

关于长江冲淡水路径的若干问题*

乐 肯 堂

(中国科学院海洋研究所)

自从 1980 年 6 月中美关于长江口及其邻近陆架海区的沉积动力学联合考察开始以来,关于长江径流入海后路径的时空变化问题,引起了中外学者的广泛兴趣。

在这次中美联合考察之前,作者曾根据 1980 年以前的实测水文资料和余流资料,分析了洪水期本区的盐度分布和海流结构¹⁾。本文目的是根据中美联合考察所得到的资料和历史资料,对长江冲淡水实测路径的性状作进一步的分析,并拟对影响长江冲淡水复杂多变路径的若干动力学问题作一初步分析。

一、长江冲淡水主体的实测路径

在长江径流的洪水期间,其冲淡水盐度分布的一个明显特征是它的舌轴(以下简称“盐轴”)指向济州岛方向。这一特征先由宇田道隆在 1936 年注意到,但自毛汉礼等^[1]重新研究以来,引起了人们极大的兴趣。在“前文”中,得出了下列结果:(1)自五十年代末以来,多数观测表明,在长江径流洪水期,冲淡水各层的盐轴均呈现转向东北的现象;但也有少数观测结果却显示,在某些年月,盐轴则向东或东南方向延伸。(2)冲淡水盐轴方向的变化与长江月平均流量的大小有密切关系,也就是说,可以用长江的月平均径流量作为判断长江冲淡水主体是否向东北转向的初步指标[即存在着一个“临界径流量”,其量值约为 $(3.6-4) \times 10^4 \text{m}^3/\text{s}$]。(3)本区的盐舌分布在某些时候具有“双峰特征[或可称为“双型分布”(bimodal distribution)]。

为了进一步证实上述结果,作者对 1980 年 6 月和 1981 年 8 月中美联合考察中“海洋学家”号、“实践”号及“向阳红九”号等船所获得的温盐度资料作一简要分析。

1981 年 8 月的表层盐度分布和温度分布见图 1b (图中实线表示盐度,虚线表示温度)。从此图可以清楚地看出,冲淡水的盐舌轴线从出口处的东南向转向东北向。尽管在远岸段,冲淡水的水体仅仅占据薄薄上层(其厚度约 5—10m),但在近岸段中,冲淡水却是整个水层的主体。由于本月的月平均径流量约为 $4.4 \times 10^4 \text{m}^3/\text{s}$,按照前文分析结果,它明显地超过了临界径流量的值,因此图 1b 中出现的盐轴向左转向的现象是正常的。当然,此图也显示,部分冲淡水有向东扩展的趋向,从而表明了盐度的双型分布,但它不是冲淡水的主体。此外,从图中温度和盐度的分布配置情况还可以看出,在近岸段,来自南部的

* 中国科学院海洋研究所调查研究报告第 1270 号。

本文基本内容曾在“东海及其他陆架沉积作用国际学术讨论会”(杭州,1983 年)上报告。

1) 乐肯堂,1984. 长江冲淡水洪水期盐度分布和海流结构的初步分析。(本论文中称为“前文”)渤海、黄海、东海调查研究报告。中国科学院海洋研究所编,第 151—163 页。

高温水舌对冲淡水水舌的形态及其转向有明显的影晌。

现从图 1a 来分析 1980 年 6 月冲淡水的路径。该图是根据该月中美联合考察中“海洋学家”号第一航次的盐度资料绘制,但图中虚线则是根据其他考察船的资料补上的,

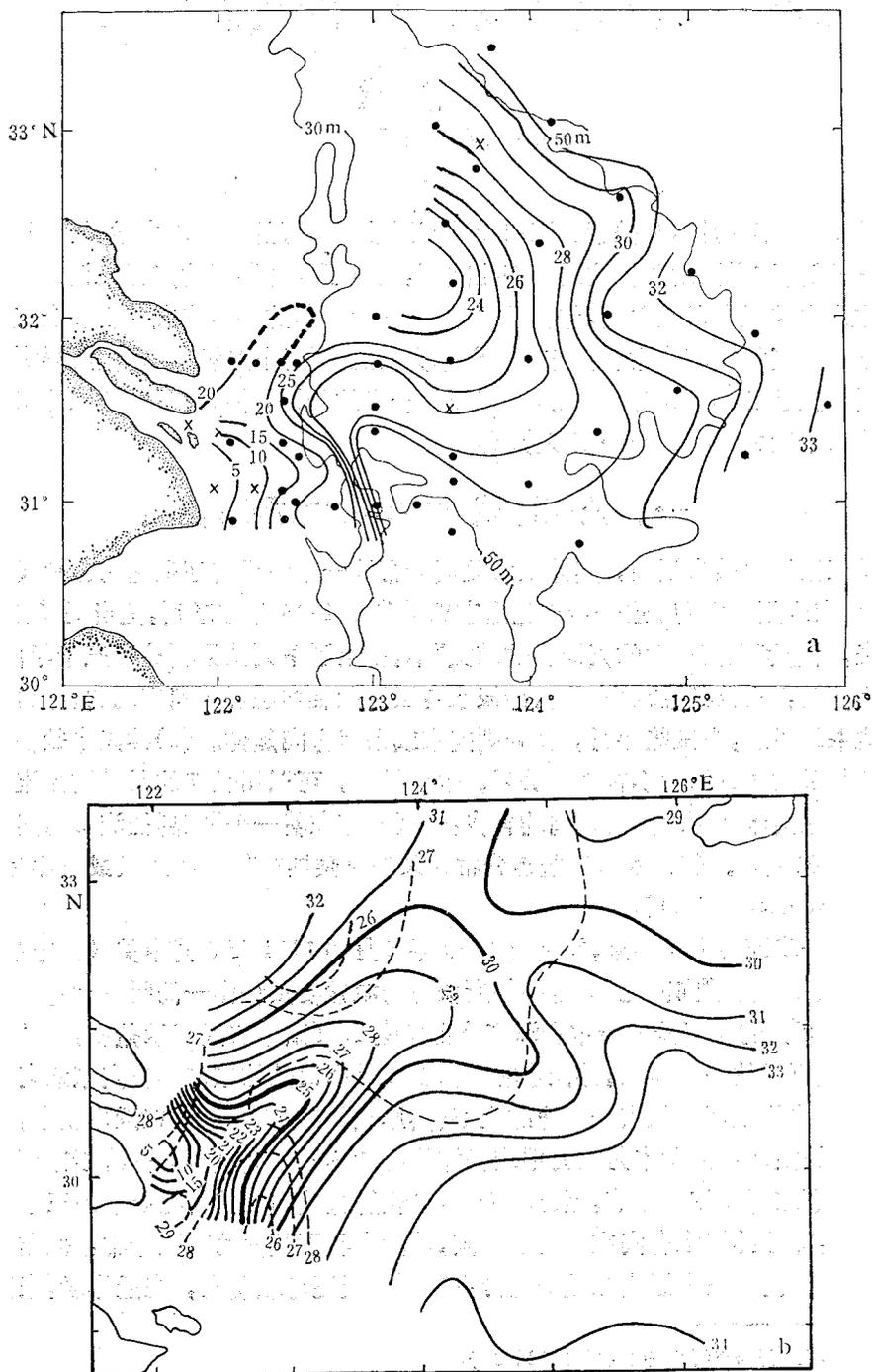


图 1 长江冲淡水区表层温盐度分布图

a. 1980 年 6 月盐度分布; b. 1981 年 8 月温盐度分布

因此本图与文献[5]中图5略有不同。如果不考虑虚线部分,粗看起来,图中近岸段的盐舌并没有明显地呈现向东北转向的迹象,它似乎无助于阐述冲淡水的转向现象。但是,我们仍然可以从中发现能证实上述某些结果之踪迹。图中表明,在观测期间,本区出现了两个低盐区。一个低盐区是南港口外的冲淡水水舌,它是一个较小的向东的盐舌,显然,它是由南港所排出的径流形成的。问题在于,为什么在长江口外的东北方向上又出现了另一个低盐区,此低盐水又来自何处?根据大通站的实测资料,1980年6月的长江平均径流量为 $3.8 \times 10^4 \text{m}^3/\text{s}$,它已大于上述临界径流量之值。因此,这一径流量应当使口门外的长江冲淡水有较强的盐舌,其舌轴应具有转向东北的趋向。又根据以往关于长江口汉道径流量分配的资料,一般说来,从此港流出的径流量约占长江总径流量的60—65%¹⁾,由此可以推测,在这次考察期间,大部分径流仍然是从北港入海的。也就是说,在北港外应当还有一个强烈的且范围比南港外更大的盐舌。然而这样的盐舌在图1a中为什么没有出现呢?我们认为,这可能是由于下述原因。第一,象1981年8月那样,在这次考察期间海区的东南方出现了一股强大的高盐水(即台湾暖流的前沿)。这股高盐水的楔入,很可能把北港口外较强的冲淡水舌向西北方向推移。这一点,通过对比图1a与图1b即可看出。在图1b中,强大的冲淡水盐舌由于受到外海水的楔入而产生变形。1981年8月的长江月平均径流量比1980年6月大 $6000 \text{m}^3/\text{s}$,因此1980年6月北港外的冲淡水舌应比1981年8月为弱,它就完全有可能被外海的高盐水所切割,也可能被推移到 32°N 以北, 123°E 以西的区域。因为1980年6月的考察在该海区没有设置测站,结果就造成了图1a中东北方向出现孤立的低盐区的假象。第二,在北港口外测站作业时可能遇涨潮,在这种情况下就很难观测到低盐水舌。第三,1980年6月同时进行考察的三条船未能做到同步观测,再加上近岸区潮流甚大,使得观测结果受到影响。

为了进一步证实上述推测,我们补充了这次中美考察期间其他调查船所得的资料,即图中虚线所示。这样,我们可以清楚地看到,长江径流从北港口出海后所形成的冲淡水水舌实际上是急剧向东北方向转向的,这从20‰等盐线的分布可以明显地看出来。但是由于外海水(可能是表征台湾暖流的高盐水)的侵入,这一盐舌表现得更为狭窄,而在远岸段则出现了一个相当大的低盐区。由于观测资料的限制,我们还不能完全肯定,图中北港口外东北方向上的低盐中心之低盐水是否完全来自长江冲淡水。但是,可以认为,来自北港口的冲淡水是这个区的低盐水的主要来源之一,当然也不能排斥其中部分低盐水可能来自“黄海沿岸流”。

为了分析洪水期冲淡水区的海流结构,前文收集了本区的实测海流资料共92个站次(1959—1976),绘制了六个层次(5m, 10m, 20m, 30m, 40m及底层)的实测余流图,通过分析,获得了如下的结果:(1)在长江的洪水期,冲淡水实测余流场的基本方向指向济州岛方向;也就是说,冲淡水主流的基本方向与其表层盐舌的主轴方向大体一致。(2)冲淡水的近岸段是一个高速的流动区,其基本流向不是沿着等盐线而是与盐舌的走向大体一致。在长江的口门附近,实测最大余流流速,表层可达 $103 \text{cm}/\text{s}$,底层亦可达 $35 \text{cm}/\text{s}$,并且其方向均为偏向东北;而在表层高速流动区的两侧,显示有流速不大的逆流存在。这一切

1) 沈焕庭、郭成涛、朱慧芳、徐海根、陈邦林、恽才兴,1980。长江河口最大浑浊带的变化规律及其成因探讨。(会议交流稿)

表明,在冲淡水的近岸段,主流具有射流性质(根据文献[4],可称为射形流),其厚度大致达到底层。

现在可以根据上述结果对冲淡水的实测路径作初步的比较分析。由于实测海流资料相当贫乏,所以单纯依靠本区现有的实测流速资料来确定冲淡水主流的路径是极其困难的。但是,由于上述结果指出夏季本区冲淡水实测主流的基本方向与表层冲淡水盐轴方向大体一致,故可把盐轴近似地作为冲淡水主体的运移路径。图2绘出了实测的盐轴曲线,未标年份的曲线取自王康璿等的文章¹⁾,它们表示长江冲淡水4至9月的平均运移路径,而其余的曲线则是根据有关年份的实测盐舌分布图绘制的。

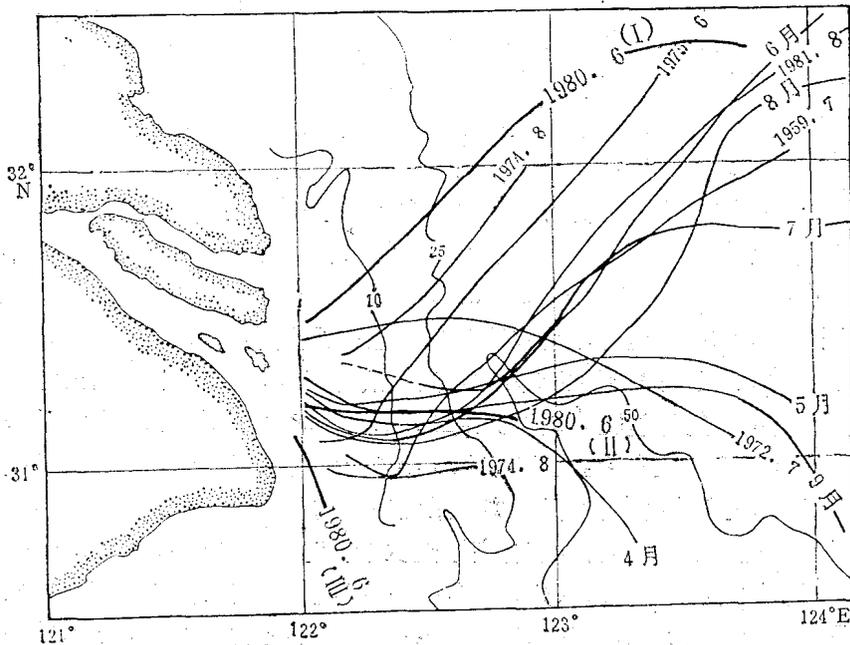


图2 依据盐度资料得到的长江冲淡水路径

从图2可以看出,长江冲淡水的实测路径有如下特征。第一,就各月平均路径而言,4,5,9月的路径偏向东南,而夏季6,7,8月的路径则转向东北,其转向位置均在近岸段的范围内。第二,就每个年月的实测路径而言,即使在夏季,冲淡水的路径性状也具有多种形态。在文献[2]中已经指出,可以把实测的向东北转向的路径大致分为三种类型,即“旋即转向型”、“急剧转向型”和“徐缓转向型”。从图2可看出,1974年8月在北港口外形成的冲淡水路径具有旋即转向的趋势,而且随着路径距离的增加,其转向角也增加(由于“双峰”即“双型分布”现象的出现,因而同时在南港外也有一个相当弱的基本上向东的盐舌,其盐轴也绘于图2)。图2中1975年6月和1959年7月的路径可以认为属于“急剧转向型”。这两条路径的特征是,在口门附近是向东南,而在离岸的某一距离处(所谓“转向点”处)它们又突然转向东北。1981年8月路径曲线的转向过程是徐缓的,属于“徐缓型”。第三,上述各种形态的路径,显然是由于多种因子(例如,长江径流量的大小,长江口

1) 王康璿、苏玉芬、蔡伟章、于洪华,1979。长江径流及其冲淡水区的水文特征。海洋实践3: 8—20。

门附近各汉道径流量的分配,沿岸流或台湾暖流的强弱与位置以及风场等)共同作用的结果。而首要因子却是径流量及其在各汉道的分配。实测资料表明,一般说来,径流量越大,冲淡水路径向左转向的趋势就越强烈,否则转向过程就显得较为徐缓,而当径流量小于其“临界流量”时,冲淡水就不出现转向。口门处汉道径流量的分配,对冲淡水路径的性状也有很大的影响。一般地说,如果径流主要从北港口流出,那么大的径流量将使北港外的冲淡水形成旋即转向的路径;如果大径流量主要从南港排出,那么就有可能在南港外形成急剧转向的路径。除了这两种情况外,冲淡水路径的转向方式将是徐缓的。

1980年6月“海洋学家”号第一航次所得到的资料(见图2)表明,长江冲淡水的路径似有三条:从北港出口的冲淡水形成了旋即向东北转向的路径;从北槽出口的冲淡水出现向东的路径;从南槽出口的冲淡水则顺着南槽航道的走向而向东南。这样复杂的冲淡水路径显然是在特定条件下形成的,简单说来,它与长江口门附近的流速分布(或者说长江径流量在各汉道的分配)及外海水入侵的强度密切相关。

为了说明上述三条路径的特征,有必要对口门处的潮流与余流结构作一简要分析。表1给出了1980年6月长江口门附近垂直平均潮流和表层余流值。从此表可以看出:(1)观测期间北港口正值大潮汛,落潮流与余流的合成流速可达208.8cm/s,流向为105°,涨潮时合成流速为19cm/s,流向则为196°。这样,根据前面的分析,落潮时口门附近的冲淡水将出现旋即转向的特征,由此形成了路径I。尽管涨潮时流向变为196°,但因合成流速较小,且落潮历时要比涨潮历时长得多,所以,它对口外路径的影响不太大;而落

表1 1980年6月长江口门附近垂直平均潮流和表层余流

位置	站号	类型	落潮流		涨潮流		$v_{落}/v_{涨}$	表层余流	
			流向	流速	流向	流速		流向	流速
北港	8001	大潮	107	132.0	293	87.6	1.5	102	77.0
北槽	8010	中潮	99	122.6	286	108.4	1.2	126	13.0
南槽	8003	中潮	103	96.7	316	99.8	0.97	80	41.0

注:流速(cm/s),流向(°)。

潮时冲淡水的流量则剧增。(2)由表可知,观测期间北槽口是中潮期间,余流不大,仅13cm/s,然在落潮时,其合成流速也不小,为134.3cm/s,流向为102°。虽然其流向大致与北港口相同,但其合成流速不及北港口的三分之二。尽管这里落潮历时比涨潮历时长,但在涨潮时,合成流速为96.3cm/s,而合成流向为257°。这就表明,涨潮流对从北槽出口的径流有巨大影响。由此可以推断,如果说从北港出口的流量大于其本身的“临界流量”的话,那么从北槽出口的径流量充其量只能接近它自己的临界值。这就可说明为什么路径II既不向东北转向也不向东南偏转。(3)南槽口外则属于第三种情况。落潮时合成流速约为135.4cm/s,流向为96°,涨潮时的合成流向和流速为200°和80.0cm/s。在这里,虽然落潮时的合成流速量值与北槽差不多,但涨潮历时与落潮历时非常接近,从而使长江径流通过南槽下泄的流量远小于通过南槽的临界流量,所以在南槽口外冲淡水的流动具有地转性质,从而形成了图中的路径III。

上述讨论清楚表明,长江冲淡水实测路径的时空变化是极其复杂的,这就给探讨其路

径的动力学机制带来了巨大的困难。

二、路径机制动力学的若干问题

长江冲淡水路径变化机制的动力学问题,尽管自 1980 年以来,已有不少文章^[1,2,4]对它进行了讨论,但是事实上仍有许多问题值得继续探索。本节将就其中的若干问题作进一步讨论。

1. 临界径流量 作者在前文中曾分析了长江月平均径流量与长江冲淡水路径变化的关系,并由此得出了“临界径流量”的概念。也就是说,当长江的月平均径流量超过其“临界径流量”(约 $(3.6-4) \times 10^4 \text{m}^3/\text{s}$)时,冲淡水的路径将会向东北方向转向,否则这种转向现象不会出现。现在看来,由于长江口门有三个汉道,仅用一个临界径流量的概念远不能阐明象 1980 年 6 月第一航次中测得的三条路径现象。也就是说,如果临界径流量的概念是符合实际的话,那么,看来有必要估算出每个汉道(即北港、北槽和南槽)各自的**临界径流量**。另一方面,长江月平均径流量的概念在时间尺度上也太长了,因为 1980 年 6 月三个航次的观测表明,长江冲淡水路径的时间变化尺度至多为一星期^[7]。

临界径流量的概念之重要性在于,径流量大于临界径流量之后,冲淡水中的主流就具有射流(或称射形流)的性质,这种情况与大多数河口外的环流具有准地转性质有很大的不同。如果我们能确定长江口区各汉道的临界径流量值,并且能够获得长江的“周平均径流量”,那么就会对长江冲淡水路径的时空变化有更深入的了解。

2. 地形效应 在文献[2]中,作者用地形波模式,对长江冲淡水几种路径的主要特征进行了解释。问题是,模式是正压的,也就是说,只有当冲淡水中的主流感觉到地形存在时,这项因子才会直接起作用。幸而在长江冲淡水的近岸段(尤其在北港口外),落潮历时比涨潮历时长得多,这一条件在大多数情况下是成立的,所以此模式在多数情况下仍然可以接受。但是,如能在模式中同时包含底形和斜压效应,那么这样的模式将是很有意义的。

值得指出的是,在袁耀初等的数值模式^[3]中考虑了上述的底斜效应,这是令人感兴趣的。可惜的是,该模式的网格尺度太大,使我们对此问题得不到更多的信息,但是由于底斜效应项是以 $\int_0^H ZJ(H, \rho) dZ$ 的形式出现的,当 H (水深)为常量时,这一效应也就不起作用(式中 J 表示 Jacobi 算子)。所以这一项结果也表明,底形的变化是冲淡水转向的重要因子。

3. 风应力和底应力效应 从 1963 年至今,关于风应力对长江冲淡水转向的作用,已有过不少的估算^{[1,2],[1,3]},这些估算表明,在夏季,月平均风应力对长江冲淡水转向的作用是可以忽略的。但底应力对长江冲淡水路径的作用,似乎研究得还不多。

作者在“长江冲淡水路径问题的初步研究(II)风场对路径的作用”一文中较详细地讨论了这个问题,结果表明,除了象台风这样的特殊天气形势外,一般说来,夏季的局地风场不是长江冲淡水路径转向的主要机制。至于底应力涡度对于冲淡水路径的效应,则是一

1) 乐肯堂,1984。长江冲淡水路径问题的初步研究(II)风场对路径的作用。(待刊稿)

2) 见第 221 页脚注 1)。

项需要加以考虑的因子，尽管它大约只有底形效应的 20%。当然，迄今为止尚无一个为大家所接受的底应力计算公式，这一项结果尚待进一步改进，但上述结果仍然支持了底形效应是冲淡水转向的主要机制这一论点。

作者认为，考察台风过境对长江冲淡水的结构及路径的作用，是一个在理论上和实践上迫切需要解决的问题。

4. 沿岸流及台湾暖流的作用 众所周知，在夏季，台湾暖流从北纬 27° 起，沿着台湾海峡方向在闽、浙海岸外北上，当它到达长江冲淡水远岸段时，流速已逐渐减弱为 20—10cm/s；与此同时，在长江冲淡水的近岸段（即台湾暖流的左侧）有一支北上的沿岸流，通称为东海沿岸流¹⁾。作者在前文对同步观测资料的初步分析表明，在长江冲淡水近岸段的南部，这支向北的沿岸流的底层流速较强，且其性质与远岸段中的台湾暖流明显不同。尽管东海沿岸流是一支狭窄的海流，而台湾暖流又位于冲淡水的远岸段，但是这两支流动仍然有可能促使冲淡水改变方向，尤其因为这支沿岸流的垂直平均流速在长江口附近并不很小。

因为此问题较为复杂，迄今还没有见到这方面的动力学的研究报告。尽管袁耀初等 (1982)^[3] 的数值模式已经表明北上的台湾暖流对长江冲淡水转向的作用非常有限，但是，作者认为对此问题进行动力学的研究仍然是必要的。此外，从我们所作的初步分析得知，沿岸流对河口外射形流的作用，似应分两种情况来考察。在正压情况下，问题并不很复杂，初步分析表明，一般说来，沿岸流对河口外射形流路径的影响是很有限的，这同上述数值模式的结果基本一致。对于斜压情况，问题要复杂得多，我们尚在作进一步的分析。

三、结 语

从本文讨论中可以看出，长江冲淡水路径的时空变化是一个非常复杂的课题。本文的分析表明，1980 年 6 月所观测到的长江冲淡水“三型分布”路径，是长江河口区三个汉道（北港、北槽、南槽）不同的下泄径流量、强潮流及沿岸流（包括东海沿岸流和台湾暖流）在复杂的河口区和内陆架的地形（包括岸形）上相互作用的结果。这些是长江冲淡水近岸段的路径变得不稳定的主要原因。

为了进一步弄清长江冲淡水近岸段路径的时空变化，必须获得长江口区三个汉道口的径流量资料及洪水期冲淡水区每十天的大面观测资料以及若干点的长期测流资料。其次，正如本文所论证的，在夏季，平均风场对冲淡水路径变化的作用很小，沿岸流对它的作用又有限，再加地形又相对稳定，因而考察长江口区径流与潮流的相互作用问题就变得十分重要（当然，在理论上也很有意义）。再则，从动力学上看，建立一个含有底形变化效应的非线性斜压模式，以考察底斜效应对射形流路径的作用仍然非常必要。

参 考 文 献

- [1] 毛汉礼、甘子钧、兰淑芳, 1963. 长江冲淡水及其混合问题的初步探讨. 海洋与湖沼 5(3): 183—206.
- [2] 乐肯堂, 1984. 长江冲淡水路径问题的初步研究 (I) 模式. 海洋与湖沼 15(2): 157—167.
- [3] 袁耀初、苏纪兰、赵金山, 1982. 东中国海陆架海流的单层模式. 海洋学报 4(1): 1—9.

1) 管秉贤, 1978. 东海海流系统概述. 东海大陆架论文集. 中国科学院海洋研究所编, 128—133 页.

- [4] 管秉贤, 1962. 有关我国近海海流研究的若干问题. *海洋与湖沼* 4(3,4): 121—141.
- [5] Beardsley, R. C., R. Limeburner, Kentang Le (乐肯堂), Dunxin Hu (胡敦欣), G. A. Cannon and D. J. Pashinski, 1983. Structure of the Changjiang River Plume in the East China Sea during June 1980. Proceedings of International Symposium on Sedimentation on the Continental Shelf, with Special Reference to the East China Sea. Vol. 1, pp. 265—284.
- [6] Beardsley, R. L., R. Limeburner, H. Yu and G. A. Cannon, 1985. Discharge of the Changjiang (Yangtze) River into the East China Sea. *Continental Shelf Research* 4(1,2): 57—76.
- [7] Yu Honghau (于洪华), D. Zheng (郑达成) and J. Jiang (姜景忠), 1983. Basic hydrographic characteristic of the studied area. *Ibid.* 295—305.

SOME ASPECTS OF THE PATH OF THE CHANGJIANG DILUTED WATER*

Le Kentang

(*Institute of Oceanology, Academia Sinica*)

ABSTRACT

The “trimodal distribution” of the Changjiang Diluted Water (CDW) in June, 1980 is analyzed and some dynamical aspects of its path are discussed in this paper. The main results are as follows: (1) The “trimodal distribution” of the CDW may be caused by the interaction of large discharge of Changjiang River, strong tidal currents and mean alongshelf currents (the “East China Sea Coastal Current” and the “Taiwan Warm Current”) within the estuary and over the adjacent shelf and the complex inner shelf topography. (2) The large discharge, the rapid cross-shelf increase in depth and the relie river valley in studied area have a direct influence on the behaviour of the path of the CDW (3) A simple estimation shows that the mean alongshelf current, generally speaking, may have a limited influence on the path of the CDW.

* Contribution No. 1270 from the Institute of Oceanology, Academia Sinica.