

海陆风研究的进展

陈焱源 魏敏捷

(天津气象科研所)

一、前言

海陆风环流是世界所有沿海地区最突出的中尺度特征之一^[10,16]。它是由局部地区海陆间昼夜温差而产生的以日周期交替变化为特征的风系。白天,由于陆地增温比海洋快,所以陆上等压面就会抬升,并在某一高度上出现空气由陆地流向海洋的现象,而海上的空气则会越过海岸流向陆地。夜间则与此相反。因此,海陆风的出现与海陆表面加热不同导致的温度梯度有密切关系^[3]。

海陆风对沿海地区的天气气候影响很大,这已为许多学者的研究所证明。海陆风虽然是由海陆温差引起的,但反过来又影响沿海地区的温度场、湿度场和风场的分

布^[37,41],从而影响沿海地区工农业生产的布局。可见开展对海陆风的研究,对提高天气预报(尤其是温度和风的预报)的准确率以及对沿海地区工农业生产有着重大的意义。另外,沿海地区有很多工业城市,工业生产过程中排放的污染物质的输送和扩散与海陆风的关系极为密切。研究表明,各测站的污染物质输送量与风速随时间的变化有着很好的相关关系。特别是由于夏季白天海陆风的形成,其发生时间,深入内陆的速度,风向风速的变化等特征左右了光化学污染物质的性质^[14,33-40]。沿海地区污染物质的扩散明显受海陆风和湍流扩散过程的影响。尽管海陆风在污染扩散问题上的重要性已引起了人们的注意,但对这方面的研究报道仍为数甚

少^[23]。所以开展海陆风的研究对了解沿海地区海陆风出现时的大气污染的基本特征,作出大气污染浓度预报也有相当重要的意义。

我国海岸线漫长,但至今对海陆风的观测研究工作开展并不多。为了有利于这方面工作的开展,这里简要介绍一些国外海陆风研究状况,并摘录一些文献,以供查阅参考。

二、观测研究

对海陆风现象的研究通常可以分为现场观测研究和理论研究。

虽然人们早已认识到沿海地区存在日周期变化的海陆风系,并且沿海渔民对其早有所利用,但是,直到十九世纪末期,人们还很少使用测量仪器对它进行观测,即使对其进行了一些观测,也仅限于在地面进行。100年前 J. K. Loughton(1873)认为,海风是“白天海上蒸发大,使海上大气产生弹性力,挤压陆地上的空气形成的”,但他根据气球探测经验,发现了高层大气存在着补偿流。进入本世纪以后,人们使用气球进行了高空风观测,并有了许多观测报告,例如 Van Bemmelen(1922); Braak(1923); Ramanathan(1931); Ramadas(1931); Koschmieder(1936, 1941); Bolezel etc.(1945)等等。当时由于技术上的限制,高空观测局限于低层,所以难于评价海风和陆风气层的厚度。Van Bemmelen(1922)的观测报告是一个很好的观测实例,他概括了海陆风系的特征,他的观测结果直至近来还经常被人引用。过去的研究结果还表明,海陆风的高度虽然随季节、纬度不同而有差异,但海风高度一般为 100~1000 米,陆风的高度为 100~300 米。从理论上计算的高空补偿流因初期观测高度较低,没有达到应有的测定高度,或是由于受盛行风的影响而难以确定。但在 500~3000 米的高度上存在补偿流确是不容否认的事实。海风深入内陆的距离一般为 20~50 公里,最大距离达 100 公里^[30]。在摩擦层上约 100 米高度附近,其最大风速可达数米/秒,热带地区的海陆风尺度

和风速一般都比中纬度地区的大^[42]。但是上述观测研究结果都是以陆上观测为主得出来的。第二次世界大战以后已开始使用船舶和飞机对包括海洋和陆地的海陆风系进行三度空间的观测。Fisher(1960)^[7]首先做了这方面的工作。日本的神户海洋气象台从 1953 年起也先后在濑户内海沿岸地区进行了几次海陆风立体观测^[43]。通过观测进一步认识了海陆风的空间结构。以 1971 年的立体观测为例,观测方法除了在海上、沿岸、内陆大致与风向一致的三个点上进行地面风和高空风的观测外,还施放等容气球,并利用直升飞机进行追踪。观测结果发现,从海上向陆地移动的空气受越山气流的影响和陆地局地上升气流、河流上空的相对下沉气流影响而作垂直运动;陆风环流上层相反的风向较为明显,而海风环流和自由大气分界面一般较为模糊;因受小岛等地形影响,该沿海地区海陆风的垂直结构颇为复杂。近年来,随着探测技术的发展,观测方法也有显著突破。Kozo(1982)^[19]利用北极冰动力学联合试验的机会对北纬 70 度的波弗特海沿岸的海陆风进行了观测。观测手段除采用一般常规观测仪器外,还使用卫星跟踪浮标,轻便式声雷达等先进设备。观测结果表明,海风是使阿拉斯加北极沿海大气边界层的风产生旋转的主要物理因素。还发现地面风矢量虽然是顺时针方向旋转,但不存在 360 度的旋转,也没有陆风。认为海风的一般特征是由于中尺度和大尺度气压梯度加上非线性自身平流对温度场和扰动速度的影响造成的。

三、理论研究

海陆风的理论研究可以分成线性理论研究和非线性理论研究两个阶段。

(1) 线性理论研究阶段

20 世纪初期,开始了以断面观测和 V. Bjerknes 的环流理论为依据的研究,发现海陆风为穿越海岸的垂直平面的直接环流,并起因于海陆间的温度差异。Jeffreys

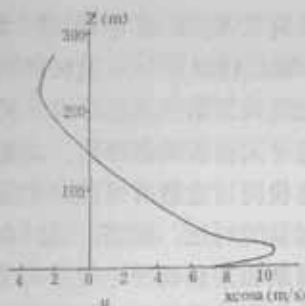


图 1 Jeffreys(1922)理论计算的海陆风垂直分布的一个实例

(1922)^[12]把海陆风看成主要是气压梯度力同摩擦力平衡的摩擦风，从而奠定了海陆风的定量理论的基础。

图 1 表示根据 Jeffreys 理论计算的结果。他假定海陆表面温差为 20°C ，水平方向的波长约为 60 公里，气温递减率为 $5^{\circ}\text{C}/\text{公里}$ ，涡动扩散系数为 10^4 厘米²/秒的情况下计算的结果。若以地面风速为 8 米/秒，高度为 150 米作为临界值，那么低层强海风时，高层则存在弱的补偿流。他的计算结果已相当明确地描述了海风的垂直结构，并抓住了海风现象的最根本机制。

此后，许多研究者对有关的物理过程给以某种程度的考虑之后，对上述理论作了反复改进。直至今日，根据如何处理所选择的物理因子部分的不同情况，则表现出各种不同的理论模式。

初期，Kobayashi 和 Sasaki(1932)，Arakawa 和 Utsugi(1937)等改进了 Jeffreys 理论。特别是 Arakawa 和 Utsugi，他们考虑了热量和动量的涡动交换、垂直运动产生的热量输送，以及地面温度的周期变化对大气的反应所表现的非定常演变进行了尝试。可以说这是把海陆风的特征更加具体化了。其方程解表明了几层迭加的环流上升或下沉的情况。涡动扩散系数(K)值越大，整个环流的厚度就越厚。在地面风速最大时，假定水平波长为 400 公里，气温递减率为 $4^{\circ}\text{C}/\text{公里}$ ， K 值为 $10^4, 10^5, 10^6$ 厘米²/秒，那么地表附近风向逆转的高度则各为 120, 500, 1000 米，而且

地面最大风速与海陆最大温差成正比。温差每增加 1°C ，风速即增加 1.6 米/秒^[42]。

第二次世界大战之后不久，Haurwitz(1947)^[9]研究了气压场及其随时间的变化；Schmidt(1947)^[20]研究了温度场及其随时间的变化，并研究了这些场对风系的影响问题，也获得了类似的结果。特别引人注目的是，这些研究中除了导入摩擦力以外，还引进了柯氏力。研究结果表明，柯氏力的主要作用是使北半球的风向作顺时针方向的旋转运动，并使风速的振幅增大(无摩擦时，在 30 度纬度上为无限大)。不考虑摩擦时，风速相位同海陆温差的相位之差——例如海风风速最大的时间与地面温度减去海面温度最大时的时间差——约为 $\frac{1}{4}$ 日周期，即 6 小时。但考

虑摩擦力之后，其差则减小。海陆风常采用与海岸线直交的垂直平面内的环流来描述。19 世纪末，据 Taylor(1887)，Davis 等(1890)等文章指出，海陆风风向每天转换一次，其转换方向在北半球为顺时针方向，在南半球则为逆时针方向；海风和陆风都是穿越海岸线平行吹的。其后，Sutcliffe(1937)根据观测结果，承认了上述事实，但直到第二次世界大战后 Haurwitz 等人才开始进行该理论的分析研究。

Defant(1951)^[4]也指出，根据规定的表面温度场，并导入垂直输送和涡动传导产生的热量垂直传输过程也可以缩短表面温度和风的相位之偏差。以 Defant 的结果为例，不考虑摩擦时，相位偏差约为 4.7 小时。图 2 表示考虑摩擦和柯氏力时地面附近平均风的速矢端迹^[42]。

以上表明，根据线性理论的研究可以阐明海陆风的基本物理机制，它作为一个定性的理论模式已达到相当满意的阶段了。但线性理论的研究仍存在许多缺点。其主要缺点是，为了获得方程的分析解，在求解过程中作了某些制约性的假定。例如规定周期性的温度场与海岸线垂直，这就在整个空间，或在

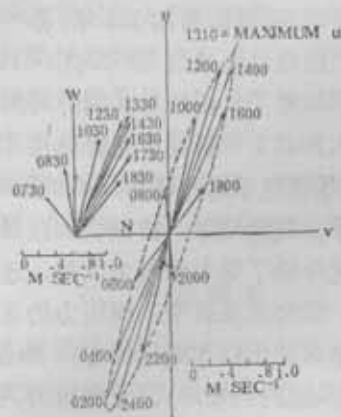


图2 考虑摩擦和柯氏效应模式计算的海陆风日变化。在北纬 45° 上,海陆温差在12时为最大。左上的矢量图为波士顿机场40次海风的平均风速矢端迹(Defant, 1951)

地面限制了海陆风现象的水平尺度;而且水平尺度增大,海陆间的温度梯度就减小,海陆风随之减弱,这是同实际不相符的。又如,温度场距海岸线远近的变化以正弦函数表示,亦不妥。另外,海风和陆风的非对称性问题在线性理论中也没得到充分研究。Haurwitz指出,一天的平均气压若存在从海洋向陆地的气压梯度时,则海风比陆风更强。但是问题在于为什么气压梯度的变化成为非对称性的呢?而且海陆的温度分布是如何连续变化,或者造成其变化的热量输送过程在海风和陆风时有何不同呢?这些问题很有必要进行深入的探讨。特别是湍流热量输送,它与大气温度和风的分布是相互依赖的,相反,大气状况又受湍流热输送显著影响。还有一个主要的问题是忽略了平流的作用。因为海风环流中,其罗斯贝数的量级为1,运动方程中的惯性力项与柯氏力项的大小几乎相等,显然,惯性项中不能忽略平流项。在热力学方程中亦是如此,海风产生之后,冷空气侵入陆地并使温度场变化,平流项的作用显然是很重要的。所以,欲使模式有一个突破性的发展,必须要研究海陆风的非线性过程。

(2) 非线性理论研究阶段

五十年代中期,使用数值方法的非线性

模式的研究正处于萌芽阶段(如Pearce, 1955; Fisher, 1961)^[24, 27]。这种研究使海陆风理论研究进入了第二近似阶段。又由于进一步正确地导入曲折的海岸线、陆地地面的起伏和热力状况,这就有可能同实际海陆风环流进行定量的对比。但是,当时由于受技术条件的限制和某些物理上假定的影响,不可能完全采用非线性过程的根本机理,所以无法获得完全可靠的解。

随着计算技术的进步,使海陆风的理论研究有了飞跃的发展。进入六十年代以后,开始正式研究海陆风现象的非线性过程。Estoque(1961)^[63]首先尝试使用计算机进行了运算,以数值方法来求解非线性方程,对垂直于海岸线的垂直平面中的海陆风进行了最基本的数值试验。Estoque(1962)^[63]根据无限大的和均匀的原平上边界层的数值试验,研究了在有天气尺度风和无天气尺度风两种情况下平直海岸线上的海陆风环流,即讨论了盛行风对海陆风环流的影响,发现离岸风加强了海陆风环流。同时还成功地解释了某些观测现象(例如在弱地转风影响下海风锋形成的问题)。在Estoque的研究工作之后,也有许多作者研究了有关海陆风的数值解的结果^[1, 20, 25-27, 31]。其中,有些作者研究了不规则海岸线对海陆风的影响^[19, 21];有些作者讨论了涡动扩散系数的不同垂直分布对海陆风环流的作用^[33],或者水汽对海陆风环流的影响^[18]。

用这些研究结果同Estoque研究以前的线性理论的结果相对比,表明非线性理论研究的结果更为接近实际,而且讨论了海陆风现象的详细特征。但在1976年以前的非线性理论研究中都没有考虑山脉对海陆风的影响。直至最近,有少数研究者(如Mahrer和Pielke, 1977; Ookouchi, Uryu和Sawada, 1978; Asia和Mistumoto, 1978)^[17, 22, 23]才开始使用数值方法讨论山脉对海陆风环流的影响。结果发现,山脉在热力上起了加强海陆风环流的作用,而在机制上却抑制了海陆风。

上述研究者获得数值解的方法都是使用有限差分格式,然后计算包括空间的每个网格点上的气象要素。但是,采用差分方法使许多研究者在计算速度场的变化上遇到不少难题,他们不能借用连续方程的垂直方向的差分形式,或使用某些数值过滤方法来解决。因此这种方法也有一定的局限性,因为受到网格大小以及所产生的线性计算的不稳定性的时间增量的限制。

后来, Iwashima 等 (1979)^[11] 使用波谱方法来代替求解流体力学方程组的有限差分方法之后,克服了计算过程中所遇到的难题。

最近,有些作者 (Sahashi, 1981; Kikuchi, 1981)^[7,8] 分别使用波谱方法来求解正交曲线坐标系和 Z^* 坐标系中海陆风的流体力学方程组,研究了任意地形对海陆风环流的影响。并通过试验获得了十分令人满意的结果,其与实测结果相比较,表明考虑山脉影响模拟的海陆风系比平坦地形模拟结果更与实际海陆风相似。

参 考 文 献

- [1] Anthes R. A., Keyser D. and Deardorff J. W., Further considerations on modeling the sea breeze with a mixed-layer model. *Mon. Wea. Rev.*, 1982, (110), No. 7, 757—765.
- [2] Asai T. and Mitsumoto S., Effects of an inclined land surface on the land and sea breeze circulation: A numerical experiment. *J. Met. Soc. Japan*, 1978, (56), No. 6, 559—570.
- [3] Barbato J. P., Area parameters of the sea breeze and its vertical structure in the Boston Basin. *BAMS*, 1978, (59), No. 11, 1420—1431.
- [4] Defant F., Local winds. *Compendium of meteorology*. Amer. Meteor. Soc., 1951, 655—672.
- [5] Estoque M. A., A Theoretical investigation of the sea breeze. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 1961, (87), 136—146.
- [6] Estoque M. A., The sea breeze as a function of the prevailing synoptic situation. *J. Atmos. Sci.*, 1962, (19), 244—250.
- [7] Fisher E. L., An observational study of the sea breeze. *J. Atmos. Sci.*, 1960, (17), 645—660.
- [8] Fisher E. L., A theoretical study of the sea breeze. *J. Met.* 1961, (18), 216—233.
- [9] Haurwitz B., Comments on the sea-breeze circulation. *J. Met.*, 1974, (4), 1—8.
- [10] Hawkins J. D., A study of the mesoscale wind circulation in a land-sea breeze regime. *BAMS*, 1977, (58), No. 12, 1289—1295.
- [11] Iwashima T., Moriyama S. and Yamamoto R., A spectral model for the study of the atmospheric general circulation. *J. Met. Soc. Japan*, 1979, (57), 97—111.
- [12] Jeffreys H., On the dynamics of wind. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 1922, (48), 29—46.
- [13] Kikuchi Y., Arakawa S., Kimura F., Shiraki K. and Nagano Y., Numerical study on the effects of mountain on the land and sea breeze circulation in the Kanto District. *J. Met. Soc. Japan*, 1981, (59), 723—738.
- [14] Kondo H. and Gambo K., The effect of the mixing layer on the sea breeze circulation and the diffusion of pollutants associated with land-sea breeze. *J. Met. Soc. Japan*, 1979, (57), 560—575.
- [15] Kozo T. L., A mathematical model of sea breeze along the Alaskan Beaufort Sea Coast: Part II. *J. Appl. Met.*, 1982, (21), 906—924.
- [16] Kozo T. L., An observational study of sea breeze along the Alaskan Beaufort Sea Coast: Part I. *J. Appl. Met.*, 1982, (21), 891—905.
- [17] Mahrer Y. and Pielke R. A., The effect of topography on sea and land breezes in a two-dimensional numerical model. *Mon Wea. Rev.*, 1977, (105), 1151—1162.
- [18] Magata M., A study of the breeze by the numerical experiment. *Paper Met. Geophy.*, 1965, (16), 23—37.
- [19] McPherson R. D., A numerical study of the effects of a coastal irregularity on the sea breeze. *J. Appl. Met.*, 1970, (9), 767—777.
- [20] Neumann J. and Mahrer Y., A theoretical study of the land and sea breeze circulations. *J. Atmos. Sci.*, 1971, (28), 532—542.
- [21] Neumann J. and Mahrer Y., A theoretical study of the sea and land breeze of circular islands. *J. Atmos. Sci.*, 1974, (31), 2026—2039.
- [22] Ookouchi Y., Uryu M. and Sawada R., A numerical study of the effects of a mountain on the land and sea breezes. *J. Met. Soc. Japan*, 1978, (56), 368—386.
- [23] Ozoe H., Shibata T., Sayama H. and Ueda H., Characteristics of air pollution in the presence of land and sea breeze—A numerical simulation. *Atmos. Environ.*, 1983, (17), 35—42.
- [24] Pearce R. P., The calculation of a sea-breeze circulation in terms of the differential heating across the coastline. *Quart. J. Roy. Met. Soc.*, 1955, (81), 351—381.
- [25] Pearson R. A., Properties of the sea-breeze front as shown by a numerical model. *J. Met.*

Soc., 1973,(30),1050—1060.

- [26] Physick W., A numerical model of the sea breeze phenomenon over a lake or gulf. J. Atmos. Sci., 1976,(33),2100—2135.
- [27] Pielke R. A., A three-dimensional numerical model of the sea breeze over south Florida., Mon. Wea. Rev., 1974,(102),115—139.
- [28] Sahrashi K., Numerical experiment of land and sea breeze circulation with undulating orography. Part I: Model., J. Met. Soc. Japan, 1981,(59),361—372.
- [29] Schmidt F. H., An elementary theory of land and sea breeze circulation. J. Met. 1947,(4), 9—15.
- [30] Simpson J. E., Mansfield D. A. and Milford J. R., Inland penetration of sea-breeze fronts., Quart. J. Roy. Met. Soc., 1977,(103).
- [31] Walsh J. E., Sea breeze theory and applications. J. Atmos. Sci., 1974,(31),2012—2026.
- [32] Yoshikado H., Statistical analysis of the sea breeze pattern in relation to general weather conditions., J. Met. Soc. Japan, 1981,(59), 98—107.
- [33] Yoshikado H. and Asai T., A numerical ex-

periment of effects of turbulent transfer processes on the land and sea breeze., Cont. Geophy. Inst. Kyoto Univ., 1972,(12),33—48.

- [34] 波多正二, 四日市の海風と大気汚染. 天気, 1971,(18),355—363.
- [35] 阿部信男., 大分市における夏季海陸風と二酸化硫黄濃度分布の关系. 天気, 1982,(29),87—90.
- [36] 若松伸司., 神奈川県の海風と大気汚染 (1). 天気, 1975,(22),79—83.
- [37] 七沢謙., 岡走地区の海陸風. 研究時報, 1979,(31),353—364.
- [38] 中村喜三雄, 東京, 神奈川付近の海風前線と光化学スモッグの発生. 天気, 1973,(18),539—540.
- [39] 吉門洋, 海風鋒と汚染物質. 天気, 1975,(22), 138.
- [40] 佐藤功, 海陸風と沿岸都市汚染. 天気, 1976,(23), 207—208.
- [41] 国保政行等, 海陸風に対する一般風の効果について. 天気, 1975,(22),565—567.
- [42] 浅井富雄, 中小規模擾乱に関する発展——その一断面. 天気, 1982,(29),677—700.
- [43] 根山芳晴, 瀬戸内の海陸風について. 天気, 1982,(29),653—668.