

关于寒潮对夜间 f_oF_2 影响的探讨

沈长寿 资民筠

(北京大学地球物理系)

摘 要

本文利用1968—1975年“寒潮年鉴”和乌鲁木齐、长春两站电离层 f_oF_2 资料,讨论了寒潮过境对夜电离层的影响。对个别样本的统计分析,特别是以地面气温最低日为标准日的叠加周期分析,均说明寒潮过境时夜间 f_oF_2 有下降趋势,平均说,在标准日下降最大,而后恢复。下降的百分值在太阳活动低年比高年大,乌鲁木齐站则比长春站大。这一下降的可能原因,是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。此初步设想能定性说明统计分析中的一些基本特性。

对流层内天气现象与电离层特性间的相互关联早为人们所关心^[1]。但至今对这种上下层耦合的可能性仍有不同看法。台风^[2]、寒潮是我国的重要天气过程,是可供上、下层耦合研究的有利途径。

本文以“寒潮年鉴”和乌鲁木齐、长春两电离层测站的 f_oF_2 资料为基础,分析了1968—1975年间寒潮经过时当地电离层夜间下层最大电子浓度的变化,证实了寒潮效应的存在,并提出了此效应可能起因的设想。

一、资料的选取和分析

本文所收集的寒潮以“寒潮年鉴”为准。寒潮的特征指标是多方面的,我们选取当地温度最低日为标准日,把其前后五天作为一寒潮过程,以便进行周期叠加分析。地磁暴也会对电离层 f_oF_2 有影响,为排除其效应,只选取标准日 $\sum Kp < 30$,前后日 $\sum Kp < 35$ 的样本。这样虽仍难免有中等以下磁暴,但对长春、乌鲁木齐的纬度 ($\sim 43^\circ\text{N}$),冬季中弱磁暴对应电离层正暴,而寒潮产生的是负效应,两者明显不同。此外流经乌鲁木齐的寒潮路径多为西北路,经长春的则还有北路。后者出现两路寒潮交错或相继发生时,电离层

表 1

地点	寒潮总次数	同时有较大磁暴次数	两路寒潮紧接次数	缺 f_oF_2 记录次数	实际取样次数
乌鲁木齐	38	8	0	5	25
长春	81	8	12	16	45

效应重迭干扰比较复杂,故统计时一律舍弃。实际取样情况如表 1。

作为初探,本文只讨论夜间响应情况,这时正常层只有 F_2 层,电离层响应可由 f_0F_2 变化表示。为滤掉其它变化及随机涨落,采用以下统计方法。先对寒潮五天过程的每一天求出前一天 20—23h (地方时)及当天 00—05h 每小时百分偏差 Δf_0F_2 :

$$\Delta f_0F_2 = \frac{f_0F_2 - \overline{f_0F_2}}{\overline{f_0F_2}},$$

其中 $\overline{f_0F_2}$ 是滑动月均值,求 Δf_0F_2 是为了去掉长期趋势变化。进而对上述 10 小时的 Δf_0F_2 加以平均,滤掉随机涨落,得到

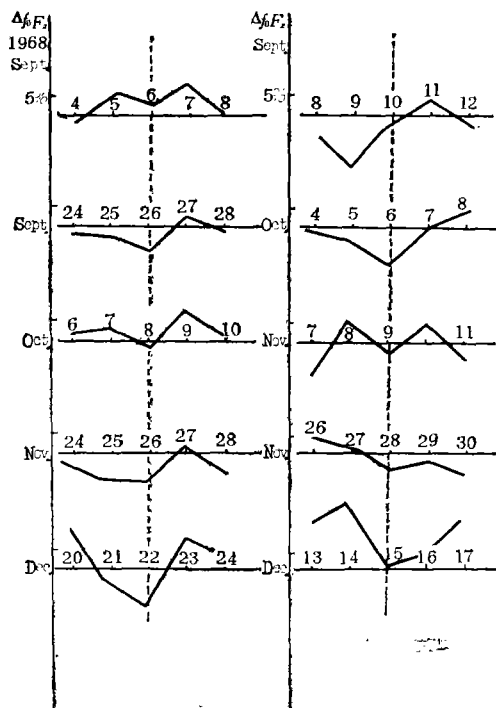
$$\overline{\Delta f_0F_2} \left(= \sum_{i=1}^{10} \Delta f_0F_2 / 10 \right),$$

代表当天(夜至晨)电离层平均响应的基本参数。

在分析个别样本的基础上,再以标准日为零日进行周期迭加分析。

二、寒潮过境的 f_0F_2 效应

图 1 中以 1968 年样本为例,给出寒潮过境的 $\overline{\Delta f_0F_2}$ 变化。尽管每个样本的情况略



(a) 乌鲁木齐 (Wulumuchi) (b) 长春 (Changchun)

图 1 1968 年 9 月至 12 月期间各次寒潮过程中 $\overline{\Delta f_0F_2}$ 的变化

(横坐标为日期,虚线为标准日)

Fig. 1 Night-to-night $\overline{\Delta f_0F_2}$ variation of cold front processes from Sep. 1968 to Dec. 1968, dotted lines indicate the key day

有差异,但在寒潮入境时 f_oF_2 下降,标准日前后达最低,这样的总趋势是很明显的。完全例外的样本(标准日达最高值,前后均偏低),七年中乌鲁木齐站仅一次,长春两次。

表 2

	前两天	前一天	标准日	后一天	后两天
乌鲁木齐	3	4	14	1	3
长春	7	5	22	6	5

表 2 给出寒潮过程 5 天中, $\overline{\Delta f_oF_2}$ 最低日出现在哪天的次数分布。很明显其峰值在标准日。一般说,表 2 能够反映寒潮过境时 f_oF_2 下降的明显趋势,但由于寒潮的电离层响应是个新的研究课题,作进一步的数理统计说明也许是必要的。这里采用了对骰子是均匀还是有偏的 χ^2 -检验法。将每个五天寒潮过程看作一次试验,如无任何定向性影响,只是随机起伏,则 $\overline{\Delta f_oF_2}$ 最低值出现在这五天中任一天的可能性都是等同的,其概率为 $1/5$ 。把这作为零假设,可对下面的统计量进行 χ^2 -检验^[7]。

$$\chi^2 = \sum_{n=1}^5 \frac{(O - E)^2}{E}$$

(自由度为 $n - 1$), 其中 O 为实际出现频数, E 为等概率情况下预期出现频数。对长春 $E = 45/5 = 9$, 对乌鲁木齐 $E = 25/5 = 5$ 。在 5% 显著水平下, χ^2 的临界值分别应为 9.48, 而对两站样本分别计算的 χ^2 值为 23.8 和 21.2, 均大大超过临界值。在 95% 的置信水平上否定原假设, 即随机起伏可造成表 2 中分布的可能性。

与磁暴的电离层效应相比, 尽管磁暴引起的电离层变化量级可大大超过寒潮效应, 但其相应的变化形态相当复杂。相对说, 上述寒潮的电离层效应(虽是局部地区)更为稳定, 不能看成是偶然现象, 而是确实存在的。

为了进一步突出寒潮效应, 采用周期叠加分析的方法, 其结果示于图 2, 由图 2 看到, 寒潮过境时 f_oF_2 的下降趋势更为明显。鉴于所研究的是一种新的耦合关系, 作些更严格的判断也许是必要的。同样, 在没有现成统计方法的情况下, U -检验看来是可取的。 U -检验法是对固定方差正态总体均值所作的检验。设随机起伏方差为 σ , 若以标准日所出现的现象是随机起伏所致作为零假设, 则统计量

$$U = \frac{(\mu - \mu')\sqrt{n}}{\sigma}$$

服从 $N(0, 1)$ (正态分布)。这里 $\mu - \mu'$ 即图 2 中寒潮标准日的 $\overline{\Delta f_oF_2}(\mu)$ 与周围日的 $\overline{\Delta f_oF_2}(\mu')$ 之差, n 为样本数。在显著水平 $\alpha = 0.05$ 时, U 的临界值为 1.96, 即在

$$|U| < 1.96(\sigma > \sqrt{n}/1.96 \cdot (\mu - \mu'))$$

时, 肯定零假设。对长春 $\mu - \mu' \sim 4\%$, 乌鲁木齐 $\sim 7\%$, 即要求正常日随机起伏达 18% 以上。事实上正常日随机起伏在 15% 以下, 这就否定了零假设。这里所用的 n 是以寒潮过程数记的。考虑到这是对每天 10 个小时取平均, $\sqrt{n}$ 还要增大 3 倍。应指出, 尽管寒潮平均效应只有 4—8% 的量级, 与 f_oF_2 逐日变化同一量级, 甚至更小, 但经过周期叠加分析后, 逐日的随机起伏(包括观测的随机误差)已压低到原来的 $1/\sqrt{n}$, 从而寒潮效应

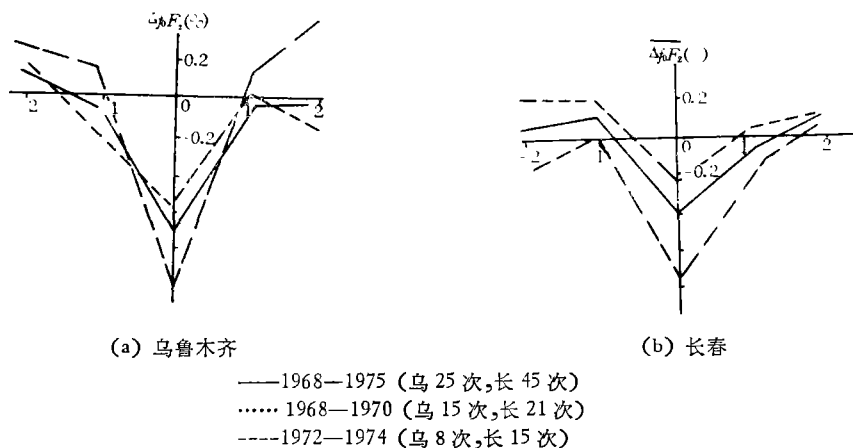


图2 寒潮过程中 $\overline{\Delta f_0 F_2}$ 变化的周期叠加分析
 Fig. 2 the results of the superposed epoch analysis for $\overline{\Delta f_0 F_2}$ of cold front processes

明显大于随机起伏。至于观测中的系统误差对标准日和非标准日是同样作用的,对本文分析的趋势变化并无影响。

总之,周期叠加分析及上述 U -检验,再次说明寒潮对电离层的影响是确实显著的。

确认了寒潮对电离层的影响后,我们对两站进行了对比,还分别太阳高年低年作周期叠加分析,结果也绘于图2中。对比结果是:不管哪个站,太阳活动高年寒潮响应的百分率均比低年小;而无论高年还是低年,乌鲁木齐响应都比长春大。这些趋势还有待于更多的资料加以检验,但它为进一步物理机制的讨论提供了一定的线索。

三、讨 论

本文主要目的是用观测结果证明寒潮过境对局地电离层 F 区最大电子浓度所产生的影响。寒潮是对流层内的天气过程,在缺乏多方面其他资料的综合分析下,要寻求有说服力的理论解释是不现实的。事实上,这种关联是由上而下,还是由下而上发展甚至是同步效应,三者都是有可能的。目前,我们认为下述机制是一种较为合理的机制。

寒潮经过时,对流层内常有风速垂直切变较大的激流带,由线性的稳定性理论可知,当 Richardson 数满足

$$R_i = N^2 / \left(\frac{du}{dz} \right)^2 < 1/4$$

的区域内,可产生 Kelvin-Helmholtz 不稳定性^[3],并经常观测到重力波的产生^[4]。这里, $\frac{du}{dz}$ 是水平风速的垂直变化。 $N = g \left(\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dz} + \frac{g}{a^2} \right)$ (ρ :大气密度, g :重力加速度, a :声速)是大气中的 Väisälä-Brunt 频率,或称浮力频率。实际大气中 N 为 $0.01-0.03 \text{ s}^{-1}$,故若 $\frac{du}{dz} > 0.4 \text{ m/s/10m}$,就超出了不稳定性激发阈。这是在寒潮激流底部的局部区域

内经常发生的现象。至于重力波向上传播造成电离层行扰 (TID) 则已有广泛的讨论。与寒潮相联, 在电离层观测频高图上出现类似 TID 的图象也有不少报道。我们则认为这种重力波作用一定时间后的积累效应, 可以说明上面分析的一些统计特性。我们仅有每小时一次的 f_oF_2 资料, 无法讨论重力波对电离层作用的瞬态效应。

如果在重力波作用下, 水平均匀的电子层产生了某种上下往返运动, 当电子消失率在各高度上都相同时, 这种上下运动当然不会影响该层电子浓度。即使电子复合系数 β 随高度线性衰减, N_m 也不会受上下运动而变化, 因为向上时消失率的减小和向下时的增长基本抵销。但实际上, F 层内 β 随高度指数衰减 $\beta = \beta_m e^{-\frac{\Delta z}{H}}$ (H : 标高, β_m : 最大电子浓度所在高度上的 β)。因此向上移时电子复合的减小将小于向下时复合的加快。在每个周期内, 此效应虽很不明显, 但经过一定的时间积累后, 就可达到一定的量级。对通常的 F 层情况, 若取 N_m 为 10^5cm^{-3} , $\beta_m = 3.3 \times 10^{-5} \text{s}^{-1[5]}$, $T = 20 \text{min}$ (中尺度 TID 的平均周期), 上下往返范围为 $\Delta z = 12.5 \text{km}^{[6]}$, 则每一周期后, N_m 变化为 $-0.07\% - -0.04\%$ (随 H 不同而变)。经过数小时的积累, 达到 $4-8\%$ 的变化是可能的。通过这一简单机制估算, 有可能解释前述的一些观测统计特性。这机制的要点, 一是寒潮使电离层作上下运动, 二是 β 随高度的指数分布。前者可解释地面气温最低日 $\overline{\Delta f_o F_2}$ 达最低值的现象。因一般说, 这一天中寒潮激流中心最靠近本站。这也说明了长春站的 $\overline{\Delta f_o F_2}$ 小于乌鲁木齐站的事实, 因为当西路寒潮自乌鲁木齐到达长春时, 其激流强度会明显减弱, 而西北路寒潮中激流的西风分量相对较小。后者则可解释太阳活动低年时寒潮效应大的统计结论, 因为 $\beta (\sim e^{-\frac{\Delta z}{H}})$ 随高度变化与标高有关, 低年时 H 小, β 垂直变化大, 寒潮效应显著, 高年时相反。

以上设想只是提供了一种可能机制, 有待于进一步的观测证实。特别是对寒潮过境时激流场的细致结构, 不稳定性及重力波的产生、传播情况以及中、高层大气中尽可能多的结构要素的观测, 都将提供必要的信息。

本文讨论的是每天 10 小时的平均效应, 故无法对寒潮与电离层响应间的时间超前、滞后或是同步问题作出判断。这种判断对进一步研究电离层对寒潮响应的机制是必不可少, 也是今后观测中应解决的问题。

参 考 文 献

- [1] Bauer, S. J., *Geophys. Res.*, Vol. 62, p. 425, 1957.
- [2] 沈长寿, 空间科学学报, 第 2 卷, 第 335 页, 1982.
- [3] Chimonas, G., *J. Fluid Mech.*, Vol. 43, p. 833, 1970.
- [4] VanZandt, T. E. et al., *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 6, p. 429, 1979.
- [5] Titheridge, J. E., *J. Atmos. Terr. Phys.*, Vol. 30, p. 1857, 1968.
- [6] Hines, C. O., *Can. J. Phys.*, Vol. 38, p. 1441, 1960.
- [7] Nevill, A. M. and J. B. Kennedy, *Basic Statistical Methods (for Engineers and Scientists)*, International Textbook Company, p. 129, 1964.

The Crossing of Cold Front and the Night f_0F_2

Shen Chang-shou Zi Min-yun

(*Department of Geophysics, Peking University*)

Abstract

The effects of the cold fronts upon the night f_0F_2 are found out by using the records from the cold fronts years book and ionosonds measurements of Wulumuqi and Changchun. From the statistical analyses of large number samples from 1968 to 1975 and the superposed epoch analyses with the day of the minimum temperature during the processes as the key day, it is shown that the f_0F_2 tends to decrease when a cold front passes across. The maximum decrease is at the key day in the superposed epoch analyses. The percentage values of the decreases are 4%—8%. It is larger in solar low-activity years, and the variation is also larger in Wulumuqi than in Changchun. χ^2 - and U -test have been used to demonstrate the significance of the response. The effects are probably caused by the gravity waves from the Jet-stream-generated Kelvin-Helmholtz Instability within the cold front area. Gravity waves may propagate upward and produce the up-down oscillation in ionosphere. The integrated decrease of the f_0F_2 and the difference between the high and low activity years can be interpreted by this mechanism as well as the station-to-station difference.