滩处流速减弱为  $25\text{ cm/s}$  左右。

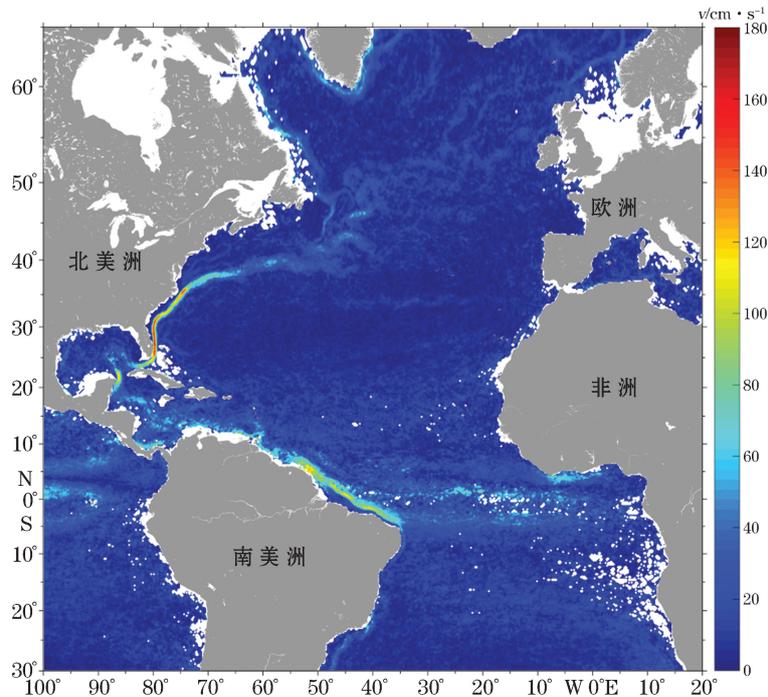


图 6 湾流及邻近海区 15 m 层多年平均流速等值线分布图

Fig.6 Isoline distribution of the multi-year averaged flow velocity at 15 m lamina of the Gulf Stream and its adjacent sea areas

### 3 湾流及邻近海区夏、冬半年多年平均表层流场特征分析

根据 Arogs 漂流浮标资料绘制的湾流及邻近海区 15 m 层多年夏半年与冬半年平均流场分布,如图 7 和图 8 所示。本文中夏半年和冬半年是按照春分和秋分时间为界限来划分的,即 03-23—09-23 为夏半年,09-24—翌年 03-22 为冬半年。

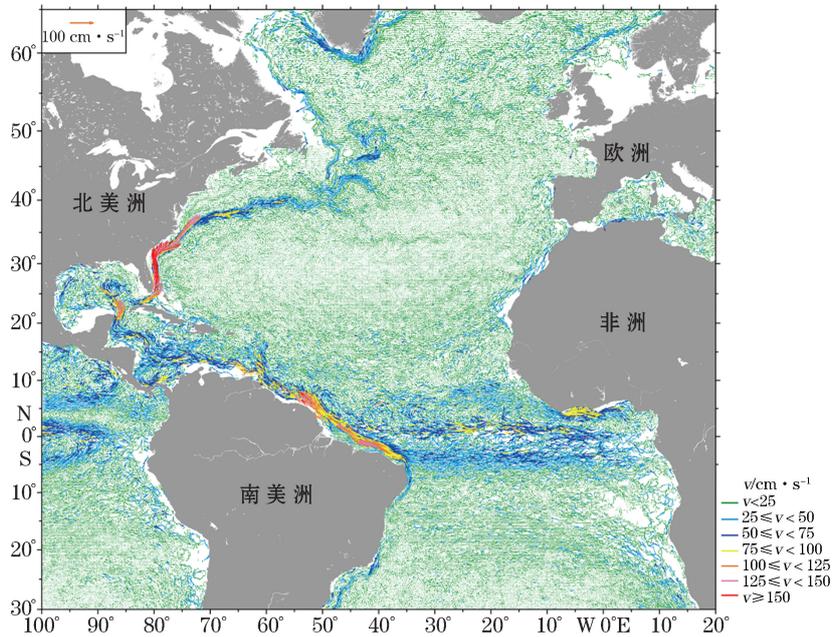


图 7 湾流及邻近海区 15 m 层夏半年平均流场分布图

Fig.7 Distribution of the summer half year mean 15 m laminar current field of the Gulf Stream and its adjacent sea areas

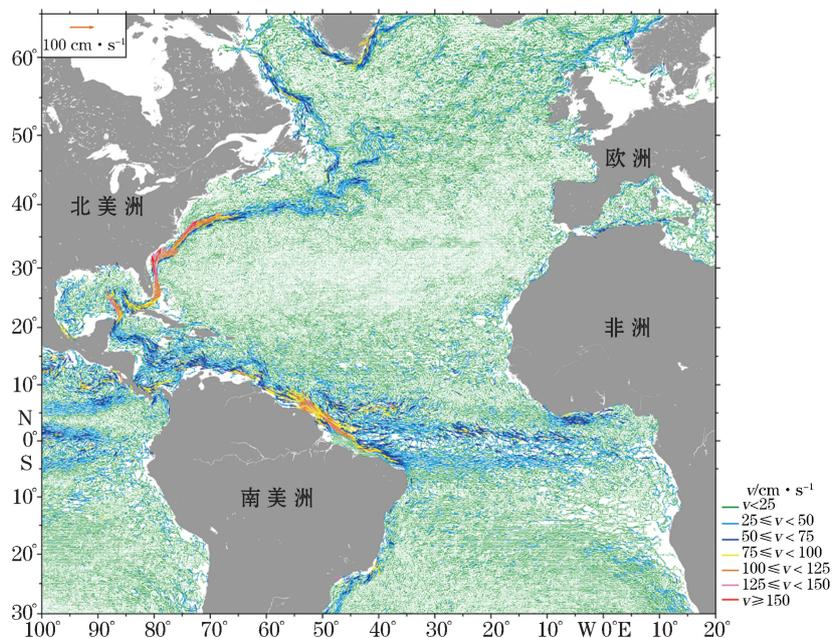


图 8 湾流及邻近海区 15 m 层冬半年平均流场分布图

Fig.8 Distribution of the winter half year mean 15 m laminar current field of the Gulf Stream and its adjacent sea areas

对比湾流夏半年与冬半年平均的流场分布图发现,湾流在佛罗里达海峡至哈特勒斯角的流段,其路径基本沿着美国东部海岸线,这一流段夏半年与冬半年的流动路径与流幅宽度基本相同,而此流段湾流的流速在夏半年强于冬半年;在哈特勒斯角以东至纽芬兰浅滩的流段,湾流不再继续沿岸流动,而是离岸折向东北方向流动,这一流段湾流在夏半年与冬半年路径的弯曲程度不同,夏半年较冬半年的弯曲更明显,此流段湾流的流速为逐渐减弱的过程,且冬半年比夏半年流速变化地更快。湾流邻近海区中,南赤道流、北赤道流以及非洲沿岸的加那利洋流表现为夏半年强于冬半年,而北大西洋流则表现为冬半年略强于夏半年,北赤道流在夏半年与冬半年变化不大。

### 3.1 哈特勒斯角以南海域夏、冬半年平均流场特征

哈特勒斯角是湾流沿海岸线流动与离岸流动的转折点,在哈特勒斯角以南,湾流及邻近海域夏半年、冬半年平均的表层流场主要特征,如图 9 所示。该流段夏半年与冬半年平均的流动路径基本一致,仅在位于佛罗里达半岛东北弯曲(弯曲Ⅱ)与哈特勒斯角西南弯曲(弯曲Ⅲ)之间的平直流段有所区别,夏半年上述流段与岸线距离较冬半年偏小。该流段汇入湾流的支流在夏半年与冬半年有一定的差异,其中夏半年在佛罗里达海峡东南方向的汇入的支流比较清晰,而冬半年该支流较弱,不易分辨;另外 2 支入流(佛罗里达半岛以东汇入的支流与哈特勒斯角东北方向汇入的支流)在夏半年与冬半年均比较清晰容易分辨,但 2 个支流的流速存在一定差异,佛罗里达半岛以东汇入的支流在夏半年流速强于冬半年,而哈特勒斯角东北汇入的支流在夏半年流速弱于冬半年。湾流邻近海域流场在夏半年的涡旋运动较弱,而在冬半年该海域是涡旋运动的多发海区,在湾流运动方向的右侧存在较为明显的气旋式涡旋与反气旋式涡旋。

哈特勒斯角以南的流段为湾流系统中流速最高的区域,且夏半年流速整体强于冬半年。该流段夏半年的最大流速为 197 cm/s,平均流速在 125 cm/s 以上,冬半年的最大流速为 167 cm/s,平均流速为 100 cm/s。

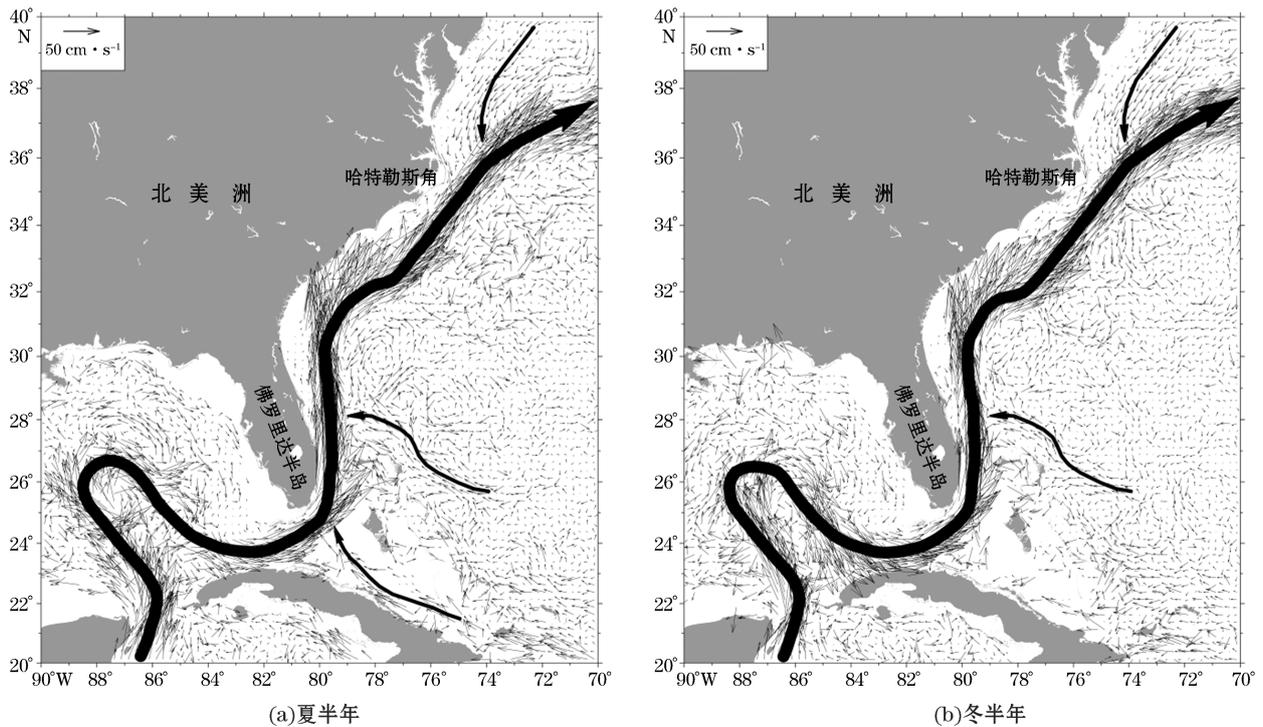


图 9 哈特勒斯角以南湾流及其邻近海域夏半年、冬半年平均的表层流场主要特征

Fig.9 Main characteristics of the summer half year and winter half year mean surface current fields of the Gulf Stream and its adjacent sea areas to the south of Cape Hatteras

### 3.2 哈特勒斯角以东海域夏、冬半年平均流场特征

在哈特勒斯角以东,湾流及邻近海域夏半年、冬半年平均的表层流场主要特征,如图 10 所示。该流段夏半年与冬半年平均的流动路径有一定区别,整体表现为夏半年湾流路径弯曲更加明显,冬半年其路径相对比较平直,比较有代表性的是夏半年湾流路径在  $63^{\circ}\text{W}, 39^{\circ}\text{N}$  附近向流动方向的左侧发生较明显的弯曲,而冬半年该区域流动路径较为平直;在纽芬兰浅滩附近海域,夏半年路径弯曲的幅度比冬半年更加明显,但整

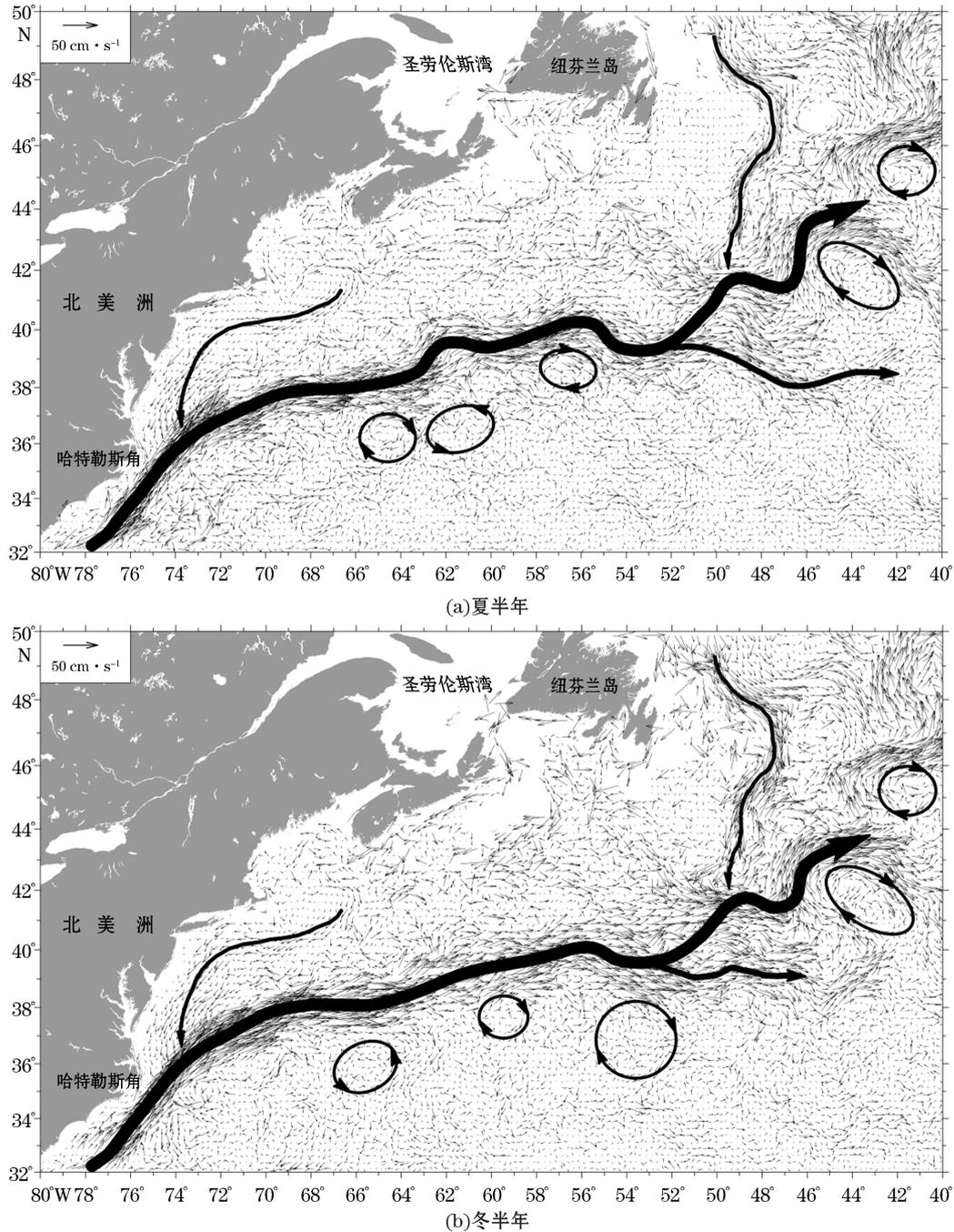


图 10 哈特勒斯角以东湾流及其邻近海域夏半年、冬半年平均的表层流场主要特征

Fig.10 Main characteristics of the summer half year and winter half year mean surface current fields of the Gulf Stream and its adjacent sea areas to the east of Cape Hatteras

体路径弯曲与年平均相比差别不大。该流段存在支流的汇入与分支的流出,在  $52^{\circ}\text{W}, 40^{\circ}\text{N}$  附近海域,有一个分支从湾流的右侧分离出来向东流向大西洋中部,该分支在夏半年的流速略强于冬半年;在  $50^{\circ}\text{W}, 41^{\circ}\text{N}$  附近海域,源于纽芬兰岛东侧向南流动的拉布拉多寒流与湾流交汇,该支流在冬半年的流速强于夏半年。该流段湾流流动路径的左侧的涡旋运动不明显,而流动路径的右侧是涡旋运动的多发海区,且冬半年涡旋运动略强于夏半年。

哈特勒斯角以东至纽芬兰浅滩的流段,夏半年与冬半年的湾流速度均逐渐减弱,夏半年湾流速度由哈特勒斯角东部近岸海域的  $100\text{ cm/s}$  逐渐减弱至纽芬兰浅滩处的  $25\text{ cm/s}$  左右,冬半年湾流速度由  $75\text{ cm/s}$  减弱至  $25\text{ cm/s}$  左右,且冬半年速度较夏半年变化更快。

## 4 结 论

本文利用 38 a(1979—2017 年)的 Argos 漂流浮标资料分析了湾流及邻近海区表层的多年年平均、夏半年和冬半年平均流场特征,分析表明:

湾流的路径是由若干个弯曲流段与平直流段共同组成的,湾流路径两侧存在气旋式涡旋与反气旋式涡旋,并且不断地有支流的汇入与分支的流出。湾流从佛罗里达海峡至哈特勒斯角的流段路径基本沿着美国东部海岸线,各弯曲过程与陆地岸线以及陆架坡变化有关,该流段夏半年与冬半年平均的流动路径基本一致;该流段从佛罗里达海峡东南汇入的支流在夏半年较强,冬半年较弱,而从佛罗里达半岛以东汇入的支流与哈特勒斯角东北汇入的支流在夏半年与冬半年均容易分辨;该流段涡旋运动在冬半年强于夏半年。湾流从哈特勒斯角以东至纽芬兰浅滩的流段路径较为平直,在纽芬兰浅滩附近海域出现多次弯曲过程,弯曲过程主要由于湾流逐渐失去地形制约,流动路径不稳定,产生多分支和弯曲,且伴随着中尺度涡旋,该流段在夏半年弯曲较为明显,冬半年相对平直;在  $52^{\circ}\text{W}, 40^{\circ}\text{N}$  附近海域流出湾流的分支在夏半年的流速略强于冬半年,而在  $50^{\circ}\text{W}, 41^{\circ}\text{N}$  附近海域汇入湾流的拉布拉多寒流在冬半年的流速强于夏半年。

湾流的流速分布呈现出平直流段的高流速区段和弯曲流段的低流速区相互交错的情况,弯曲流段流速偏低是由于部分水体脱离湾流主干造成的。夏半年湾流流速整体强于冬半年,哈特勒斯角以南的流段,湾流在各弯曲之间的平直流段的年平均流速高于  $140\text{ cm/s}$ ,而在弯曲处年平均流速约为  $110\text{ cm/s}$ ;哈特勒斯角以东至纽芬兰浅滩之间的流段年平均流速逐渐由  $100\text{ cm/s}$  减弱为  $25\text{ cm/s}$  左右,且冬半年流速较夏半年变化更快。

湾流邻近海区主要洋流特征表现为,南赤道流、北赤道流以及非洲沿岸的加那利洋流在夏半年强于冬半年,而北大西洋流则表现为冬半年略强于夏半年,北赤道流在夏半年与冬半年差异不大。

## 参考文献 (References):

- [1] STOMMEL, HENRY M. The Gulf Stream: a physical and dynamical description[M]. Berkeley: University of California Press, 1958.
- [2] QIU Y, HU J Y. Monthly variation of surface currents in the tropical Atlantic derived from TOPEX/Poseidon altimeter data[J]. Haiyang Xuebao, 2004, 26(6): 1-12. 邱云, 胡建宇. 热带大西洋表层环流及其月变化特征的分析[J]. 海洋学报, 2004, 26(6): 1-12.
- [3] HUANG B, SHUKLA J. Characteristics of the interannual and decadal variability in a general circulation model of the tropical Atlantic Ocean[J]. Journal of Physical Oceanography, 1997, 27(8): 1693-712.
- [4] RICHARDSON P L. Eddy kinetic energy in the North Atlantic from surface drifters[J]. Journal of Geophysical Research, 1983, 88(C7): 4355-4367.
- [5] ROSSBY T, BOWER A S, SHAW P T. Particle pathways in the Gulf Stream[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1985, 66(9): 1106-1110.
- [6] SONG T, ROSSBY T, CARTER E. Lagrangian studies of fluid exchange between the Gulf Stream and surrounding waters[J]. Journal of Physical Oceanography, 1995, 25(1): 46-63.
- [7] FRATANTONI D M. North Atlantic surface circulation during the 1990's observed with satellite-tracked drifters[J]. Journal of Geophys-

cal Research: Oceans, 2001, 106(C10): 22067-22093.

- [8] LETERME S C, PINGREE R D. The Gulf Stream, rings and North Atlantic eddy structures from remote sensing(Altimeter and SeaWiFS)[J]. Journal of Marine Systems, 2008, 69(3-4): 177-190.
- [9] HU X M, XIONG X J, QIAO F L, et al. Surface current field and seasonal variability in the Kuroshio and adjacent regions derived from satellite-tracked drifter data[J]. Haiyang Xuebao, 2008, 30(6): 1-16. 胡筱敏, 熊学军, 乔方利, 等. 利用漂流浮标资料对黑潮及其邻近海域表层流场及其季节分布特征的分析研究[J]. 海洋学报, 2008, 30(6): 1-16.
- [10] YU L, XIONG X J, GUO Y L, et al. Analysis of the path and axis features of the Kuroshio at the depth of 15m based on drifting buoy data[J]. Advances in Marine Science, 2014, 32(3): 316-323. 于龙, 熊学军, 郭延良, 等. 根据漂流浮标资料对黑潮 15m 层流路及流轴特征的分析[J]. 海洋科学进展, 2014, 32(3): 316-323.

## Analysis of the Characteristics of 15 m Laminar Current Field of the Gulf Stream and Its Adjacent Sea Areas

XU Yi-zheng<sup>1</sup>, XIONG Xue-jun<sup>1,2</sup>, GUO Yan-liang<sup>1</sup>, YU Long<sup>1</sup>

(1. The First Institute of Oceanography, SOA, Qingdao 266061, China;

2. Laboratory for Regional Oceanography and Numerical Modeling, Qingdao National

Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266061, China)

**Abstract:** Based on 38 years of data collected by Argos drifting buoys which sailed at the water depth of 15 m from 1979 to 2017, the annually and half-yearly averaged characteristics of the surface current fields of the Gulf Stream and its adjacent sea areas are analyzed, which include the flow path, velocity variations and tributary distributions of the Gulf Stream and the vortex motion in its adjacent sea areas. The flow path of the Gulf Stream is composed of several bending flow segments and flat direct current segments. The path of the flow segment from the Florida Strait to the Cape Hatteras is roughly parallel to the eastern coastline of the United States and keeps basically the same in summer half year and winter half year. The path of the flow segment from the east of Cape Hatteras to the Newfoundland Shoal is relatively flat, with multiple bending processes occurring near the Newfoundland Shoal. This flow segment is more obvious in bending in summer half year and becomes relatively flat in winter half year. Both the tributaries flowing into the Gulf Stream and the branches flowing out of the Gulf Stream are, to some extent, different in flow velocity in summer half year and winter half year. The vortex motion in the adjacent sea areas of the Gulf Stream occurs mostly on the right side of the flow direction and is slightly stronger in winter half year than in summer half year. The distribution of the flow velocity of the Gulf Stream shows that the high velocity sections of the flat direct current segments and the low velocity zones of the bending flow segments are interlaced with each other, and the overall flow velocity in summer half year is stronger than that in winter half year.

**Key words:** drifting buoys; Gulf Stream; adjacent sea areas; current field

**Received:** March 26, 2018