第 42 卷　第 5 期　　海 洋 学 报　　Vol. 42　No. 5
2020 年 5 月　　Haiyang Xuebao　　May 2020

王万筠, 窦策伟, 殷海涛, 等. 天津沿岸冷锋型温带风暴潮的客观分型研究[J]. 海洋学报, 2020, 42(5): 31–40, doi:10.3969/j.issn.0253−4193.2020.05.004
Wang Wanjun, Dou Cewei, Yin Haitao, et al. Study on objective classification of extratropical storm surge induced by cold-front along Tianjin coast[J]. Haiyang Xuebao, 2020, 42(5): 31–40, doi:10.3969/j.issn.0253−4193.2020.05.004

天津沿岸冷锋型温带风暴潮的客观分型研究

王万筠[1]，窦策伟[2*]，殷海涛[1]，沈岳峰[1]

(1. 天津市滨海新区气象局, 天津 300457; 2. 天津市静海区气象局, 天津 301600)

摘要: 选取 1956−2016 年共 126 例天津沿岸风暴潮个例, 基于统计资料研究其发生规律, 并按照天气形势将之分类。冷锋型温带风暴潮个例占据全部风暴潮个例的 60% 以上, 其平均每年发生 1.28 次, 2013−2016 年有明显增多的趋势。利用 Lamb-Jenkinson(L-J) 客观分型方法, 对 2003−2016 年的冷锋型温带风暴潮个例进行客观分型, 并计算 5 个环流指数。分型结果表明: 除有 1 例无法归类外, 其余均可进行客观分类。在全部分型的 27 类环流类型中, 冷锋型温带风暴潮个例的环流主要集中在 12 类之中。其中反气旋混合偏东气流型、反气旋混合东北气流型、偏东气流型均发生较多次数, 共占据了总数的 58.8%。此 3 类出现次数多, 产生的增水大, 可认为冷锋型温带风暴潮个例依据客观分型再次细分为此 3 种主要类型。3 种主要的客观环流类型 80% 集中出现在秋、冬季节。利用典型过程的海平面气压场进行对比分析, 其客观分型结果可以对影响渤海的冷锋走向和冷高压中心位置进行区分。环流指数的强弱粗略的表示了风暴潮过程的强弱。客观环流类型和环流指数, 可以为风暴潮个例对比分析提供客观依据。

关键词: 温带风暴潮; 冷锋型; L-J 客观分型; 环流指数

中图分类号: P731.23　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 0253−4193(2020)05−0031−10

1　引言

风暴潮是在剧烈大气扰动条件下, 因强风等导致海水升降异常、潮位超过平常状态的现象。已有的研究中, 按照诱发风暴潮的大气扰动性质把风暴潮划分为热带气旋诱发的风暴潮和温带气旋诱发的风暴潮。此外, 当冷锋掠过渤海时, 也会使渤海湾和莱州湾沿岸发生风暴潮[1], 此类风暴潮一般简称为冷锋型温带风暴潮。上述不同类型的风暴潮一年四季均有发生[2], 对沿海经济发展和人民生命财产安全构成了日益严重的威胁, 是沿海地区防潮防汛工作中非常重要的一项。

我国 3 个温带风暴潮频发区和严重区依次为莱州湾、渤海湾和海州湾沿岸地区[3]。天津沿海是全球风暴潮的最频发区和最严重区之一, 其冷锋型温带风暴潮个例数量多、增水大, 是最为严重的一类风暴潮过程。袁顺等[3] 曾在分析我国沿海地区风暴潮灾害的脆弱性组合评价中指出, 天津风暴潮脆弱性位列山东省之后, 排在沿海省市第二位, 因此风暴潮研究对于天津沿海的防潮工作十分重要。天津地区风暴潮属浅水风暴潮过程, 冯士筰[4] 在《风暴潮导论》中指出, 风应力是浅水风暴潮的主要强迫力。吴少华等[5-6] 研究亦表明风暴潮模式结果的精度在很大程度上依赖于气压场和风场模式的质量。因此准确的风场要素预报提高在风暴潮预报准确率中起着十分重要的作用。而风场要素预报则离不开对天气环流形势的

收稿日期: 2019-03-11; **修订日期:** 2019-09-11。
基金项目: 滨海新区突发公共事件预警信息发布系统(二期)“滨海新区智慧气象平台”(津滨审批投准 [2016]1482 号)。
作者简介: 王万筠(1981—), 女, 天津市人, 高级工程师, 从事海洋及港口天气预报研究。E-mail: yht0505@sina.com
*** 通信作者:** 窦策伟, 男, 工程师, 从事短期天气预报及服务。E-mail: Jhdcw2010@163.com

诊断分析。通过环流形势的对比分析,可以了解风暴潮发生时的大气环流的特征。目前,针对风暴潮过程的大气环流分型,主要还是基于主观环流的分型方法[7-10]。但主观分类方法对分类者要求较高,且费时费力。客观分类方法有较为统一的分类标准,具有可重复性,机器运算快,操作性更强。目前客观环流分型已经有很多用于天气、气候等多方面的研究。Jenkinson 和 Collinson[11] 通过定义指数及分类标准将 Lamb[12] 分类方法客观化,将主客观环流分型法相结合(即 Lamb-Jenkinson 方法,简称为 L-J 方法),在许多天气以及气候方面的研究中被使用。利用 L-J 方法可以得到针对局地环流的客观数值描述,并从天气、气候学角度来研究局地环流[13-15]。这种方法计算量小,且其分型结果具有明显的天气学意义,因此 L-J 分型方法得到了广泛的应用。采用气象和海洋水文科学技术相结合的思路,依据塘沽潮汐资料,研究天津沿岸诱发风暴潮过程的大气环流形势,对充实、完善天津市海洋气象预报服务体系是非常必要的。

本文利用 L-J 分型方法,针对诱发风暴潮灾害个例中大气环流类型为冷锋型的个例,即冷锋型温带风暴潮个例进行客观分型,将大气环流形势场分型细化。同时计算环流指数,得出针对局地环流的客观数值描述。可以为今后预报风暴潮,提供历史个例大气环流的客观依据。

2 资料来源和方法

2.1 资料选取

滨海新区位于天津东部,东临渤海。本文采用的是滨海新区的代表站塘沽验潮站的潮位观测资料。滨海新区的警戒水位是 470 cm,业务工作中把最高潮位超过警戒水位定为一次风暴潮过程[16-17]。前人的研究中[2],也针对 50 cm 以上的增水(实况潮位与天文潮位的差值)事件进行研究。所以增加选取了最高潮位接近 470 cm(460～470 cm),同时最大增水(全天逐小时的最大增水值)大于 50 cm 的天气过程选为风暴潮过程。在 1956−2016 年,一共选取 126 例风暴潮个例。采用客观分型时,大气环流形势采用海平面气压场。1956−2002 年,海平面气压场主要采用纸质图片的形式保存。2003−2016 年资料为 MICAPS 格式,是数字化的海平面气压场资料。MICAPS 格式海平面气压场,是大致为中国范围内的格点数据资料(2°×2°),时间间隔为 6 h。考虑客观分型使用数据的可计算性,所以本文暂时仅对 2003−2016 年的个例进行客观分型处理。在 2003−2016 年中,冷锋型温带风暴潮个例一共 34 例。对这 34 个个例,按照最高潮位的时次选取临近时刻的海平面气压场资料。

2.2 分析方法

在仔细分析个例后,参照文献 [7–10],将全部风暴潮个例按诱发时的大气环流形势将之分为 3 类,分别为:冷锋型,台风(含热带风暴及热带低压)型,温带气旋型。利用 L-J 分型方法,对其中的冷锋型温带风暴潮个例的大气环流形势进行客观分型。

Lamb[12] 分类方法最初应用于对逐日环流类型的划分。Jenkinson 和 Collinson[11] 通过定义指数及分类标准,将 Lamb 分类方法客观化,即 Lamb-Jenkinson 方法,简称为 L-J 方法。L-J 分型方法一般定义 6 个环流指数:地转风纬向分量指数、地转风经向分量指数、地转风风速、涡度纬向分量指数、涡度经向分量指数、涡度值,同时计算地转风风向。根据地转风风速、风向及涡度值将环流型划分为平直气流型、旋转型和混合型 3 大类。

冷锋型温带风暴潮个例影响渤海区域,主要是冷锋从西北或东北向南划过渤海。根据文献 [13–14],在中国区域进行分区,选取渤海所在区域进行环流指数计算。区域中心点选择为(41ºN, 116ºE),区域范围为 33º～49ºN, 104º～128ºE(图 1a),16 个格点选取如图 1a 黑点所示。由于 MICAPS 数据范围在 2010 年进行了调整,2010 年后的区域中心点选为(40°N, 116ºE),区域范围为 32º～48ºN, 104º～128ºE(图 1b),16 个格点选取如图 1b 黑点所示。

利用公式(1)至公式(7)计算 5 个环流指数:地转风的纬向分量(u_g),地转风的经向分量(v_g),地转风风速(V),地转风风向(dd),地转涡度(ξ)。其中,f 为地转参数(f=2Ωsinα),本文区域中心点取 41°N,故 f=2Ωsin41°,记作 f_{41}。2010 年后由于中心点改变,f=2Ωsin40º,记作 f_{40}。利用所选区域内的 16 个格点(图 1)的海平面气压,通过中央差分的计算方案,计算出中心点的地转风和涡度。以下公式推导,主要以 f_{41} 为例说明推导过程,f_{40} 不再赘述。以中心点所在纬度为参照系,5 个环流指数的单位为 hPa/10º经度。

$$u_g = -\frac{1}{f\rho}\times\frac{\partial P}{\partial y}\approx -\frac{1}{f_{41}\rho}\times\frac{\Delta P}{\Delta y}\approx\frac{1}{2f_{41}\rho}\times\left[\frac{P(12)+P(4)}{\Delta y}+\frac{P(13)-P(5)}{\Delta y}\right]\approx\frac{1}{2\Delta y f_{41}\rho}\times[P(12)+P(13)-P(4)-P(5)]. \quad (1)$$

$$v_g = \frac{1}{f\rho}\times\frac{\partial P}{\partial x}\approx\frac{1}{f_{41}\rho}\times\frac{\Delta P}{\Delta x}\approx\frac{1}{4f_{41}\rho}\times\left[\frac{P(5)-P(4)}{\Delta x_1}+\frac{2P(9)-2P(8)}{\Delta x}+\frac{P(13)-P(12)}{\Delta x_2}\right]\approx\frac{1}{4\Delta x f_{41}\rho}\times[P(5)+2P(9)+P(13)-P(4)-2P(8)-P(12)]. \quad (2)$$

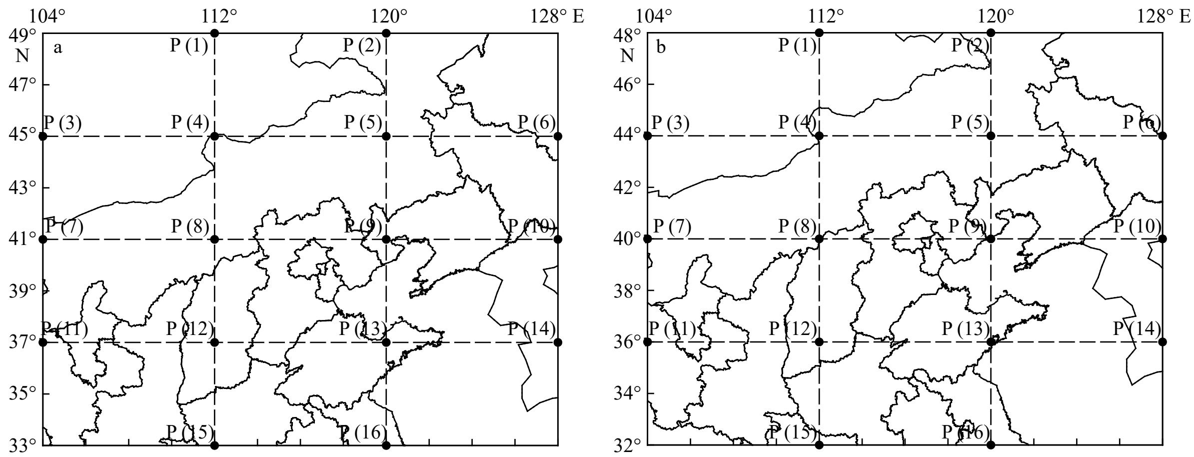

图 1　划分环流类型时所选用的区域范围及 16 个格点位置

Fig. 1　Selected area range and 16 grid points for classification of circulation types

a. 2003−2009 年格点位置; b. 2010−2016 年格点位置

a. Grid position in 2003−2009; b. grid position in 2010−2016

$$V = \sqrt{u_g^{\,2} + v_g^{\,2}}. \tag{3}$$

$$\begin{aligned}\xi_x = & -\frac{\partial u}{\partial y} \approx \frac{1}{\Delta y}\left\{\frac{1}{2f_{37}\rho}\left[\frac{P(15)-P(8)}{\Delta y}+\frac{P(16)-P(9)}{\Delta y}\right]\right. \\ & \left. -\frac{1}{2f_{45}\rho}\left[\frac{P(8)-P(1)}{\Delta y}+\frac{P(9)-P(2)}{\Delta y}\right]\right\} \approx \frac{1}{\Delta y^2 f_{41}\rho} \\ & \times\left\{\frac{\sin 41^\circ}{2\sin 37^\circ}[P(15)+P(16)-P(8)-P(9)]\right. \\ & \left. -\frac{\sin 41^\circ}{2\sin 45^\circ}[P(8)+P(9)-P(1)-P(2)]\right\},\end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}\xi_y = & \frac{\partial v}{\partial x} \approx \frac{1}{2\Delta x}\times\left\{\frac{1}{4f_{41}\rho}\left[\frac{P(6)-P(5)}{\Delta x_1}+\frac{2P(10)-2P(9)}{\Delta x}+\right.\right. \\ & \left.\frac{P(14)-P(13)}{\Delta x_2}\right]-\frac{1}{4f_{41}\rho}\left[\frac{P(4)-P(3)}{\Delta x_1}+\frac{2P(8)-2P(7)}{\Delta x}+\right. \\ & \left.\left.\frac{P(12)-P(11)}{\Delta x_2}\right]\right\} \approx \frac{1}{8\Delta x^2 f_{41}\rho}[P(6)+2P(10)+P(14)- \\ & P(5)-2P(9)-P(13)+P(3)+2P(7)+P(11)-P(4)- \\ & 2P(8)-P(12)] \approx \frac{1}{8\Delta y^2\cos^2 41^\circ f_{41}\rho}[P(6)+2P(10)+ \\ & P(14)-P(5)-2P(9)-P(13)+P(3)+2P(7)+P(11)- \\ & P(4)-2P(8)-P(12)],\end{aligned} \tag{5}$$

$$\xi = \xi_x + \xi_y. \tag{6}$$

$$dd = \frac{\tan^{-1}\left(\dfrac{u_g}{v_g}\right)}{\pi}\times 180^\circ. \tag{7}$$

根据涡度值($|\xi|$, ξ 算法见公式(4)至公式(6))与地转风速(V, 算法见公式(1)至公式(3))的关系将环流型划分为平直气流型、旋转型和混合型 3 大类。当 $|\xi|<V$ 时, 即当涡度指数小于地转风, 环流被定义为平直气流类。当 $|\xi|>2V$ 时, 涡度明显大于地转风, 强调大气的旋转性, 定义为旋转型。当 $V<|\xi|<2V$ 时, 为混合型。如果 $V<6$, 且 $|\xi|<6$ 时, 为无定义型标为 UD。再依据地转风的风向细分为 27 种不同的环流类型[10,14]。平直气流型包含 8 类: N(北)、NE(东北)、E(东)、SE(东南)、S(南)、SW(西南)、W(西)、NW(西北)。例如, 对某一区域的环流形势分型结果为 N 型, 则表示该区域受偏北的地转风气流控制。旋转型包含: A 型(反气旋)和 C 型(气旋)。例如, 对某一区域的环流形势分型结果为 A 型, 表示该区域的地面形势场为高压(反气旋)控制。混合型兼有平直气流型和旋转型的特点, 共有 16 类: CN、CNE、CE、CSE、CS、CSW、CW、CNW、AN、ANE、AE、ASE、AS、ASW、AW、ANW。例如, 分型结果为 AN 型, 表示该区域受高压系统控制下的偏北地转风影响。

3　统计结果分析

3.1　冷锋型风暴潮个例发生次数统计

1956−2016 年, 天津地区风暴潮个例共计 126 个, 平均每年出现 2.1 个。风暴潮个例逐年发生次数统计(图 2a)显示, 2000 年之前风暴潮个例发生次数仍维持较低水平, 而在 2002 年之后, 风暴潮个例呈明显增多的趋势。可见, 天津地区沿海防范风暴潮的工作日益艰巨。

天津沿岸的风暴潮个例中: 冷锋型共计发生 78 次, 台风型 32 次, 温带气旋型最少, 为 16 次。其中冷锋型占据全部个例的 60%(图 2b)。可见冷锋型是诱发渤海湾风暴潮的最主要的天气形势。在 1956−2016 年, 冷锋型温带风暴潮平均每年发生 1.28 次(图 2a)。个例次数大体呈离散分布, 其中有 22 年没有发生。发生 1 次冷锋型温带风暴潮过程的有 14 年, 2 次的

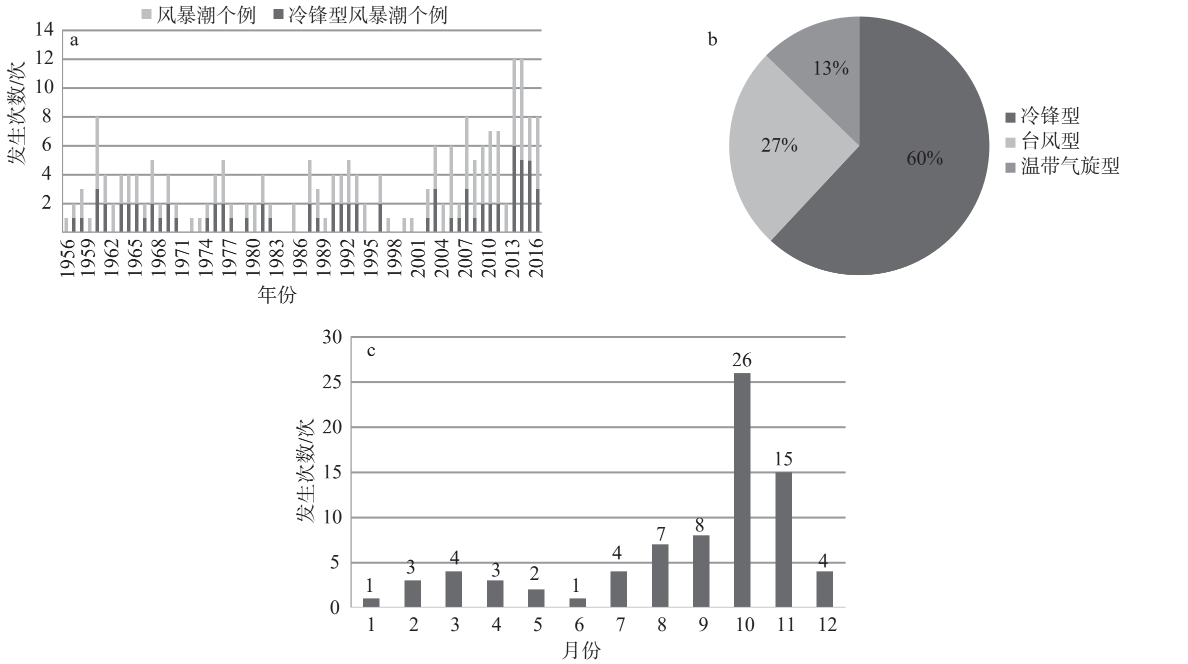

图 2 1956–2016 年天津沿岸风暴潮及冷锋型风暴潮个例的逐年发生次数(a),风暴潮个例天气分型比例(b),冷锋型温带风暴潮个例逐月发生次数(c)

Fig. 2 Annual number of occurrences of storm surges and extratropical storm surges induced by cold-front along Tianjin coast in 1956–2016 (a), weather classification ratio of storm surge cases (b), monthly number of occurrences of extratropical storm surges induced by cold-front (c)

有 18 年,3 次的有 4 年,5 次的有 2 年,6 次的有 1 年(2013 年)。2002 年后风暴潮个例发生次数超过平均次数的频率增加,2013–2016 年冷锋型温带风暴潮的发生次数有明显增多的趋势。

冷锋型温带风暴潮个例在全年的 12 个月中均有发生(图 2c),秋季(9–11 月)是最频发的季节。在 78 个个例中,有 49 个发生在秋季,占全年发生次数的 62.8%。其中,有 26 个冷锋型温带风暴潮个例发生在 10 月,是最常发生冷锋型温带风暴潮个例的月份。此时北方冷空气势力增强,蒙古国一带多冷高压活动,华北地区冷暖空气频繁交汇,大风灾害频繁,易引发冷锋型温带风暴潮过程。

3.2 冷锋型个例增水统计

冷锋型个例中最高潮位超过 500 cm 的共有 11 例,其中 2003 年和 2009 年均接连有两次冷锋型过程最高潮位超过了 500 cm(表 1)。2003 年的“10.11”渤海特大温带风暴潮灾害就是冷锋型温带风暴潮。其最高潮位 554 cm,增水 178 cm。而产生最大增水的个例是 1960 年 11 月 21 日,最高潮位 465 cm,增水 236 cm。全部个例中增水超过 200 cm 的个例共计 4 个;增水在 150～199 cm 的共计 19 个;增水在 100～149 cm 的共计 36 个,增水在 99 cm 以下的共计 19 个。大多数冷锋型温带风暴潮个例增水在 100～149 cm 之间,超过 100 cm 占到总数的 75.6%。统计结果表明,冷锋型温带风暴潮个例不仅占比大,且易引发较大增水。

4 客观分型

冷锋型温带风暴潮个例数量较多,为了进一步的研究其大气环流特征,还需分析冷锋位置、渤海海面气压梯度、海平面气压冷高压中心与渤海的距离等具体形势场特征[18–19]。也常依据冷锋前进方向有无低压中心配合,继续将冷锋型温带风暴潮个例分为纯冷锋型以及冷锋配合低压型。依据传统分类,每一类个例数目仍然较多,且没有具体形势场特征的客观描述。利用 L-J 方法对冷锋型温带风暴潮个例进行客观分型,其 3 类主要的环流形势配合具体的 27 类客观环流类型将形势场分型细化。同时计算的环流指数可以得到针对局地环流的客观数值描述。

4.1 客观分型结果

在全部分型的 27 类环流类型中,冷锋型温带风暴潮个例的大气环流类型主要集中在 12 类(AE、ANE、ASE、AN、CE、NW、SW、S、SE、E、NE、UD)之中(表 1)。除了有 1 例无法归类,被判定为 UD 外,其余 33 个过程均可以进行客观分类。在传统分型的同一类个例上,依然可以细分为 12 类,说明具体的环流形势仍然有所不同。因此有必要对冷锋型风暴潮

表 1　2003−2016 年个例客观分类、环流指数及潮位增水信息

Table 1　Results of objective typing, circulation index, tide level and maximum storm surge elevation in 2003−2016

时间	分型结果	ξ	V	dd/(°)	u_g	v_g	最高潮位/cm	最大增水/cm
2005年10月21日05:00	AE	−13.6	13	99.5	−12.9	2.2	499	108
2006年10月10日20:00	AE	−10.2	8.7	68.9	−8.1	−3.1	487	100
2009年4月15日05:00	AE	−30.3	16.6	88.6	−16.6	−0.4	523	185
2010年12月13日08:00	AE	−28.5	15.2	71.7	−14.4	−4.8	475	130
2013年10月14日11:00	AE	−16.1	13.8	68.7	−12.8	−5	477	139
2015年10月18日08:00	AE	−21.3	9.8	103.8	−9.5	2.4	478	105
2015年10月24日11:00	AE	−15.9	8.3	103.3	−8.1	1.9	473	112
2015年11月5日14:00	AE	−19.9	16.6	105.9	−16	4.5	476	176
2003年4月17日20:00	ANE	−23.8	14.9	64.8	−13.4	−6.3	466	84
2007年3月4日20:00	ANE	−27.6	22.8	38.4	−14.1	−17.9	481	126
2007年9月27日02:00	ANE	−18.5	6.5	27	−2.9	−5.8	481	107
2007年10月28日02:00	ANE	−14.4	12.7	36.4	−7.5	−10.2	487	136
2013年8月22日14:00	ANE	−9.5	1.9	53.1	−1.5	−1.1	471	51
2013年9月23日17:00	ANE	−22.6	9	48	−6.7	−6	534	150
2003年10月11日08:00	E	−10.5	18.4	96.1	−18.3	2	554	178
2008年12月9日23:00	E	−1.7	15.8	104.6	−15.3	4	474	174
2009年2月13日05:00	E	4.8	13.1	78.5	−12.9	−2.6	528	203
2011年2月27日08:00	E	−8	18	104.9	−17.3	4.6	491	186
2011年11月28日23:00	E	−7.7	15.1	103.7	−14.7	3.6	476	134
2015年11月7日14:00	E	−1.3	9.8	98.8	−9.7	1.5	492	161
2010年12月5日11:00	NE	−10.9	16.6	41.9	−11.1	−12.4	473	144
2014年10月12日05:00	NE	−13.1	14	37.9	−8.6	−11.1	483	96
2014年9月14日17:00	AN	−13.9	4.3	358	0.1	−4.3	471	70
2015年10月3日05:00	AN	−10.4	4.1	339.2	1.5	−3.8	494	102
2013年7月25日17:00	S	−0.3	6	199.9	2	5.7	472	52
2013年8月26日17:00	S	−4	7.8	190.7	1.5	7.7	481	73
2014年7月17日17:00	S	−2.3	7.9	198.5	2.5	7.5	484	70
2003年11月25日08:00	SE	−2.7	16.3	152.1	−7.6	14.4	504	137
2016年10月20日08:00	SE	−5.7	17	146.9	−9.3	14.2	492	187
2013年7月23日11:00	NW	0.3	5.8	323.8	3.4	−4.6	473	50
2014年5月30日17:00	SW	−6.9	10.1	223.2	6.9	7.4	472	89
2014年9月30日08:00	ASE	−17.1	5.9	154.7	−2.5	5.3	489	109
2016年9月2日23:00	CE	6.6	1.5	97.5	−1.5	0.2	472	62
2016年8月19日17:00	UD	−2	4	130.7	−3	2.6	483	65

注: ξ、V、u_g、v_g的单位为hPa/10º经度, 增水为全天逐小时的最大增水值。

天气个例进行客观环流形势的细分。通过对比分析，可以进一步了解风暴潮这一灾害性天气的大气环流的特征。

冷锋型温带风暴潮个例中，当锋面扫过渤海时，一般都有冷空气的影响，海平面气压场上有一冷高压中心相配合。或者渤海位于高低压环流中间，海平面气压场等值线较为密集。客观分型结果显示：冷锋型温带风暴潮个例的大气环流分型中除 1 例判定为旋转类中气旋主导的 CE，其他均为混合类中的反气旋主导（A 开头的几类）或者平直气流类。图 3a 给出各种客观环流类型出现的次数。客观环流类型中 AE（8 次）、ANE（6 次）、E（6 次）3 类均发生较多次数，占据了总数的 58.8%。而 CE、NW、SW、ASE、UD 5 种类型仅出现 1 次。前人研究得出，足够大的向岸风，产生足够大的风应力，会进一步诱发风暴潮。由于天津处于渤海湾西侧，向岸风配合海洋洋流，有利产生风暴潮增水的主要方向为 NE 至 E。这与客观环流分型得出的主要 3 类：AE、ANE、E 相一致。此外 AN、NE、SE 类也分别有两例。值得注意的是，在分型结果中 NW 和 SW 环流形势下各有 1 例，即在离岸风的条件下也会产生风暴潮过程。这也表明利用大气环流分析的天气学方法，并不能解释所有的风暴潮灾害过程，如果需要分析这些特例，还需要海洋及气象方面更多的资料。但离岸风的几类过程，其增水均在 100 cm 以下（表 1）。AE、ANE、E 3 类的平均增水均超过了 100 cm，最大的增水过程是在 E 环流形势下，为 203 cm。这 3 类主要的客观环流类型出现次数多，产生的增水大。可以认为冷锋型温带风暴潮个例依据客观分型可以再次细分为此 3 种类型：AE、ANE 及 E（反气旋混合偏东气流型、反气旋混合东北气流型及偏东气流型）。

客观环流类型逐月的发生频次（图 3b），10 月为发生风暴潮最多的月份，共出现 6 类（AE、ANE、E、NE、AN、SE），其中 AE 类出现 5 次，是 10 月份风暴潮过程的主要环流类型。AE、ANE、E 3 类主要的环流类型集中出现在秋、冬季节，共计 16 次，占此 3 类的 80%。而在春、夏季节会出现一些小概率的天气类型，比如 5 月及 7 月分别出现了 SW 和 NW 的环流类型，在 8 月还出现了唯一的 1 例 UD。在今后的工作中，预报风暴潮过程应重点关注秋、冬季节的 AE、ANE、E 环流类型的发生。

4.2　3 类主要影响形势对比

冷锋型温带风暴潮个例的共同点是均有冷锋划过渤海，但海平面气压场上冷锋影响渤海时的强度和走向以及冷高压中心的位置各有不同。利用客观分型后主要的 3 类进行对比分析，来探讨 L-J 客观分型方法对于个例具体大气环流形势场的划分。从 3 种主要类型的个例中挑选增水较多及潮位较高的个例作为此类的典型天气形势。AE 类选取 2009 年 4 月 15 日过程（图 4a），ANE 类选取 2013 年 9 月 23 日过程（图 4b），E 类选取 2003 年 10 月 11 日过程（图 4c）。

L-J 客观环流形势的划分，首先根据涡度值与地转风速的关系将环流型划分，再依据地转风风向细分为总共 27 种不同的环流类型。风应力作用于渤海水体引发风暴潮时，结合向岸风以及洋流的方向，风向为东北至东的大风最为有利增水。其中，AE 及 E（图 4a，图 4c）类海平面气压密集带在渤海地区呈东西走向，而 ANE 类（图 4b）呈东北—西南走向。3 类过程海平面气压场中等压线走向主要为偏东及东北，冷锋的走向亦相同，与有利增水的风向一致。分型结果可以反

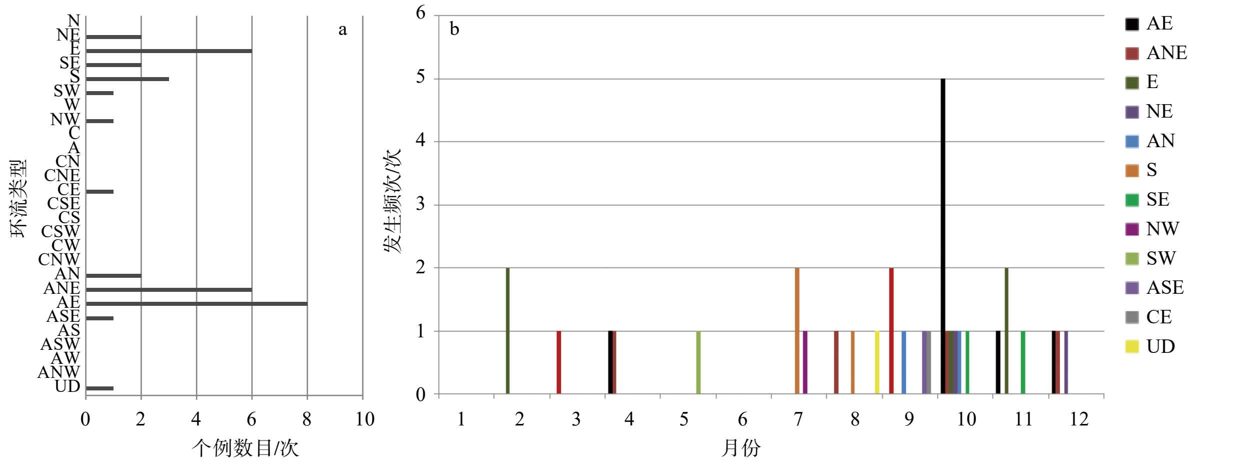

图 3　环流类型数量分布（a）和环流类型逐月发生频次（b）

Fig. 3　Quantitative distribution of circulation types (a), and monthly frequency distribution of circulation types (b)

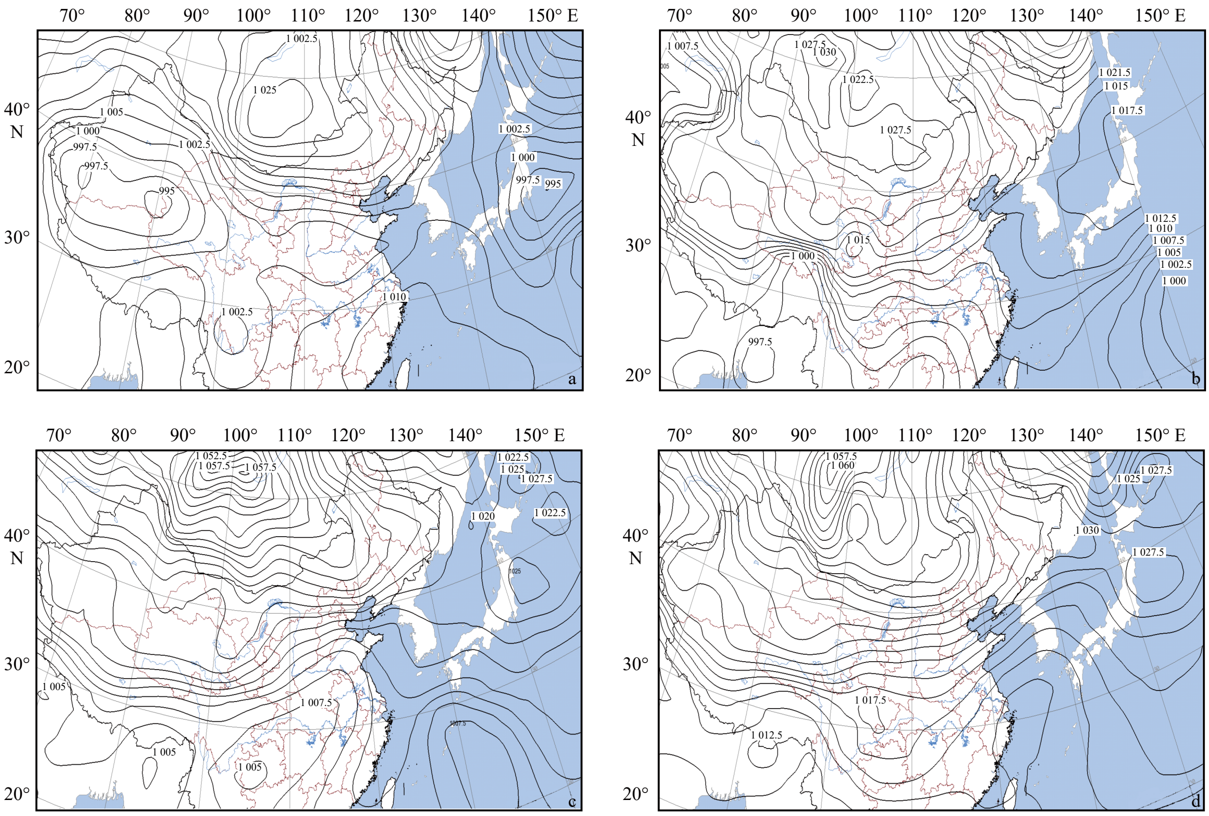

图 4　2009 年 4 月 15 日 05 时 (a), 2013 年 9 月 23 日 17 时 (b), 2003 年 10 月 11 日 08 时 (c), 2010 年 12 月 13 日 08 时 (d) 海平面气压分布(单位: hPa)

Fig. 4　Sea level pressure on 05:00 April 15, 2009 (a), 17:00 September 23, 2013 (b), 08:00 October 11, 2003(c), 08:00 December 13, 2010 (d) (unit: hPa)

映渤海地区海平面气压场的基本走向, 间接表明了冷锋的走向。

AE 与 ANE 类是混合型, 既有平直地转风气流的影响, 也有反气旋的影响。E 类则主要受平直的偏东气流影响。三者的主要区分在于反气旋(即冷高压)对于渤海的影响程度。3 次过程的涡度指数依次为: −30.3 hPa/10°经度(AE 类); −22.6 hPa/10°经度(ANE 类); −10.5 hPa/10°经度(E 类)。对比其绝对值大小, AE 类及 ANE 类受反气旋影响明显比 E 类过程更大。其影响的强弱可以根据反气旋中心相对于渤海的位置远近来近似判断。2003 年 10 月的过程(E 类), 冷高压中心位于贝加尔湖以西, 离渤海较远, 大约 2 000 km。而 AE 类及 ANE 类两次过程, 冷高压中心在蒙古国中部, 与渤海距离较近, 约为 1 200 km。地面的冷高压中心对渤海的影响越大, 意味着冷空气造成的渤海地区大风也可能会越大。但同时仍应参考其他环流指数的影响。分型结果可以反映反气旋(或气旋)对于渤海地区的影响程度, 地转涡度的值来表示高压或低压中心的影响程度。综合考虑涡度指数和地转风指数, 2009 年过程的两种指数都最大, 增水(185 cm)也是三者中最大的。但不同类型的过程, 由于气流方向和影响系统有所不同, 用环流指数值来直接比较, 可能无法得出结论。例如 ANE 和 E 类两个过程相比较, 2013 年的过程涡度指数绝对值较大, 地转风指数较小, 2003 年的过程与 2013 年过程相反。无法通过比较来判断增水值的大小。应考虑在同一类环流类型之下, 再进行环流指数的比较, 来判断增水的强弱。

4.3　以 AE 类为例相似个例对比

在冷锋型个例客观分型结果上可以看到, AE 类型的个例最多, 可以进行个例之间环流指数的进一步比较。在 8 例个例中, 涡度指数和地转风风速都比较大的是 2009 年 4 月 15 日和 2010 年 12 月 13 日两例(表 1)。图 4a 和图 4d 是这两例过程之中, 最高潮位临近时次的海平面气压场分布。两者海平面气压场分布大致相同, 在蒙古国有高压东移, 同时在黄海南部至东海地区分布着低压。渤海地区处于高压前部等值线密集区之中。渤海上分布有 3 条气压线, 气压梯度较为一致。2010 年过程蒙古高压的中心强度达到 1 045 hPa 以上(图 4d), 而 2009 年过程蒙古高压中

心仅有 1 025 hPa(图 4a)。同时 2010 年过程东海附近低压系统也明显强于 2009 年的过程。从黄、渤海整体气压等值线密集程度上来看，2010 年过程冷锋强于 2009 年过程。仅从海平面气压场上分析，容易得出 2010 年的过程要强于 2009 年过程的结论。但是对比环流指数发现，2010 年过程涡度指数的绝对值(28.5 hPa/10°经度)，即涡度值要小于 2009 年过程(30.3 hPa/10°经度)(表 1)。2009 年地转风风速为 16.6 hPa/10°经度，2010 年为 15.2 hPa/10°经度，也是 2009 年的过程更强(表 1)。而从最后的过程最大增水也可以看到，2009 年的风暴潮过程增水 185 cm，强于 2010 年过程的 130 cm 增水。同一类天气分型的个例中涡度指数和地转风风速的绝对值越强，则增水越大。环流指数的强弱对比可以粗略的分析过程强弱，进一步对比客观环流分型结果和环流指数强弱，寻找历史上相似的风暴潮个例。为预报员提供更多可以参考的信息。

利用 L-J 分型，可以细分的天气形势场，通过地面形势场特征和地转风强弱来辨别相似的个例，有助于利用历史相似个例时快速查找出可以参考的历史过程。但由于风暴潮个例每年发生的数量较少，且 MICAPS 资料仅有 2003 年之后过程的资料。在进行客观分型和相似个例对比分析时，如想进一步得出环流指数与风暴潮增水之间的关系，还需要分析大量个例，下一步计划采用 NCEP 再分析资料(水平分辨率 1°×1°)对 2003 年之前的个例进行补充分析。

5 结论

本文在 1956−2016 年一共选取了 126 例天津沿岸风暴潮及强增水个例。将全部个例按照诱发风暴潮灾害的大气环流形势将之分为 3 类，分别为：冷锋型，台风(含热带风暴及热带低压)型，温带气旋型。得到以下结论：

(1)1956−2016 年中，风暴潮及强增水个例年平均发生 2.1 次。2004 年之前风暴潮个例发生次数仍维持较低水平，而在 2005 年之后，风暴潮个例呈明显增多的趋势。2007−2016 年间，风暴潮天气年发生次数要高于 1956−2016 年的平均水平。

(2)冷锋型温带风暴潮个例共计 78 例，占据全部个例的 60% 以上，2013-2016 年次数有明显增多的趋势。冷锋型个例在全年的 12 个月中均有发生的先例。秋季(9−11 月)是最多发的季节，在 78 例中，有 49 例发生在秋季，占全年分布的 62.8%。

(3)利用 L-J 客观分型方法对选取的个例进行客观天气分型。在全部分型的 27 类环流类型中，风暴潮个例的环流主要集中在 12 类(AE, ANE, ASE, AN, CE, NW, SW, S, SE, E, NE, UD)之中。AE, ANE, E 均发生较多次数，占据了总数的 58.8%。可以认为冷锋型温带风暴潮个例依据客观分型再次细分为 3 种类型：AE 型、ANE 型及 E 型。

(4)通过对 AE 型、ANE 型及 E 型中的典型个例环流形势对比发现，客观分型结果可以将环流形势中影响渤海的冷锋走向和冷高压中心位置进行区分。同一类客观分型的个例中涡度指数和地转风风速的绝对值越大，则增水越大。环流指数的强弱对比可以粗略地分析风暴潮过程强弱。客观环流类型和环流指数，可以为风暴潮个例的对比分析提供客观依据。

参考文献：

[1] 乐肯堂. 我国风暴潮灾害及防灾减灾战略[J]. 海洋预报, 2002, 19(1): 9−15.
Le Kentang. Severe storm surge disasters and strategic measures against them in China[J]. Marine Forecasts, 2002, 19(1): 9−15.

[2] 王喜年. 关于温带风暴潮[J]. 海洋预报, 2005, 22(S1): 17−23.
Wang Xinian. On extratropical storm surges[J]. Marine Forecasts, 2005, 22(S1): 17−23.

[3] 袁顺, 赵昕, 李琳琳. 沿海地区风暴潮灾害的脆弱性组合评价及原因探析[J]. 海洋学报, 2016, 38(2): 16−24.
Yuan Shun, Zhao Xin, Li Linlin. Combination evaluation and case analysis of vulnerability of storm surge in coastal provinces of China[J]. Haiyang Xuebao, 2016, 38(2): 16−24.

[4] 冯士筰. 风暴潮导论[M]. 北京: 科学出版社, 1982: 241.
Feng Shizuo. Introduction to Storm Surge[M]. Beijing: Science Press, 1982: 241.

[5] 吴少华, 王喜年, 戴明瑞, 等. 渤海风暴潮概况及温带风暴潮数值模拟[J]. 海洋学报, 2002, 24(3): 28−34.
Wu Shaohua, Wang Xinian, Dai Mingrui, et al. The general status of storm surges and the simulation of extratropical storm surges in the Bohai Sea[J]. Haiyang Xuebao, 2002, 24(3): 28−34.

[6] 吴少华, 王喜年, 于福江, 等. 连云港温带风暴潮及可能最大温带风暴潮的计算[J]. 海洋学报, 2002, 24(5): 8−18.
Wu Shaohua, Wang Xinian, Yu Fujiang, et al. Extratropical storm surge and calculation of probable maximum extratropical storm surge in Lianyungang[J]. Haiyang Xuebao, 2002, 24(5): 8−18.

[7] 吴少华, 王喜年, 宋珊, 等. 天津沿海风暴潮灾害概述及统计分析[J]. 海洋预报, 2002, 19(1): 29−35.

Wu Shaohua, Wang Xinian, Song Shan, et al. The general status and statistics of storm surges in the coast area of Tianjin[J]. Marine Forecasts, 2002, 19(1): 29−35.
[8] 许富祥. 天津沿海三次特大风暴潮灾成因分析及预防对策[J]. 海洋预报, 2002, 19(1): 36−42.
Xu Fuxiang. Analysis of causes of three severe storm surge disasters in Tianjin and strategy of disaster prevention[J]. Marine Forecasts, 2002, 19(1): 36−42.
[9] 杨宝国. 中国沿海的风暴潮灾及其防御对策[J]. 自然灾害学报, 1996, 5(4): 82−88.
Yang Baoguo. Storm surge disaster and disaster defensive countermeasures along China coast[J]. Journal of Natural Disasters, 1996, 5(4): 82−88.
[10] 许富祥. 海浪预报知识讲座[J]. 海洋预报, 2002, 19(4): 78−81.
Xu Fuxiang. Lecture on wave forecast knowledge[J]. Marine Forecasts, 2002, 19(4): 78−81.
[11] Jenkinson A F, Collinson F P. An initial climatology of gales over the North Sea[C]//Synoptic Climatology Branch Memorandum, No. 62. Bracknell: Meteorological Office, 1977.
[12] Lamb H H. Types and spells of weather around the year in the British Isles: annual trends, seasonal structure of the year, singularities[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1950, 76(330): 393−429.
[13] 朱艳峰, 陈德亮, 李维京, 等. Lamb-Jenkinson环流客观分型方法及其在中国的应用[J]. 南京气象学院学报, 2007, 30(3): 289−297.
Zhu Yanfeng, Chen Deliang, Li Weijing, et al. Lamb-Jenkinson circulation type classification system and its application in China[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2007, 30(3): 289−297.
[14] 贾丽伟, 李维京, 陈德亮, 等. 东北地区月平均大气环流型与哈尔滨气候关系的初步研究[J]. 气象学报, 2006, 64(2): 236−245.
Jia Liwei, Li Weijing, Chen Deliang, et al. A monthly atmospheric circulation classification and its relationship with climate in Haerbin[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2006, 64(2): 236−245.
[15] Chen Deliang. A monthly circulation climatology for Sweden and its application to a winter temperature case study[J]. International Journal of Climatology, 2000, 20(10): 1067−1076.
[16] 于宜法, 俞聿修. 渤海天文-风暴潮数值模拟和一种多年一遇极值水位的计算方法[J]. 海洋学报, 2003, 25(4): 10−17.
Yu Yifa, Yu Yuxiu. The numerical modeling of astronomy-storm tide in the Bohai Sea and a calculation method for extreme water levels of multiyear return periods[J]. Haiyang Xuebao, 2003, 25(4): 10−17.
[17] 段志华. 再析天津渤海沿岸风暴潮特性及防御减灾对策[J]. 海洋预报, 2002, 19(1): 43−50.
Duan Zhihua. Eanalysis of the characteristics of the storm surge along the Tianjin Bohai coast and the countermeasures for defense and disaster reduction[J]. Marine Forecasts, 2002, 19(1): 43−50.
[18] 傅赐福, 于福江, 王培涛, 等. 滨海新区温带风暴潮灾害风险评估研究[J]. 海洋学报, 2013, 35(1): 55−62.
Fu Cifu, Yu Fujiang, Wang Peitao, et al. A study on extratropical storm surge disaster risk assessment at Binhai New Area[J]. Haiyang Xuebao, 2013, 35(1): 55−62.
[19] 莫冬雪. 中国近海寒潮影响下的灾害性海洋动力环境研究[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2018.
Mo Dongxue. Study on disastrous ocean dynamical environment under the influence of cold waves in the northern East China Sea[D]. Qingdao: Institute of Oceanography, Chinese Academy of Sciences, 2018.

Study on objective classification of extratropical storm surge induced by cold-front along Tianjin coast

Wang Wanjun[1], Dou Cewei[2], Yin Haitao[1], Shen Yuefeng[1]

(1. *Tianjin Binhai New Area Meteorological Bureau*, *Tianjin* 300457, *China*; 2. *Tianjin Jinghai Meteorological Bureau*, *Tianjin* 301600, *China*)

Abstract: A total of 126 cases of storm surge along Tianjin coast from 1956 to 2016 were selected. Based on statistical data to study its occurrence, and classify these cases according to weather circulation situation. Extratropical storm surge induced by cold-front accounted for more than 60% of all cases, with an average of 1.28 times per year, and there is a significant increase in 2013−2016. Using Lamb-Jenkinson (L-J) objective typing method, extratropical storm surges induced by cold-front from 2003 to 2016 were objectively classified, and calculated five circulation indices. The results of objective typing showed that: except for one case which can not be classified, the other processes can be classified objectively. Among all 27 types of circulation, circulation situations of extratropical storm surges induced by cold-front are mainly concentrated in 12 types. Types of co-influence of anticyclone and eastward airflow, types of co-influence of anticyclone and northeaster airflow and types of influence of easterly airflow occurred many times, accounting for 58.8% of the total. These three types of objective circulation situation occur more frequently and increase more storm surge elevation. It can be concluded extratropical storm surges induced by cold-front can be subdivided into three types again according to objective classification. 80% of these three main circulation types are concentrated in autumn and winter. By comparing and analyzing the sea-level pressure field of typical processes, these results of objective circulation typing can be used to distinguish the direction of the cold front and the location of the center of the cold high in the circulation situation affecting the Bohai Sea. The strength of circulation index roughly indicates the strength of storm surge process. The objective circulation type and circulation index can provide objective basis for comparative analysis of storm surge cases.

Key words: extratropical storm surge; cold-front; L-J objective typing; circulation indices