

对流层特大暴雨天气对电离层变化的影响^{*}

徐桂荣^{1,2,3} 万卫星¹ 宁百齐¹

¹(中国科学院地质与地球物理研究所 北京 100029)

²(中国科学院武汉物理与数学研究所)

³(中国科学院研究生院)

摘 要 研究气象活动对电离层变化的影响. 利用时序叠加方法, 通过对 1958—1998 年期间发生在武汉的 5 次特大暴雨天气事件对武汉上空电离层变化的影响进行分析, 发现: (1) 特大暴雨能够引起低电离层 $f_b E_s$ 和 $f_o E_s$ 参量较明显地减小; (2) 特大暴雨对电离层 F 区寻常波描述的最小虚高 $h'F$ 和电离层等效峰高 $h_p F$ 的参量也有一定影响, 且随着雨量的增大这种影响作用也会增加; (3) 特大暴雨对电离层其他参量影响甚弱或没有影响. 本文认为, 特大暴雨天气事件对电离层的影响主要来自于动力过程, 特别是特大暴雨激发的或相伴的大气重力波、潮汐波和行星波等长周期大尺度过程的作用.

关键词 特大暴雨; 电离层变化; 时序叠加法

中图法分类号 P 352

Effects of Extreme Heavy Rainfall in the Troposphere on the Ionosphere

XU Guirong^{1,2,3} WAN Weixing¹ NING Baiqi¹

¹(*Institute of Geology and Geophysics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)

²(*Wuhan Institute of Physics and Mathematics, The Chinese Academy of Sciences*)

³(*Graduate School, The Chinese Academy of Sciences*)

Abstract In this paper, the meteorological influences on ionospheric variability have been studied. We analyzed the effects on the ionosphere from the five extreme heavy rainfall cases happened in Wuhan from 1958 to 1998 by means of the superposed epoch method. The results show that when the extreme heavy rainfall happens: (1) the blanket frequency of $E_s(f_b E_s)$ and the critical frequency of $E_s(f_o E_s)$ drop distinctly; (2) the minimum virtual height of F-layer ($h'F$) and the peak height of F-layer ($h_p F$) decrease limitedly, and when the extreme heavy rainfall is more severe, the decreases of $h'F$ and $h_p F$ are more obvious; (3) the extreme heavy rainfall has few or no effects on the other characters of the ionosphere. In the paper, it is thought that the meteorological influences on the ionosphere are due to dynamical processes; it occurs as the result of upward-propagating tides, planetary waves and gravity waves originating from or accompanying the extreme heavy rainfall.

Key words Extreme heavy rainfall, Ionospheric variability, Superposed epoch method

^{*} 国家自然科学基金项目 (40134020), 中国科学院创新方向性项目 (KZCX3-SW-144) 和国家重点基础研究规划项目 (G2000078407) 共同资助

2004-05-15 收到原稿, 2004-11-08 收到修定稿

1 引言

气象活动对电离层变化的影响一直是电离层研究中的一个颇受关注的课题。早在 1925 年, Wilson 首次提出雷暴可能会引起高层大气的电离。Rastogi^[1] 对 1959 年孤立雷暴经过 Ottawa 时电离层垂直探测记录进行分析, 发现雷暴期间 Es 临界频率和 Es 回波数都有增加。Gherzi^[2] 利用上海徐家汇观象台几十年的资料进行分析发现, 电离层寻常回波与控制天气变化的三大气团有对应关系, 并根据这种关系建立了一种新的天气预报方法, 取得了不错的预报效果。Bauer^[3] 利用时序叠加法 (superposed epoch method) 对 F₂ 层虚高 $h'F_2$ 和临界频率 f_0F_2 进行统计分析, 发现冷锋过境与 F₂ 层特性有相关联系。当冷锋过境时, $h'F_2$ 会降低, 而 f_0F_2 会增加, 两者成反相关, 这可能与气团有关, 与 Gherzi 的研究结果类似。1954—1955 年在美国华盛顿特区附近发生了 4 次飓风 (台风) 事件, Bauer^[4] 对此期间的 f_0F_2 的偏差 $D(f_0F_2)$ 、地磁指数 K 、地面气压 P 和 500 hPa 等压面高度 H500 进行分析, 发现当飓风向观测站靠近时, f_0F_2 开始增加, 当飓风最接近观测站时, 地面气压最低, f_0F_2 增加到最大。Georges^[5] 认为大气波动从低层上传到电离层高度会产生 4 种类型 TID, 其中 3 min 周期的扰动与对流层恶劣天气活动有明显关联。这种扰动对应的地面有明显的降水, 并有密集的雷暴产生, 其中一些雷暴云顶超过了 12 km。Baker 和 Davies^[6] 也认为 2—5 min 周期的波状电离层扰动与对流层恶劣天气有紧密联系, 这些扰动可能是恶劣天气产生的声波的表现。他们设计了一个每日恶劣天气指数, 经过分析发现电离层扰动事件大多数都发生在恶劣天气指数为最大值的天数内, 恶劣天气指数为最小值的天数没有任何电离层扰动事件发生。

最近, Šauli 和 Boška^[7] 研究发现, 低地磁活动条件下 ($A_p = 8, A_p = 9$), 强冷锋过境时, 欧洲中部上空的低电离层 (D 层) 无线电波吸收会有明显的下降, 在冷锋过境期间 10—180 min 周期的声重波活动明显增加。Forbes 等^[8] 认为电离层的变化主要受太阳电离通量、气象活动和太阳风条件 3 方面影响, 他们通过对逐小时 f_0F_2 进行拟合分析发现, 由 f_0F_2 计算得到的 $N_{\max}$ 在静地磁条件下 ($K_p < 1$), $1 - \sigma$ 的 $N_{\max}$ 的变化在高频部分 (数小时至 1—2 d) 约有 $\pm 25\% - 35\%$, 在低频部分 (2—30 d) 约有

$\pm 15\% - 20\%$ 是主要受气象活动的影响。Rishbeth 和 Mendillo^[9] 通过对 13 个电离层测站 F₂ 层电子浓度峰值 N_mF_2 的逐日变化进行分析也发现, 影响 F 层变化的影响源可分为 3 个方面: 太阳光辐射、地磁源和气象源, 其中气象源的影响在白天约为 15%。Mendillo 等^[10] 发现, 在静地磁条件下, 从低压大气上传的扰动能够引起 F₂ 层电子浓度发生 10%—30% 的变化, 其结论与 Forbes 等以及 Rishbeth 与 Mendillo 的结论相一致。

在我国, 沈长寿^{[11],[12]} 在研究台风和寒潮对电离层 f_0F_2 的影响时发现, 台风与电离层 f_0F_2 变化之间存在有规律的相关现象, 而寒潮过境时夜间 f_0F_2 有下降趋势。肖佐等^[13] 在研究中纬度电离层吸收的冬夏不对称性时发现, 冬天电离层 D 层更容易受来自对流层和低平流层中某些过程的影响。沈长寿^[14] 在探讨中低纬电离层“冬季反常吸收”的可能原因时也认为, 气象因子能较好地说明“冬季反常”现象。这些研究都表明了电离层的变化会受到气象活动的影响。

气象活动对电离层变化的影响需要用更多的对流层天气事件和观测站数据来进行分析验证。本文试图通过分析 1958—1998 年期间发生在武汉的 5 次特大暴雨天气事件对武汉上空电离层变化的影响, 研究特大暴雨天气事件对低电离层参量的影响。下面首先介绍数据及其分析方法, 然后在此基础上给出利用时序叠加法分析得出的结果, 并对特大暴雨引发的电离层变化现象可能的物理原因进行讨论, 最后给出初步结论。

2 数据处理

气象学上规定观测站过去 24 h 降水量达到 200 mm 以上为一次特大暴雨天气事件。据此武汉地区在 1958—1998 年期间总共发生了 5 次特大暴雨天气事件, 如表 1 所示。为了研究电离层扰动的原因, 在表 1 中同时给出了特大暴雨期间 3 天时间的地磁指数 $\sum K_p$ 。我们选取的电离层数据为武汉电离层观测站测高仪所得的 12 个参量, 分别是: f_bE_s , $f_{\min}$, f_0E , f_0E_s , f_0F_1 , f_0F_2 , $h'E$, $h'E_s$, $h'F$, $h'F_2$, h_pF , $M_{3000}F_2$ 。电离层参量的变化用当日整点观测值的日平均值表示。

为了分析特大暴雨天气事件对电离层变化的影响, 我们采用时序叠加法 (或称周期叠加法) 对数据

表 1 武汉 5 次特大暴雨天气事件
Table 1 Five extreme heavy rainfall cases in Wuhan

发生日期	24 h 降水量 /mm	24 h $Kp(\sum Kp)$		
		前一日	当日	后一日
1998-07-21	285.7	6+	17	17-
1991-07-09	209.8	39-	51-	25-
1982-06-20	298.5	28-	26	17
1961-06-08	214.5	29-	25	13+
1959-06-09	317.4	19+	27-	20

进行处理。时序叠加法在理论上讲，当叠加次数很多时，可以消去其他因子的影响，而单独突出所考虑的关键日这个因子的作用。我们将发生特大暴雨的当天定为关键日（第 0 d），并从关键日之前的第 5 d 到关键日之后的第 5 d 总共 11 d 作为分析时间序列窗口，关键日之前的时间用负的天数表示，关键日

之后的时间用正的天数表示，对时间序列窗口内 5 次特大暴雨天气事件所对应的电离层参量进行叠加平均，得到均值在 11 d 时间序列内的变化情况，以便考查关键日特大暴雨天气事件对电离层参量的影响。

3 分析结果

通过时序叠加法对电离层参量进行分析，发现在发生特大暴雨天气事件的关键日电离层低层的 E_s 遮蔽频率 ($f_b E_s$) 和连续的 E_s 临界频率 ($f_o E_s$) 有较明显的下降，电离层 F 层峰高 $h_p F$ 与 $h'F$ 也有一定的变化 (下降)，而其他电离层参量没有明显变化。

图 1—4 分别给出了 $f_b E_s$, $f_o E_s$, $h_p F$ 和 $h'F$ 在分析时间窗口内的变化情况。从图 1 可以看到 $f_b E_s$ 在关键日即特大暴雨发生的当天有较明显的下降，

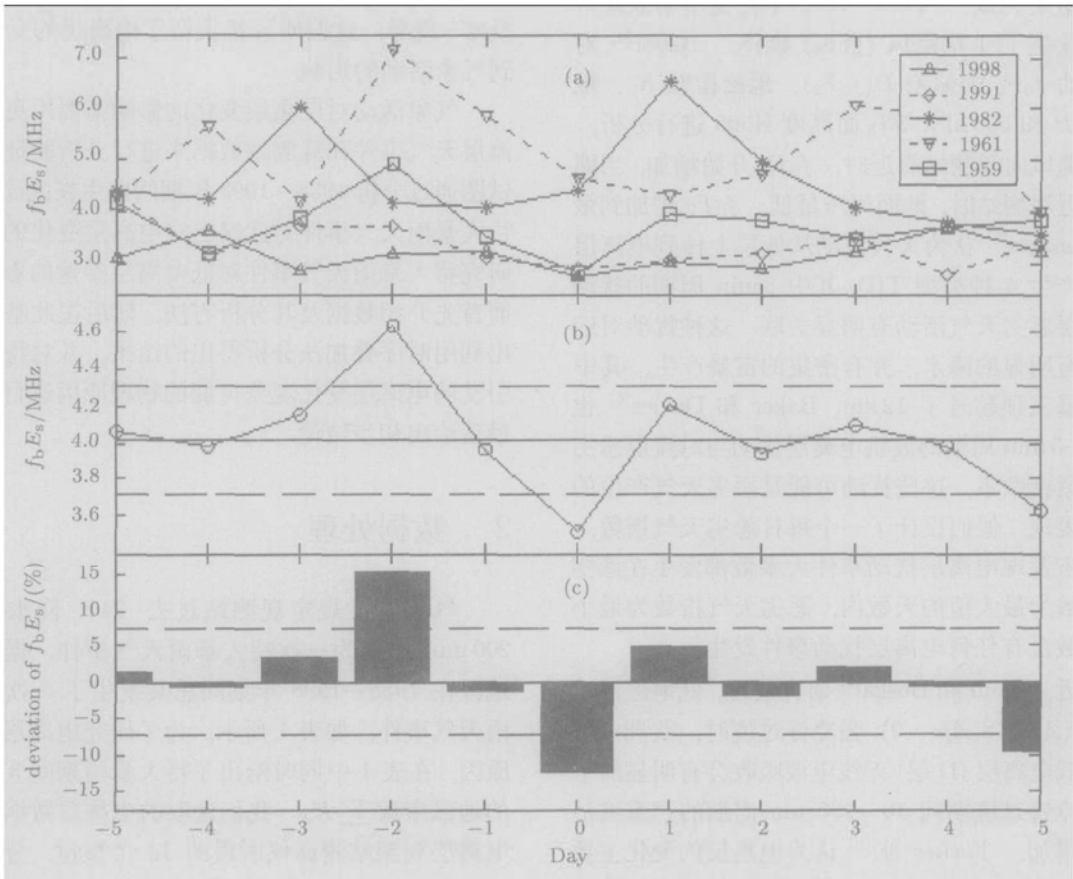
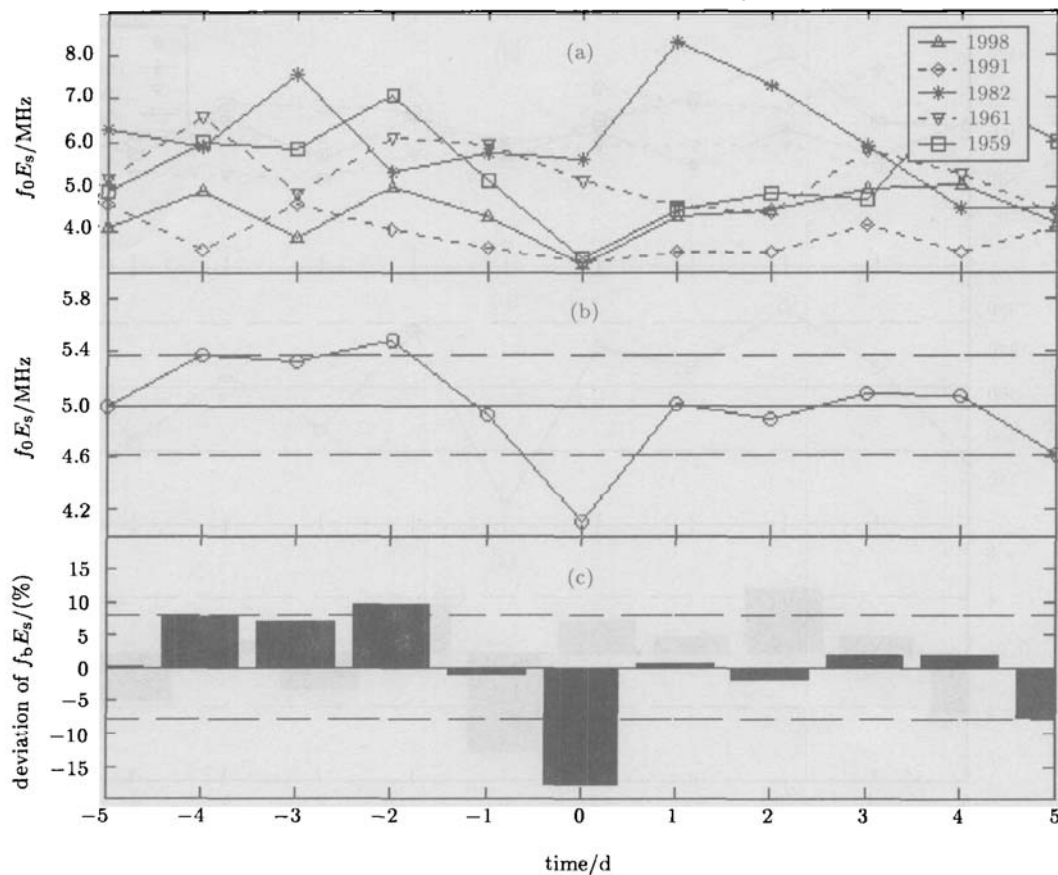


图 1 用时序叠加法对 $f_b E_s$ 进行分析的结果。(a) 5 次特大暴雨事件的 $f_b E_s$ 的变化情况；(b) $f_b E_s$ 均值的变化情况 (两条虚线为正常扰动范围，中间实线为均值)；(c) $f_b E_s$ 均值的偏差情况 (两条虚线为标准偏差的范围)
Fig.1 Superposed epoch analysis of $f_b E_s$. (a) Variations of $f_b E_s$ in five extreme heavy rainfall cases; (b) Average variance of $f_b E_s$. The normal disturbance level is indicated by dashed lines, and the standard average of $f_b E_s$ is indicated by solid line; (c) deviation of average $f_b E_s$. The standard deviation is indicated by dashed lines

图2 用时序叠加法对 f_0E_s 进行分析的结果 (说明同图 1)Fig.2 Same as Fig.1 but for f_0E_s

f_bE_s 从前一天的 3.96 MHz 下降到 3.51 MHz, 相对于时间窗口均值下降了 12.43%, 比时间窗口内的标准偏差 7.26% 大 57%. 在图 2 中 f_0E_s 也从前一天的 4.93 MHz 下降到 4.1 MHz, 相对于时间窗口均值下降了 17.85%, 比时间窗口内的标准偏差 7.65% 大 133%.

在图 3 和图 4 中可以看到, 电离层 F 层高度参量也有变化, 但 $h'F$ 的变化没有 f_bE_s 和 f_0E_s 的下降明显. 从图 3 中可以看到 h_pF 从前一天的 371 km 下降到 334 km, 相对于时间窗口均值下降了 7.74%, 比时间窗口内的标准偏差 4.13% 大 87%. 由图 4 可见, 特大暴雨发生时 $h'F$ 从前一天的 278 km 下降到 277 km, 相对于时间窗口均值下降了 1.78%, 比时间窗口内的标准偏差 1.56% 大 13%.

用同样的方法对其他 8 个电离层参量 (f_{min} , f_0E , f_0F_1 , f_0F_2 , $h'E$, $h'E_s$, $h'F_2$, $M_{3000}F_2$) 进行了分析, 但未能发现特大暴雨期间能明显超出标准

统计偏差范围的变化, 故没有给出分析结果图.

图 1—4 中的 (a) 给出了 5 次特大暴雨事件中 f_bE_s , f_0E_s , $h'F$ 和 h_pF 的变化情况, 我们分析发现特大暴雨天气事件越严重, 即过去 24 h 降水量越大, 对 f_bE_s , f_0E_s , $h'F$ 和 h_pF 的影响越明显. 从表 1 可知 1959 年 6 月 9 日 (9 日 $\sum Kp$ 指数为 27-, 地磁活动偏弱) 发生的特大暴雨天气事件最严重, 除 h_pF 外, f_bE_s , f_0E_s 和 $h'F$ 在关键日的下降在 5 次特大暴雨事件中是最明显的. h_pF 在 1991 年下降得最明显, 这可能是因为 1991 年 8—10 日武汉有严重磁暴 ($K=8$, $Dst=-194$), 磁暴的影响和 9 日特大暴雨的影响叠加在一起使得 h_pF 下降很明显. 除去 1991 年, h_pF 在 1959 年的下降最明显. 在 1959 年最严重的特大暴雨事件中我们还发现, $M_{3000}F_2$ 在关键日有明显的增加, f_0E 有较明显的下降, 这从某种程度上也说明, 特大暴雨越严重, 其对电离层的影响作用就会增加.

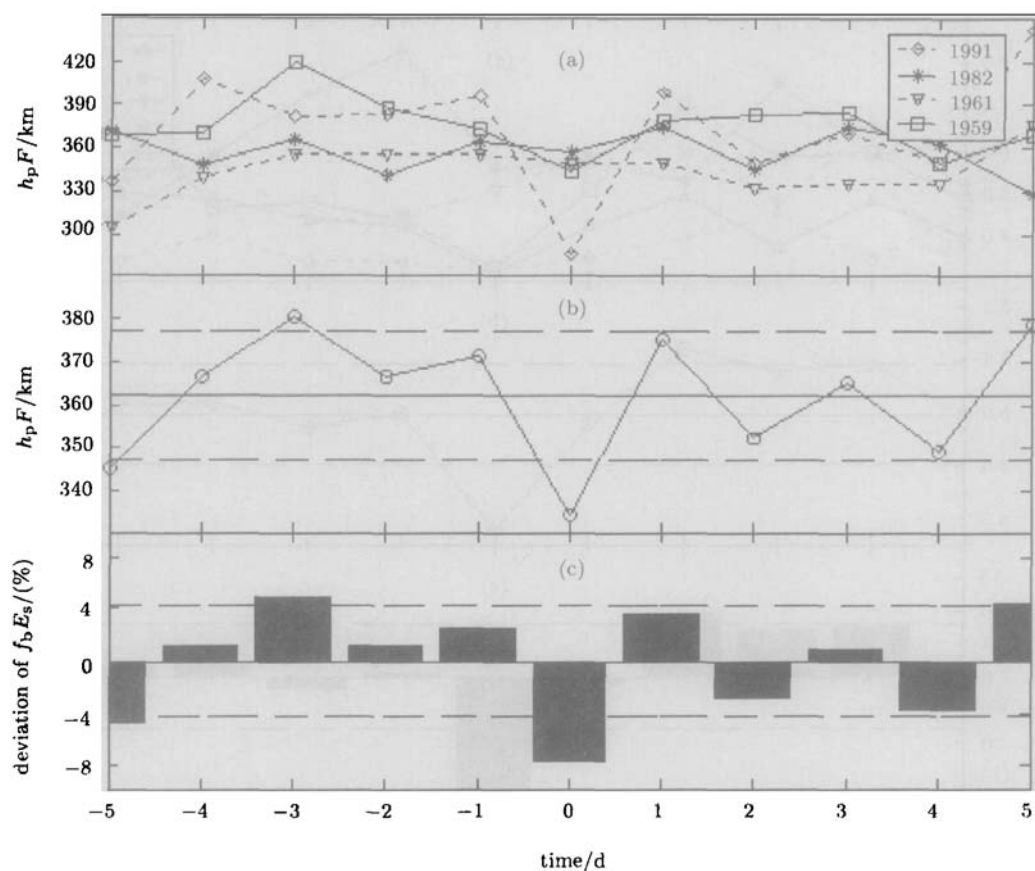


图3 用时序叠加法对 $h_p F$ 进行分析的结果, 说明同图1 (1998年个别缺 $h_p F$ 数据)

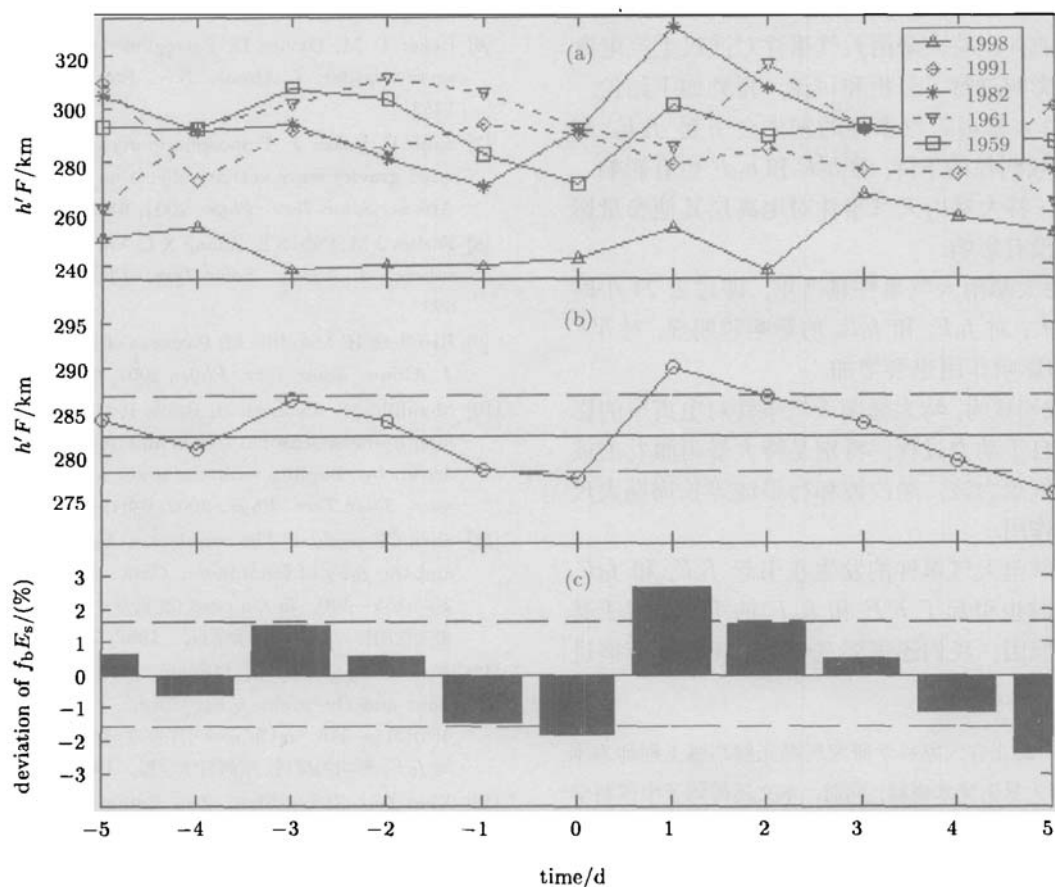
Fig.3 Same as Fig.1 but for $h_p F$ (lack data in 1998 case)

4 讨论

气象活动对电离层变化会产生影响, 其物理机制比较复杂而且深入研究甚少, 针对不同的天气系统提出的可能的物理解释有所不同. Bauer^[3]认为, 冷锋过境对 F_2 层特性的影响可以用 Martyn 提出的低高层大气动力耦合机制来进行解释. 对于飓风过境对 $D(f_0 F_2)$ 的影响, Bauer^[4]认为是低层辐射补偿高层辐射所导致的. 而沈长寿^[11]认为, 台风引起的对流层内的强烈垂直气流可以改变平流层、中间层内的局地环流系统, 影响湍流层顶的高度及气体成分比, 从而使电离层的电子浓度发生变化. 雷暴活动对电离层变化的影响研究一直是电离层与其下层大气相互作用研究方面的一个热点, 其物理机制比较复杂, 不同的学者给出了不同的解释^[1], 如 Wilson 提出的静电场离化机制, Bailey 和 Martyn 以及 Healey 提出的碰撞离化机制等. 寒潮过境时夜间 $f_0 F_2$ 有下降趋势, 沈长寿和资民筠^[12]将这一下

降的可能原因归结为寒潮中激流带底部风切不稳定性产生的重力波向上传至电离层高度, 对电子浓度分布影响的积累效应. Bertin^[15]等认为, 影响电离层的气象源波动的产生可能与中性风急流的非地转扰动有关. Forbes^[8]等认为, 影响电离层的气象源包括锋、对流系统、平流层突然增温等, 这些气象活动大多通过上传的潮汐、行星波和重力波对电离层发生作用, 也有一些通过其他的动力耦合或系统本身的非线性作用来产生影响.

对流层强降水天气事件对电离层变化的影响研究开展得很少, 相关的可能的物理解释的文献也很少. 本文上面的分析结果表明, 特大暴雨天气事件能对低电离层中的 E_s 强度参量 $f_b E_s$ 和 $f_0 E_s$ 产生较明显作用, 对 F 层高度参量 $h'F$ 和 $h_p F$ 产生一定影响, 而对其他参量影响甚弱或没有影响. 对此, 我们认为, 特大暴雨天气事件对电离层的影响主要来自于动力过程, 特别是特大暴雨激发的或相伴的大气重力波、潮汐波和行星波等长周期大尺度过程

图4 用时序叠加法对 $h'F$ 进行分析的结果 (说明同图1)Fig.4 Same as Fig.1 but for $h'F$

的作用. 主要理由是: 首先, 理论与观测表明, 中纬电离层 Es 层由背景风剪切引起, 而与特大暴雨相关的大气重力波、潮汐波和行星波等可直接影响高层大气的风场剪切, 进而改变 Es 的强度, 引起 $f_b E_s$ 和 $f_o E_s$ 的较明显变化; 其次, 电离层 F 层的高度对背景风场等动力过程十分敏感, 因此, 特大暴雨引起的风场变化可能改变电离层 F 层高度, 引起高度参量 $h'F$ 和 $h_p F$ 的变化; 此外, 由于电离层常规 E 层处于光化平衡状态, 一般不受长周期动力过程的影响, 这可能是我们没有观测到特大暴雨期间电离层 E 层参量变化的原因; 而引起 F 层临界频率 $f_o F_2$ 等的随机变化的因素较多, 相对来说其与特大暴雨相关的变化并不敏感, 以致难以从观测中检测出来.

由于特大暴雨往往伴随强烈的气流上升运动和辐合辐散运动, 它有可能通过其他的可能途径对电离层产生影响. 如果像 Bauer^[4] 和沈长寿^[11] 所假设的那样存在某种辐合辐散模型和动力耦合, 那么

特大暴雨引起的气流的辐合辐散就可以上传到电离层高度, 在低电离层 E 区附近引起辐散, 这种辐散会导致背景 E 区电子浓度的下降, E 区背景电子浓度的下降会引起 $f_b E_s$ 和 $f_o E_s$ 的下降; 同时, E 区辐散会导致 F 层的下降, 使得 $h'F$ 和 $h_p F$ 减少.

由于对流层与电离层的耦合问题的理论仍处在探讨研究阶段, 特大暴雨天气事件又是极端天气事件, 发生的概率很小, 因此难以收集到较大的样本事例进行分析, 本文旨在通过 5 次样本事例对特大暴雨天气对电离层的影响进行初探性研究, 所得结论应该是初步的, 其后仍有许多工作要做. 例如, 所得结论是否具有普遍性, 夏季重力波是否能够通过某种温压结构较易上行传播等, 这些问题都值得进一步地探讨研究.

5 结论

为了研究对流层特大暴雨天气对电离层变化的

影响, 我们利用时序叠加法对 1958—1998 年期间发生在武汉的 5 次特大暴雨天气事件对武汉上空电离层变化的影响进行了分析和讨论, 得到如下结论.

(1) 特大暴雨天气事件的发生会引起 f_oE_s 和 f_oE_s 产生较明显的下降, 对 $h'F$ 和 h_pF 也有影响. 除此之外, 特大暴雨天气事件对电离层其他参量影响甚弱或没有影响.

(2) 特大暴雨天气事件越严重, 即过去 24 小时降水量越大, 对 f_oE_s 和 f_oE_s 的影响越明显, 对 $h'F$ 和 h_pF 的影响作用也会增加.

(3) 我们认为, 特大暴雨天气事件对电离层的影响主要来自于动力过程, 特别是特大暴雨激发的或相伴的大气重力波、潮汐波和行星波等长周期大尺度过程的作用.

特大暴雨天气事件的发生在引起 f_oE_s 和 f_oE_s 下降的同时也引起了 $h'F$ 和 h_pF 的下降, 对于其中的物理原因, 我们还需要在今后的工作中开展进一步的研究.

致谢 湖北省气象科学研究所冯光柳高级工程师为本文提供了特大暴雨降水资料, 同时, 本文还得到了中国科学院研究生科学与社会实践资助专项创新研究的经费支持, 在此一并感谢!

参考文献

- [1] Rastogi R G. Thunderstorms and sporadic-E layer ionization over Ottawa, Canada. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1962, **24**:533—540
- [2] Gherzi E. Ionosphere and weather. *Nature*, 1950, **165**:38
- [3] Bauer S J. A possible troposphere-ionosphere relationship. *J. Geophys. Res.*, 1957, **62**(3):425—430
- [4] Bauer S J. An apparent ionospheric response to the passage of hurricanes. *J. Geophys. Res.*, 1958, **63**:265—269
- [5] Georges T M. HF Doppler studies of traveling ionospheric disturbances. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1968, **30**:735—746
- [6] Baker D M, Davies D. F₂-region acoustic waves from severe weather. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1969, **31**:1345—1352
- [7] Šauli P, Boška J. Tropospheric events and possible related gravity wave activity effects on the ionosphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2001, **63**:945—950
- [8] Forbes J M, Palo S E, Zhang X L. Variability of the ionosphere. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2000, **62**:685—693
- [9] Rishbeth H, Mendillo M. Patterns of F₂-layer variability. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 2001, **63**:1661—1680
- [10] Mendillo M, Rishbeth H, Roble R G, Wroten J. Modeling F₂-layer seasonal trends and day-to-day variability driven by coupling with the lower atmosphere. *J. Atmos. Solar Terr. Phys.*, 2002, **64**:1911—1931
- [11] Shen Changshou. The correlations between the typhoon and the f_oF_2 of ionosphere. *Chin. J. Space Sci.*, 1982, **2**(4):135—140. in Chinese (沈长寿. 台风与电离层 f_oF_2 相关性的探讨. 空间科学学报, 1982, **2**(4):135—140)
- [12] Shen Changshou, Zi Minyun. The crossing of cold front and the night f_oF_2 . *Chin. J. Space Sci.*, 1986, **6**(3):211—216. in Chinese (沈长寿, 资民筠. 关于寒潮对夜间 f_oF_2 影响的探讨. 空间科学学报, 1986, **6**(3):211—216)
- [13] Xiao Zuo, Zhang Shuli, Zou Jiqing, Wang Yongguang. The morphological difference of ionospheric absorption in summer and winter at mid-latitudes and the possible coupling between D-region and lower atmosphere. *Chin. J. Geophys.*, 1984, **27**(1):1—7. in Chinese (肖佐, 张树礼, 邹积清, 王永光. 中纬度电离层吸收的冬夏不对称性及吸收与低层大气耦合的可能性. 地球物理学报, 1984, **27**(1):1—7)
- [14] Shen Changshou. The factors which influence the f_{min} and the possible cause of the "Winter Anomaly" of the D region. *Chin. J. Space Sci.*, 1984, **4**(2):135—141. in Chinese (沈长寿. 影响 f_{min} 的各种因子和中纬 D 层 "冬季反常" 的可能原因. 空间科学学报, 1984, **4**(2):135—141)
- [15] Bertin F, Testud J, Kersley L. Medium scale gravity waves in the ionospheric F-region and their possible origin in weather disturbances. *Planet. Space Sci.*, 1975, **23**:493—507