# 不同 CTD 数据垂向分辨率对黑潮地转流动力计算的影响分析*

孔 彬[1,2], 陈红霞[2], 袁业立[2]
(1. 山东科技大学 测绘科学与工程学院,山东 青岛 266590;
2. 国家海洋局 第一海洋研究所,山东 青岛 266061)

**摘 要**:基于日本海洋信息中心提供的东海黑潮 PN 断面垂向分辨率不同的 2 种 CTD 数据,采用动力高度法计算了 2000—2011 年的断面流速。通过对 49 个航次的流场结构、最大流速、流幅、流量等黑潮特征值的对比,分析了不同数据垂向分辨率对黑潮地转流动力计算的影响。结果表明:数据垂向分辨率不同对东海黑潮的流量几乎没有影响,对平均流幅影响很小,对流核位置略有影响,但对平均流核个数、平均最大流速影响较大。2 种数据对应的流场差异主要有:与低分辨率数据对应的流场相比较,高分辨率数据对应的流场流核区流速较大、平均流核数偏多。不同流核结构在 2 种数据对应的流场中出现概率差别较大,低分辨率数据结果中的单核结构出现概率最高,高分辨率数据结果中的双核结构出现概率最高。

**关键词**:东海;黑潮;PN 断面;流速结构;季节变化
**中图分类号**:P731.27 **文献标识码**:A **文章编号**:1671-6647(2016)03-0358-12
**doi**:10.3969/j.issn.1671-6647.2016.03.005

黑潮是北太平洋的一支西边界流,具有高温、高盐、流速强的特点。黑潮起源于菲律宾以东海域,经我国台湾以东进入东海,并沿东海大陆架外缘向东北向流动,后穿越吐噶喇海峡返回太平洋。通常,在东海境内的这一段黑潮被称为东海黑潮。东海黑潮在整个黑潮流系中起着承上启下的作用,我国近海区域的水文特征以及海流、水团的分布、变化等在不同程度上都受到东海黑潮的影响。因此,对于东海黑潮的研究,不仅对阐明黑潮本身的动力结构有重大意义,而且对阐明中国近海的海况变化从而建立比较可靠的预报方法,都是十分必要的[1]。

对于黑潮的系统研究,始于 1914 年日本渔业局对黑潮进行的定期观测。对黑潮的科学调查至今已有 100 多 a 的历史,积累了大量的观测资料。关于黑潮的流结构以及流幅、流量等流况,国内外学者进行了大量的研究:管秉贤[2]通过分析 1914—1937 年期间黑潮苏澳-与那国断面上的调查资料,得到黑潮在此断面上主要呈单核结构,只有在 6 月或 9 月才出现双核结构,流核核心的最大流速可达 3 kn 左右。管秉贤等[3]还利用 1956—1975 年间 G 断面的调查资料,计算得出黑潮出现频率最高的流幅为 40～50 n mile。汤毓祥等[4]利用 1972—1990 年期间 PN 断面的调查资料,计算得到黑潮 PN 断面的多年平均流量为 25.3 Sv。袁耀初等[5-6]通过对 1987－1988 年多个航次 PN 断面的流场计算,证实了 PN 断面存在双核结构。陈红霞等[7]计算了 1955—2001 年间黑潮 PN 断面的流场,得到了黑潮 PN 断面流核位置的时间序列以及黑潮流结构的季节变化特征。Kagimoto 和 Yamagata[8]采用 POM 模式模拟了黑潮流量的季节变化,指出夏季黑潮通过 PN 断面的流量比其他季节大。

黑潮调查已有 100 多 a 的历史,在这期间,调查方法以及调查仪器均有不同程度的革新,得到的调查数据分辨率也在不断变化。研究人员使用不同分辨率的数据得到的研究结果也有一定差异。所以,随着数据

* **收稿日期**:2015-11-02
**作者简介**:孔 彬(1991-),男,山东曲阜人,硕士研究生,主要从事大地测量学与区域海洋动力学方面研究. E-mail:kongbin@fio.org.cn
* **通讯作者**:陈红霞(1975-),男,山东聊城人,副研究员,博士,主要从事区域海洋动力学方面研究. E-mail: chenhx@fio.org.cn

(王 燕 编辑)

分辨率的不断变化，对黑潮的认知也有着一定的改变。PN 断面是东海黑潮中观测最系统的标准断面。从 1955 年开始，日本长崎海洋气象台就开始对该断面的黑潮主段进行定期观测。起初叫 G 断面，每年观测 2～3 个航次；1972 年改名为 PN 断面，位置较 G 断面向西南方向略有移动，并随即进行季节性观测。因此 PN 断面在东海黑潮流场和流量变化特征研究上极具代表性。本文利用 JODC（日本海洋资料中心）提供的东海黑潮 PN 断面 2000—2011 年期间 2 种分辨率的 CTD 数据，分别计算了 10 a 间 PN 断面的流场、流幅及流量，并对 2 种数据得到的流场、流幅及流量进行对比，揭示不同数据垂向分辨率对黑潮研究结果的具体影响。

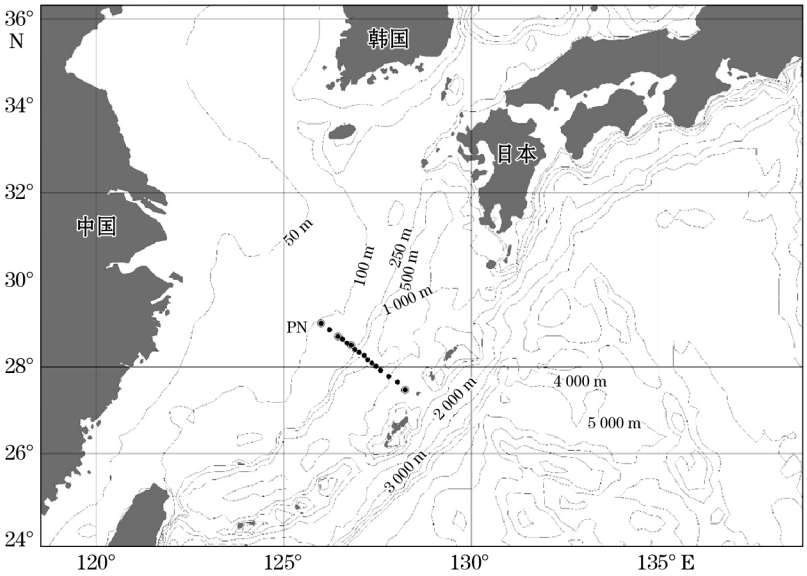


图 1　PN 断面的位置

Fig. 1　The location of PN section

## 1　数据与方法

本文使用的所有数据全部来自 JODC 网站（http://www.jodc.go.jp）。JODC 提供的 CTD 数据时间跨度为 1961—2011 年，2000—2011 年期间连续提供 2 种不同垂向分辨率的 CTD 数据。在 2 种分辨率的 CTD 数据中，其中一种为垂向间隔为 1 m 的高分辨率数据，而另一种是仅在水深为 0，10，20，30，50，75，100，125，150，200，250，300，400，500，600，700，800，900，1 000，1 100 和 1 200 m 层有数据记录的垂向分辨率较低的数据。我们将 2000—2011 年作为研究时段。

因为在进行断面的地转流动力计算时，通常是通过依次计算两相邻站点的中间流速完成的，这种方法在水平方向上会缺少两端范围各半个站距的流速数据，在垂向上也舍去了两相邻站点中未共同观测的深度范围，存在浅水订正产生的过大误差。为了克服这些问题，实现非线性订正，在动力计算前，在垂向和横向上均进行插值加密[9]。本文选取的插值算法为 Kriging 插值。在垂直方向上，低分辨率数据插值后的分辨率为 10 m/层，高分辨率数据不进行插值，保持 1 m/层的分辨率。在水平方向上，为了便于插值，采用各站点距离断面上经度为 125°30′E 点的线距离（单位为 km），用线距离代替横向上的经度，两种数据插值后的水平分辨率均为 2 km。

近些年，在对黑潮海流进行计算时，人们采用了多种方法，如动力高度法、螺旋方法以及改进的螺旋方法、逆方法和 P 矢量法等[9-14]。其中动力高度法是利用单个断面 CTD 数据计算地转流最常用的方法。为了计算东海黑潮 PN 断面的流场，本文采用的是动力高度法。动力高度法的基本方程如下：

$$v = v_0 - \frac{g}{f\rho_0}\int_{z_0}^{z} \frac{\partial \rho}{\partial x}\mathrm{d}z。\tag{1}$$

在动力计算中采用了以下计算参数：海水密度均值 $\rho_0$ 取 $1.025\times10^3$ kg/m$^3$；科氏参数 $f=2\Omega\sin\theta$，其中 $\Omega$ 为地转角速度，$\theta$ 为测点所在的纬度，零流面取 700 m。在零流面选取时，当两相邻站点的水深都达到 700 m 时，取 700 m 作为零流面；当两相邻站点水深不都大于 700 m 时，取水深较浅的站点深度作为零流面。这种零流面的选取方法也存在一定的弊端，尤其在水深较浅处。如在水深浅于 100 m 的陆架上，计算得到的流速只能表示相对于底层的流速差，而并不是绝对流速值。

## 2 三种典型差异

应用 2 种不同垂向分辨率的 CTD 数据计算得到的东海黑潮 PN 断面的流场存在显著的差异。典型的差异有 3 种：流核区流速差异、流核个数差异、流核位置差异。需要补充的是，这几种差异只是比较典型的情况，而有的差异并非在所有航次均有出现。

### 2.1 流核区流速差异

通过对比 2 种数据对应的流场可以看出，高分辨率数据对应的流场流核区的流速普遍比低分辨率的大，最大差异可达 45 cm/s。以 2004-07 航次为例，高分辨率数据对应的流核区流速比低分辨率数据对应的流核区流速大(图 2)。

无论是低分辨率数据对应的流场图，还是高分辨率数据对应的流场图，流场的流核个数都是 2 个，两者之间最大的差异在于流核区域的流速大小(图 2)。在图 2a 中，主流核位于线距离 215 km 陆坡处的表层，最大流速为 95 cm/s；而在图 2b 中，主流核的位置略有西移，位于线距离 210 km 陆坡处的表层，最大流速为 140 cm/s。两者之间主流核最大流速差异高达 45 cm/s。图 2a 中的次流核位于线距离 175 km 附近的 40 m 层处，最大流速为 50 cm/s；而图 2b 中的次流核位于线距离 185 km 附近 40 m 层处，最大流速为 90 cm/s。次流核的位置略有东移，而流速差异则为 40 cm/s。

由此可见，尽管 2 种数据对应的流核个数相同，流核位置也差别不大，但在流核的流速大小上存在较大差异。高分辨率数据对应的流核流速要比低分辨率数据对应的流核流速大得多。

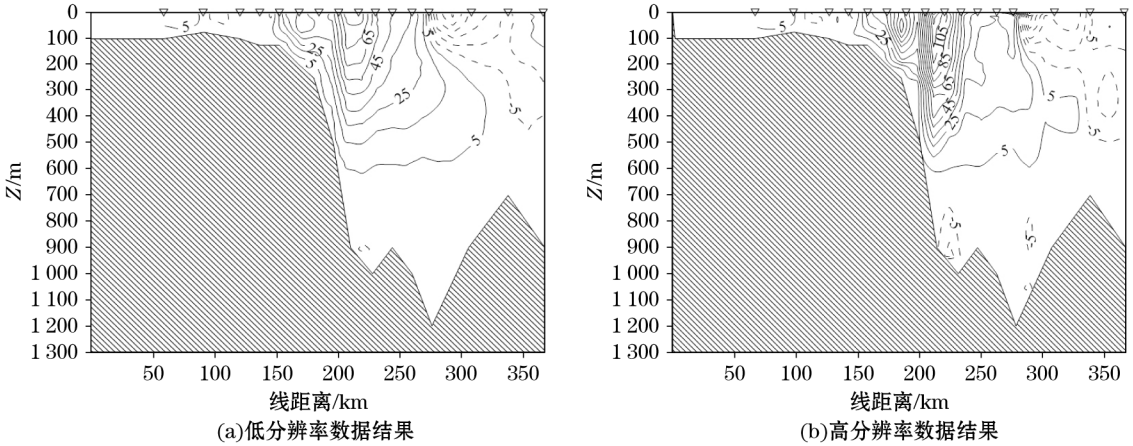


图 2 2004-07 低、高分辨率数据所得的流场(cm·s$^{-1}$)图

Fig. 2 Vertical profiles of current velocity derived from low and high vertical resdution data observed in July 2004

### 2.2 流核个数差异

在部分航次的 2 种数据对应的流场图中，流核个数有所不同；此时通常高分辨率数据对应流场的流核个数较多。

以 2001-01 航次为例，图 3 给出了高分辨率数据得到的流核个数比低分辨率数据多 2 个的情况。由图 3a

可见，低分辨率数据对应的流场为典型的单核结构，流核位于线距离 210 km 陆坡处的表层，最大流速为 145 cm/s。截然不同的是，在图 3b 所示高分辨率数据对应的流场为三核结构。其中主流核位于线距离 215 km 陆坡处的表层，最大流速为 155 cm/s；另外 2 个流核均位于主流核的右侧；一个位于线距离 240 km 处，深度约为 100 m，最大流速为 115 cm/s；另一个流核位于线距离 290 km 处的 130 m 层，最大流速为 38 cm/s。

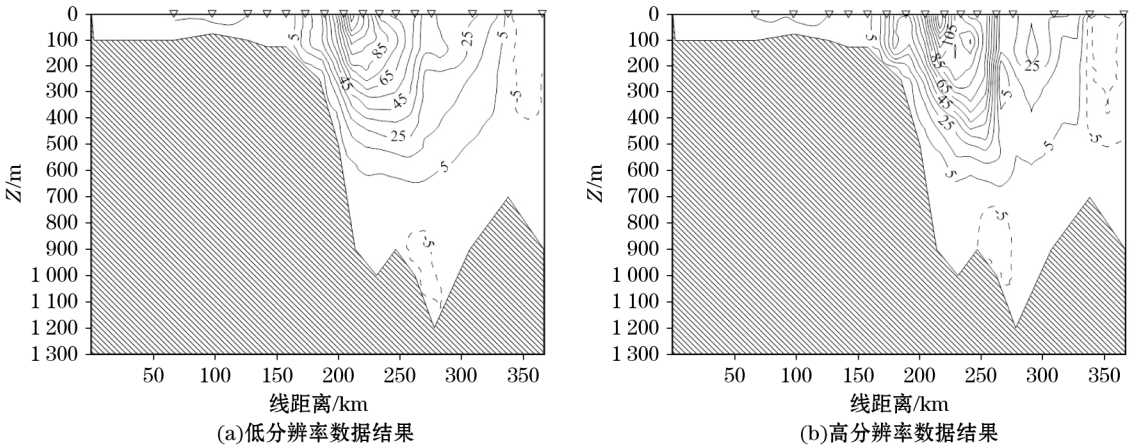


图 3　2001-01 低、高分辨率数据所得的流场（cm・s$^{-1}$）图

Fig. 3　Vertical profiles of current velocity derived from low and high vertical resolution data observed in January 2001

以 2005-01 航次为例，图 4 给出了高分辨率数据得到的流核个数比低分辨率数据多 1 个的情况。由图 4a 可见，低分辨率数据对应的流场为典型的单核结构，流核位于线距离 210 km 陆坡处的表层，最大流速为 135 cm/s。与之不同的是，在高分辨率数据对应的流场中，在线距离 273 km，水深 139 m 处出现了一个流核，此时流场呈现为双核结构；主流核的位置略有东移，在线距离 215 km 处的表层；主流核的流速明显比低分辨率数据对应流场的主流核流速大。除此以外，高分辨率数据对应的流场在线距离 300 km 处的逆流也有所增强。

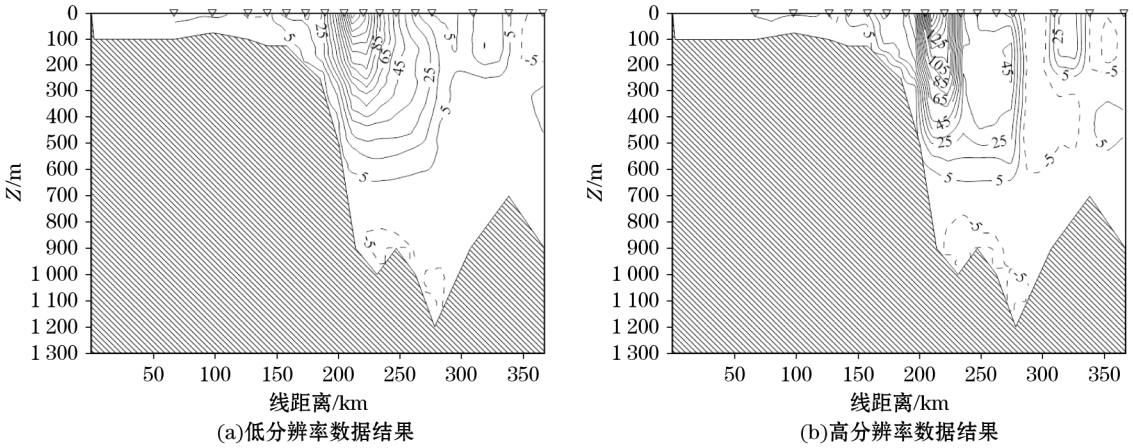


图 4　2005-01 低、高分辨率数据所得的流场（cm・s$^{-1}$）图

Fig. 4　Vertical profiles of current velocity derived from low and high vertical resolution data observed in January 2005

由此可见，数据垂向分辨率不同可能直接影响到东海黑潮 PN 断面的流场结构与流核个数。有时增加 1 个流核，有时增加 2 个流核，增加的流核通常出现在陆坡外的深水海域。

### 2.3 流核位置差异

数据垂向分辨率不同，同一航次 2 种数据对应流场中流核的位置也可能不同。以 2003-10 为例，图 5 给出的是 2 种数据得到的 PN 断面的流核位置不同的情况。

由图 5 可见，2 种数据得到的流场均是单核结构。但在低分辨率数据对应的流场中，流核位于线距离 200 km 陆坡处的表层，最大流速为 105 cm/s；而在高分辨率对应的流场中，流核位于线距离 225 km 处的 70 m 层，最大流速为 105 cm/s。2 种数据对应流场的流核位置左右相差 20 km，上下相差 70 m。如果从流核与站位的相对位置上看，低分辨数据的流核位于左起第 7 个与第 8 个站点之间，而高分辨率流场中的流核位于第 9 个与第 10 个站点之间。

由此可见，数据垂向分辨率的增加，特别在陆架外的深水海区，无论在水平方向上，还是在东西方向上，都将有可能影响到主流核的位置变化。

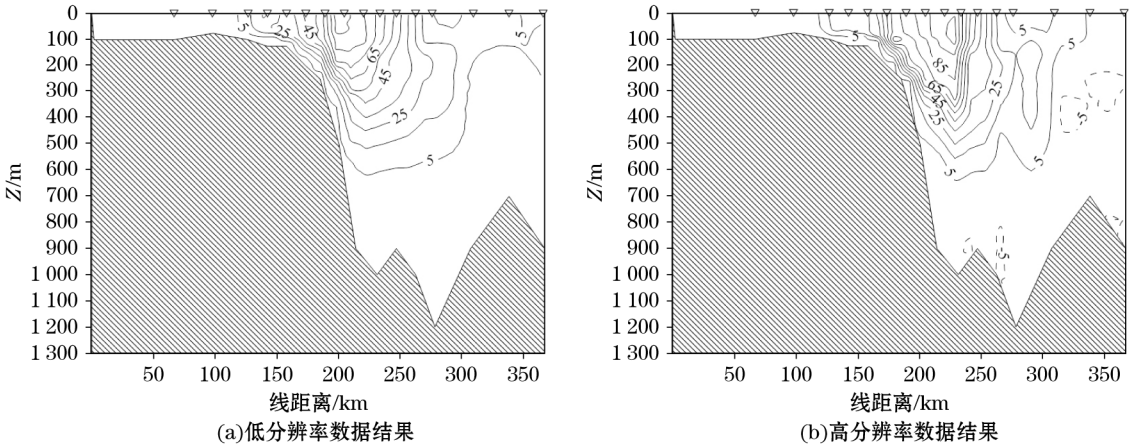


图 5 2003-10 低、高分辨率数据所得的流场(cm·s$^{-1}$)图

Fig. 5 Vertical profiles of current velocity derived from low and high vertical resolution data observed in October 2003

## 3 流结构对比统计分析

在 2000—2011 年期间，东海黑潮 PN 断面 2 种不同垂向分辨率数据对应的流场中，不同流核结构出现的概率有较大的差异，并且流核在空间分布上也有所不同。本文还将所有航次按季节进行了统计，分析了 2 种数据对应流结构的季节差异。

### 3.1 流结构与平均流核数差异

根据流核个数进行分类，黑潮 PN 断面的流场可分为 3 种结构：单核结构、双核结构以及多核结构。在 2000—2011 年期间的 49 个航次中，2 种数据得到的黑潮 PN 断面流场中，3 种流核结构均有出现。

在低分辨率数据对应的流场中，单核结构、双核结构、多核结构出现的概率依次为 53%，41%，6%。而在高分辨率数据对应的流场中，3 种流场结构出现的概率分别为 33%，49%，18%。由此可见，由于数据垂向分辨率的变化，3 种流核结构出现的概率也发生了较大的变化。

由于数据分辨率的提高，双核结构和多核结构出现的概率均有所增加，而单核结构则显著减少。若简单地以 2 种情形下单核结构减少的比例或者双核结构和多核结构增加的比例看，高分辨率数据将有 20%的可

能增加流场的流核个数。

如果进一步统计 2 种情况下平均流核个数，低分辨率数据为 1.6 个，高分辨率数据为 1.9 个，增加的平均流核数为 0.3 个；增加数 0.3 与原平均流核数 1.6 的比值也接近于 20% 。

### 3.2　流核空间分布差异

基于 2000—2011 年期间 49 个航次 2 种垂向分辨率数据对应流场的流核位置对照情况如图 6 所示。其中三角符号表示的是主流核，而十字符号表示的是次流核。

从低分辨率数据对应的流核分布图上看，在水平方向上流核主要分布在线距离 140～280 km；在垂直方向上，流核全部集中在 200 m 层以浅。其中主流核主要集中在线距离 180～240 km 范围内。次流核分布在主流核的两侧，但大部分次流核位于主流核西侧的陆架上，只有少数位于主流核的东侧；次流核在垂直方向上的分布也比较集中，其中大部分分布在 50 m 层以上。

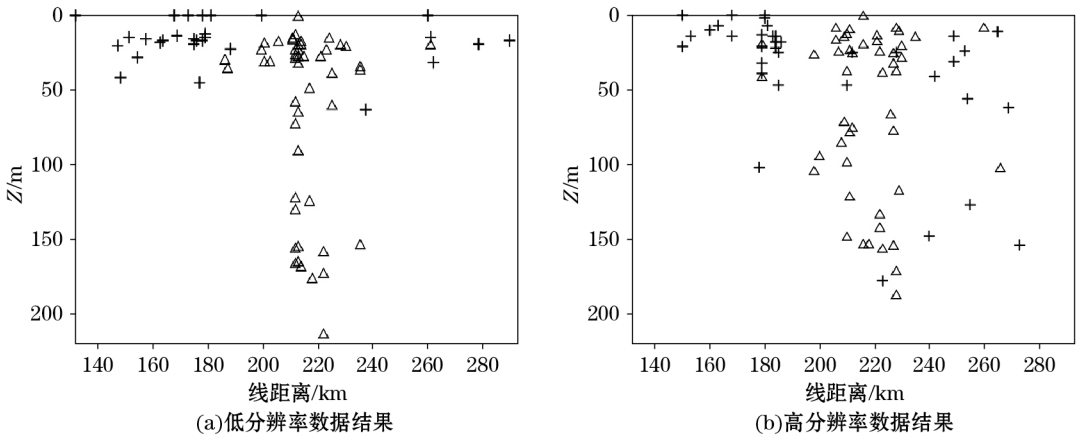


图 6　低、高分辨率数据得到的流核位置分布

Fig. 6　Location of maimum velocities derived from low and high vertical resolution data

而从高分辨率数据对应的流核分布图上看，主流核在水平方向上主要集中在线距离 180～240 km，在垂直方向上出现在 200 m 层以浅。次流核在水方向上的分布范围比较广，在线距离 140～280 km 均有出现。此时次流核虽然也是分布在主流核的两侧，但在两侧出现的次数相当；在垂直方向上，次流核分布在 200 km 以浅。

通过比较不难发现，垂向分辨率不同并没有改变流核的空间分布。1）流核出现在水平方向范围均为 140～280 km，在垂直范围均为 200 m 层以浅。2）主流核出现位置大致相同，均在 200～240 km 附近的陆坡区域。

数据垂向分辨率对流核空间分布的主要影响有以下 3 点。1）次流核的个数：高分辨率数据对应的次流核个数有显著增加。2）次流核的水平位置分布：低分辨率数据对应的次流核大部分集中在主流核西侧的陆架区域，只有少量出现在主流核东侧；而高分辨率数据对应的次流核在主流核两侧的分布概率相近。3）东侧次流核的垂向范围：在主流核的东侧，低分辨率数据对应的次流核大都位于 50 m 以浅，而高分辨率数据对应的次流核均匀分布在 200 m 以浅的区域。

### 3.3　流结构季节差异的对比

将 49 个航次按季节进行划分，并分别统计 2 种数据分辨率情况下各个季节中各种流核结构出现的次数，计算相应的平均流核个数，有关结果如表 1 所示。

**表 1 低高分辨率数据得到的各个季节内的不同流核个数统计**

Table 1 Number of current cores derived from low and high resolution data in four seasons

| 季 节 | 数据分辨率 | 总航次数 | 单核结构 | 双核结构 | 多核结构 | 平均流核个数 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 春 | 低 | 12 | 6 | 6 | 0 | 1.50 |
| 夏 | 低 | 11 | 6 | 4 | 1 | 1.55 |
| 秋 | 低 | 14 | 5 | 7 | 2 | 1.86 |
| 冬 | 低 | 12 | 9 | 3 | 0 | 1.25 |
| 春 | 高 | 12 | 5 | 5 | 2 | 1.75 |
| 夏 | 高 | 11 | 4 | 4 | 3 | 1.91 |
| 秋 | 高 | 14 | 3 | 8 | 3 | 2.07 |
| 冬 | 高 | 12 | 4 | 7 | 1 | 1.75 |

从表 1 中上半部分可以看出,在低分辨率数据对应的流场中,4 个季节中秋季的平均流核数最多,冬季的平均流核数最少,春、夏两季的平均流核数介于秋冬之间,夏季略大。春季出现单核结构和双核结构的概率均为 50%,没有多核结构出现。夏季 3 种流结构均有出现,其中单核结构出现概率超过了 50%,双核结构出现概率为 36%,多核结构仅出现了一次。秋季是观测次数最多的季节,也是平均流核数最多的季节,平均流核数位 1.86。冬季也没有出现多核结构,单核结构出现概率高达 75%。

从表格下半部分可以看出,在高分辨率数据对应的流场中,秋季平均流核数仍然最多,冬季与春季的平均流核数相同且最少,夏季的平均流核数介于它们之间。这种情况下春季出现了多核结构,但出现比例只有 16%;单核结构与双核结构出现比例相同,均为 42%。夏季 3 种流结构出现比例较为接近,其中单核结构与双核结构均为 36%,多核结构为 28%。秋季平均流核数为 2.07,是平均流核数唯一超过 2 个的季节;双核结构出现比例最高,单核结构与多核结构出现的比例相同。在冬季,双核结构出现的比例也是最大的,而多核结构仅出现过一次。

通过比较可见,随着数据垂向分辨率的增加,各季节平均流核数均有所增加,多核结构在各季节中均有出现。值得说明的是,在低分辨率数据对应的结果中,春季和冬季没有出现多核结构。分辨率增加并没有改变平均流核数的季节次序,即秋季最多,夏季次多,然后是春季与冬季;除了在冬季低分辨率对应的单核结构出现比例最高,而高分辨率数据对应的双核结构出现比例最高外,也基本没有改变 3 种流结构在季节内的相对比例。

## 4 最大流速、流幅、流量差异

流速特别是最大流速、流幅、流量一直是黑潮研究中重要的参量,对于这个特征量的研究贯穿着黑潮研究的全程,也是研究黑潮的重要指标。

### 4.1 最大流速对比

本部分将基于 2 种不同垂向分辨率数据得到的流速分布,对 2000—2011 年期间所有航次的最大流速进行统计分析。各航次最大流速的时间变化如图 7 所示,最大流速的季节平均如表 2 所示。

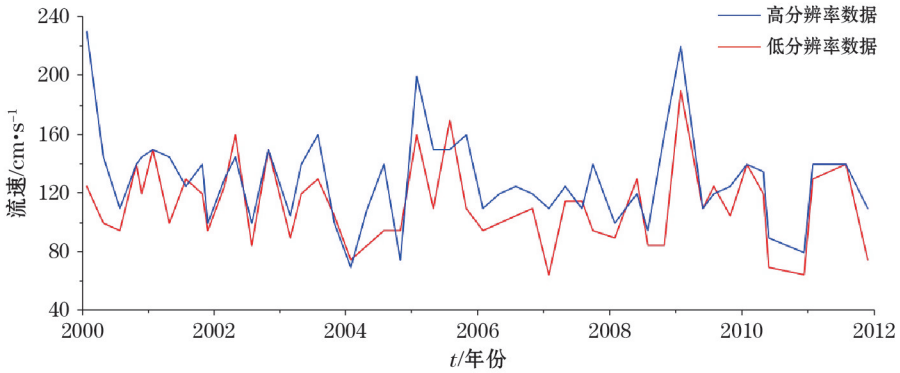


图 7　高、低分辨率数据对应的 PN 断面最大流速的时间序列

Fig. 7　Time series of maximum velocity at PN section derived form low(red line) and high(bule line) resdution data

由图 7 可见，除了极个别航次(2002 年和 2005 年夏季航次)外，高分辨率数据对应的最大流速普遍比低分辨率数据对应的最大流速要略大；2 个时间序列的最小值较为接近，但最大值相差较大。2 条最大流速时间序列的变化趋势大致相同，变化幅度有所差别。高分辨率最大流速的变化幅度明显要高于低分辨率最大流速的变化幅度。

在低分辨率数据对应的流场中，最大流速的平均值为 112.2 cm/s；最大值出现在 2009-01，为 190 cm/s；最小值为 65 cm/s，出现在 2007-01；低分辨率最大流速值多在 80～120 cm/s 范围内围绕 110 cm/s 上下波动。在高分辨率数据对应的流场中，平均最大流速为 129.8 cm/s；最大值出现在 2000-01，高达 230 cm/s；最小值为 70 cm/s，出现在 2004-01。2000—2011 年期间，高分辨率数据对应的最大流速有 3 个航次超过 200 cm/s，分别是 2000-01、2005-01 和 2009-01。

由表 2 可见，对于低分辨率数据对应的最大流速，冬季季节平均值在所有季节中是最大的；秋季季节平均值最小；春季与夏季居中，其中夏季略大。结合图 6，鉴于 2000—2011 年期间最大流速的极大值与极小值都出现在冬季，冬季也是最大流速变动幅度最大的季节。春季最大流速的变动幅度相对较小，除了 2 个航次最大流速小于 100 cm/s 外，其他航次最大流速介于 100～160 cm/s。夏季最大流速的极小值为 85 cm/s。秋季的最大流速值普遍偏小，极大值仅为 150 cm/s。

对于高分辨率数据对应的最大流速平均值，冬季最大、秋季最小的特征保持不变；虽然春季与夏季仍然居中且相差很小，但此时春季略大。与低分辨率数据结果类似，冬季也是最大流速变动幅度最大的季节。其他季节的最大流速均值差异很小，并且各个季节内的最大流速变化幅度也不大，不仅没有大于 200 cm/s 的流速出现，小于 100 cm/s 的流速也少有出现。

通过逐季对比可以看出，2 种垂向分辨率数据得到季节平均最大流速差别较大。高分辨率数据对应的最大流速均显著高于低分辨率数据的相应结果；其中冬季差异最大，差异值高达 22.5 cm/s；夏季的差别最小，但也相差近 10 cm/s。

**表 2　低、高分辨率数据对应的 PN 断面最大流速($cm \cdot s^{-1}$)季平均**

Table 2　Seasonal average of maximum velocity($cm \cdot s^{-1}$) at PN section derived from low and high resolution data

| 数据类型 | 春 | 夏 | 秋 | 冬 |
|---|---|---|---|---|
| 低分辨率数据 | 110.0 | 115.9 | 105.0 | 119.6 |
| 高分辨率数据 | 127.9 | 125.0 | 124.6 | 142.1 |

## 4.2　流幅对比

沿用前人黑潮流幅研究中选取平均流速大于或等于 40 cm/s 的主流宽度作为流幅这一标准[3,15]，计算

了 2000—2011 年间黑潮 PN 断面所有航次的流场，各航次在不同分辨率下的流幅值时间序列如图 8 所示。

由图 8 可见，2 种数据对应的黑潮流幅时间序列曲线变化趋势相似，并且流幅大小也相差不大。2 个时间序列均在 45 n mile 附近变化，高分辨率数据对应的流幅比低分辨率数据对应的数值要略大一些。

在 2000—2011 年期间，低分辨率数据对应的 PN 断面流幅平均值为 44.4 n mile，高分辨率数据对应的平均值为 45.3 n mile，两者相差 0.9 n mile。低分辨率数据对应的流幅最小值为 30.8 n mile，出现在 2006-01；而高分辨率数据对应的最小流幅为 28.1 n mile，出现在 2005-01。2 种数据对应的流幅最大值均出现在 2007-07，分别为 64.8 和 70.0 n mile。

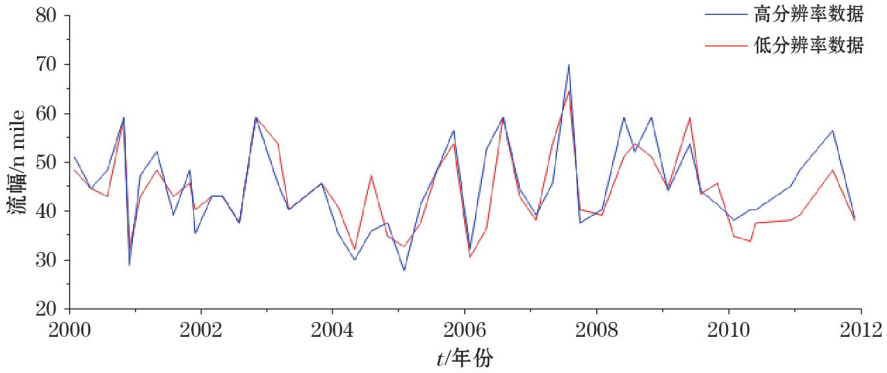


图 8 高、低分辨率数据得到的 PN 断面流幅的时间序列

Fig. 8 Time series of current width at PN section derived from low(red line) and high(blue line) resolution data

2 种数据对应的流幅季节平均值统计结果如表 3 所示。在低分辨率数据对应的结果中，夏季流幅均值是所有季节中最大的，其次是秋季与春季，冬季的流幅均值最小。不仅 2000—2011 年期间流幅最大值出现在夏季，而且夏季仅有一个航次的流幅值低于 40 n mile，流幅均值高达 48.5 n mile。秋季的流幅变化幅度较大，变化范围为 30～60 n mile，流幅均值为 45.0 n mile。与秋季类似，春季流幅变化范围较大，流幅均值为 43.4 n mil。冬季是平均流幅最小的季节，流幅均值仅为 40 n mile；在研究时段内，冬季仅有一个航次的流幅大于 50 n mile。

**表 3 低、高分辨率数据得到的 PN 断面流幅(n mile)季平均**

Table 3 Seasonal average of current width(n mile) at PN section derived from low and high resolution data

| 流 幅 | 春 | 夏 | 秋 | 冬 |
|---|---|---|---|---|
| 低分辨率流幅 | 43.4 | 48.5 | 45.0 | 40.9 |
| 高分辨率流幅 | 45.5 | 48.1 | 45.7 | 41.3 |

高分辨率数据对应的流幅季节平均值也是夏季最大，其次是秋季与春季，冬季最小。此时夏季的平均流幅为 48.1 n mile。与夏季相比，秋季小于 40 n mile 的流幅值多有出现，平均流幅为 45.7 n mile。春季和冬季的平均流幅值分别为 45.5 和 41.2 n mile。

总体来看，2 种数据对应的流幅季节平均值相差不大。从数值上来看，春季是相差最大的季节，差值也仅为 2.1 n mile。其他 3 个季节的差值均在 1.0 n mile 以内。并且 2 种数据得到的流幅季平均的大小顺序是相同的。不同之处是，在春季、秋季以及冬季，高分辨率流幅的平均值大于低分辨率流幅的平均值。而在夏季，低分辨率数据的结果要比高分辨率数据的结果大。

### 4.3 流量对比

鉴于 2000—2011 年期间黑潮 PN 断面在 126°24′E 西侧的站点位置较为稳定，并且 126°24′E 以东的流量很小，本文在计算黑潮流量时，选取的是 126°24′E 以东的全深度范围。2 种垂向分辨率数据对应的流量

时间序列如图 9 所示，季节平均的流量统计情况如表 4 所示。

由图 9 可见，在 2000—2011 年期间，2 种垂向分辨率不同的数据得到的黑潮 PN 断面流量时间序列重合率很高，变化趋势相似，而且在有差别的航次相差数值也很小。这说明数据垂向分辨率不同对流量几乎没有影响。

更为具体地，在 2000—2011 年期间，所有航次的低分辨率数据对应的流量均值为 21.8 Sv，所有航次的高分辨率数据对应的流量均值为 21.9 Sv，两者之间仅相差 0.1 Sv。低分辨率数据对应的流量的最大值为 29.1 Sv，出现在 2009-04，此时高分辨率数据对应的流量也为 29.1 Sv。而高分辨率数据对应的流量的最大值为 29.6 Sv，出现在 2002-01，此时低分辨率数据对应的流量为 29.0 Sv，两者相差 0.6 Sv。2 种数据对应的流量最小值均出现在 2006-04，前者为 13.2 Sv，后者为 13.7 Sv，相差 0.5 Sv。

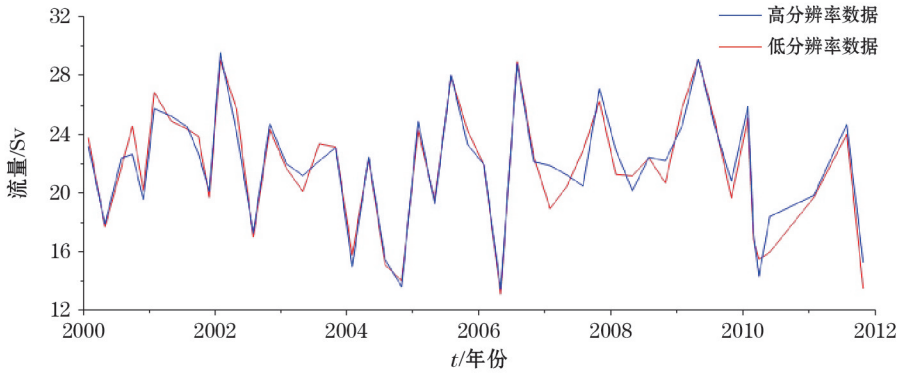


图 9　高、低分辨率数据得到的 PN 断面流量的时间序列

Fig. 9　Time series of volume transport at PN section derived from low(red line) and high(blue line) resolution data

**表 4　低、高分辨率数据得到的 PN 断面季节平均流量(Sv)**

Table 4　Seasonal average of volume transport(Sv) at PN section derioed from low and high resolution data

| 流量类型 | 春 | 夏 | 秋 | 冬 |
|---|---|---|---|---|
| 低分辨率流量 | 21.0 | 22.4 | 20.9 | 22.9 |
| 高分辨率流量 | 20.6 | 22.8 | 21.4 | 23.1 |

从表 4 可见，低分辨率数据对应的结果是冬季流量最大，其次是夏季与春季，秋季最小。结合图 8，2000—2011 年期间流量的极大值(29.1 Sv)与极小值(13.2 Sv)均出现在春季，而流量的平均值为 21.0 Sv。冬季流量的平均值为 22.9 Sv，最小值为 15.8 Sv，最大值为 29.1 Sv。夏季流量的平均值为 22.4 Sv，最小值为 15.5 Sv，最大值为 29.0 Sv。低于 20 Sv 的流量在秋季多次出现，季节平均值较小，只有 20.9 Sv。

在高分辨率对应的季节流量平均值中，冬季最大，其次是夏季与秋季，春季流量最小。冬季流量大于 25 Sv 的航次显著多于其他季节，其季节平均流量为 23.1 Sv。夏季航次的流量相对变化较小，季节平均值为 22.8 Sv。秋季仅有一个航次的流量超过了 25 Sv，季节平均值为 21.4 Sv。春季存在较多流量小于 20 Sv 的航次，春季的季节平均流量是所有季节中最小的，为 20.6 Sv。

整体上看，2 种数据得到的黑潮流量季节平均值相差很小，所有季节的差异均在 0.5 Sv 以内。除春季外，高分辨率流量季节平均值要比低分辨率的大，而在春季则相反。

## 5　结　论

通过对比 2 种 CTD 数据计算得到的黑潮 PN 断面的流结构、最大流速、流幅以及流量，分析得出，数据垂向分辨不同对计算黑潮流场结构、平均流核数以及平均最大流速有较大影响：

1)2种数据得到的黑潮PN断面流场的细微结构有3种典型的差异:高分辨率数据对应的流场流核区的流速比低分辨率的大;高分辨率数据对应流场的流核数比低分辨率的多;2种数据对应流场中的流核位置不同。

2)2种数据得到的流核结构存在较大差别。低分辨率数据对应的流场中单、双、多三种流结构出现的概率分别为53%,41%与6%。高分辨率数据对应的流场中单、双、多三种流结构出现的概率分别为33%,49%与18%。

3)虽然2种数据得到的季节平均流核数都是秋季最多,夏季次多,然后是春季与冬季。不同的是高分辨率数据的结果中春季与冬季的平均流核数相同,而低分辨率数据的结果中春季的平均流核数比冬季略大。

4)2种数据对应的最大流速存在显著差别。高分辨率数据对应的最大流速平均值为129.8 cm/s,低分辨率数据对应的最大流速平均值112.2 cm/s;2种数据对应的最大流速季节平均值虽然均是冬季最大,秋季最小,春季与夏季居中,但是高分辨率数据的最大流速季节间差异较大。

数据垂向分辨率不同对东海黑潮的流量几乎没有影响,对平均流幅影响很小:

1)2种数据得到的黑潮PN断面的流幅差异较小:低分辨率数据对应的流幅平均值为44.4 n mile,高分辨率数据对应的流幅平均值为45.3 n mile;季节平均流幅均为夏季最大,其次是秋季与春季,冬季最小。

2)高分辨率数据得到的黑潮平均流量为21.9 Sv,低分辨率数据得到的黑潮平均流量为21.8 Sv,两者之间几乎没有差异。

## 参考文献(References):


[1] GUAN B X. A preliminary study of the distribution and variation of the velocity and volume transport of the Kuroshio and their relation to their topography[J]. Oceanologiaet Limnologia Sinica, 1964, 6(3): 229-251. 管秉贤. 黑潮流速流量的分布,变化及其与地形关系的初步分析[J]. 海洋与湖沼, 1964, 6(3): 229-251.

[2] GUAN B X. Some preliminary results of the kuroshio research[J]. Marine Sciences, 1980(4): 34-37. 管秉贤. 我们对黑潮研究的若干初步结果[J]. 海洋科学, 1980(4): 34-37.

[3] GUAN B X, LIU J P, FAN J Q, et al. Variations of the surface velocity of the Kuroshio on section G in the East China from 1956-1979[J]. Chinese Science Bulletin, 1979, 21: 990-994. 管秉贤, 刘举平, 范继铨, 等. 东海G断面上二十年(1956-1975)来黑潮表层流速的变动[J]. 科学通报, 1979, 21: 990-994.

[4] TANG Y X, LIN K, TOMOSI T. Analysis of some features of volume transport of the Kuroshio in the East China Sea[J]. Oceanologica et Limnologia Sinica. 1994, 25(6): 643-651. 汤毓祥, 林葵, TOMOSI T. 关于东海黑潮流量某些特征的分析[J]. 海洋与湖沼, 1994, 25(6): 643-651.

[5] YUAN Y C, ENDOH M, ISHIZAKI H. A study of the Kuroshio in the East China Sea and the currents east of the Ryukyu Islands[C]//Essays on the Investigation of Kurishio (3). Beijing: China Ocean Press, 1991: 220-234. 袁耀初, 远藤昌宏, 石崎广. 东海黑潮与琉球群岛以东海流的研究[C]//黑潮调查研究论文集(三). 北京: 海洋出版社, 1991: 220-234.

[6] YUAN Y C, PAN Z Q, KANEKO J, et al. Variability of the Kuroshio in the East China Sea and currents east of the Ryuku Islands[C]//Essays on the Investigation of Kurishio (5). Beijing: China Ocean Press, 1993: 279-297. 袁耀初, 潘子勤, 金子郁雄, 等. 东海黑潮的变异与琉球群岛以东海流[C]//黑潮调查研究论文选(五). 北京: 海洋出版社, 1993: 279-297.

[7] CHEN H X, YUAN Y L, HUA F. Multi-core structure of the Kuroshio at G-PN Section in the East China Sea[J]. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(6): 730-737. 陈红霞, 袁业立, 华锋. 东海黑潮主段G-PN断面的多核结构[J]. 科学通报, 2006, 51(6): 730-737.

[8] KAGIMOTO T, YAMAGATA T. Seasonal transport variations of the Kuroshio: An OGCM simulation[J]. Journal of Physical Oceanography, 1997, 27(3): 403-418.

[9] CHEN H X. Analysis of current structure and application of several computing method at PN Section of the Kuroshio in the East China Sea[D]. Qingdao: The First Institute of Oceanography, 2002. 陈红霞. 中国东海PN断面附近区域黑潮流结构分析与几种计算方法的运用[D]. 青岛: 国家海洋局第一海洋研究所, 2002.

[10] LIU Y G, YUAN Y C. Variability of the Kuroshio in the East China Sea in 1992[J]. Acta Oceanologica Sinica(in Chinese), 1998, 26(6): 1-11. 刘勇刚, 袁耀初. 1992年东海黑潮的变异[J]. 海洋学报(中文版), 1998, 26(6): 1-11.

[11] LIU Y G, YUAN Y C. Variability of the Kuroshio in the East China Sea in 1993 and 1994[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1999, 18(1):

17-36.

[12] LIU Y G, YUAN Y C. Variability of the Kuroshio in the East China Sea in 1995[J]. Acta Oceanologica Sinica, 1999, 18(4): 459-475.

[13] CHU P C. P-vector method for determining ocean circulation from hydragraphic date[J]. Ocean Modelling, 1994, 114: 23-26.

[14] CHEN H X, LIU N, YUAN Y L. Study on the selection of level of no motion for calculating geostrophic flow in the East China Sea Kuroshio Area[J]. Advances in Marine Science, 2007, 25(4): 383-390. 陈红霞，刘娜，袁业立. 东海黑潮地转流计算中的零流面选取问题[J]. 海洋科学进展，2007，25(4): 383-390.

[15] TANG Y X. Regional variation analysis of the Kuroshio[J]. Acta Oceanologica Sinica(in Chinese), 1995, 17(4): 22-29. 汤毓祥. 东海黑潮区域性变异的分析[J]. 海洋学报(中文版)，1995，17(4): 22-29.

# The Influence of CTD Data Resolution on Calculating Geostrophic Flow of Kuroshio

KONG Bin[1,2], CHEN Hong-xia[2], YUAN Ye-li[2]

(1. *Geomatics College*, *Shandong University of Science and Technology*, Qingdao 266590, China;
2. *The First Institute of Oceanography*, *SOA*, Qingdao 266061, China)

**Abstract**: Based on the CTD data with high and low resolutions at PN section provided by Japanese Oceanographic Data Center, the current velocity during 2000 to 2011 are calculated with dynamic height method. The influence of vertical resolution of data on calculating the geostrophic flow of Kuroshio is analyzed by comparing the structure, maximum velocity, flux and width of the current observed by 49 cruises. The results show that: vertical resolution of data has little influence on flux and minor influence on the location of current core, but great influences on current core number and maximum velocity. The differences in current structure derived from the two different resolution data are as follows: the current structure based on high resolution data has stronger velocity in the core area and more current cores than the one based on low resolution data; single core structure occurs more frequently in the current structure of low resolution data and double core structure has the highest occurring frequency in the current structure of high resolution data.

**Key words**: the East China Sea; Kuroshio; PN section; current structure; seasonal variation

**Received**: November 2, 2015