# 用偏相关分析电离层 NmF2 与低层大气等压面高度的相关性

徐桂荣[①②③] 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, 武汉 430071; ③ 中国科学院研究生院, 北京 100049. * 联系人, E-mail: wanw@mail.iggcas.ac.cn)

摘要 通过建立电离层 NmF2 与其不同影响因子的多元线性回归模型, 应用偏相关方法分析了 1957~2004 年中国武汉电离层 NmF2 与对流层和平流层不同等压面高度的相关联系, 结果表明偏相关方法能够有效剔除太阳活动, 地磁活动以及季节因子的影响, 真实地反映电离层 NmF2 与低层大气等压面高度的相关性质, 两者在平流层中部有弱的正相关. 通过偏相关系数的对比发现, 电离层 NmF2 主要受太阳活动和季节因子的影响, 地磁活动的影响很小, 而低层大气等压面高度的影响很微弱. 研究表明偏相关方法是判断电离层与其上下层大气耦合程度的有效工具.

关键词 偏相关 电离层 **NmF2** 低层大气 耦合

对流层, 平流层, 中间层以及热层和外逸层构成了地球大气系统, 电离层与热层嵌套在一起, 其行为与其他大气层有着相互联系. 对流层和平流层中能量密度的量级远大于热层, 即使是从下面泄漏上来的一点微弱的能量都可能在大体上扰乱热层能量, 进而影响电离层行为. 众多的研究表明, 电离层的行为受到低层大气气象活动的影响[1~6]. 电离层F2 层光化学过程和动力学过程之间的微妙平衡对来自上面和下面的影响非常敏感. F2 层峰值电子浓度NmF2 除有复杂的季节行为外, 还有典型的大约 15%标准偏差的逐日变化, 这些变化可以归结于“太阳的”, “地磁的”和“其他的”影响, 而“其他的”影响似乎主要源自大气的低层, 可称之为“气象的”影响, 它至少可以与地磁活动的影响相当[7,8]. NmF2 与F2 层临界频率foF2 的平方成正比, Mikhailov等人[9]以及 Vanina 和 Danilov[10~17]对电离层 foF2 和平流层 100 hPa (约 17 km)等压面高度$h$(100)的相关性进行了系列的研究, 分析了foF2 与$h$(100)的简单相关系数的日变化, 季节变化, 以及对太阳活动和地磁活动的依赖性等问题. 他们在研究中发现, foF2 与$h$(100)的简单相关系数在夜间有正的高值区, 在白天有负的高值区, 黎明和黄昏是其正负值的过渡区. 然而, 由于太阳的, 地磁的和气象的影响共同控制着电离层的行为, 在太阳的和地磁的影响对电离层的遮蔽效应下, 气象的影响难以得到有效的提取, 电离层参量和低层大气气象参量的耦合研究有时会得到模棱两可的结论, 因而有必要在进行分析时将太阳的和地磁的影响去掉. 寻找一个有效的方法来剔除太阳活动和地磁活动的影响, 进而揭示电离层参量与低层大气气象参量的真实相关联系是本文的主要研究目的. 另外, 由于电离层与其上下层大气耦合的复杂性, 定量描述电离层参量与其不同影响源的关系一直是个重要的课题, 尝试用偏相关方法定量分析电离层参量与其不同影响源的相关性是本文的另一个研究目的.

在对多元相关变量进行相关性分析时, 偏相关分析能够剔除其他相关变量的影响, 正确地表示两个变量间的线性相关性质与程度, 真实地反映两个变量的本质联系. 本文通过建立电离层 NmF2 与其影响因子的多元线性回归模型, 分别应用简单相关和偏相关方法对电离层 NmF2 与平流层 100 hPa 等压面高度 $h$(100)的相关性进行了对比分析, 应用偏相关方法考查了 1957~2004 年中国武汉对流层和平流层不同等压面高度 $h$ 与电离层 NmF2 的相关联系, 并进一步分析比较了电离层 NmF2 与太阳活动参量 $F107$, 地磁活动参量 $Ap$ 以及低层大气等压面高度 $h$ 之间的

2007-01-29 收稿, 2007-04-05 接受

中国科学院知识创新工程方向性项目(批准号: KZCX3-SW-144)、国家自然科学基金项目(批准号: 40636032)和国家重点基础研究发展计划(编号: 2006CB806306)资助

相关程度.

## 1 数据和方法

本文所用电离层 NmF2 由武汉电离层观象台观测的 foF2 通过计算得到, 每日有 48 个数据点, 其时间间隔为 0.5 h(0000LT, 0030LT, 0100LT, 0130LT,…, 2330LT). 对流层和平流层各等压面高度 $h$ 从中国气象局发布的每天 0000UT 定时探测的高空气象资料中获取, 文中所取武汉站对流层和平流层各等压面 $P$ 及其平均高度 $\bar{h}$ 见表 1. 分析数据覆盖的时间段为 1957~2004 年.

表 1 武汉站对流层和平流层各等压面 $P$ 及其平均高度 $\bar{h}$

| | 对流层 | | | | | | 平流层 | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $P$/hPa | 1000 | 850 | 700 | 500 | 400 | 300 | 200 | 100 | 50 | 30 | 20 | 10 |
| $\bar{h}$ /km | 0.1 | 1.5 | 3.1 | 5.8 | 7.5 | 9.5 | 12.3 | 16.6 | 20.7 | 23.9 | 26.5 | 31.0 |

由于电离层 NmF2 受太阳活动, 地磁活动以及气象活动等的影响, 其本身还具有年变化和半年变化, 为考查 NmF2 与其不同影响源的相关性, 本文在电离层参量的传统建模思想基础上, 用每日 $F107$ 来表征当日太阳活动, 用每日 $Ap$ 来表征当日地磁活动, 用每日 0000UT 时刻低层大气等压面高度 $h$ 来表征当日等压面高度状态, 连同年变化和半年变化季节因子建立如下 NmF2 的多元线性回归模型:

$$\begin{aligned}\mathrm{NmF2} = {} & \mathrm{NmF2}_0 + \gamma_F \cdot F107 + \gamma_A \cdot Ap + \gamma_h \cdot h \\ & + A_1 \cdot \cos\left(\frac{2\pi d}{365}\right) + A_2 \cdot \sin\left(\frac{2\pi d}{365}\right) \\ & + S_1 \cdot \cos\left(\frac{4\pi d}{365}\right) + S_2 \cdot \sin\left(\frac{4\pi d}{365}\right), \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $\mathrm{NmF2}_0$ 表示 NmF2 的年平均值, $d$ 表示一年的第 $d$ 天. 根据这个模型可以用偏相关方法分析 NmF2 与 $F107$, $Ap$, $h$ 以及季节因子的相关性. 回归模型中各变量序列的时间长度为 1957~2004 年, 而且各变量是同日相对应的. 不同 LT 时刻的 NmF2 需要分别进行建模, 不同等压面上的 $h$ 也需要分别地建模.

多元相关变量间的相关性是比较复杂的, 任何两个变量间常常存在不同程度的简单相关关系, 但是这种相关关系又包含有其他相关变量的影响, 简单相关分析没有考虑其他相关变量对这两个变量的影响, 实际上并不能真实地反映两个相关变量间的相关联系, 而只有消除了其他相关变量的影响之后, 研究两个变量间的相关性, 才能真实地反映这两个变量的相关性质. 偏相关分析就是固定其他相关变量不变而研究两个相关变量间相关性的统计分析方法. 用来表示两个相关变量偏相关的性质与程度的统计量叫偏相关系数. 偏相关系数的绝对值越大, 表示其偏相关程度越强. 根据被固定的变量个数可将偏相关系数分级, 偏相关系数的级数等于被固定的变量的个数. 一般地, 当研究 $n$ 组 $m$ 个相关变量 $X_1$, $X_2$,…, $X_m$的相关时, 只有将其中的$m$–2个变量保持固定不变, 研究另外两个变量的相关才能真实地反映这两个相关变量间的相关性. 在本文的 NmF2 的多元线性回归模型中, 当求解 NmF2 与 $h$ 的偏相关系数时, 首先用 NmF2 对除 $h$ 外的其他影响因子即 $F107$, $Ap$ 以及季节因子作回归, 得到此回归方程的残差 $e_{\mathrm{NmF2}}$, 然后用 $h$ 同样对 $F107$, $Ap$ 以及季节因子作回归, 得到此回归方程的残差 $e_{\mathrm{h}}$, 那么 $e_{\mathrm{NmF2}}$ 与 $e_{\mathrm{h}}$ 的相关系数就是 NmF2 与 $h$ 的偏相关系数. 用每日不同 LT 时刻的 NmF2 样本序列分别与相对应的 $h$ 样本序列进行偏相关分析, 就可以得到 NmF2 与 $h$ 的偏相关系数在不同 LT 时刻的日变化情况. 同理, 可求 NmF2 与其他影响因子的偏相关系数. 偏相关系数的统计显著水平可用 $t$ 检验法来进行检验.

## 2 结果与讨论

### 2.1 简单相关与偏相关方法的对比

为对比简单相关与偏相关两种方法的区别, 同时便于与Vanina和Danilov[14]的结果进行适当的比较, 图 1(a), (b)分别给出了电离层NmF2 与平流层 100 hPa 等压面高度$h$(100)的简单相关系数和偏相关系数的日变化. 从图 1(a)可以看到, 简单相关系数的统计显著水平全天几乎都达到 90%以上, 而且其日变化具有明显的规律性, 白天为负相关, 夜间为正相关, 黎明和黄昏为正负相关的过渡区, 夜间的正相关系数在黎明过渡区急剧下降前有极大值, 其值为 46%, 白天的负相关系数在 0900~1100LT有极小值, 其值为 –27%. 这些结果与Vanina和Danilov[14]的结果相当一致, 只是由于分析时间段和选取电离层F2 层参量的不同, 简单相关系数的大小稍有不同. 然而, 图 1(b)给出的NmF2 与$h$(100)的偏相关系数的日变化与简单相关分析得到的结果有明显差别, NmF2 与$h$(100)的偏相关系数的统计显著水平全天大多数低于 90%, 其日变化的规律性较差, 而且其符号经常与简单相关系数的相反; NmF2 与$h$(100)的偏相关系数在 0600~0700LT 有显著极小值, 其值为–3%, 在 1300~1530LT有显著

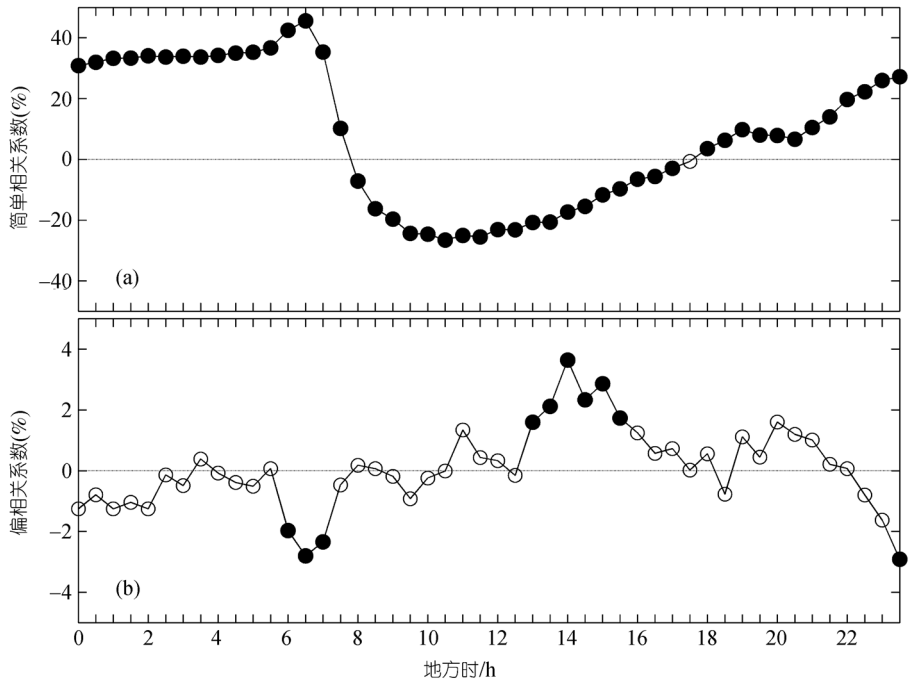


图 1 NmF2 与 $h$(100)的简单相关系数与偏相关系数的日变化

(a) 简单相关系数; (b) 偏相关系数. ●代表统计显著水平在 90%以上, ○代表统计显著水平在 90%以下

极大值, 其值为 4%, 其大小比简单相关系数的大小小了一个量级.

由此可见, 用简单相关分析得到的NmF2 与 $h$(100)的相关系数含有其他相关变量的影响, Vanina 和Danilov[14]用简单相关分析得到的结果也只是foF2 与$h$(100)的表面相关联系, 因为在太阳辐射的作用下, 电离层NmF2(或者foF2)和$h$(100)的行为在季节变化上具有相似性, 此外地磁活动等其他相关影响因子也有可能对NmF2(或者foF2)与$h$(100)的简单相关系数产生影响. 而偏相关分析能够剔除$F$107, $Ap$以及季节因子对NmF2 和$h$(100)的相关性的影响, 所得到的偏相关系数能够真实反映NmF2 与$h$(100)的相关性质与密切程度.

### 2.2 NmF2 与低层大气等压面高度 $h$ 的相关性

图 2 给出了用偏相关分析得到的电离层 NmF2 与低层大气不同等压面高度 $h$ 的偏相关系数的日变化. 从图中可以看到, NmF2 与不同等压面 $h$ 的偏相关系数的日变化并不完全一致但有一定的层次性, 在 1000~700, 500~100, 50~20 hPa 区域分别具有比较相似的日变化, 而在 10 hPa 上又稍有不同. 然而, 无论在对流层还是在平流层, NmF2 与 $h$ 的偏相关系数都相当小, 具有 90%以上统计显著水平的偏相关系数的大小在平流层 30 hPa 以下区域都没有超过 4%, 到平流层 20 hPa 其极大值也仅为 6%, 而且显著相关时段也相当短; 直到平流层中部 10 hPa, 具有 90%以上统计显著水平的偏相关系数的极大值才提高 19%, 其显著相关时段较长, NmF2 与 $h$ 是正相关.

从上面的分析可知, 电离层 NmF2 与低层大气等压面高度 $h$ 没有明显的相关联系, 只在较高的平流层中部两者有弱的正相关. 某地气压是指该地单位面积铅直向上延伸到大气顶的空气柱的总质量, 气压越大, 空气柱的大气密度越大. 对于同一个等压面来说, 其高度参数 $h$ 越高, 意味着该地气压越大, 则该地单位空气柱的大气密度也越大. 在对流层甚至低平流层, 由于低层大气的大气密度远大于热层/电离层的大气密度, $h$ 的变化主要由电离层高度以下的大气密度变化所引起, 到了平流层中部区域, 由于与电离层高度的距离在拉近, 两个区域大气密度的量级差异在缩小, $h$ 的变化便有可能对电离层高度的大气密度产生影响. 当平流层中部 $h$ 增加时, 该地单位空气柱的大气密度增大, 这有可能造成电离层高度的大气密度也增大, 使得电离层高度的标高 $H$ 增加, $H$ 的

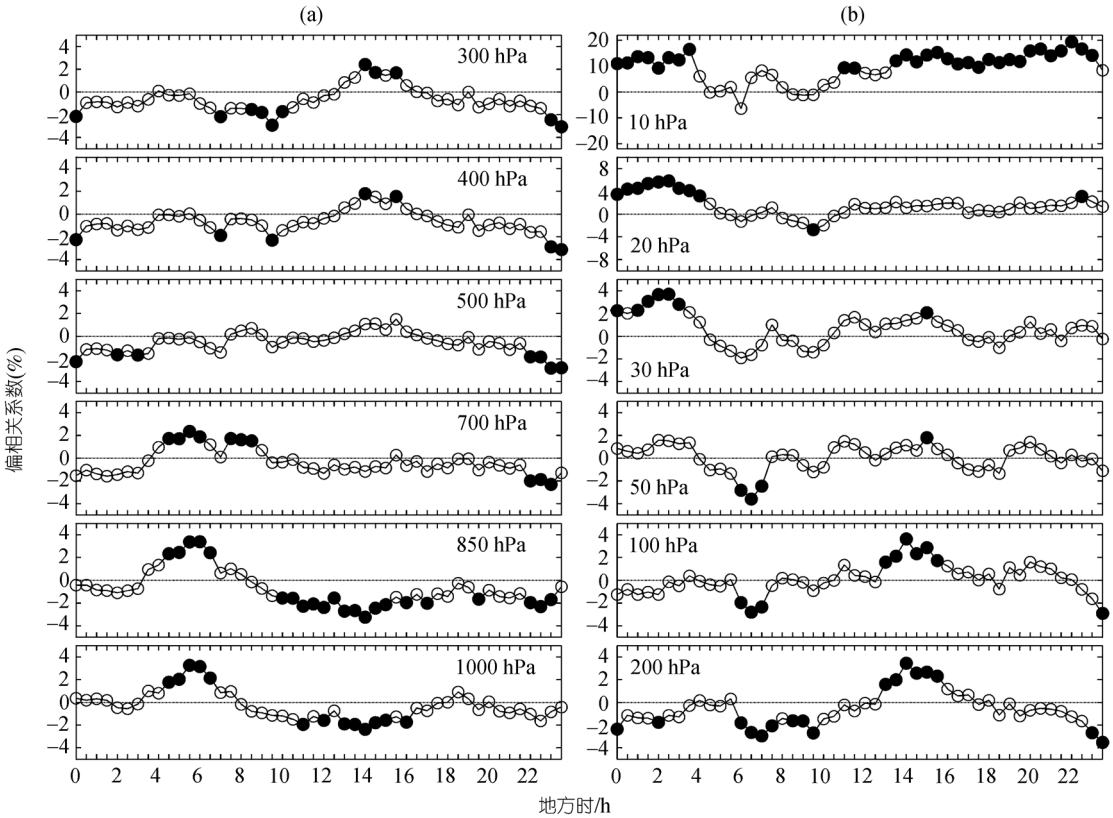


图 2 NmF2 与低层大气不同等压面高度 $h$ 的偏相关系数的日变化

(a) 对流层; (b) 平流层. ●, ○表示同图 1

增加会引起线性损失系数$\beta$的减小, 使得电子浓度增大, 电离层NmF2 也会增大 [18].

### 2.3 NmF2 与其不同影响源的偏相关程度

为考查电离层 NmF2 与其不同影响源的偏相关程度, 本文在 NmF2 的多元线性回归模型的同一个样本中分别求取 NmF2 与低层大气等压面高度 $h$, 地磁活动指数 $Ap$, 太阳活动指数 $F107$ 以及年变化和半年变化因子的偏相关系数, 结果见图 3, 其中所选取的等压面高度 $h$ 为平流层 30 hPa 等压面上的. 从图 3 可见, 在电离层 NmF2 的不同影响源中, $F107$ 的偏相关程度最高, 其偏相关系数全天都有 90%以上统计显著水平的正相关, 其最大值可达 81%; 年变化和半年变化因子的偏相关程度比 $F107$ 稍小, 其偏相关系数全天也有 90%以上的统计显著水平, 两个年变化因子的偏相关系数的大小最大可达 67%和 53%, 两个半年变化因子的偏相关系数的大小最大可达 54%和 27%; $Ap$ 的偏相关程度要远小于 $F107$ 以及年变化和半年变化因子, 具有 90%以上显著水平的偏相关系数的大小最大为 12%, 其显著相关时段没有覆盖全天; $h$ 的偏相关程度最低, 具有 90%以上显著水平的偏相关系数大小最大仅为 4%, 其显著相关时段也很短. 选取其他等压面上的 $h$ 进行同样的分析所得结果一致, 只是选取平流层中部 10 hPa 等压面上的 $h$ 时, NmF2 与 $h$ 的偏相关程度稍有提高, 能够达到与 $Ap$ 相当的量级.

通过对比可以看到, 电离层 NmF2 主要受 $F107$ 和季节因子的影响, 这两个影响因子也是国际电离层参考模式(IRI)的主要驱动源, 而$Ap$对NmF2 的影响较小, 低层大气等压面高度$h$的影响很微弱, 这说明电离层NmF2 主要受太阳活动的控制, 在其作用下 NmF2 的行为具有明显的季节变化特征. 这与NmF2 的扰动变化受影响的情况不同, 在造成NmF2 扰动变化的影响源中, 地磁活动的影响起主要作用, 气象活动的影响与地磁活动相当, 而太阳活动的影响较弱 [7,8]. 文献[7,8]给出的不同影响源对NmF2 扰动变

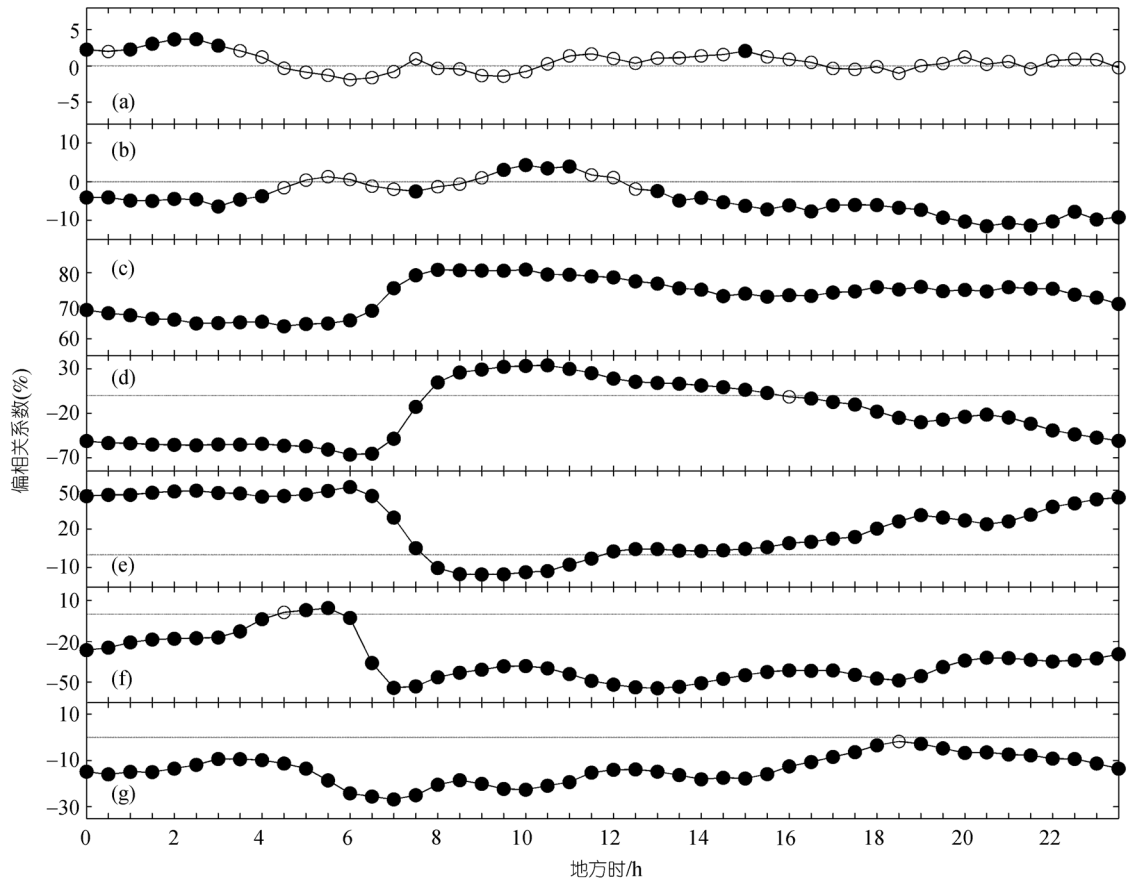


图 3 NmF2 与其不同影响因子的偏相关系数的日变化

(a) $h$; (b) $Ap$; (c) $F107$; (d)年变化因子 $\cos\left(\frac{2\pi d}{365}\right)$; (e)年变化因子 $\sin\left(\frac{2\pi d}{365}\right)$; (f)半年变化因子 $\cos\left(\frac{4\pi d}{365}\right)$; (g)半年变化因子 $\sin\left(\frac{4\pi d}{365}\right)$. ●, ○表示同图 1

化的贡献大小只是一个粗略的估计, 因为不同的影响源并没有被有效地分开来考虑, 用偏相关方法定量分析 NmF2 的扰动变化与其不同影响源的相关程度是本文作者下一步将要开展的工作. 此外, 从图 3 还可以看到, NmF2 与 $F107$ 的偏相关系数在白天要高于夜间, 这说明两者的相关性在日出后随太阳辐射的增强而增强, 在日落后随太阳辐射的减弱而稍有减弱; NmF2 与年变化的两个因子的偏相关系数的符号是相反的, 而 NmF2 与半年变化的两个因子的偏相关系数的符号却是相同的, 这个现象需要本文作者作进一步研究.

## 3 结论

电离层的行为受到太阳活动, 地磁活动, 气象活动以及季节变化等的影响, 不同影响源的作用混合在一起增加了研究电离层与其上下层大气耦合的复杂性和难度, 如何有效提取电离层参量与其不同影响源的相关联系一直是个重要课题. 本文通过建立电离层 NmF2 与其不同影响因子的多元线性回归模型, 首次应用偏相关方法分析了 1957~2004 年中国武汉电离层 NmF2 与对流层和平流层不同等压面高度 $h$ 以及其他影响因子的相关联系. 通过与简单相关分析的结果进行对比, 偏相关分析能够有效剔除太阳活动, 地磁活动和季节因子的影响, 真实地反映电离层 NmF2 与低层大气等压面高度 $h$ 的相关情况. 电离层 NmF2 与对流层和平流层不同等压面高度 $h$ 没有明显的相关联系, 但在平流层中部 NmF2 与 $h$ 有弱的正相关. 用偏相关方法对比分析电离层 NmF2 与其不同影响因子的偏相关系数的大小发现, 与电离层 NmF2 的扰动变化受影响的情况不同, NmF2 主要受太阳活

动和年变化以及半年变化的影响，地磁活动的影响很小，气象活动的影响很微弱. 本文的研究表明偏相关系数能够真实反映电离层 NmF2 与其不同影响源的相关性质，偏相关方法是判断电离层与其上下层大气耦合程度的有效工具.

致谢 本工作所用高空气象资料由中国气象局提供，在此表示衷心的感谢.

## 参 考 文 献


1 Kazimirovsky E S, Kokourov V D. Meteorological effects in the ionosphere: A review. Geomagn Aeron, 1995, 35(3): 303—320

2 Wan W X, Yuan H, Ning B Q, et al. Traveling ionospheric disturbances associated with the tropospheric vortexes around Qinghai-Tibet Plateau. Geophys Res Lett, 1998, 25(20): 3775—3778[DOI]

3 Kazimirovsky E, Herraiz M, De La Morena B A. Effects on the ionosphere due to phenomena occurring below it. Surv Geophys, 2003, 24: 139—184[DOI]

4 Davis C J, Johnson C G. Lightning-induced intensification of the ionospheric sporadic E layer. Nature, 2005, 435: 799—801[DOI]

5 Rishbeth H. F-region links with the lower atmosphere. J Atmos Solar-Terr Phys, 2006, 68: 469—478[DOI]

6 肖赛冠，郝永强，张东和，等. 电离层对台风响应的全过程的特例研究. 地球物理学报, 2006, 49(3): 623—628

7 Forbes J M, Palo S E, Zhang X L. Variability of the ionosphere. J Atmos Solar-Terr Phys, 2000, 62: 685—693[DOI]

8 Rishbeth H, Mendillo M. Patterns of F2-layer variability. J Atmos Solar-Terr Phys, 2001, 63: 1661—1680[DOI]

9 Mikhailov E N, Vanina L B, Danilov A D. Relation between the parameters of the ionospheric F2 region and the stratosphere. Geomagn Aeron, 1998, 38: 121—123

10 Vanina L B, Danilov A D. Relation between the parameters of the F2 region and the stratosphere: The seasonal effect. Geomagn Aeron, 1999, 39: 388—389

11 Vanina L B, Danilov A D. Relation between the parameters of the F2 region and the stratosphere: Fine structure of the effect. Geomagn Aeron, 2000, 40: 776—778

12 Vanina L B, Danilov A D. Relation of the F2 region to stratospheric parameters: Gor'kii station. Geomagn Aeron, 2002, 43(2): 483—486

13 Vanina L B, Danilov A D. The relation of the F2 region to stratospheric parameters: A comparison of Gor'kii and Kaliningrad data. Geomagn Aeron, 2003, 43(2): 206—209

14 Vanina L B, Danilov A D. Relation between the parameters of the ionospheric F2 region and the stratosphere: The dependency of the effect on UT. Geomagn Aeron, 2003, 43: 464—470

15 Vanina L B, Danilov A D. Interrelation between daytime and nighttime values of foF2 and the $h$(100) stratosphere parameter. Geomagn Aeron, 2003, 43: 616—623

16 Danilov A D, Vanina L B. Relation between parameters of the stratosphere and ionospheric F2 layer. Int J Geomagn Aeron, 2003, 4(3): 237—250

17 Vanina L B, Danilov A D. Relation of the parameters of the F2 region and stratosphere: The choice of only magnetically quiet days. Geomagn Aeron, 2005, 45(3): 363—366

18 Rishbeth H. How the thermospheric circulation affects the ionospheric F2-layer. J Atmos Solar-Terr Phys, 1998, 60: 1385—1402[DOI]