

邱晓暖, 范绍佳. 2013. 海陆风研究进展与我国沿海三地海陆风主要特征. 气象, 39(2): 186-193.

海陆风研究进展与我国沿海 三地海陆风主要特征^{* 1}

邱晓暖^{1,2} 范绍佳¹

1 中山大学环境科学与工程学院大气科学系, 广州 510275

2 广州市环境监测中心站, 广州 510030

提 要: 海陆风是发生在海岸附近由于海陆热力差异引起的中尺度环流, 对沿海地区天气气候和环境空气质量有重要影响, 本文综述海陆风研究进展与我国华南、长三角和环渤海 3 个不同地区海陆风的主要特征。海陆风研究可分为观测研究、理论研究、数值模拟研究。20 世纪 60 年代以来的观测研究表明, 全球高、中、低纬沿海地区都有海陆风。海陆风理论研究已从 20 世纪 20 年代力的平衡分析发展到海陆热力平衡非线性动力学解析与数值模拟相结合研究海陆风的参数化, 模拟研究已逐步成为主要手段。我国华南、长三角和环渤海 3 个不同地区海陆风有明显差异, 海风盛行和结束时间不尽相同, 低纬地区海风出现较晚, 甚至可持续至午夜时分。海陆风有可能造成污染物的累积, 使空气质量变差, 应引起沿海地区有关部门的重视。

关键词: 海陆风, 观测, 理论, 数值模拟

中图分类号: P425

文献标识码: A

doi: 10. 7519/j. issn. 1000-0526. 2013. 02. 007

Progress of Sea-Land Breeze Study and the Characteristics of Sea-Land Breeze in Three Coastal Areas in China

QIU Xiaonuan^{1,2} FAN Shaojia¹

1 School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-Sen University, Guangzhou 510275

2 Guangzhou Environmental Monitoring Center, Guangzhou 510030

Abstract: Sea-land breeze is a mesoscale weather system due to the different heating between sea and land, with important influence in air quality, weather and climate of coastal areas. This paper describes the study of sea-land breeze on observation, theory and numerical simulation, and in addition the characteristics of sea-land breeze in three coastal areas in China. Sea-land breeze is a common phenomenon in coastal area. It has been observed in mid-latitudes, also high and low latitudes by field experiments since the 1960s. Theoretical studies can be divided into the analytical and the numerical studies. The analytical studies began from analyzing the force balance in the 1920s, and went into thermodynamic equilibrium and non-linear dynamic characteristics of sea-land breeze, combined with numerical simulation at last. The numerical studies have gone into practical application. Studies have shown that sea breeze begins in the late morning, ends in different time in regions. Land breeze begins in midnight, ends in the morning. Sea-land breeze may cause the accumulation of pollutants, making the air quality worse. It should be paid attention.

Key words: sea-land breeze, observation, theory, simulation

* 国家自然科学基金(40875007 和 41275017)及国家 973 计划项目(2011CB403403)共同资助

2011 年 12 月 19 日收稿; 2012 年 7 月 31 日收修定稿

第一作者: 邱晓暖, 主要从事空气质量预报和污染气象研究. Email: xiaonuan_2004@yahoo. com. cn

通信作者: 范绍佳, 主要从事环境气象、污染气象和大气边界层研究. Email: eesfsj@mail. sysu. edu. cn

引言

海陆风是发生在海岸附近由于海陆热力差异引起的大气中尺度环流,其发生的原因主要是由于海陆热容量差异导致的受热不均匀。国内外海陆风研究大体可区分为观测分析、理论及数值模拟研究。海陆风的野外观测研究,早期主要利用船舶、飞机以及气象铁塔等获得观测数据,随着科学技术的进步,除了常规的观测仪器外,气象观测飞机、卫星跟踪浮标、轻便式声雷达、多普勒雷达、激光雷达和廓线仪等也应用到海陆风的观测中,对海陆风的观测更加精细、全面。海陆风理论研究,最初是从简单的力的平衡讨论开始,后发展为复杂的海陆热力平衡的非线性动力学解析,这也是后来数值模拟的基础,计算机的使用使得含有参数化方案的数值模拟更为便捷,目前已经出现了结合野外观测和污染过程的海陆风模拟。应用多种观测手段并结合数值模拟,有助于海陆风环流详细信息的获得,也有助于分析海陆风对局地天气过程、污染物输送的影响。

1 观测分析

较早的海陆风观测试验开始于20世纪60、70年代。Fisher(1960)利用气象气球对美国东北部的Rhode和Block进行过海陆风观测研究,Feit(1969)则利用气象铁塔对Texas的海陆风进行观测研究。Simpson等(1977)利用气象气球、雷达等对英格兰南部Lasham的观测研究发现,海风的发生频率跟潮水的涨落有关。北京大学地球物理系1976年在锦西沿海地区进行的探测研究,是我国较早的海陆风观测。

观测研究发现,大陆沿海地区,海陆风是一种普遍现象。高纬度地区(纬度在 60°N 以上地区),Kozo(1982)发现在Alaska的Beaufort海岸(70°N)存在海陆风,他认为海风的一般特征是由于中尺度和大尺度气压梯度相互作用和非线性平流对温度场及风场的影响造成的。

中纬度地区($30^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$)海陆风观测主要集中在欧洲、北美、澳大利亚和东亚。Kraus等(1990)对澳大利亚南部Coorong沿岸的海风锋动力结构和热力过程进行了观测研究。Banta等(1993)在California的Monterey海湾利用脉冲式多普勒雷达发

现海风发生时较难观测到其他的陆风回流。Finkele等(1995)同样在澳大利亚南部的Coorong沿岸观测到了完整的海陆风环流,发现该环流是非对称的,海风部分远大于陆风部分,并且观测到了海风在海上及陆上分别存在辐散和辐合流场。Puygrenier等(2005)对法国Mareille地区的海陆风观测发现该地区海风通过影响边界层高度及垂直扩散而造成污染物的累积,海风风速小一大一小的三段时期 NO_2 浓度出现高一低一高的变化。Bouchlaghem等(2007)通过个例介绍了地中海Tunisia地区海风对污染的影响,该地区海风进入陆地后转向将某发电厂的污染物向风向下游输送造成Sousse污染物浓度上升。近年自动气象站网的建立,也为Prtenjak等(2007)和Azorin-Molina等(2009)的海陆风研究提供了便利。Prtenjak等(2007)对Borne等(1998)的海陆风判定方法作部分修改后,对克罗地亚Adriatic沿岸的研究发现该地区海陆风频率在 $37\%\sim 60\%$ 之间,海风一般在当地时间08时开始并平均持续10小时,且在14—15时海风风速达到最大值。Azorin-Molina等(2009)以850 hPa风场作为系统风,研究发现西班牙Alicante地区离岸系统风会使海风开始时间推迟、持续时间延长及风速加强,向岸系统风则相反。

国内环渤海地区,于恩洪等(1987),陈斌等(1989)对渤海湾西部的海陆风观测研究发现,天津塘沽地区的海陆风出现频率全年平均为 41.2% ,各月频率从 17% 到 59% 不等,天津市的城市热岛效应使海风加强,陆风减弱。吴增茂(1989)对山东东营市的气象站资料和大气探测资料进行研究,提出了根据动力条件和气象要素变化特征来判断海陆风生消的方法。蒋维楣等(1991)通过对秦皇岛的观测研究,提出了一个由未受海陆风环流影响高度的平均风速和水陆最大温差定义的海陆风出现指数。Cheng(2002)对台湾的海峡沿岸研究发现,该地区夏季和冬季的海风存在一定角度偏差,带来了不同污染源的污染物,同时由于冬季海风环流厚度比夏季小使该地区冬季 O_3 浓度明显高于夏季。卢焕珍等(2008)利用天津新一代天气雷达结合地面自动气象站实时资料研究发现,雷达探测到的沿海岸线形成的边界层辐合线和渤海湾海陆风辐合线有对应关系,并且这种海陆风辐合线只有在每年的5—9月才能在雷达上观测到。此外,还有陈丕宏等(1988)对辽东半岛南部,王赐震等(1988)对山东半岛北部,张

振维等(1991)对辽东湾西部,仲伟民(1993)对烟台,薛德强等(1995a; 1995b)对山东半岛,殷达中等(1997)对辽东半岛西岸,王玉国等(2004)对辽东湾西岸,庄子善等(2005)对日照,刘玉彻等(2007)对大连金州,黄容等(2008)对青岛,陶岚等(2009)对上海,东高红等(2011)对渤海西岸,何群英等(2011)对天津的海陆风研究。

低纬度地区的海陆风研究主要有,朱乾根等(1983)对华南沿海的海陆风研究指出,海陆风对温压梯度的削弱作用,制约了海陆风本身的发展。李惠丰等(1985)对浙江沿海的研究发现,海陆风出现在晴天的几率较高,而周钦华等(1987)等对浙江沿海的研究则发现,海陆风造成的地面风辐合带和当地的大暴雨有一定关系。金文其(1988)研究发现厦门的海陆风在每年7月最多,海风夏季比冬季早2 h开始,陆风则冬季比夏季早2 h开始。徐金辉等(1992)提出了 $20^{\circ}\sim 25^{\circ}\text{N}$ 、 $110^{\circ}\sim 117^{\circ}\text{E}$ 区域内不超过1条等压线的弱环流形势判定标准对广东沿海的海陆风进行研究。吴兑等(1995)在海口的观测研究发现,该地区海陆风频率较高,海风持续时间一般为1~4 h,最长可达10 h。此外,还有孔宁谦等(1998)对广西北海,周伯生等(2002)对广东阳江,官满元(2005)对海南万宁,黄梅丽等(2005)对广西,周武等(2008)对阳江,王祖炉等(2009)对福建宁德的海陆风研究。

珠江三角洲地区的海陆风研究方面,黄志兴等(1985)利用伶仃洋及其附近站点的气象站资料和大气探测资料研究发现,该地区海陆风在夏秋季出现频率较高,内陆站与沿海站海陆风转换时间和强度存在明显差异。吴祖常等(1991)对内伶仃岛海陆风的观测分析发现晴天有海陆风时边界层有两层不接地逆温,晴天无海陆风时只有一层不接地逆温。高绍凤等(1993)对珠江三角洲的研究发现珠江三角洲的海陆风频率在25%~30%之间,最强海风出现在珠江喇叭口颈部。李明华等(2007; 2008a; 2008b)对珠江口西岸的海陆风进行了观测,分析发现该地区10月海风出现和结束的时间都较晚,且海风发生时珠江口容易出现低空逆温,并抑制城市群空气污染物向下风向输送造成污染物的“堆积”。

观测分析表明:海陆风是海陆热力差异引起的中尺度环流,具有明显的日变化特征,能够形成与降水有关的强辐合中心,也可能造成污染物的循环累积,使空气质量变差。图1是海陆热力差异引起的

海风环流和陆风环流,图2是海陆风造成的污染物累积,图3是海陆风形成的辐合、辐散中心。

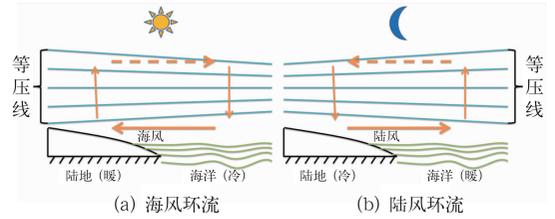


图1 海陆热力差异引起的海风环流(a)和陆风环流(b)

Fig. 1 Sea breeze circulation (a) and land breeze circulation (b) caused by sea-land temperature contrast

如图1所示,海陆风的建立具有突发性,它是海陆热力差异引起的中尺度环流,是在外界加热作用下的一种强迫的中尺度运动,而海陆风产生后又对温压梯度形成削弱作用,将制约海陆风本身的发展。

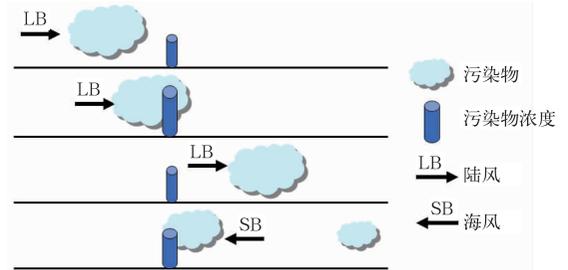


图2 海陆风造成的污染物累积
Fig. 2 Accumulation of pollutants caused by sea-land breeze

如图2所示,海陆风过程可能造成污染物的循环累积,使空气质量变差。污染物从污染源排出后,通过陆风输送扩散到一定距离外,风向转换后,扩散出去的污染物又被海风输送回源地附近,造成污染物的累积,使污染物浓度升高,污染加重;同时在循环累积过程中,加剧二次污染物产生。

如图3所示,海陆风与一定的海岸线形状相结合,常形成强的辐合中心,这些中心也正是强的降水中心,但不能认为海陆风是决定降水的主要因子,它只是在一定天气背景下对降水起到触发和加强作用。

2 理论及数值模拟研究

Jeffreys(1922)首次提出海陆风是气压梯度力

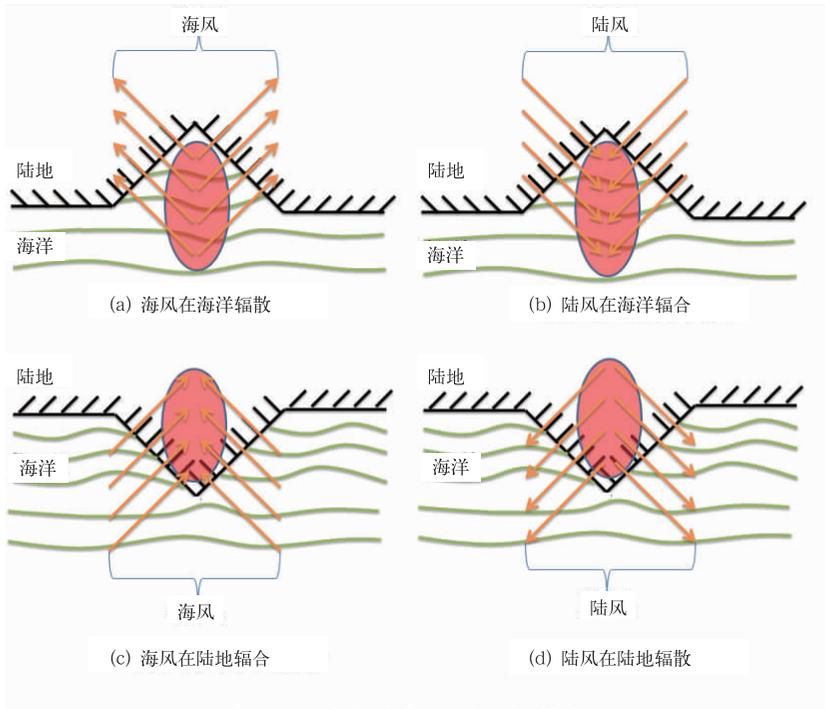


图 3 海陆风形成的辐合及辐散中心

Fig. 3 Convergence and divergence of sea-land breeze

和摩擦力平衡的摩擦风,从而奠定了海陆风理论研究的基础。Haurwitz(1947)则讨论了摩擦力和地球自转偏向力的作用,他指出,海风强度随着海陆温差的减小而增大,并由于摩擦力的作用使海风强度在海陆温差减为零之前达到最大值。Schmidt(1947)指出,由于科氏力的作用,最大强度海风出现时,其方向不是垂直于海岸线,而是向右偏转(北半球)。这些关于海陆风的线性理论研究,能够定性解释海陆风的基本物理机制,计算得到的结果也在一定程度上与实际相符,但其对海陆风的非对称性问题没有充分考虑,而无法模拟出观测中常见的海陆风风向的突然转变。

为了解决这些问题,20世纪50年代中期,人们开始尝试使用数值模拟手段来研究海陆风。Pearce(1955)最早采用非线性方程计算海陆风环流的变化,他在垂直于平直海岸线方向上,以等温和静力平衡为初始条件进行不同的加热,计算了产生的海风的速度、温度和气压分布,指出了在海陆风模拟中非线性项的重要性。在对Rhode岛海陆风的观测研究基础上,Fisher(1961)使用了和Pearce相同的运动方程及不同的加热函数进行研究,成功地模拟了海风的发展和由于科氏力而引起的旋转效应。Estoque(1961;1962)改进了Pearce和Fisher的加热

函数,模拟了湍流扩散、不均匀加热及大尺度风对海风的作用,模拟的结果反映了海风锋面的特点,其研究成果为后来海陆风环流的数值研究奠定了基础。其后二维模式被McPherson(1970)推广到三维,研究不规则海岸线对海陆风的影响。Neumann等(1971;1974)改进了Estoque的模式来研究海陆风环流特别是陆风的日变化,得到了与预期一样的水平辐散的陆风。Pielke(1974)建立了首个比较完善的三维原始方程模式,该模式采用实际的海岸线和地形,并完善地面加热部分,奠定了用数值方法研究海陆风环流三维结构的基础。Bechtold等(1991)、Arritt(1993)模拟了大尺度风对海陆风的影响,研究表明向岸或离岸方向的大尺度风对海风环流的强度影响最大,而平行于海岸线的大尺度风对海风的强度大小几乎没有影响。此外,还有Mahrer等(1977)从山脉,Anthes(1982)从纬度和地形,Koo等(1995a;1995b)从非流体静力模式等角度对海陆风进行的理论研究。

我国关于海陆风的理论研究起步相对较晚,程志强(1983)对运动方程进行参数化得到一个比较简单的理论模式,模拟了海陆风环流日变化的基本特征。王辉等(1989)用参数化方法研究积云对流凝结加热对海陆风的作用。杜俊(1989)利用Boussinesq

流体二维运动方程,讨论了海陆风的动力学特征。金皓等(1991)利用地形坐标,建立了一个三维海陆风模式,模拟城市、斜坡和海岸形状等对海陆风的影响,结果表明,海陆风主要受海陆温差影响,海岸线附近的坡地和城市的存在,对海风发展有利。

随着计算机技术的发展,计算能力和海陆风模型的改善,海陆风的数值模拟中引入了实际地形和实测气象资料,海陆风的数值模拟研究进入了实际应用阶段。

Nester(1995)研究发现有海风时希腊 Athens 的混合层高度偏低不利于污染物的扩散,同时海风也将陆风输送到下风向的污染物往回输送造成污染物的累积。Tijm 等(1999)对荷兰北海的海陆风模拟发现海风环流的强度和厚度,受初始垂直温度廓线和大气边界层高度影响明显。Clappier 等(2000)研究发现系统风较弱时,多支海风在希腊半岛形成辐合带使该地区 O_3 浓度显著升高。Plant 等(2002)对波斯湾的海陆风模拟发现海风环流产生时也同时出现了热内边界层。Gilliam 等(2004)对美国东南部 Carolina 的海陆风研究发现该地区离岸系统风对海陆风有加强作用,离岸系统风使海风锋较早产生但对其强度的贡献不如向岸系统风的作用大。Srinivas 等(2006)利用 MM5 模式对印度 Kalkpakam 的海陆风研究发现该地区夏季比冬季海风发展更早、强度更大且深入陆地范围更深。Talbot 等(2007)利用声雷达和光雷达资料结合数值模拟研究法国北海的一个海风过程,研究发现该海风过程在陆上形成一个明显的热内边界层,热内边界层内污染物以烟熏型扩散。Dandou 等(2009)利用 MM5 模式研究希腊 Athens 城市化对海陆风及城市热岛环流的影响,研究发现城市热岛环流产生时对海陆风有加强作用,同时海风锋的产生会阻碍海风向内陆的推进。

我国环渤海地区,王赐震等(1988)在对山东半岛北部海陆风观测的基础上,对大尺度环流影响下海陆风变化的多样性进行了数值试验研究,并对该区海陆风模拟的参数化改进以及陆风环流的展开机制等方面提出一些看法。常志清等(2002)采用地形影响修正的三维中尺度流体静力学气象学模式,对青岛地区海陆风的日变化规律和三维结构进行了较细致的分析。此外,游春华等(2006)对京津地区,李庆宝等(2008)对青岛,刘树华等(2009)对京津冀地区,王玉国等(2009)对辽东湾西岸,孙贞等(2009)对青

岛的海陆风也进行了模拟研究。

华南地区,向可宗(1986)考虑了海陆风效应和广东沿海垂直扩散及降水冲洗作用均较强等特点,提出了关于广东沿海海陆风的扩散模式。王雪梅等(1996)在非局地闭合模式下对海风环流进行模拟。蔡榕硕等(2003)研制了一个针对台湾海峡海陆风数值模拟的二维模式,较好地模拟了海峡两岸的海陆风变化规律。付秀华等(1991)对浙江宁波,钟中等(1993)对雷州半岛,张祯玺等(2004)对福建惠安,文伟俊等(2009)对广西的海陆风也进行了数值模拟。

珠江三角洲地区,张立凤等(1999)由 Mass 模式的诊断结果得到了珠江口地区海陆风风系分布的概念模型:吹海风时,珠江口沿岸存在扇形风系和扇形辐合带;吹陆风时,珠江口海面上存在东西两岸陆风的辐合。Lin 等(2001)利用 MM5 模式对澳门及其附近地区的海陆风三维结构进行模拟。Liu 等(2002)在香港的模拟发现海陆风增加了该地区流场的复杂性,多支海风在该地区形成辐合带使辐合带内及下风向地区的污染物浓度偏高。Ding 等(2004)模拟发现离岸系统风、海风及低边界层高度造成了香港地区一次长时间臭氧污染事件。陈训来等(2007)模拟发现香港地区海陆风受曲折海岸线和众多小山脉影响,分成许多小支海风环流,相互作用形成复杂的辐合带。此外,陈训来等(2008)模拟了海陆风对珠江三角洲区域性灰霾形成的影响,研究表明陆风与离岸型背景风向相同,风的输送使珠三角沿海城市和海面 PM_{10} 浓度较高,海风与离岸型背景风向相反,使海风较小,造成整个珠三角灰霾天气比较严重。

3 我国沿海三地区海陆风主要特点

我国沿海地区海陆风研究表明:我国海陆风夏季频率高于冬季,海风强于陆风。海陆风频率辽东湾西部夏季超过 20%,而冬季则在 15%左右(张振维等,1991),7 月份甚至出现过 31%的频率(殷达中等,1997),但仍低于广东深圳的 48.7%(黄志兴等,1985)。辽东湾西部海风夏季最高风速为 $3.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,陆风则是 $2.8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,冬季海风出现 $4.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,而陆风只有 $3.7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (张振维等,1991)。而在厦门则出现夏季海风最大为 $8 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,冬季 $10 \sim 12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,陆风则是夏季 $8 \sim 10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,冬季 $6 \sim 8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (金文其,1988),但在香港则海风最

大风速只有 $4.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (张立凤等, 1999)。海风开始时间始于上午晚些至中午, 环渤海和华南地区多在上午 07—09 时和 09—10 时开始, 而长三角则是接近中午; 海风结束时间各地区不尽相同, 环渤海地区结束得较早, 多在 18 时前后, 低纬度地区结束时间较晚, 长三角和华南地区海风甚至持续至午夜 (23

时); 陆风多在午夜开始, 早晨结束, 其中环渤海地区开始和结束时间均比较早, 而长三角和华南地区陆风则有时持续到中午。海陆风开始和结束的时间, 随纬度和季节而变。纬度越低, 海风开始和结束的时间有越晚的倾向。表 1 给出我国各地区海陆风特征。

表 1 各地区海陆风特征

Table 1 Characteristics of sea-land breeze in three regions

地点	海风时间	陆风时间	海陆风日频率
环渤海地区	夏: 07(09)—18(20) 冬: 11—17(18)	夏: 20—06(07) 冬: 19—09(10)	夏秋高于冬春, 年均频率 23% 左右
长三角地区	夏: 11—21(23) 冬: 12(13)—22(23)	夏: 23—09(11) 冬: 00—12	9 月高于 2 月, 频率皆超过 30%, 9 月椒江站甚至接近 50%
华南地区	夏: 09(10)—22(23) 冬: 10(13)—20(23)	夏: 00—08 冬: 22(23)—10(12)	夏秋高于冬春, 年均频率 20%~35% (珠江口: 25%~35%, 夏季略高于冬季)

海陆风和一定的海岸线形状相结合, 常形成强的辐合中心, 这些中心也正是强的降水中心, 但不能认为海陆风是决定降水的主要因子, 它只是在一定天气背景下对降水起到触发和加强作用。海陆风有可能造成污染物的累积, 使空气质量变差。

4 结 论

海陆风是在外界加热作用下的一种强迫的中尺度运动。海陆风研究中, 如何有效判断系统风和海陆风是重点也是难题, 目前所使用的方法多是: (1) 通过判定大范围天气状态选择系统风对海陆风影响小的个例进行研究, 如徐金辉的区域等压线判定法; (2) 将风分解成垂直于海岸线方向的 u 风和平行于海岸线方向的 v 风, 把 u 风作为海陆风; (3) 朱乾根等的月时间距平法; (4) 对海陆风的风速加以限制, 如于恩洪等的方法。虽然这些方法都在一定程度上避免或去除了系统风对海陆风的影响, 但并没有真正地分离了系统风和海陆风, 而且(1)和(2)两种方法在推广应用方面也分别受到了数据和海岸线走向的限制。

由于航空管制等原因, 海陆风野外放球试验进行难度较大, 不利于海陆风研究数据资料的收集, 研究海陆风将更多地利用日记风或自动气象站数据等连续自动监测数据。对于连续自动监测数据, 海陆风统计工作量巨大, 传统的先判天气系统, 再判定海陆风日的方法不再适用。参考朱乾根等的月时间距平法, 计算平均向量作为系统风, 剔除后再判定海陆风是比较可行的。该方法能够使用量化标准便于程

序化, 是较为有效快捷的方法, 用于大量的连续自动监测数据分析时十分方便, 能够统计海陆风详细特征, 同时也具有推广应用的可能。

参考文献

- 蔡榕硕, 严邦良, 黄荣辉. 2003. 台湾海峡海陆风数值模式与数值模拟试验. 大气科学, 27(1): 86-96.
- 常志清, 吴增茂, 高山红. 2002. 青岛海陆风三维结构的数值模拟. 青岛海洋大学学报(自然科学版), 44(6): 877-883.
- 陈彬, 于恩洪. 1989. 渤海湾西部海陆风的天气气候特征. 海洋通报, 8(1): 23-29.
- 陈丕宏, 张俊. 1988. 辽东半岛南部海陆风分析. 辽宁师范大学学报(自然科学版), (3): 64-70.
- 陈训来, 冯业荣, 范绍佳, 等. 2008. 离岸型背景风和海陆风对珠江三角洲地区灰霾天气的影响. 大气科学, 32(3): 530-542.
- 陈训来, 王安宇, 李江南, 等. 2007. 香港地区海陆风的显式模拟研究. 气象科学, 27(5): 473-480.
- 程志强. 1983. 海陆风环流的基本模式. 热带海洋学报, 2(4): 296-301.
- 东高红, 何群英, 刘一玮, 等. 2011. 海风锋在渤海西岸局地暴雨过程中的作用. 气象, 37(9): 1100-1107.
- 杜俊. 1989. 中尺度海陆风环流的动力学特征. 南京大学学报(自然科学版), 35(4): 696-704.
- 付秀华, 李兴生, 吕乃平, 等. 1991. 复杂地形条件下三维海陆风数值模拟. 应用气象学报, 2(2): 113-123.
- 高绍凤, 杨兆礼. 1993. 珠江三角洲初夏海陆风特征. 中山大学学报论丛, 1993, (1): 87-92.
- 官满元. 2005. 海风与谷风环流对万宁气候的影响. 广西气象, 2005, (1): 33-34, 30.
- 何群英, 解以扬, 东高红, 等. 2011. 海陆风环流在天津 2009 年 9 月 26 日局地暴雨过程中的作用. 气象, 37(3): 291-297.
- 黄梅丽, 苏志, 周绍毅. 2005. 广西海陆风的地面气候特征分析. 广西气象, 2005(S2): 21-22, 66.

- 黄容,漆梁波,李庆宝,等. 2008. 青岛近海夏季海风分型及预报. 气象,34(S1):223-229.
- 黄志兴,刘嘉玲. 1985. 伶仃洋海陆风观测的初步结果. 热带海洋学报,4(3):21-29.
- 蒋维楣,王彦昌,钟世远. 1991. 海岸地区边界层风及其输送扩散特性的观测研究. 海洋与湖沼,22(2):140-147.
- 金皓,王彦昌. 1991. 三维海陆风的数值模拟. 大气科学,15(5):25-32.
- 金文其. 1988. 厦门的海陆风. 气象,14(9):31-33.
- 孔宁谦,欧志方. 1998. 北海海陆风环流特征分析. 广西气象,1998,(2):34-36.
- 李惠丰,袁德辉. 1985. 浙江沿海海陆风的初步分析. 东海海洋,1985,(1):12-16.
- 李明华,范绍佳,王宝民,等. 2007. 2004年10月珠江口西岸海陆风特征观测研究. 中山大学学报(自然科学版),46(2):123-125.
- 李明华,范绍佳,王宝民,等. 2008a. 珠江三角洲秋季大气边界层温度和廓线观测研究. 应用气象学报,19(1):53-60.
- 李明华,范绍佳,王宝民,等. 2008b. 秋季珠江口地区海风对城市群空气污染的影响. 中山大学学报(自然科学版),47(4):114-121.
- 李庆宝,孙桂平,张苏平,等. 2008. 青岛奥帆赛场浮标站弱风成因. 气象,34(S1):64-73.
- 刘树华,刘振鑫,李炬,等. 2009. 京津冀地区大气局地环流耦合效应的数值模拟. 中国科学(D辑:地球科学),39(1):88-98.
- 刘玉彻,杨森. 2007. 大连金州地区海陆风特征分析. 气象与环境学报,23(2):25-28.
- 卢焕珍,赵玉洁,俞小鼎,等. 2008. 雷达观测的渤海湾海陆风辐合线与自动站资料的对比分析. 气象,34(9):57-64, 130.
- 孙贞,高荣珍,张进,等. 2009. 青岛地区8月一次海风环流实例分析和WRF模拟. 气象,35(8):76-84.
- 陶岚,戴建华,陈雷,等. 2009. 一次雷暴冷流出中新生强脉冲风暴的分析. 气象,35(3):29-36.
- 王赐震,宋西龙. 1988. 山东半岛北部沿海的海陆风. 海洋学报(中文版),6(6):678-686.
- 王辉,伍荣生. 1989. 积云凝结加热对海陆风的作用. 气象学报,47(4):402-411.
- 王雪梅,蒋维楣. 1996. 非局地闭合模式模拟海风环流. 热带气象学报,12(1):72-77.
- 王玉国,吴增茂,常志清. 2004. 辽东湾西岸海陆风特征分析. 海洋预报,(3):57-63.
- 王玉国,吴增茂,常志清,等. 2009. 辽东湾西岸三维海陆风特征的数值模拟. 海洋预报,(3):12-21.
- 王祖炉,陈彬彬,吴幸毓,等. 2009. 福建宁德沿海海陆风观测结果及特征分析. 安徽农业科学,37(20):9572-9574, 9614.
- 文伟俊,沈桐立,丁治英,等. 2009. 城市化对广西夏季海陆风影响的数值试验. 热带气象学报,25(3):350-356.
- 吴兑,陈位超,游积平. 1995. 海口地区近地层流场与海陆风结构的研究. 热带气象学报,11(4):306-314.
- 吴增茂. 1989. 渤海南岸海陆风个例分析及判别. 海洋与湖沼,20(1):87-91.
- 吴祖常,董保群,任阵海,等. 1991. 内伶仃岛及其附近海面低层大气的平均结构. 热带气象学报,7(2):162-169.
- 向可宗. 1986. 广东沿海海陆风扩散模式. 热带海洋学报,5(4):55-61.
- 徐金辉,郭绵钊,梁汉民. 1992. 广东沿海地区海陆风特征及其分布规律. 气象科学,12(2):188-199.
- 薛德强,郑全岭,钱喜镇,等. 1995a. 山东半岛的海陆风环流及其影响. 南京气象学院学报,18(2):293-299.
- 薛德强,郑全岭,钱喜镇,等. 1995b. 龙口的海风及其影响. 海洋湖沼通报,26(3):1-9.
- 殷达中,刘万军,李佃佐. 1997. 辽东半岛西岸海陆风及热内边界层的观测研究. 气象,23(9):9-12.
- 游春华,蔡旭晖,宋宇,等. 2006. 京津地区夏季大气局地环流背景研究. 北京大学学报(自然科学版),52(6):779-783.
- 于恩洪,陈彬,白玉荣. 1987. 渤海湾西部海陆风的空间结构. 气象学报,45(3):379-381.
- 张立凤,张铭,林宏源. 1999. 珠江口地区海陆风系的研究. 大气科学,33(5):581-589.
- 张祯玺,蔡旭晖,康凌,等. 2004. 福建惠安沿海中尺度大气流动和扩散特征研究. 环境科学研究,17(6):5-11.
- 张振维,李东红,王瑛. 1991. 辽东湾西部地区海陆风初探. 气象科学,11(2):205-213.
- 仲伟民. 1993. 烟台地区海陆风特点. 海洋通报,12(3):26-29.
- 钟中,周学群. 1993. 雷州半岛海风环流的数值研究. 热带气象学报,9(1):46-54.
- 周伯生,汪永新,俞健国,等. 2002. 广东阳江沿海地区海陆风观测结果及其特征分析. 热带气象学报,18(2):188-192.
- 周钦华,刘小根,戚优华,等. 1987. 浙江沿海海陆风环流特征研究. 浙江大学学报(理学版),14(1):109-120.
- 周武,黄小丹,黄忠,等. 2008. 阳江地区海陆风特征及其影响. 气象,34(12):44-53, 132.
- 朱乾根,周军,王志明,等. 1983. 华南沿海五月份海陆风温压场特征与降水. 南京气象学院学报,6(2):150-158.
- 庄子善,郑美琴,王继秀,等. 2005. 日照沿海海陆风的气候特点及其对天气的影响. 气象,31(9):66-70.
- Anthes R A, Keyser D, Deardorff J W. 1982. Further considerations on modeling the sea breeze with a mixed-layer model. Mon Wea Rev,110(7):757-765.
- Arritt R W. 1993. Effects of the large-scale flow on characteristic features of the sea breeze. J Applied Meteor,32(1):116-125.
- Azorin-Molina C, Chen D. 2009. A climatological study of the influence of synoptic-scale flows on sea breeze evolution in the bay of Alicante (Spain). Theoretical and Applied Climatology,96(3):249-260.
- Banta R M, Olivier L D, Levinson D H. 1993. Evolution of the monterey bay sea-breeze layer as observed by pulsed doppler lidar. J Atmos Sci,50(24):3959-3982.
- Bechtold P, Pinty J, Mascart F. 1991. A numerical investigation of the influence of large-scale winds on sea-breeze- and inland-breeze-type circulations. J Applied Meteor,30(9):1268-1279.
- Borne K, Chen D, M N. 1998. A method for finding sea breeze days under stable synoptic conditions and its application to the swedish west coast. International Journal of Climatology,18(8):

- 901-914.
- Bouchlaghem K, Mansour F B, Elouragini S. 2007. Impact of a sea breeze event on air pollution at the eastern Tunisian Coast. *Atmospheric Research*, 86(2):162-172.
- Cheng W. 2002. Ozone distribution in coastal central taiwan under sea-breeze conditions. *Atmospheric Environment*, 36(21):3445-3459.
- Clappier A, Martilli A, Grossi P, et al. 2000. Effect of sea breeze on air pollution in the greater athens area. Part I: Numerical simulations and field observations. *J Applied Meteor*, 39(4):546-562.
- Dandou A, Tombrou M, Soulakellis N. 2009. The influence of the city of athens on the evolution of the sea-breeze front. *Boundary-Layer Meteorology*, 131(1):35-51.
- Ding A J, Wang T, Zhao M, et al. 2004. Simulation of sea-land breeze and a discussion of their implications on the transport of air pollution during a multi-day ozone episode in the Pearl River Delta of China. *Atmospheric Environment*, 38:6737-6750.
- Estoque M A. 1961. A theoretical investigation of the sea breeze. *Quart J Royal Meteorological Society*, 87(372):136-146.
- Estoque M A. 1962. The sea breeze as a function of the prevailing synoptic situation. *J Atmos Sci*, 19(3):244-250.
- Feit D M. 1969. Analysis of the Texas Coast land breeze. *Atmospheric Science Group, University of Texas*, 1-52.
- Finkele K, Hacker J M, Kraus H, et al. 1995. A complete sea-breeze circulation cell derived from aircraft observations. *Boundary-Layer Meteorology*, 73(3):299-317.
- Fisher E L. 1960. An observational study of the sea breeze. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 17(6):645-660.
- Fisher E L. 1961. A theoretical study of the sea breeze. *J Atmos Sci*, 18(2):216-233.
- Gilliam R C, Raman S, Niyogi D D S. 2004. Observational and numerical study on the influence of large-scale flow direction and coastline shape on sea-breeze evolution. *Boundary-Layer Meteorology*, 111(2):275-300.
- Haurwitz B. 1947. Comments on the sea-breeze circulation. *J Atmos Sci*, 4(1):1-8.
- Jeffreys H. 1922. On the Dynamics of wind. *Quart J Meteor Soc*, 48(201):29-48.
- Koo Y, Reible D D. 1995a. Flow and transport modeling in the sea-breeze. Part I: A modified E- ϵ Model with a non-equilibrium level 2.5 Closure. *Boundary-Layer Meteorology*, 75(1):109-140.
- Koo Y, Reible D D. 1995b. Flow and transport modeling in the sea-breeze Part II: Flow model application and pollutant transport. *Boundary-Layer Meteorology*, 75(3):209-234.
- Kozo T L. 1982. A mathematical model of sea breezes along the Alaskan Beaufort Sea Coast; Part I. *J Applied Meteor*, 21(7):906-924.
- Kraus H, Hacker J M, Hartmann J. 1990. An observational aircraft-based study of sea-breeze frontogenesis. *Boundary-Layer Meteorology*, 53(3):223-265.
- Lin W, Wang A, Wu C, et al. 2001. A case modeling of sea-land breeze in macao and its neighborhood. *Adv Atmos Sci*, 18(6):1231-1240.
- Liu H, Chan J C L. 2002. An investigation of air-pollutant patterns under sea-land breezes during a severe air-pollution episode in Hong Kong. *Atmospheric Environment*, 36(4):591-601.
- Mahrer Y, Pielke R A. 1977. The effects of topography on sea and land breezes in a two-dimensional numerical model. *Mon Wea Rev*, 105(9):1151-1162.
- Mcperson R D. 1970. A numerical study of the effect of a coastal irregularity on the sea breeze. *J Applied Meteor*, 9(5):767-777.
- Nester K. 1995. Influence of sea breeze flows on air pollution over the attica peninsula. *Atmospheric Environment*, 29(24):3655-3670.
- Neumann J, Mahrer Y. 1971. A theoretical study of the land and sea breeze circulation. *J Atmos Sci*, 28(4):532-542.
- Neumann J, Mahrer Y. 1974. A theoretical study of the sea and land breezes of circular islands. *J Atmos Sci*, 31(8):2027-2039.
- Pearce R P. 1955. The calculation of a sea-breeze circulation in terms of the differential heating across the coast line. *Quart J Royal Meteorological Society*, 81(349):351-381.
- Pielke R A. 1974. A three-dimensional numerical model of the sea breezes over South Florida. *Mon Wea Rev*, 102(2):115-139.
- Plant R S, Atkinson B W. 2002. Sea-breeze modification of the growth of a marine internal boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology*, 104(2):201-228.
- Prtenjak M T, Grisogono B. 2007. Sea/land breeze climatological characteristics along the northern Croatian Adriatic Coast. *Theoretical and Applied Climatology*, 90(3):201-215.
- Puygrenier V, Lohou F, Campistron B, et al. 2005. Investigation on the fine structure of sea-breeze during escompte experiment. *Atmospheric Research*, 74(1-4):329-353.
- Schmidt F H. 1947. An elementary theory of the land- and sea-breeze circulation. *J Atmos Sci*, 4(1):9-20.
- Simpson J E, Mansfield D A, Milford J R. 1977. Inland penetration of sea-breeze fronts. *Quart J Roy Meteor Soc*, 103(435):47-76.
- Srinivas C, Venkatesan R, Somayaji K, et al. 2006. A numerical study of sea breeze circulation observed at a tropical site kalpakkam on the east coast of india, under different synoptic flow situations. *J Earth System Science*, 115(5):557-574.
- Talbot C, Augustin P, Leroy C, et al. 2007. Impact of a sea breeze on the boundary-layer dynamics and the atmospheric stratification in a coastal area of the North Sea. *Boundary-Layer Meteorology*, 125(1):133-154.
- Tijm A B C, Holtslag A A M, Van Delden A J. 1999. Observations and modeling of the sea breeze with the return current. *Mon Wea Rev*, 127(5):625-640.