

不同天气系统影响下广东省酸雨特征对比分析 ——气象场数值模拟

邹德龙¹, 罗栩羽¹, 范绍佳¹, 钟流举², 樊琦^{1*} (1.中山大学大气科学系, 广东 广州 510275; 2.广东省环境监测中心站, 广东 广州 510045)

摘要: 运用 WRF 模式对 3 种不同天气系统(冷锋, 低压槽以及台风)造成的广东省酸雨个例进行数值模拟, 结合实际测站资料对酸雨分布特征及影响酸雨过程的风场、湿度场以及温度场进行分析. 结果表明个例中酸雨主要分布在珠江三角洲区域以及重工业区韶关. 不同天气系统影响下的降水酸度略有不同, 台风个例降水 pH 值最高(5.81), 其后依次为低压槽降水(5.60)及冷锋降水(5.40). 冷锋降水个例中酸雨的分布及变化主要受风速、风向、相对湿度及逆温的影响, 低压槽和台风降水个例中的酸雨分布及变化主要受降水量和风速的影响. 风速和降水量的增加有利于缓解降水的酸度, 而逆温层的存在及不同风向的辐合作用有利于降水酸度的增加.

关键词: 酸雨; WRF; 天气系统; 气象条件

中图分类号: X517 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-6923(2012)08-1439-08

Comparative analysis of the features of acid rain under the influence of different weather systems in Guangdong Province-Numerical simulation of meteorological fields. ZOU De-long¹, LUO Xu-yu², FAN Shao-jia¹, ZHONG Liu-ju², FAN Qi^{1*} (1.Department of Atmospheric Science of Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2.Guangdong Provincial Environmental Monitoring Center, Guangzhou 510045, China). *China Environmental Science*, 2012,32(8): 1439~1446

Abstract: The numerical simulations were carried out on three acid rain processes influenced by different weather systems (cold front, low pressure trough and typhoon) in Guangdong province by WRF mesoscale meteorological model. The acid rain was mainly located in the Pearl River Delta region and an industrial area -Shaoguan. The highest pH value appeared in typhoon case (5.81), followed by low pressure trough case (5.60) and cold front case (5.40). The location and variation of cold front acid rain was mainly influenced by wind speed, wind direction, relative humidity, and inversion, the other two types of acid rain was mainly influenced by rainfall and wind speed. The increase in wind speed and rainfall were beneficial to remission the acidity of precipitation, and the existence of the inversion and the wind convergence were conducive to increase the acidity of precipitation.

Key words: acid rain; WRF; weather system; meteorological conditions

酸雨是指 pH 值小于 5.60 的雨雪或者其他方式形成的大气降水^[1]. 改革开放以来, 广东省以燃煤为主的能源结构和治理措施的不足, 使其成为我国酸雨严重省份之一^[2]. 20 世纪 80 年代开始针对广东省酸雨曾开展过较大规模的外场实验和研究, 并在酸雨过程的物理、化学特性及其形成的天气背景方面都取得了很多有意义的成果^[3-5]. 例如秦鹏等^[2], 李琼等^[6]和 Tsai 等^[7]均指出酸雨的形成既与局地排放源有关, 也与天气系统和气象条件有关. 但由于探空资料的缺乏, 无法对影响酸雨的气象要素进行更为细致的分析. 近年来随着

中尺度数值预报模式的发展, 模式中各种物理过程参数化方案的完善, 可利用其进行各种高时空分辨率的气象场模拟. 樊琦等^[8]利用 MM5 中尺度气象模式针对华南地区一次典型酸雨过程的气象条件进行数值模拟, 讨论了该过程局地源和外来源的可能贡献. 本文在统计分析的基础上, 首次利用 WRF 模式对 3 个不同天气系统影响下的广

收稿日期: 2011-12-31

项目基金: 国家自然科学基金资助项目(41175091, 40875007); 中山大学青年教师培育项目; 国家“973”项目(2005CB422203)

* 责任作者, 副教授, eesfq@mail.sysu.edu.cn

东省酸雨个例进行数值模拟,以期对影响广东省酸雨形成及分布的中小尺度气象场特征有一个更为全面的了解。

1 资料与方法

采用的中尺度气象模式是 WRF3.3,该模式系统是由美国国家大气研究中心(NCAR),美国太平洋西北国家实验室(PNNL),美国国家海洋及大气管理局(NOAA)等多单位联合共同开发的新一代中尺度数值预报模式和同化系统^[9]。模拟所用初始和边界资料取自美国环境预报中心和美国大气研究中心的 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ 格点资料,时间间隔为 6h。实况资料包括东亚地面天气图,广东省降水量、pH 值及离子浓度资料。其中东亚地面天气图和广东省降水量资料来源于香港科技大学的网络资源平台(<http://envf.ust.hk/dataview>)及中国天气网(<http://www.weather.com.cn/static>);降水 pH 值及离子浓度资料来源于广东省各地环境保护部门的逐日酸雨监测结果。选取的个例分别为 2006 年 3 月 23~25 日一次冷锋降水过程,2008 年 6 月 12~14 日一次热带低压槽影响的降水过程,2008 年 6 月 24~26 日台风“风神”的降水过程。

参考马国忠^[10],赵玉春^[11]及河惠卿^[12]等人的研究成果,针对不同的降水个例选取不同的模式网格区域、水平分辨率设置及不同的物理参数化方案以达到最佳的模拟效果。因本文的主要目的是分析影响广东省酸雨分布及变化的主要气象场特征,而非探讨模式的物理参数化方案,因此全文选用的分析结果均已是通过多个敏感性试验对比得出的最佳方案组合。第 1 个个例的数值模拟的物理参数化方案为 Morrison 双参数方案,Kain-Fritsch(new Eta) 积云对流参数方案,MYJ 行星边界层方案,RRTM 长波辐射方案和 Goddard 短波辐射方案,模式垂直分 35 层,水平格距为 27,9km。第 2 个个例的物理参数化方案为 WSM 6-class graupel 微物理方案,Grell-Devenyi ensemble 积云参数化方案,YSU 边界层方案,RRTM 长波辐射方案和 Goddard 短波辐射方案,模式垂直分 35 层,水平格距为 36,12km。第 3

个个例的数值模拟的物理参数化方案为 WSM 6-class graupel 微物理方案,Kain-Fritsch(new Eta) 积云对流参数方案,YSU 行星边界层方案,RRTM 长波辐射方案和 Dudhia 短波辐射方案,模式垂直分 35 层,水平格距为 27,9,3km。

2 典型酸雨个例数值模拟

2.1 春季冷锋降水个例分析

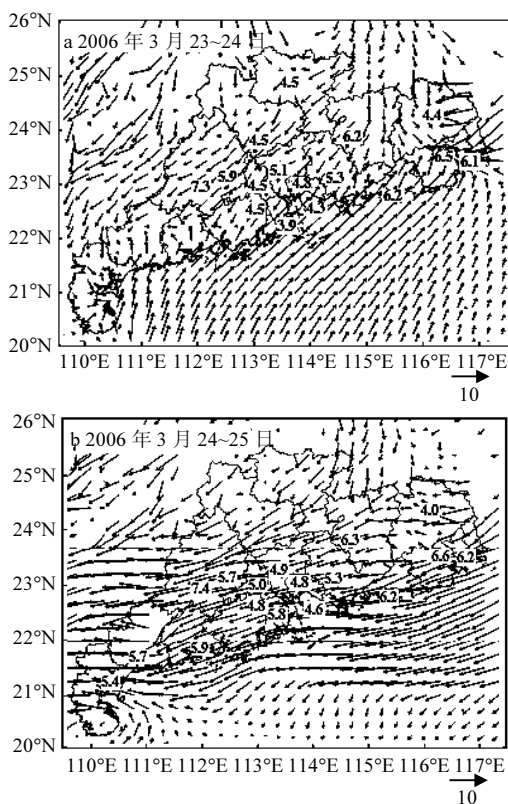


图 1 模式模拟的 23 日 14:00 及 24 日 08:00 950hPa 高度水平风场和地面监测站点 23~25 日平均 pH 值
Fig.1 Simulated 950hPa wind field at 14:00 on 23rd and 08:00 on 24th and daily average pH value of 23rd-25th

2.1.1 实况分析 2006 年 3 月 23~25 日广东省大部分地区在内产生了一次较强的降水过程。从地面天气图(图略)上可清晰看到 23 日华南地区存在一明显的冷锋锋面,且随着时间的推移,锋面逐渐向东南方向推进,并于 24 日到达海上。图 1 为模式模拟的 950hPa 风场及 2006 年 3 月 23~25 日广东省各监测站所测得的降水日平均 pH 值。

从图中可以看出随着锋面系统由北向南推进,23~24日,酸雨主要分布在广东省的东北部(梅州、韶关及清远)和珠江三角洲地区(以下简称珠三角),而随着冷锋的移动,24~25日广东省的酸雨主要出现在东部(梅州)及珠三角,广东省两日平均降水 pH 值为 5.40.可见,此次冷锋降水的酸雨主要出现在珠三角、韶关和梅州等地.其中内陆城市韶关和梅州的酸雨情况十分严重,pH 值均低于 4.5,达到了强酸度的阈值.沿海地区除深圳、珠海及湛江三地外,其他城市降水 pH 值均高于 5.6,没有出现酸雨.

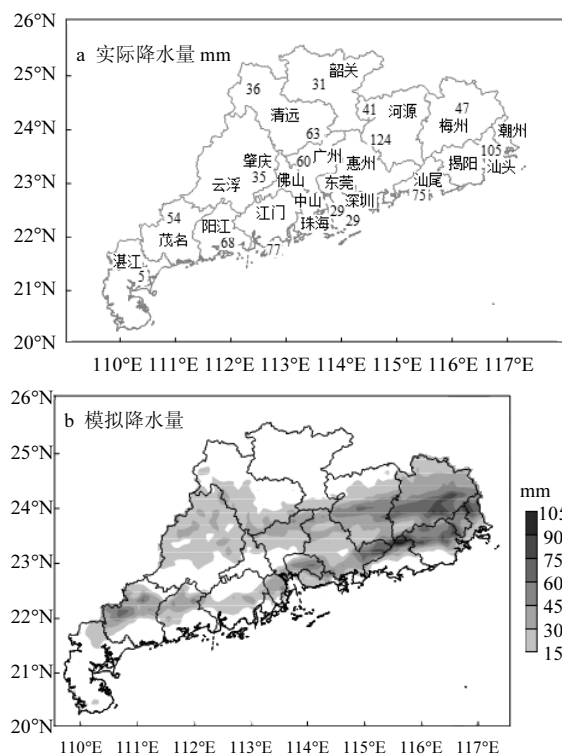


图2 2006年3月23日08:00~25日08:00广东省实际与模拟降水量分布

Fig.2 Distribution of observed and simulated 48h precipitation from 23rd to 25th March, 2006 in Guangdong

2.1.2 数值模拟结果分析 图2a为3月23日08:00~25日08:00广东省的实际降水量分布图,从图中可看出降水主要集中在广东省东部及江门、阳江一带的沿海地区.其中河源、汕头两市降水量超过 100mm,最大值出现在河源地区,降

水量为 124mm.图2b为模拟的同一时段降水量,模拟降水最大值与实况基本一致,都达到 100mm以上,降水区域也主要分布在广东省东部地区.除韶关、阳江及江门地区模拟降水量偏小外,其余地区基本与实况相同,由于所获得的实测降水站点数据较少,有些地区(特别是汕尾北部)的模拟结果无法与实测进行比对,另外由于模式本身存在各方面的误差,因此在阳江和江门的模拟效果与实况还存在一定误差.但总体而言,模式模拟的雨带与冷锋锋面形势十分一致,均呈东北-西南走向,且与华南沿海海岸线基本平行,结合图1的降水 pH 值分布情况来看,实况降水的大值区降水 pH 值较高,均达到 6.0 以上.这表明降水的稀释对此次酸雨过程有一定的缓解作用.值得注意的是广州和清远两地的降水量达到了 60mm 以上,但两地的降水酸度却依然很大,这种情况的发生与局地污染源的排放情况以及其他气象条件有关.

从图1a中的流场分布可以看出在 21°N~24°N,110°E~117°E 范围内存在一条东北-西南走向的辐合带,辐合带的位置即为冷锋锋线的位置.从图1b中可以看出珠三角地区盛行偏东风,辐合带消失,冷锋已移出陆地到达海上,模拟的风场结构与实况基本一致.由图1a可见,韶关地区的风速较小,且韶关的污染物排放量较大,加上粤北山区的地形因素,污染物的扩散条件较差,有利于致酸物质的堆积,因此韶关地区出现了 pH 值为 4.5 的重酸雨.23日受局地排放与辐合带的共同影响,污染物在珠三角地区聚集,从而导致珠三角地区酸雨的产生.24日由于风速的增加,除广州降水 pH 值由 5.1 降为 4.9 外,珠三角其他城市的酸雨状况均有所好转,其中佛山降水 pH 值由 4.5 升为 5.0,中山更是达到了 5.8.由此可知风场扩散条件对于此次酸雨过程有较为重要的影响,风速的增加使得污染物浓度下降,从而降低了降水酸度.从风向来看广东省西北部主导风场为东北风,处于韶关下风向的清远市降水 pH 值也达到 4.5,出现了强酸雨.此外,广州、东莞的降水 pH 值较低,其下风向的佛山、中山及江门等地的降水 pH 值均达到了强酸雨的阈值,下风方向的这些城市受上

游城市的污染排放影响明显,珠三角出现区域性酸雨与风场对污染物的输送作用有一定的关系。

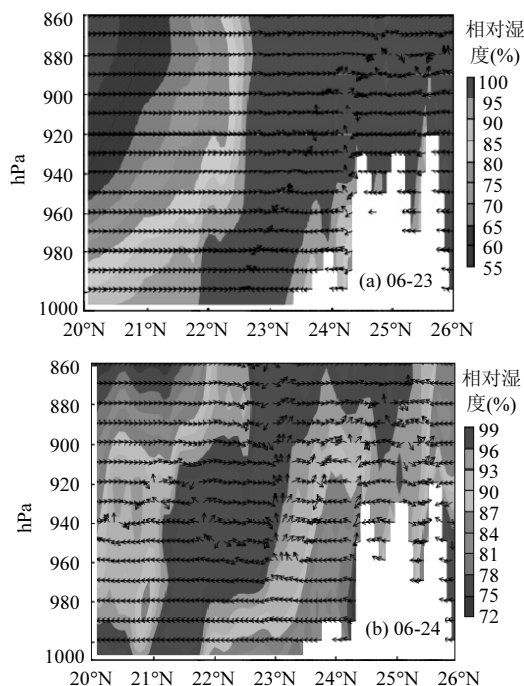


图3 23日和24日08:00沿113.2°E相对湿度和风场南北剖面

Fig.3 The cross-section of relative humidity and wind field along 113.2°E at 08:00
(a) 23日 (b) 24日

由图3可见,23日08:00,北风和南风的辐合带位于22.5°N附近,24日08:00辐合带已向南推进至海上.23日,由于风场的辐合作用,相对湿度的高值区位于22.5°N附近,地面至850hPa高度的相对湿度均达到95%以上,深厚的湿层对捕获大气中的致酸物质并发生液相化学反应起到了积极作用,这有利于珠三角地区酸雨的产生,造成降水pH值偏低.24日,由于锋面的推进,锋后的干冷空气到达珠三角地区,相对湿度降至80%~90%,湿度场的变化对珠三角地区的降水酸度变化也有一定的影响。

由图4可以看出在960hPa~880hPa之间存在大范围的逆温层,这主要是由于向南移动的冷空气侵入原本的暖气团之下形成的.因为这个大范围逆温层的存在,导致23日致酸物质的湍流输送

减弱,无法在垂直方向上得以扩散,从而聚集在近地面层中,而之后的降水过程可对累积的致酸污染物进行冲刷,使降水酸度增加,樊琦^[13]等通过对湖南地区一次典型酸雨过程气象条件的数值模拟也发现逆温层的存在会造成酸雨程度的增加。

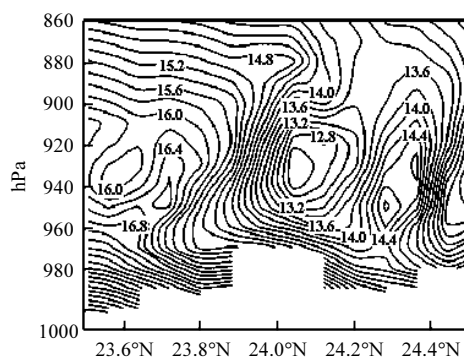


图4 23日12:00沿113.5°E温度场剖面(°C)

Fig.4 The cross-section of simulated temperature along 113.5°E at 12:00 on 23th

综上所述,此次冷锋降水过程中酸雨主要分布在韶关、梅州及珠三角等地.内陆城市的降水pH值较低,而除深圳、珠海及湛江外,其余沿海城市无酸雨产生.降水的稀释以及风速的增加对此次酸雨过程有一定的缓解作用,充沛的水汽及逆温层的存在有利于酸雨的形成与加强。

2.2 夏季低压槽降水个例分析

2.2.1 实况分析 2008年6月12日~14日华南地区受到一条明显的低压槽控制(图略),12日槽线位于粤北,14日槽线南移到华南沿海地区,移动特征与之前的冷锋锋面类似.受此影响,广东省12日~14日普降大雨,8个城市的降水量达100mm以上。

图5为模式模拟的950hPa风场及6月12~14日广东省降水日平均pH值的分布情况.此次降水过程的酸雨主要分布在韶关及珠三角,而其他地区的降水pH值普遍较高,除12~13日揭阳降水pH值为5.4外,其他地区无酸雨产生.广东省两日平均降水pH值为5.60,与干季的冷锋降水个例相比,此次珠三角地区的酸雨程度较轻.从这两日降水pH值的逐日比较来看,珠三

角内陆地区,广州、佛山、东莞及中山等地的降水 pH 值有所降低,而深圳、珠海的降水 pH 值基本没有变化,这与冷锋降水过程的酸雨日变化相反.广东省其余地区,除韶关外,各地的降水 pH 值均有所增加.

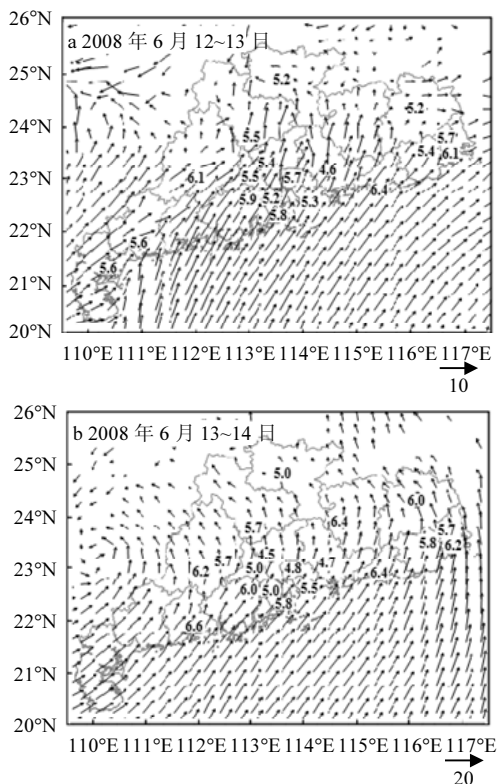


图5 模式模拟的12~14日05:00 950hPa高度水平风场和地面监测站点12~14日平均pH值

Fig.5 Simulated 950hPa wind field at 05:00 on 12th and 14th and daily average pH value from 12th to 14th

2.2.2 数值模拟结果分析 从图5中水平风场的形势可以看出在降水时段内除粤东地区外,广东省的主导风向基本没有变化,为西南风向,粤东由偏西风转为偏南风.模拟的风场结构与实况基本一致,与冷锋降水个例的风场结构有显著差别,此处无不同风向的辐合带存在,且风场的变化不大,此外,没有偏北气流的影响,因此珠三角酸雨区域不受粤北污染物输送的影响.结合pH值分布情况来看,主要酸雨区域珠三角内陆地区的风向没有改变,但风速有所减小,这导致了污染物扩

散条件的变差,从而使得致酸物质的累积量有所增加,降水酸度增加.此外,在主要酸雨区域的上风向,即江门,阳江等地的降水pH值均在5.9以上,因此外来污染物的贡献较低,酸雨形成的主要原因为局地污染物的排放,外来污染物的输送作用不明显,这也与冷锋降水个例略有不同.此外,风场结构对梅州地区降水pH值的变化有一定影响,结合图5b对比可知,当梅州地区降水pH值显著升高的时段,吹向梅州地区的气流主要来源于较为清洁的海上,而海盐气溶胶粒子及其氯化学反应过程对降低致酸污染物浓度有一定的作用^[14].

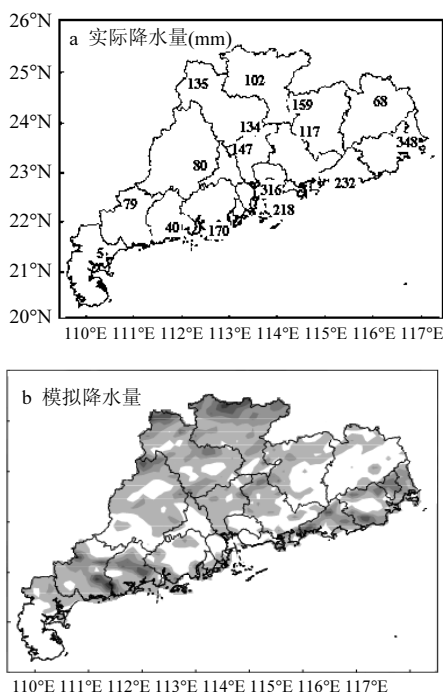


图6 2008年6月12日08:00~14日08:00广东省实况和模拟降水量

Fig.6 Distribution of observed and simulated 48h precipitation from 12th to 14th June, 2008 in Guangdong

从图6a可看出2008年6月12~14日08:00广东省实际降水主要集中在广东省中北部及江门至潮州一带的沿海地区,最大降水量达到200mm以上并集中在珠江口以东的沿海地区,其中实测的最大雨量出现在汕头地区,降水量达348mm.江门、深圳、汕尾、汕头、广州、河源、

清远和韶关等 8 个城市降水量超过 100mm。图 6b 为模拟的同一时段广东省降水量,其最大值与实况基本一致,都达到 300mm 以上,主要分布在广东中北部及珠江口两侧沿海等地区。除清远、韶关北部地区模拟降水量较大外,其余地区基本与实况相同,但模式对茂名和阳江两地的降水模拟较实况偏大,对珠江口降水量模拟结果偏小,由于所获取的实测降水站点数据量有限,有些地区的模拟结果无法与实测比对。

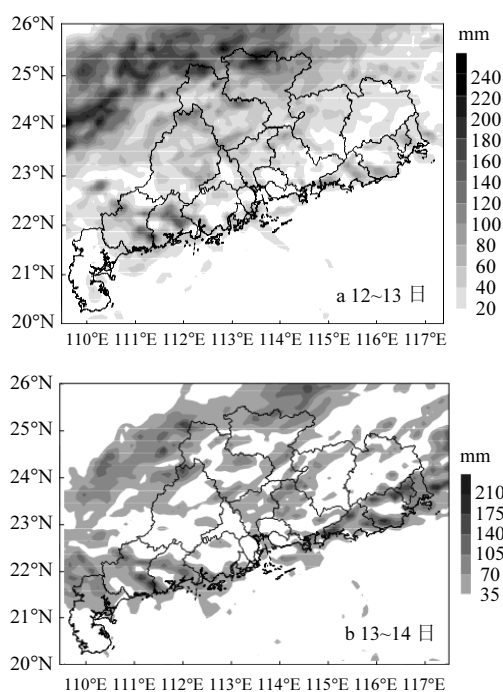


图 7 2008 年 6 月 12 日 08:00~14 日 08:00 降水量

Fig.7 Distribution of simulated 24h precipitation

图 7 为 6 月 12 日 08:00~13 日 08:00 及 13 日 08:00~14 日 08:00 的累计降水量分布。从两图的比较可以清晰看到雨带的南移过程,与实况中低压槽的移动过程一致。由图 7 可知,珠三角内陆地区的日降水量有较显著地增长,但降水酸度却有所增加(图 5),这说明除了降水量对降水酸度的影响外,本地排放的致酸前体物累积及外来致酸前体物的输送过程对降水酸度的影响均不容忽视。在其他地区,由于降水量的增加,稀释作用的加强导致降水 pH 值升高,其中以梅州地区最为

明显,12~13 日梅州降水 pH 值为 5.2,次日变为 6.0;12~13 日梅州降水量为 20mm 左右,次日为 60mm 左右。另外,此个例中韶关地区的降水 pH 值较冷锋降水个例有显著升高,结合两个时期降水量图可知低压槽降水过程中韶关地区 48h 累积雨量达 102mm,而冷锋降水过程中韶关地区 48h 累积雨量仅为 31mm,低压槽系统给韶关带来的降水量要远高于冷锋系统,这也表明降水的稀释对缓解酸雨有一定的作用。综上所述,此次夏季热带低压槽引起的酸雨过程主要受局地污染物排放的影响,风场的输送作用不明显,但风场对污染物的扩散有一定影响,降水的稀释作用在不同区域影响不同,在主要酸雨区,即珠三角内陆地区稀释作用不显著,但在广东省其余地区降水的稀释作用对酸度的降低有较为重要的作用,这是由于各市局地排放、环境容量及所处的地理环境形成的局地风场不同等诸多原因造成。

2.3 台风降水个例分析

2.3.1 个例概况 2008 年第 6 号热带气旋“风神”于 6 月 19 日上午在菲律宾以东洋面生成,6 月 20 日上午加强为台风。6 月 25 日早晨 5 时 30 分前后“风神”在广东深圳市葵涌镇沿海登陆,登陆时减弱为热带风暴,中心附近最大风力为 9 级。受“风神”环流影响,珠江口外海面、粤东海面出现 7~8 级、阵风 10 级的大风;广东省中南部出现中到大雨,局部暴雨。

2.3.2 数值模拟结果分析 图 8a 为 6 月 25 日 07:00~26 日 07:00 广东省的实际降水量分布图,从图可看出降水主要集中在广东省中部珠江口两侧地区,最大降水量达到 250mm 以上并集中在广州、深圳、东莞及中山等地区,其中实测的最大雨量出现在广州番禺,降水量达 427.5mm。深圳、清远、肇庆、中山、广州、东莞、揭阳、湛江和珠海等 9 个城市降水量超过 100mm。图 8b 为 WRF 模式模拟的同一时段的降水量,与图 8a 比较,模拟降水量大区的量级与实况基本一致,都达到 250mm 以上,主要分布在广州、惠州及河源等地区,位置较实况位置偏东。其中佛山、清远、中山、广州、东莞、惠州、河源、韶关、汕尾及潮州等 10 个城市降水量超过 100mm。由此可知

珠江口以西的降水量级模拟效果较好,其中对于广州、佛山、东莞、惠州、珠海、湛江及清远的模拟基本与实况相同,但对茂名、云浮、肇庆、江门和阳江等降水区域的模拟较实况偏小;对韶关、河源、梅州、潮州、汕头、揭阳和汕尾的模拟较实况偏大,导致珠江口东侧地区的降水量较实况偏高的主要原因是模式模拟的台风路径较实际台风路径略微偏东。

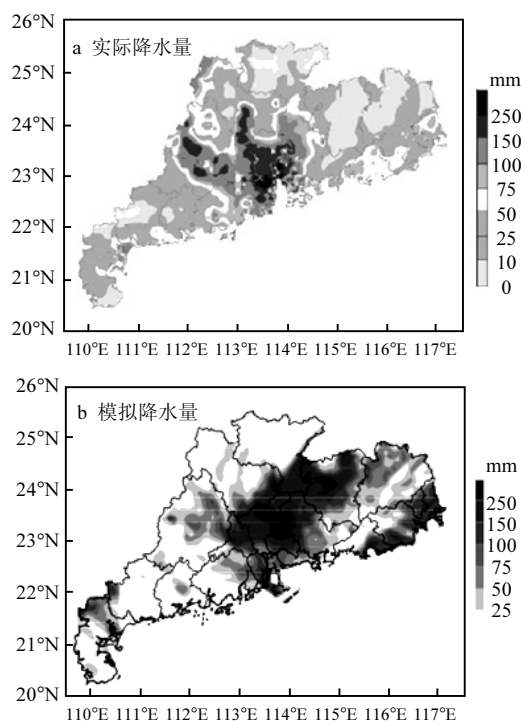


图8 2008年6月25日07:00~26日07:00广东省实况(引自中国天气网)和模拟降水量

Fig.8 Distribution of observed and simulated 24h precipitation from 25th to 26th June, 2008 in Guangdong

图9为广东省14个监测站2008年6月17~19日及25~26日两次降水过程pH值实况,25~26日台风期间广东省14个监测站的降水pH值平均为5.81,降水酸度低于冷锋降水过程及低压槽降水过程的降水酸度, Sakihama等^[15]也有类似的结果。17~19日降水过程发生于台风降水过程之前。从这一时段的天气图(图略)可知此次降水过程由低压槽的存在引起。从图中可以看出,

除江门外其余13个监测站的pH值较台风降水之前均有所升高,主要原因可能是台风降水量明显高于此前的低压槽过程降水量,因此对降水酸度的稀释作用更为明显,使得大气中二次光化学反应产物减少,由此导致致酸离子浓度下降,从而使pH值增加。

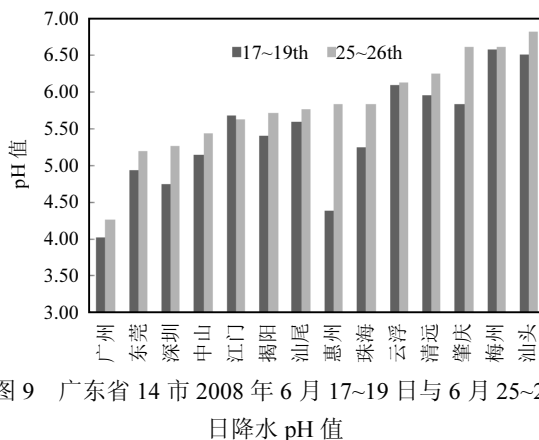


图9 广东省14市2008年6月17~19日与6月25~26日降水pH值

Fig.9 Precipitation pH value of 14 cities in Guangdong from 17th to 19th and from 25th to 26th June, 2008

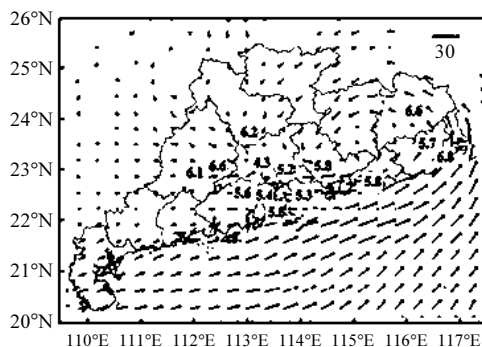


图10 模式模拟的25日14:00 950hPa高度水平风场和地面监测站点25日~26日平均pH值

Fig.10 Simulated 950hPa wind field at 14:00 on 25th and daily average pH value from 25th to 26th

图10为模式模拟的25日14:00 950hPa高度流场和地面监测站点25日~26日平均pH值叠加图。由图可见,酸雨集中分布在珠三角地区,珠三角是广东省内污染物排放大值区,根据多年的酸雨资料统计发现夏季的酸雨多出现在珠三角地区的城市内。此个例中除这一区域外的其他地区降水pH值均高于5.60,没有酸雨产生,广州的降

水 pH 值最低,达到了 4.26.从 950hPa 高度流场形势可看出,25 日发生酸雨的区域中低层主要为西北风,偏西的流场形势使得此次酸雨主要分布在广州及其以东的几个城市.与前两个降水过程相比,台风的风场结构有显著特点.由图可见有一气旋式环流存在,而风速也比冷锋及低压槽个例中的风速高,这也导致了台风降水过程中的污染物扩散条件要优于其他两个降水过程,因此导致了台风降水 pH 值较高.此外,由于台风来源于海上,因此携带的海盐气溶胶离子对酸雨的缓解也有一定作用.

3 结 论

3.1 运用 WRF 模式对三个典型降水个例分别进行了数值模拟,降水的区域分布、累计降水量以及降水量最高值的模拟与实况较为一致,模拟结果比较理想.

3.2 不同天气系统影响下的降水酸度略有不同,台风个例降水 pH 值最高(5.81),其后依次为低压槽降水(5.60)及冷锋降水(5.41).

3.3 广东省酸雨的产生和变化受局地致酸污染物的排放及气象条件的综合影响,不同时期气象条件的影响略有不同.冷锋降水个例中酸雨的分布及变化主要受风速、风向、相对湿度及逆温的影响,低压槽和台风降水个例中的酸雨分布及变化主要受降水量和风速的影响.风速和降水量的增加有利于缓解降水的酸度,而逆温层的存在及不同风向的辐合作用导致污染物堆积,有利于降水酸度的增加.

参考文献:

- [1] 马琳,杜建飞,闫丽丽,等.崇明东滩湿地降水化学特征及来源解析 [J]. 中国环境科学, 2011,31(11):1768-1775.
- [2] 秦鹏,杜尧东,刘锦奎,等.广东酸雨分布特征及其影响因素 [J]. 热带气象学报, 2006,22(3):298-300.
- [3] 张铮,孟广礼.1988 年两广地区春季酸雨观测和天气形势分析 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 1992,28(1):86-95.
- [4] 盛裴轩,毛节泰,王建民,等.华南地区春季冷锋云系中污染物的输送 [J]. 环境科学学报, 1992,12(1):16-27.
- [5] 毕木天,陈旦华,粟欣,等.广州市白云山、电视塔春季酸性降水的研究 [J]. 环境化学, 1992,11(6):26-34.
- [6] 李琼,李福娇,叶燕翔,等.珠江三角洲地区天气类型与污染潜势及污染浓度的关系 [J]. 热带气象学报, 1999,4(15):363-369.
- [7] Tsai Y I, Hsieh L Y, Kuo S C, et al. Seasonal and rainfall-type variations in inorganic ions and dicarboxylic acids and acidity of wet deposition samples collected from subtropical East Asia [J]. Atmospheric Environment, 2011,45:3535-3547.
- [8] 樊琦,范绍佳,钟流举,等.华南地区典型酸雨过程气象条件的数值模拟 [J]. 中国环境科学, 2008,28(3):279-283.
- [9] Skamarock W C, Klemp J B, Dudhia J, et al. description of the advanced research WRF Version 3. [EB/OL]. <http://www.dtic.mil/cqi-bin/GetTRDOC?Location=U2&doc=GetTRDOC.pdf&AD=AOA487419>.
- [10] 马国忠,银燕,王秋京.东北地区春季冷锋云系降水个例数值模拟及机理研究 [J]. 黑龙江气象, 2010,4(27):4-8.
- [11] 赵玉春,王叶红,崔春光.华南前汛期一次大暴雨过程的扰动位涡反演与数值研究 [J]. 暴雨灾害, 2008,3(27):193-203.
- [12] 河惠卿,王振会,金正润,等.积云参数化和微物理方案不同组合应用对台风路径模拟效果的影响 [J]. 热带气象学报, 2009,4(25):435-441.
- [13] 樊琦,罗栩羽,范绍佳,等.湖南衡山春季一次酸雨过程气象条件的数值模拟研究 [J]. 中国环境科学, 2010,30(7):879-887.
- [14] 姚小红,黄美元,高会旺,等.海盐氯循环对输送污染物致酸的缓冲作用 [J]. 大气科学, 1998,22(6):913-918.
- [15] Sakihama H, Tokuyama A. Effect of typhoon on chemical composition of rainwater in Okinawa Island, Japan [J]. Atmospheric Environment, 2005,39:2879-2888.

作者简介: 邹德龙(1988-),男,山东荣成人,中山大学大气科学系硕士研究生,主要从事中小尺度数值模拟研究.