

国家安全地球物理丛书(十一)



地球物理应用前沿

刘代志 主编



 西安地图出版社

《国家安全地球物理丛书》(十一)

地球物理应用前沿

中国地球物理学会国家安全地球物理专业委员会
陕西省地球物理学会军事地球物理专业委员会

刘代志 主编



西安地图出版社

©刘代志 2015

图书在版编目(CIP)数据

地球物理应用前沿/刘代志主编. —西安:西安地图出版社, 2015.9

ISBN 978-7-5556-0195-1

I. ①地… II. ①刘… III. ①地球物理学—应用
IV. ①P3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 215687 号

著作人及著作方式:刘代志 主编

责任编辑:陈扬眉

书 名 地球物理应用前沿

出版发行 西安地图出版社

地址邮编 西安市友谊东路 334 号 710054

印 刷 西安地质矿产研究所印刷厂

规格开本 787mm×1092mm 1/16

印 张 27

印 数 200

字 数 600 千字

版 次 2015 年 9 月第 1 版 2015 年 9 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5556-0195-1

定 价 50.00 元

版权所有 侵权必究

《国家安全地球物理丛书》(十一) 编委会

主 编：刘代志

副 主 编：李夕海 刘志刚

编 委：(按姓氏笔划为序)

王仕成 龙 凡 刘代志 刘怀山

刘志刚 李夕海 张金城 曾小牛

《国家安全地球物理丛书》编审委员会

顾 问：刘光鼎 (院士) 何继善 (院士) 刘振兴 (院士)

许绍燮 (院士) 魏奉思 (院士) 万卫星 (院士)

徐文耀 (研究员)

主任委员：刘代志

副主任委员：龙 凡 靳 平 王仕成 刘怀山 张金城

秘 书 长：李夕海

委 员：(按姓氏笔划为序)

于德浩 王仕成 王庆宾 王晓航 龙 凡 边少锋 刘 刚

刘代志 刘光斌 刘怀山 刘志刚 刘 波 孙凤华 孙更文

孙新利 朱培民 杜爱民 李夕海 李天河 李艾华 李学正

李卧东 吴时国 何 彬 余志勇 张玉兔 张全虎 张金生

张金城 陈 洁 查石祥 查亚兵 周坚鑫 高增勇 徐白山

陶 勇 童思友 曾新吾 韩天成 靳 平

前 言

国家安全与军事地球物理专业委员会已成立十周年,国家安全(军事)地球物理学科建设也进入了一个重要的发展时期。

随着世界新军事变革和信息化战争形态的演化发展,陆海空天电多维战场空间作战与保障需求,使人们认识到,地球物理学在国家安全与军事领域的应用越来越广泛和深入。与国家安全(军事)应用相关的地球物理学研究领域很广,主要涉及空间物理学、大气物理学、军事海洋学、空间遥感物理与监测和固体地球物理学。在这些领域中存在众多需要解决的问题,形成了若干研究方向:(1)具有明显或潜在国家安全(军事)应用价值的地球物理理论、方法技术研究;(2)国家安全(军事)地球物理装备(仪器)设施研究;(3)国家安全(军事)地球物理学中的数据处理理论、方法和技术研究;(4)重大国家安全(军事)地球物理学问题研究。

去年十一月初,我们在青岛的中国海洋大学召开了主题为“地球物理环境与国家安全”的第十届国家安全地球物理学术讨论会,主要研讨了各种地球物理环境与国家安全问题。十年前,在古城西安,第二炮兵工程学院(现为第二炮兵工程大学)成立了中国地球物理学会国家安全地球物理专业委员会和陕西省地球物理学会军事地球物理专业委员会。十年来,我们每年以不同主题研讨国家安全(军事)地球物理研究问题、交讨研究成果,至今已公开出版了十辑《国家安全地球物理丛书》,在国内产生了很好的反响。本论文集是《国家安全地球物理丛书》第十一辑,既是对过去十年的回顾与总结,又进入了实现“中国梦”与“强军梦”的新时期。本集所收录的68篇论文,内容主要涉及空间物理环境与空间天气、重磁、高光谱与SAR、核爆地震(与核查)、次声、工程保障与污染控制、突发自然灾害等方面的理论、方法技术及应用研究。

国家安全与军事地球物理专业委员会一直得到中国(陕西省)地球物理学会的指导和老一辈地球物理学家的关心;第二炮兵工程大学王耀鹏校长和科研部首长给予了诸多指导和大力支持。我们将继续出版好《国家安全地球物理丛书》,推动国家安全(军事)地球物理学科建设与发展迈上新台阶。

值此本辑丛书出版之际,谨向各位领导、专家和同志们表示诚挚的谢意。

刘代志

2015年8月3日

目 录

临近空间基础环境特征研究	王胜国, 谢志辉, 许丽人, 戴福山, 陈润强	(1)
电离层预报模式及探测方法的比较	范启雄, 段成君, 汪中伟, 方震	(6)
小型化 Fabry-Perot 干涉仪地基测量高层大气风场	王后茂, 王咏梅	(10)
IGS 电离层 VTEC 地图内插模型研究	杨晓云, 何恒, 刘凯, 占建伟	(15)
电离层扰动下超视距雷达探测的问题综述	侯维君, 李义红, 杨晓君	(19)
平静期地磁变化场数据建模预测	陈鼎新, 孟亮, 王蕴宝, 刘代志	(25)
基于 HHT 变换的地磁变化场 Z 分量非平稳性度量研究	卢世坤, 李夕海, 牛超	(30)
航空重力测量综述	李霞, 于德浩, 龙凡, 韩天成, 杨清雷	(40)
6 种重力异常阶方差模型与 EGM2008 阶方差的比较	常岑, 王世忠, 王庆宾, 贾鲁, 吴亮, 张超	(44)
基于 Android 平台的重力垂直梯度解算软件的开发	贾鲁, 王世忠, 王庆宾, 常岑, 吴亮, 张超, 黄佳喜	(49)
全球空间扰动引力快速 FFT 计算效能分析	王庆宾, 马国元, 王永收, 范昊鹏, 常岑	(55)
空间扰动引力场特征分析	范昊鹏, 王庆宾, 吴晓平	(60)
侦测目标的高光谱与 SAR 图像协同利用与联合分析识别	刘代志, 黄世奇, 王艺婷, 王百合, 刘志刚, 王红霞	(66)
基于改进极化目标分解算法的 POLSAR 图像分类	芦颖, 倪维平, 严卫东, 边辉	(81)
基于高分影像道路信息提取与应急设计的研究	王波印, 徐白山, 易俊杰, 张猛	(88)
多维直方图特征分类学习的目标检测算法	杨威, 张金城, 史德琴	(92)
基于高分影像的滑坡体空间场位移矢量标定的研究	张猛, 徐白山, 王波印, 易俊杰	(99)
艰险地区通行条件遥感评价方法	于德浩, 王康, 安海军, 杨彤, 杨清雷	(104)
Harris 角点提取中的图像迹和行列式特征分析	苏培峰, 黄世奇, 王艺婷, 刘代志	(109)
基于 SURF 特征点相位相关法配准算法研究	李健, 高钦和, 郭君斌	(115)

地形等高比遥感信息快速提取方法* ……	王 康, 于德浩, 龙 凡, 杨清雷, 杨 彤	(123)
一种基于 PCA 的崩塌潜在区评价方法* ……	李 霞, 于德浩, 龙 凡, 杨清雷, 韩天成	(128)
高光谱遥感的发展及其对军事目标的威胁* ……	范启雄, 李永红, 杨 威, 方 震	(138)
基于粒子滤波特征集成的异源图像目标跟踪 ……	杨 威, 唐 莉, 史德琴	(146)
高光谱目标检测算法研究进展* ……	廖佳俊, 刘志刚, 蔡 尚, 刘 翔	(153)
基于端元丰度量化的高光谱图像目标检测算法 ……	何元磊, 李红军, 周陆军, 李旭渊, 顾立林, 尼 涛	(161)
高光谱图像波段选择方法综述 ……	王 喆, 王百合, 王艺婷	(166)
景象匹配制导中景象匹配适应性研究* ……	张阳阳, 苏 娟, 李 彬	(170)
一种自动搜索平场域的反射率反演方法* ……	刘志刚, 刘 翔, 蔡 尚, 廖佳俊	(176)
基于人眼视觉特性的 NSCT 图像融合方法 ……	杨 威, 韩若飞, 李天河, 范启雄	(183)
MULASSIS 在中子防护中的模拟应用 ……	韩梦涛, 方美华, 王 静, 朱庆伟	(189)
核裁军核査属性测量技术综述 ……	张全虎, 黎素芬, 弟宇鸣, 姬国勋, 许 鹏, 邱晓林	(193)
次声探测阵列时差测算技术分析 ……	许 伟, 林源根, 宋天莉, 李虹轶, 王晓航	(199)
运载火箭发射过程的次声波近场观测 ……	郭 泉, 杨选辉	(204)
基于 STA/LTA 及多项式拟合的次声台站数据野值处理方法 ……	张万刚, 李夕海, 孟 亮	(209)
地下核爆炸震磁效应在核査中的应用探讨 ……	范启雄, 李天河, 周家丹, 方 震	(214)
基于实时性的 n- γ 甄别算法改进研究 ……	卢新城, 王 宋, 许 鹏, 何 彬, 鲁昌兵	(217)
放射性工作场所表面污染及消除技术研究 ……	周春林, 秦 晋, 李如松, 吕 宁, 黎素芬, 霍勇刚	(226)
土颗粒浓度对 Cd (II) 吸附影响的试验研究 ……	杨清雷, 于德浩, 杨 庆, 杨 彤, 王 康	(231)
Cd (II) 在黏土及改良黏土中的无水头扩散试验研究 ……	杨清雷, 于德浩, 张金利, 韩天成, 李 霞	(237)
柴油机尾气消烟净化处理技术及试验研究 ……	韩若飞, 刘 菲, 范启雄	(242)
地下工程人员生存环境污染与控制 ……	唐 莉, 杨建明, 尹 波	(251)
地下异常体边界识别的重力异常处理方法研究 ……	吴 亮, 王世忠, 王庆宾, 常 岑, 贾 鲁	(257)
我国海洋生态环境安全保护存在问题与对策研究 ……	张金城, 汪峻锋	(263)

天然气水合物立体观测系统分析	张 茗, 刘怀山 (269)
天然气水合物赋存区立体观测正演模拟研究	刘建国, 刘怀山 (275)
地震海洋学水体特性处理方法研究*	刘东启, 刘怀山 (280)
海洋气枪立体震源虚反射特征与压制方法	丁西凯, 尹燕欣 (286)
基于 Radon 变换的垂直缆波场分离研究	杨晓辉, 刘怀山 (292)
基于改进短时傅里叶变换的频谱分析方法研究	岳家彤, 刘怀山, 蔡正辉 (299)
基于局域波分解法的 Wigner-Ville 时频分布方法研究*	焦静娟, 刘怀山 (304)
基于稳相位理论的地震干涉法研究*	雷朝阳, 刘怀山 (310)
地震信号的最小相位重构研究*	蔡正辉, 刘怀山, 黄云笛, 张博伦 (317)
基于回归估计支持向量机的 AVO 反演	赵 玺, 张 进, 应茜羽 (322)
基于可变交错网格的声波方程有限差分数值模拟*
.....	付 萌, 童思友, 李林伟, 王鹏飞 (330)
浅海近偏移距地震数据重构方法探究*	陈 亮, 童思友, 李唐律 (337)
基于二维地震资料模拟分析西湖凹陷沉降特征及其与构造演化的关系	郭雨帆 (343)
地震堰塞湖对地下工程设施安全影响研究	李庆辉, 王彦锋 (349)
运输车辆震动波的噪声分析	易俊杰, 徐白山, 张 猛, 王波印 (354)
基于物联网的地质灾害监测预警系统探讨
.....	陈敬东, 徐白山, 李世龙, 石光益, 穆林森 (359)
对我国突发自然灾害应急管理环境的思考	刘 菲, 韩若飞, 杨 威 (364)
矿井围岩安全监控方法的研究	李世龙, 徐白山, 陈敬东, 石光益, 穆林森 (369)
多重叠加灾害孕源断链减灾模式研究	李永红, 范启雄, 周家丹 (373)
基于粗糙集理论的地下工程雷电危害风险评估研究	张卫兵 (377)
中国区域小比例尺地球物理图件涉及的版图安全问题
.....	李敬敏, 何 辉, 魏英娟, 骆 遥 (384)
数据链异构网络选择算法研究现状分析	李琳琳, 焦 阳, 韩艳军 (389)
关于对应原理和互补原理的一点认识	徐 野, 许 鹏, 鲁昌兵 (394)
定位精度对火箭探空仪探测精度的影响	刘舒蔚, 陈光明, 陈书驰, 孙 宇 (400)
附录: 第十届全国安全地球物理专题研讨会会议纪要	(406)

临近空间基础环境特征研究

王胜国, 谢志辉, 许丽人, 戴福山, 陈润强

(北京应用气象研究所, 北京 100029, 中国)

摘要 综合利用卫星资料、常规探空资料和再分析资料, 获得了 0~80km 高度的北半球月平均气候模式, 初步分析临近空间大气环境的基本气候特征。

关键词 临近空间 标准大气 参考大气

Research on Characteristics of the Near Space Atmosphere

Wang Shengguo, Xie Zhihui, Xu Liren, Dai Fushan, Chen Runqiang

(Beijing Institute of Applied Meteorology, Beijing 100029, China)

Abstract Using satellite, radiosonde and NECP reanalyzed data, the reference atmosphere (ground~80km) is has been developed. The parameters include temperature, pressure, density and horizontal winds. As an example of the application of this model, the atmospheric environments are analyzed.

key words near space standard atmosphere reference atmosphere

1 引言

2010年6月, 美国发布新的《国家空间政策》, 提出构建国际空间新秩序设想, 以巩固其霸权地位。为应对新的空间安全的挑战, 主要航天国家加快空间技术发展, 大力推进空间能力建设, 利用空间与控制空间出现新的发展动向。

近年来, 随着临近空间战略价值的凸显, 世界各军事大国开展了大量的临近空间飞艇、亚轨道飞行器等新式武器平台的研制和试验。2010年, 作为美国“全球快速常规打击”计划的一部分, 美国国防部高级研究计划局试射了一架太空飞机 HTV-2, 这是一种亚轨道飞行工具, 采用弹道导弹发射, 冲出大气层后, 滑翔返回地面。2011年8月又进行了一次试飞, HTV-2 就是飞行在临近空间环境中。2011年7月27日, 美国陆军和洛·马公司在俄亥俄州的阿克伦城完成了首艘高空长航时飞艇验证艇的首飞, 在飞抵 32000ft 高度后出现技术异常, 终止飞行, 此次事故可能与气象有关。本文在卫星资料、常规探空资料和再分析资料综合分析处理的基础上, 获得了 0~80km 高度的北半球月平均气候模式, 初步分析了临近空间环境的气候特征。

2 研究资料及处理方法

2.1 研究资料

TIMED 卫星、Nimbus-7、UKMO、探空站定时探空资料, 以及 NCAR/NCEP (美国大气研究中心/美国国家环境预测中心) 大气参数再分析资料。

2.2 卫星数据的网格插值方法

在纬度、经度和高度上划分为 $5^\circ \times 5^\circ \times 1\text{km}$ 的网格。每一高度层的各个水平格点上, 以该网格点为中心, 在 2.5° 的半径范围内, 利用 (1) 式进行插值, 得到各网格点上的要素 (压强、温度和密度) 值。

$$X = \frac{\sum_i X_i \omega_i}{\sum_i \omega_i} \quad (1)$$

其中, $\omega_i = 1 - \frac{\Delta r_i}{r}$ 为权重, Δr 为数据点到网格点的距离。由此得到均匀网格上的参量值。

2.3 月均值、标准偏差和极值的统计

对于同一个网格点、同一个月的数据, 进行统计, 计算得到其数据量、平均值 (公式 2a)、标准偏差 (公式 2b) 信息。

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_j \quad (2a)$$

$$\sigma = \frac{1}{N-1} \sqrt{\sum_j (X_j - \bar{X})^2} \quad (2b)$$

3 临近空间环境特征

3.1 大气温度分布

图 1~3 分别给出了 25°N 、 35°N 、 45°N 与 115°E 三个交点上 1, 4, 7, 10 月的 0~80km 的气温垂直廓线。

0~80km 大气按气温的垂直分布特征分为对流层、平流层和中间层。对流层是地球大气的最低层, 气温随高度递减, 对流层顶高度在 17~18km, 此处气温最低, 40°N 以北地区冬季一般存在两个对流层顶, 第一个高度在 10~12km, 第二个高度在 17~18km 附近, 两个对流层顶间气温垂直变化较小; 自对流层顶到 48km 左右为平流层, 该层内气温随高度递增, 平流层顶气温达最高; 自平流层顶到 85km 左右为中间层, 该层内气温随高度的增加而降低。

3.1.1 平流层内气温分布特征

平流层内气温随高度递增, 平均气温垂直递减率为 $-2 \sim -3^\circ\text{C}/\text{km}$, 平流层顶年平均气温随纬度增加而递减, 如 15°N 48km 高度为 -9.3°C , 而 50°N 48km 高度为 -12.4°C 。平流层顶处月平均最高气温, 30°N 以南地区出现在 4 月, 35°N 以北地区出现在 6 月, 其值随纬度增加, 如 15°N 处为 -6.8°C , 而 50°N 处高达 -0.3°C , 这一分布特征与年平均气温分布特征相反。这种差异是与平流层气温随纬度和季节的变化有关, 冬季, 高气温中心在低纬地区上空, 比高纬地区偏高 20°C 以上。春季, 气温升高, 南北温差缩小。夏季, 高纬地区上空增温较快, 高气温中心出现在极地上空, 南北温差在 10°C 左右。秋季, 高气温中心又逐

渐向低纬地区过渡。

3.1.2 中间层内气温分布特征

中间层内气温随高度递减，平均气温垂直递减率为 $3^{\circ}\text{C}/\text{km}$ 左右。中间层顶气温随纬度和季节而变化：冬季，低气温中心在低纬地区上空，如1月在80km高度， 15°N 处为 -72.5°C ，而 50°N 处为 -59.5°C ；春夏季中间层顶气温继续降低，低气温中心出现在极地上空，如7月80km高度， 15°N 处为 -74.3°C ，而 50°N 处为 -99.7°C ，可见低纬地区中间层顶气温的年变化幅度很小，而高纬地区的气温年较差可达 40°C 。中间层内气温这种随季节变化的温度梯度与平流层正好相反。

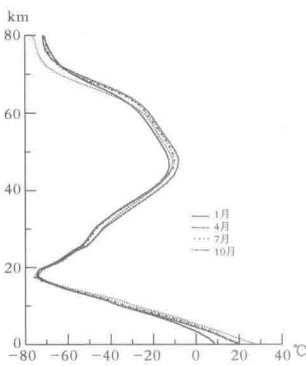


图1 25°N与115°E相交格点上月平均气温垂直廓线

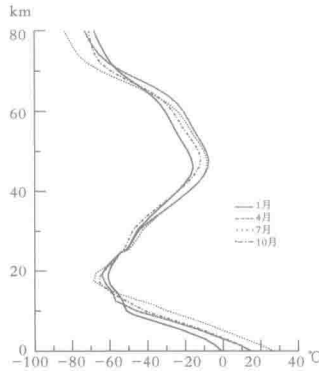


图2 35°N与115°E相交格点上月平均气温垂直廓线

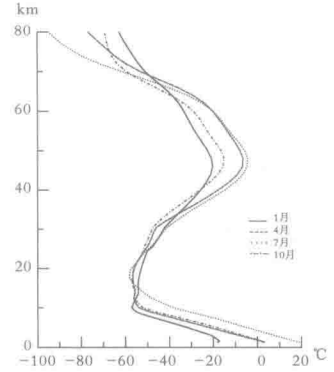


图3 45°N与115°E相交格点上月平均气温垂直廓线

3.2 大气气压分布特征

气压随高度呈指数递减，0~80km内，年平均气压从1010.0hPa降至1.0hPa左右。年平均气压随纬度的分布，中、低纬度地区偏高，高纬度地区偏低。如沿 115°E 不同高度上年平均气压最大值的出现纬度，3km以下为 25°N ，3.5~11km内为 15°N ，12~22km内为 25°N ，24~40km内为 30°N ~ 35°N ，42km以上为 15°N ~ 20°N 。中、高纬度地区的年平均气压差随高度迅速减小，如 25°N 与 45°N 的年平均气压差，2km处为9.3hPa，20km处为2.9hPa，30km处为0.1hPa。气压年较差随纬度增加，8~10km处其值最大，如 20°N 以南地区在3.0hPa以下， 40°N 以北地区在30.0hPa以上。10km以上气压的年变化随高度逐渐变小，至30km处年较差为2.0hPa左右。月平均气压最大值出现的月份随高度而变，一般情况下3km以下出现在秋、冬季，3~6km内出现在秋季，6km以上出现在夏季。

3.3 大气密度分布特征

空气密度随高度呈指数递减，0~80km年平均空气密度从 $1.18\text{kg}/\text{m}^3$ 降至 $0.018\text{kg}/\text{m}^3$ 。年平均空气密度随纬度的分布，9km以下其值随纬度增加而增加，如沿 115°E 、 45°N 处与 20°N 处相比，1.5km高度上差 $0.055\text{kg}/\text{m}^3$ 、5km高度上差 $0.028\text{kg}/\text{m}^3$ 、8km高度上差 $0.008\text{kg}/\text{m}^3$ ，这一差值随高度而减小。9~11km其高值由中纬向低纬地区过渡，11~25km， 25°N 以南地区年平均空气密度偏高，25~45km，其高值出现在中、高纬地区，

45km 以上高值出现在 25°N 以南地区, 随高度升高各纬度间年平均空气密度的差值逐渐减小。同纬度上年平均空气密度随经度变化, 一般情况下各纬度各高度上呈现出 110°E 以东地区偏高, 而西部地区偏低的特征, 这一差值随高度升高迅速减小。月平均空气密度最大值出现的月份随高度而变, 8km 以下出现在 1 月和 12 月、9~13km 出现在 3~4 月和 9~10 月、14~28km 出现在 8 月、29~50km 出现在 7 月、50km 以上出现在 6 月; 月平均空气密度最小值的出现月份, 8km 以下在夏季、9km 以上主要在冬季。月平均空气密度的年变化, 其年较差近地面层较大, 随高度升高迅速减小, 另外年较差随纬度而增加, 如 110°E 5km 高度上, 20°N 处为 0.0012kg/m³, 45°N 处为 0.0047kg/m³。

3.4 平流层至中间层大气纬向风分布特征

图 4~6 分别给出了 25°N、35°N、45°N 与 115°E 三个交点上 1, 4, 7, 10 月的 0~80km 的纬向风垂直廓线。

我国 0~80km 空中风场的气候分布, 随季节、地理位置和高度有明显的变化规律。在对流层内, 冬季形成了南、北两支强盛的西风急流, 夏季南支西风急流北上, 北支急流消失, 低纬地区上空盛行偏东风; 平流层至中间层内, 秋、冬季节在 60km 高度附近, 存在较强的西风层, 而夏季却是和对流层内东风连成一体的整层东风。

冬季, 我国广大地区, 自对流层顶向上西风风速随高度减小, 30~40km 的月平均风速只有 2m/s, 有些地区出现弱的偏东风, 50km 以上, 西风风速随高度迅速增大, 形成较强的中间层西风急流, 其急流轴位于 65km 附近, 1 月份 35°N 以南地区平均风速在 30~50m/s 之间。随纬度增高, 风速逐渐减小, 且最大风速层高度下降。春季, 西风急流中心继续南移, 风速减小, 最大风速层高度降低, 5 月开始由低纬向高纬, 由高层向低层, 逐渐转为偏东风。夏季, 西风已不存在, 自对流层内的东风层开始向上至 80km, 我国上空均为偏东风控制。风速随高度增加, 形成了强盛的东风急流, 月平均东风风速大于 30m/s 的起止高度, 低纬地区较低, 而高纬地区较高。最大月平均东风风速也随纬度增大。可见东风最大风速出现高度是南低北高, 其最大风速值是南小北大, 同纬度上最大风速轴线近水平分布, 且东西向风速差异不大。秋季, 25°N 以南 30km 附近, 仍以偏东风为主, 风速不大。9~10 月在 50°N 以北 52km 附近, 逐渐形成了较强的西风急流, 在其南伸过程中, 最大风速层高度不断抬升, 至 25°N 处已到 62km。11 月该急流发展最为强盛, 25~50°N 范围内, 月平均西风风速大于 30m/s 的厚度均在 30km 以上, 急流轴上最大月平均西风风速多在 60m/s 以上。沿 120°E 自北向南, 急流轴上的最大风速略有增加。另外可以看出, 随纬度增加, 急流轴上的风速西高东低的特征非常突出。该支急流在向冬季过渡中, 中心逐渐南移, 强度有所减弱。

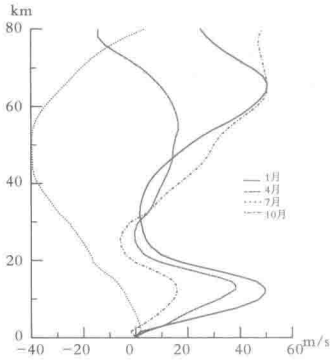


图4 25°N与115°E相交格点
上月平均纬向风垂直廓线

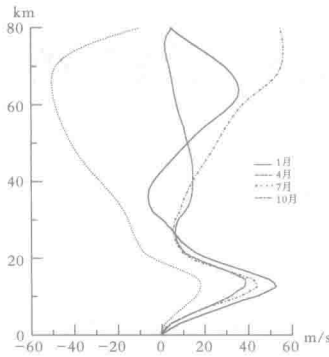


图5 35°N与115°E相交格点
上月平均纬向风垂直廓线

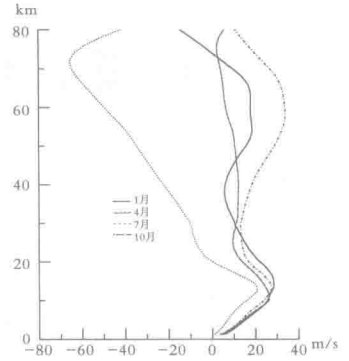


图6 45°N与115°E相交格点
上月平均纬向风垂直廓线

4 结论

临近空间基础环境非常复杂,具有明显的区域变化、季节变化,以及随高度和太阳活动的变化等特性。本文综合利用卫星资料、常规探空资料和再分析资料,建立了0~80km高度的北半球月平均气候模式,初步分析了临近空间大气环境的基本气候特征。

参考文献

- [1] 马瑞平, 廖怀哲. 中国地区 20~80km 高空风的一些特征 [J]. 空间科学学报, 1999, 19 (4): 334-341.
- [2] Fleming E L, Chandra S, Bamelt J J, et al. Zonal mean temperature, pressure, zonal wind and geopotential height as function of latitude [J]. Adv. Space Res., 1990, 10 (12): 11-59.
- [3] Fleming E L, Chandra S, Burrage M D, et al. Climatological mean wind observation from the UARS high-resolution Doppler imager and wind imaging interferometer; comparison with current reference models. J. Geophys. Res., 1996, 101 (D6): 10455-10473.

电离层预报模式及探测方法的比较

范启雄, 段成君, 汪中伟, 方 震

(第二炮兵指挥学院, 武汉 430012)

摘 要 空间电离层状态和变化对短波通信、卫星通信、地面导航、卫星导航、卫星侦察、预警探测、雷达、电子系统都会产生影响, 尤其是电离层处于非正常变化时影响更大, 所以对其进行正确预报和精准探测是非常重要的。介绍了电离层的三种预报模式和两种探测方法, 并对各自的优缺点进行了对比分析, 并以此为依据提出了各自的发展前景。

关键词 电离层 预报模式 探测方法 比较

Comparison on Forecast Modes and Detection Techniques of the Ionosphere

Fan Qixiong, Duan Chengjun, Wang Zhongwei, Fang Zhen

(The Second Artillery Command College, Wuhan, 430012, China)

Abstract The state and change of the space Ionosphere can bring much influence to shortwave communications, satellite communications, ground navigation, satellite navigation, satellite scout, presentiment exploration, radar, electron, even when the Ionosphere is deviant. So it is very important to us to predict accurately and explore well and truly. The paper introduces three prediction modes and two exploration ways, and analyses parallelly the merits and the disadvantages severally. In the end, the paper also gives the blueprint respectively.

Key words Ionosphere prediction modes exploration ways Comparison

1 引言

电离层是指离地面高度 60~1000km 的大气电离区域。电离层中的大气处于部分电离状态, 有大量的自由电子, 能引起电波的折射、反射、衰减等效应, 造成电波的振幅、相位、极化状态及传播模式的变化。

电离层是通过地磁研究及无线电通信实验发现的。1839 年, 德国人 C. F. 高斯在分析地磁场变化时, 指出高层大气中可能存在导电的电离区域。1902 年, 美国人 A. E. 肯内利和英国人亥维赛基于无线电信号跨大西洋传播的实验事实, 分别提出了高空存在反射无线电波的电离层的假说。1903 年 J. E. 泰勒和 1906 年英国人 J. R. 弗莱明, 先后提出太阳紫外线辐射使大气分子电离形成电离层的设想。1924 年, 英国人阿普尔顿和新西兰人巴尼特利用地波和天波干涉法进行观测, 首先证实了电离层的存在。1926 年, 美国人布雷特和图夫用脉冲回波法探测了电离层, 为设计与制造电离层测高仪奠定了基础。1926 年 11 月 8 日, 英国人沃森—瓦特正式给出电离层的命名。1931 年, 英国人查普曼提出电离层的形成理论。

2 电离层的形成及结构特征

电离层是太阳紫外线辐射、X射线辐射对大气分子或原子的电离作用形成的。宇宙射线和通过磁层空间进入的高能粒子也对大气电离起一定的作用。不同波长的太阳辐射与密度分布不均匀的大气相互作用，造成电子密度沿高度不同分布，形成了电离层的分层结构，由低向高分为D、E、F₁、F₂及上电离层。各层的高度和状态随昼夜、季节、太阳黑子的周期以及太阳和地磁活动而变化，同时也与所处的地理或地磁位置有关。赤道地区、中低纬度地区、极区的电离层各有不同的特点。赤道电离层经常出现不稳定现象，极区电离层经常出现极光及强扰动。中低纬度地区电离层相对来说变化平缓。电离层的基本结构有以下特点：①D层仅在白天出现，高度为60~90km，由103~112nm的太阳紫外线辐射、X射线及宇宙射线的作用形成。其电子密度仅有 $10^3/\text{cm}^3$ 的量级，但电子碰撞频率较高。②正常E层只在白天出现，一般在90~130km的高度上，是80~103km的太阳紫外线辐射作用的结果，电子密度约为 $10^5/\text{cm}^3$ 。正常E层较稳定，一般只随太阳的天顶角而变化。③F₁层仅在夏季白天存在，高度在180km附近。④F₂层是最重要的一层，由14~80nm的太阳紫外线辐射造成，白天和夜间都存在，该层位于210km高度以上，电子密度为 $10^6/\text{cm}^3$ 量级，其最大电子密度所在的高度约300km，称为F₂层峰。F₂层的高度、厚度及电子密度随太阳和地磁活动而变化。⑤F₂层峰以上是上电离层，它的电子密度随高度升高指数下降，一直延续到1千多千米并与磁层相连接。电离层和磁层间的粒子交换通过该区域进行，这是电离层保持一定电子密度的原因。

3 电离层预报模式的比较

电离层预报指对未来某一时段内电离层空间天气要素和空间天气现象作出的预测和报告。主要通过历史资料的统计分析及实时的太阳、地磁、电离层等监测数据，分区预报电离层空间天气状态和事件，以及对不同技术系统的影响。

电离层是一个复杂的电动力学介质，它在所有经度和纬度上都展现出天气特征。这些特征可由内部过程驱动出来，也可由行星际和磁层现象所引起。而电离层天气可对地基和天基系统产生很大的破坏作用。正因电离层及其天气扰动变化的极端重要性，建立电离层的预报模式就显得尤为紧迫，目前已有基于不同方法建立起来的模式，包括：（1）经验模式；（2）分析和参数化模式；（3）耦合了相邻空间区域的全球数值模式；（4）高分辨率的区域数值模式；（5）层析模式；（6）基于物理机制的数据同化模式。当前的电离层天气模式主要集中在全球数值模式、层析模式和基于物理的数据同化模式。

3.1 耦合的全球模式

物理模型对于电离层动力学行为的描述是非常有用的，尤其是在地磁暴和亚暴期间。在模式中，为了计算等离子体的密度、温度和流速，电子和离子的（质量、动量、能量等）守恒方程作为适当的空间坐标和时间的函数已被数值地求解出来。物理电离层模型需要磁层和大气层的数据输入，而且输出精度依赖于输入数据的质量。另一种变通方法则是将全球电离

层模式与描述其他区域（包括磁层、等离子层、极风、热层和中间层等）的全球模式进行耦合处理。主要优点在于它能够以一种自给的方式将系统内部固有的反馈机制、时间延迟和耦合过程都包括进去。此外，它能将某一区域观测到的效应与另一区域内的在稍早时刻出现的过程联系起来。然而其不足之处则是在从模式到模式的误差传播会导致出现大量不可靠的结果。同时，大量的物理过程、空间尺度和时间常数对于不同区域是不同的，因此这也是耦合模式在建构中最具挑战性的问题。

3.2 层析模式

层析模式利用电离层电波层析技术，从近地轨道卫星发射的电波能被一连串的（典型地是沿着子午面分布的）台站所接收，接收到的信号通常用来测量卫星经过台站时大量的交叉射线路径上的电子总含量（TEC）。而这些信号数据则是 TEC 的一个相对测量，因为与该测量值相联系的每个接收仪都因不同卫星通道的改变而存在一定的偏差。将这些 TEC 数据利用数学算法进行反推，便可获得沿该接收链上电离层信息。除了获得大尺度电离层特征外，无线电层析技术还可以提供不均匀结构的动力学行为信息。

3.3 数据同化模式

最近的模式模拟趋势是朝着构造同化电离层模式的方向发展。因为利用同化技术，可以实时地利用在不同地区从不同仪器上观测得到的大量电离层数据库。这个数据库可以包括视线（柱积分）光散射、数字雷达的底层电子密度廓线、从多颗卫星上得到的电子密度的实地测量，由无线电信标或 GPS 卫星测量得到的数百个倾斜路径上的 TEC 值，以及上千次的掩星测量。各类数据集需要有质量的控制，适当的权重平衡。然后利用同化技术重构产生各样测量结果的电离层。但是，重构需要给初值和约束条件。尤其是当要用的资料中存在某些不可靠成分，或者如果资料中含有多种等离子体结构（等离子体块、斑、槽和 Appleton 峰）时，这一点就格外重要。同化技术已成功地运用到有关中纬电离层的早期研究中，那里的空间梯度小，时间变化相对缓慢；可是该技术却很少成功地运用到低纬地区，尤其是在赤道异常出现时。不过，同化电离层模式还是为获得实时的三维电离层图形提供了美好的前景，在不久的将来，该技术必将在电离层模拟中占有重要地位。

4 电离层探测方法的比较

电离层探测指利用天基和地基探测设备对电离层各种特性参量的测量，包括对电离层成分、电子总含量、电子密度、电子温度、离子密度、离子温度、碰撞频率、电场、磁场、风场等的探测。

电离层探测对于全面了解电离层的性质、形态，结构以及变化和扰动过程是非常重要的。同时，电离层的常规探测对于实时监测空间天气的变化，研究空间天气过程的发生、发展从而更好地对其进行预报都有重要的意义。根据探测仪器所搭载的平台可以将电离层探测分为地基和天基两方面。

4.1 地基探测

地基探测，目前可以通过非相干散射雷达，电离层垂测仪，GPS接收站来实现。非相干散射雷达是探测电离层参数（电子、离子浓度剖面、速度、温度等）最有力的大型地面探测设备，目前全世界仅有6台类似设备在观测运行中。由于设备成本高，技术复杂，目前我国还没有非相干散射雷达。电离层垂直测高仪是电离层探测中最早使用的探测手段，也是我国普遍使用的电离层探测仪器，我国境内已经布有很多测高仪观测站。其中有的已经拥有了世界上最先进的数字测高仪DPS4，例如：中国科学院空间中心海南电离层观测站。利用接受GPS卫星所发射的信号，对信号进行时延分析，可以获得电离层很多信息，如电子总含量（TEC）。目前的地基探测方法已经日趋成熟，无论是探测仪器，还是数据处理方法都比以前有了很大进步。此外，不同纬度、经度的电离层台站所提供的数据，对全面了解我国上空电离层形态、结构、各种变化、扰动情况有很大的帮助，并且配合世界各国的电离层垂测数据，可以构建电离层全球模型。

4.2 天基探测

天基探测可以通过探针探测 F_2 层以上的那部分离子浓度分布，结合地基的垂测仪所得到的数据，可以更完整地描绘出电离层的离子浓度分布。另外，通过航天器携带的仪器，还可以直接测得电离层的电场。各种粒子谱仪，可以得到电离层离子的速度分布、质谱、能谱等重要的信息。兰米尔探针（Langmuir Probe）是最早搭载于空间探测平台的仪器之一，目前仍然被放置在各种航天器上用以探测Te、Ni、Ne和Vs等重要的电离层信息。现在的兰米尔探针做了很多改进，这些改进大大增强了探针测量的精确度。例如：The Segmented Langmuir Probe（SLP）就是把一个球形的兰米尔探针电极分割成许多相互独立的分区。这就使我们可以一个统一的电位势下，独立地收集来自整个球面不同方向的电流，并且测量这些来自相互独立扇区的电流，从而提供其方向性给传感器，就使得SLP相对于传统的单电极兰米尔探针有了更多的功能。SLP可以测量经过卫星的离子流的方向，也可以区分光电子和周围电子，这对于中密度和稀薄的等离子体是一项很有用的性能。对于天基探测，另一个比较重要的方面就是电场的探测。电场的测量有两种方法：第一种是利用伸出去的两个根天线手臂两端的电位差，求出当地的静电场；第二种方式是利用观测到的等离子体的平均速度，以及现成的地球磁偶极模型中的磁场大小和方向，根据磁流体（MHD）理论，换算电场（ $E=V\times B$ ）。DE-1、DE-2人造卫星就是用第一种方法观测极区上空的电场，而中华一号上携带的电离层等离子体及电动效应仪就是利用第二种方式。

参考文献

- [1] 焦维新. 空间探测 [M]. 北京大学出版社, 2008: 87-92.
- [2] 朱红兵. 电离层地球物理武器 [J]. 国防科技, 2007 (10): 21-24.
- [3] 范启雄, 张金城. 军事空间环境探测技术及其设备研究 [C]. 西安地图出版社, 2009: 162-166.
- [4] 上出洋介, 鲍明翰, 徐文耀译. 地磁—电离层耦合 [M]. 北京: 科学出版社, 2005: 22-24.
- [5] 姜景山. 空间科学与应用 [M]. 科学出版社, 2001.