

601-607

p 352.7

用理论模式研究电离层  $F_1$ -ledge 的变化\*张顺荣<sup>1)</sup> 黄信榆<sup>1)</sup> S. M. Radicella<sup>2)</sup> Radi., SM

1) 中国科学院武汉物理研究所, 武昌 430071

2) Aeronomy and Radiopropagation Lab, International Centre  
for Theoretical Physics, Trieste 34100, Italy

## 摘 要

利用一个时变电离层理论模式, 研究武昌地区 ( $30.5^\circ\text{N}$ ,  $114.4^\circ\text{E}$ ) 电离层  $F_1$ -ledge 现象. 表明利用当前关于中性气体和太阳辐射的经验模式, 观测到的  $F_1$ -ledge 出现与演化的基本规律将可基于现有电离层理论加以再现. 指出较明显的  $F_1$ -ledge 结构同较低的中性原子-分子含量比有直接关系, 并同原子-分子成份的过渡高度、背景温度及其垂直分布形态有一定联系. 同  $F_1$ -ledge 形态相关联的  $F_1$ - $F_2$  谷, 其出现主要是由于亚稳态氧离子参与光化过程, 以及电离气体参与具有一定垂直变化的输运过程.

关键词 电离层理论模式, 电离层  $F_1$ -ledge, 电离层  $F_1$ - $F_2$  谷.

## 1 引 言

电离层垂直探测的频高曲线上, 经常可见白天  $F_1$  区与  $F_2$  区间尖形描述的多重变化. 观测经验表明, 这种尖形早晚较钝、中午较锐; 夏季较锐, 太阳活动低年较锐. 此外, 还常发现当此描述充分尖锐时,  $F_1$  与  $F_2$  区描述会发生完全断裂的现象, 如同 E 层与 F 层之间描述一样.

相应地, 在电子浓度随高度变化的剖面上, 在 150—200 km 范围内, 电子浓度有时保持较稳定的斜率, 近似线性增长, 有时在这种线性背景上附加某种形式的额外变化, 这种“附加物”称为  $F_1$ -ledge. 在 ledge 充分发达,  $F_1$ - $F_2$  间出现谷区时, 就会产生一个独立的  $F_1$  层.

频高图上的尖形变化已是熟知的事实, 早期的研究者也进行过某些定性分析<sup>[1,2]</sup>, 但电子浓度的实际变化, 人们了解得还不甚详细, 这反映在对其变化形状的经验描述上以及形成机制的物理分析上, 特别是使用现代观测结果进行理论研究, 都很不充分. 在目前致力于获得精细电离层天气结构及其时空变化的情况下, 对于  $F_1$ -ledge 这样一个相当基本的电离层现象, 不论是基本形态及其描述还是形成机制, 都很有必要作深入探讨, 这已经成为国际上相当活跃的一个研究方向. 1994 年在意大利 Trieste 举行的关于  $F_1$ -ledge 特性的国际参考电离层专家特别委员会 (IRI Task Force) 专项研究活动, 从实验数据分析、经验描述和理论模拟的角度进行了讨论; 1995 年再次开展的更高层次的后续活动,

\* 国家自然科学基金资助的课题和中国科学院留学经费择优支持项目.  
本文 1995 年 10 月 16 日收到, 1996 年 5 月 3 日收到修改稿.

展示和总结了最新研究成果,提出了相当具体的行动议程,特别是还明确地将理论模拟工作纳入其中。本文所介绍的即是有关理论方面的结果。

## 2 理论模式

$F_1$ -ledge 所在的高度,是一个颇为复杂的过渡性区域。从含量构成看,这里是由分子离子成份占主导到氧原子离子占主导的过渡区,分子离子与原子离子的浓度相差不多;从涉及的物理过程看,由此往上,动力过程占主导,往下则光化过程占主导,两过程在此处几乎同等重要。对这些特点,在进行有关理论研究时必须予以特别关注。本文所采用的理论模式<sup>[3-5]</sup>,包含 21 个有关联的稳态与亚稳态离子反应,涉及扩散、中性风等主要中低纬地区过程(计算表明,电磁漂移对 ledge 形状的影响不大)。模式在模拟电离层形态和探讨物理机制上,在使用的灵活性和有效性等方面,具有较突出的特点。基于这一模式,我们曾探讨过电离层峰下结构<sup>[4-6]</sup>和峰上结构<sup>[7]</sup>的某些特征。本文在使用该模式时,统一采用 IRI 的电子和离子温度;光电子次级电离的影响用文献[8]的方法确定。

## 3 $F_1$ -ledge 的变化性

### 3.1 $F_1$ -ledge 形态

$F_1$ -ledge 的形态,存在明显的随地方时、季节、太阳活动性和地磁活动性的变化。图 1 示出武昌地区的两个代表性观测实例,从中可以观察在不同地方时, $F_1$ -ledge 的虚高形态和真高曲线的对应关系。

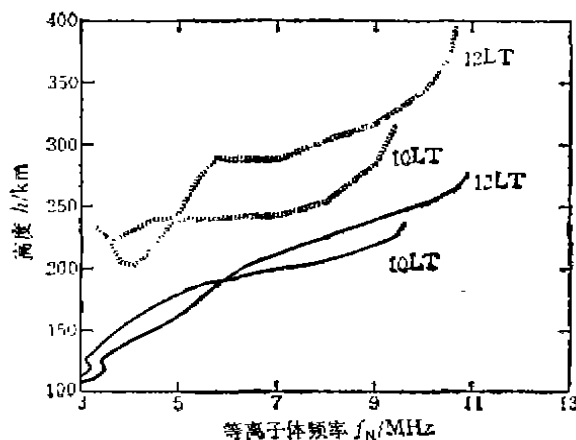


图 1 观测的频高图虚高曲线和反演的真高曲线  
武昌(30.5°N,114.4°E),1992年12月13日(冬季)10LT  
和12LT,当天黑子数113,月均值83。虚线为观测得到的  
虚高,实线为反演得到的真高。

理论模式在剖面形态方面的结果,文献[4-6]已有所介绍,但各自关心的侧重点不同,这里不作归纳。下面给出采用完全统一的方法所得到的系统性结果(图2)。在日变曲线的演变过程中(图2a),中午 ledge 比早晚明显得多;在季变曲线中(图2b,c),冬季最不显著而夏季特别显著。对比处于不同太阳活动条件的图2b(高年)与图2c(低年),高年 ledge 明显不及低年的发达。此外,在不同地磁活动条件下,若  $A_p$  指数发生明显变化,例如1982年8月6日至8日从25剧增到106然后降为6,ledge 的形状也将随之发生一定的改变(图2d),其发达程度与  $A_p$  指数的对应关系,一般不是固定不变,例如计算表明,随着地理位置的不同也会有所不同。总之,理论模拟表明,ledge 在各种不同条件下显示非常不同的特征,这些特征同观测基本上是一致的。

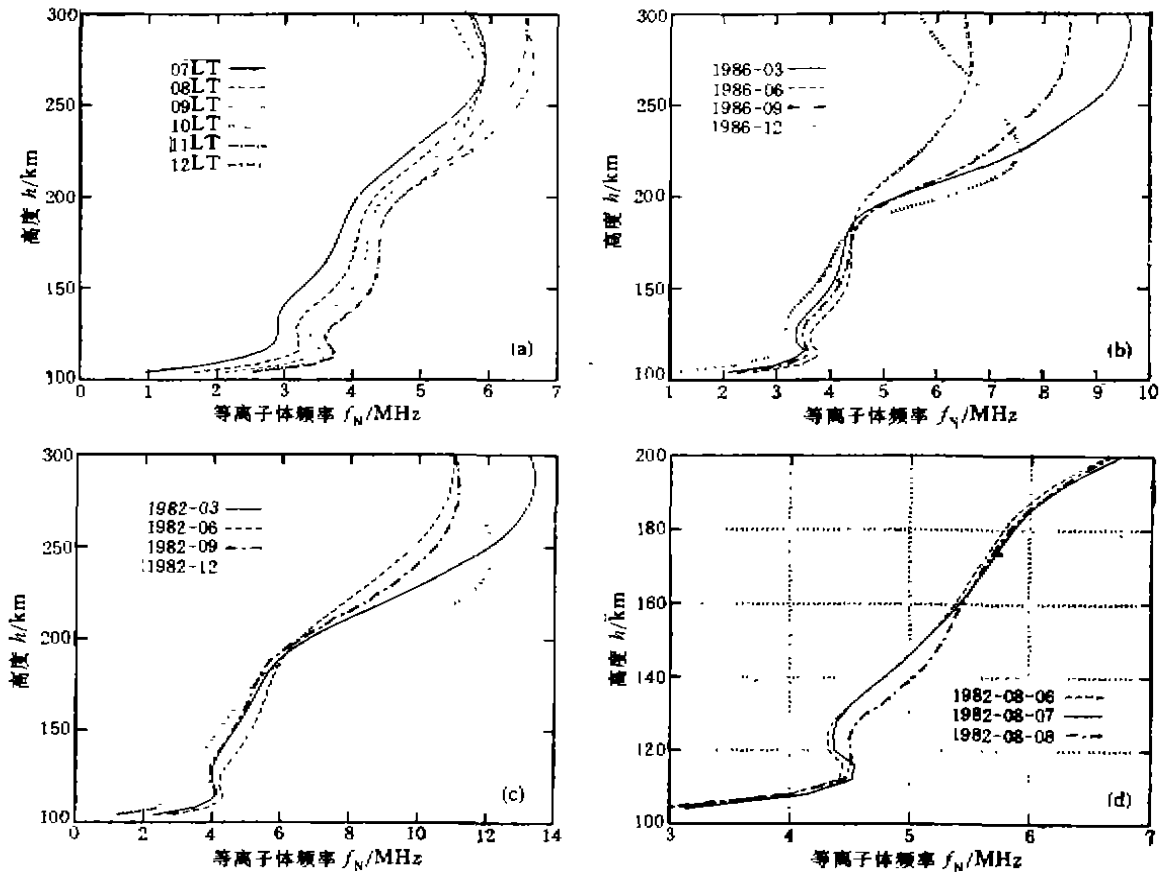


图 2 理论模拟得到的武昌地区 F<sub>1</sub>-ledge 剖面

- (a) F<sub>1</sub>-ledge 的日变化(武昌, 1986年 6 月);
- (b) 正午 F<sub>1</sub>-ledge 的季节变化(武昌, 1986 年 3, 6, 9, 12 月);
- (c) 同(b)但对应于另一太阳活动条件(武昌, 1982 年 3, 6, 9, 12 月);
- (d) 正午的 F<sub>1</sub>-ledge 在具有明显不同的地磁活动性的日子里的变化(武昌, 1982 年 8 月 6—8 日)。

实现对 ledge 的准确描述, 需要使用除浓度、高度以外的第 3 参量, 以确定其形状。对 E 层与 F<sub>2</sub> 层, 由于均是单独的层节, 在峰上总有  $\partial N/\partial h = 0$ ; 而对于 F<sub>1</sub>-ledge,  $\partial N/\partial h$  并不总为零, 引入此梯度值, 显得非常必要。当  $\partial N/\partial h$  较大时, 表示 ledge 不够发达; 反之, 则较发达; 当其值为零时, 说明 ledge 充分发达, 独立的 F<sub>1</sub> 层出现。计算表明, 在日变过程中, 此梯度的早晚值与中午值之比可高达 6—7, 在太阳活动性变化中, 高低年份之比亦可达 3—4, 而在季节变化中冬夏之比约为 2。

### 3.2 F<sub>1</sub>-ledge 的形成机制

F<sub>1</sub>-ledge 的形成, 同背景中性大气状况存在密切关系。具体而言, 主要是同大气中原子-分子成份的含量比有直接关系。当氧原子含量减小而氮氧分子含量增加时, 将有较少的原子离子电离源, 通过与中性分子复合而损耗的氧离子也同时增多, 这样在随高度增加的氧离子剖面上, 氧离子浓度整体上减少。与此同时, 分子离子由于来源增多, 其随高度增加而下降的剖面上, 浓度整体增加。这样净效果将是, 在 F<sub>1</sub> 附近区域总的离子含量

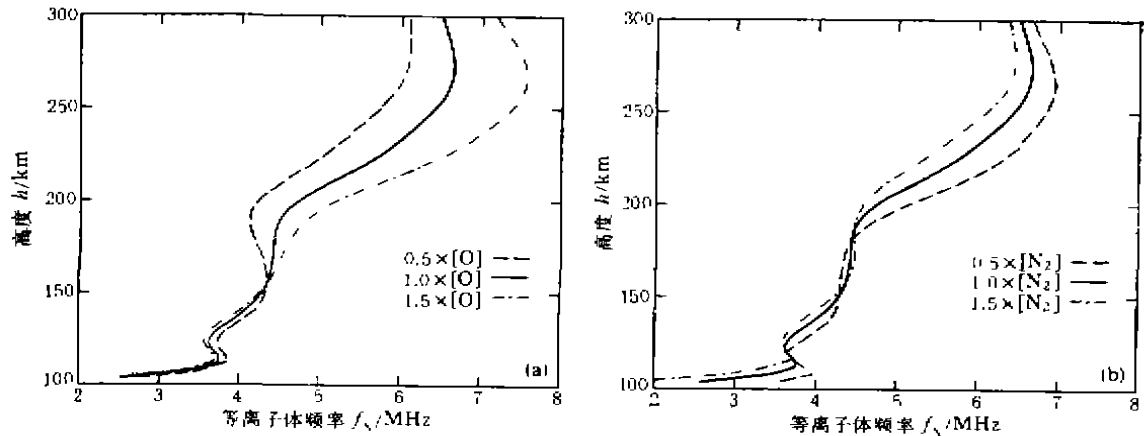


图3 大气含量变化对  $F_1$ -ledge 形成的作用

(a) 氧原子浓度增减 50% 引起的效应; (b) 氮气分子增减 50% 引起的效应。  
中性大气浓度由 MSIS 86 给定, 对中性含量 50% 的增减, 均作用在所有计算高度上。  
图示相应于武昌, 1986 年 6 月正午。

(或电子含量), 在上部趋少, 下部趋多, 于是便形成明显的  $F_1$ -ledge。模拟计算充分证实了上述分析(图 3)。

提到原子-分子含量比的影响, 我们顺便谈谈与之有关的所谓“冬季异常”。这种异常通常指冬季的电离层  $F_2$  层最大电子浓度要比夏天的低, 尽管夏天电离辐射更为强烈。一般认为这种异常与冬季较高的原子-分子含量比有关。联系到  $F_1$ -ledge, 则这种高含量比正好对应着冬季不够发达的  $F_1$ -ledge, 表明所谓“冬季异常”和冬季不发达 ledge 其实具有共同机制, 也充分说明我们上述讨论是和现有其他理论相容的。

进一步研究还表明, 在随高度变化的中性原子-分子含量比的曲线上, 过渡高度(该比值为 1 处)的位置, 也和 ledge 的显著程度有关系。当此过渡高度较高时, 一般对应于比较发达的 ledge。实际上, 过渡高度位置的变化, 亦反映着原子-分子含量比的变动状况。当其位置上升时, 根据中性气体分布规律, 对应的是整体上减小的原子-分子含量比。

$F_1$ -ledge 的出现不仅同中性大气温度有关, 而且同其随高度变化的斜率有关。计算表明, 当温度较高而其斜率较小时, ledge 较为发达。

总之, 理论分析和模拟计算表明,  $F_1$ -ledge 同中性大气的原子-分子含量比有直接关系, 也同原子-分子含量的过渡高度、中性温度及其梯度, 存在一定联系。

### 3.3 影响 $F_1$ -ledge 形状的其他因素—— $F_1$ - $F_2$ 谷区问题

$F_1$ -ledge 的形成其实同所谓  $F_1$ - $F_2$  谷区现象是紧密相关的。前人研究表明, 除非引入的中性风场具有垂直方向的剪切变化, 或者存在某种其他形式的随高度变化, 外加电场引起的漂移、纬向风的快速变化、中性大气温度与中性含量随季节与太阳活动的变化等, 均不足以解释适当深度的  $F_1$ - $F_2$  谷<sup>[9]</sup>, 近年的研究则指出, 不必引入较强剪切风, 也可解释  $F_1$ - $F_2$  谷的成因<sup>[10,11]</sup>。

需要强调的是, 比较光化与运输机制的相对重要性, 必须将讨论置于同一物理模式

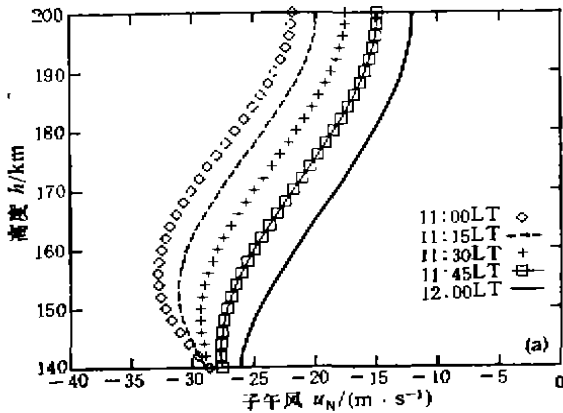


图 4a 由 HWM90 给出的正午前的子午风剖面  
武昌, 1986 年 6 月, 负号代表南向风。

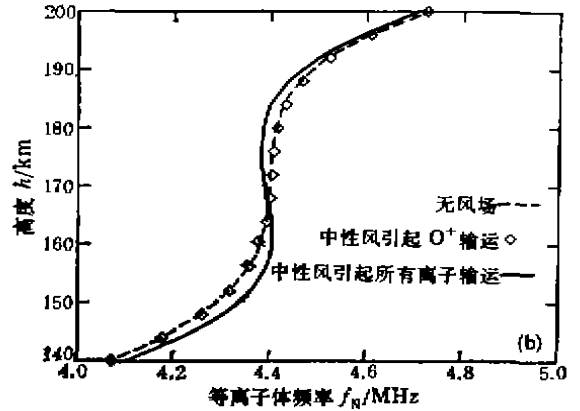


图 4b 正午时刻中性风对  $F_1$ - $F_2$  谷形成的相对重要性  
计算时采用的太阳辐射通量由 EUV91 模式决定, 武昌, 1986 年 6 月。

中。我们在模式计算中发现, 不论是否考虑氧离子运输、是否考虑分子离子运输, 也不论是使用 Torr 等<sup>[12]</sup>的 EUV 模式, 还是 EUV91<sup>[13]</sup>, 包含氧离子 2D 与 2P 态的反应, 均一致地趋于形成较明显的谷。同样, 不论是否考虑亚稳态氧离子反应, 也不论涉及的是氧离子运输还是分子离子运输, 当包含运输时, 均一致地有产生较明显的谷的趋向。模式计算中使用的 HWM90 模式<sup>[14]</sup>, 所给出的子午风在  $F_1$  区附近确有一定的随高度变化(图 4a), 不过对于这样的风, 我们发现其产生谷的效率明显不及亚稳态离子反应机制(比较图 4b 和文献[5]的 Figure 4)。总之, 常规性机制, 即亚稳态反应和中性子午风存在一定的随高度变化, 可以解释常规性出现的  $F_1$ - $F_2$  谷现象; 非常规性  $F_1$ - $F_2$  谷(较深谷), 既可能同较强剪切风也可能同中性原子-分子含量比等的较大变化有关系。

### 4 基本结论

- 4.1 利用现有中性大气的含量、温度、风场等经验模式, 以及太阳辐射通量模式, 可以从理论上得到同观测形态较一致的  $F_1$ -ledge 地方时、季节、太阳活动和地磁活动的变化。
- 4.2  $F_1$ -ledge 的出现和较低的原子-分子含量比有直接关系, 也同较高的原子-分子成份的过渡高度、较高的中性温度及其较低的高度梯度值, 存在对应关系。
- 4.3 同  $F_1$ -ledge 的形态相关联,  $F_1$ - $F_2$  谷的出现, 主要是由于亚稳态氧离子参与光化过程和电离气体参与具有一定垂直变化的运输过程。

致谢 本文所用到的经验模式由美国 NASA 的 GSFC 提供。

### 参 考 文 献

[1] Raticliffe, J. A., An introduction of the ionosphere and magnetosphere, Cambridge University Press, Cambridge, 1972.

- [2] Giraud, A., Petit, M., Ionospheric techniques and phenomena, Reidel Publishing Company, 1978.
- [3] Zhang, S.-R., Huang, X.-Y., Su, Y.-Z., Radicella, S. M., A physical model for one-dimension and time-dependent ionosphere. Part I. Description of the model, *Annali di Geofisica*, **36**, 105—110, 1993.
- [4] 张顺荣、黄信榆·电离层峰下结构的数值模拟, *空间科学学报*, **14**, 116—124, 1994.
- [5] Zhang, S.-R., Huang, X.-Y., A numerical study of ionospheric profiles for mid-latitudes, *Ann. Geophysicae*, **13**, 551—557, 1995.
- [6] Zhang, S.-R., Huang, X.-Y., An ionospheric numerical model and some results for the electron density structure below the F<sub>2</sub> peak, *Adv. Space Res.*, **16**, 119—120, 1995.
- [7] Zhang, M. -L., Zhang, S. -R., Radicella, S. M., Theoretical simulation of ionospheric variability below and above the F<sub>2</sub>-peak, Proceedings of International Beacon Satellite Symposium, Aberystwyth, Wales, UK, 11—15 July, 294—297, 1994.
- [8] Richards, P. G., Torr, D. G., Ratios of photoelectron to EUV ionization rates for aeronomic studies, *J. Geophys. Res.*, **93**, 4060—4066, 1988.
- [9] Taieb, C., Scialom, G., Kockart, G., A dynamical effect in the ionosphere F<sub>1</sub> region, *Planet. Space Sci.*, **26**, 1007—1016, 1978.
- [10] 苏元智、黄信榆, 电离层 F<sub>1</sub>-F<sub>2</sub> 谷区结构及其变化, *地球物理学报*, **34**, 139—146, 1991.
- [11] 高 铭、肖 佐, 一种电离层物理模型及其在 F<sub>1</sub> 谷区形成讨论中的应用, *空间科学学报*, **12**, 287—297, 1992.
- [12] Torr, D. R., Torr, M. R., Chemistry of the thermosphere and ionosphere, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **41**, 797—839, 1979.
- [13] Tobiska, K., Revised solar extreme ultraviolet flux model, *J. Atmos. Terr. Phys.*, **53**, 1005—1018, 1991.
- [14] Hedin, A. E., Biondi, M. A., Burnside, R. G., et al., Revised globe model of thermospheric winds using satellite and ground-based observations, *J. Geophys. Res.* **96**, 7657—7688, 1991.

## THEORETICAL MODEL STUDIES OF THE IONOSPHERIC F<sub>1</sub>-LEDGE VARIATIONS

ZHANG SHUN-RONG<sup>1)</sup> HUANG XIN-YU<sup>1)</sup> S. M. RADICELLA<sup>2)</sup>

1) *Wuhan Institute of Physics, Academia Sinica, Wuhan 430071, China*

2) *Aeronomy and Radiopropagation Laboratory, International Centre for theoretical Physics, Trieste 34100, Italy*

### Abstract

The F<sub>1</sub>-ledge behaviour in Wuchang (30.5°N, 114.4°E) is studied with the help of a time-dependent theoretical ionospheric model. It is shown that the current ionospheric theories are eligible to reproduce the observed regularity of the F<sub>1</sub>-ledge occurrence and evolution within the atmospheric background defined by the up-to-date empirical models. And the simulations reveal that a pronounced ledge correlates directly to a lower ratio of neutral atomic oxygen to molecular compositions, and has something to do with the transition height from the prevailing molecular to atomic ions, and with the background temperature and its height gradient. The F<sub>1</sub>-F<sub>2</sub> valley, connected to the F<sub>1</sub>-ledge shape, is considered to be present with the chemical processes that involve reactions of meta-stable oxygen ions, as well as the

dynamic processes that contain a proper vertical variation of ion movements.

**Key words** Theoretical ionospheric model, Ionospheric  $F_1$ -ledge, Ionospheric  $F_1$ - $F_2$  valley.

**作者简介** 张顺荣,男,1966年2月出生,1987年毕业于北京大学地球物理系空间物理专业,获学士学位,1995年在中国科学院武汉物理研究所获空间物理博士学位,1987年起在武汉物理所从事电离层物理的研究工作,1995年被特批为副研究员。主要研究方向为电离层模式和模拟,发表论文20多篇。

## 欢迎 订 阅

### 《地球物理学报》第38卷增刊

### 《油储地球物理研究文集》

国家自然科学基金委、中国科学院、中国石油天然气总公司和大庆石油管理局联合资助的国家重大项目“陆相薄互层油储地球物理理论和方法研究”,于1992年实施以来,已取得了很大进展,并获得了一批优秀成果。在理论研究方面,针对我国主力油田油气储集层的复杂性,作出一些有创造性的工作,达到或接近国际同类研究的前沿水平。在实际应用方面,结合了中国陆相地层特点,对我国的油气勘探与开发,具有重要的参考价值。本文集反映了我国“油储”项目在“八·五”期间执行的情况和结果,从中可见我国众多学者在油储地球物理研究方面所作出的努力。

“油储”项目是基础性研究面向国民经济建设重大问题的一个范例。为了适应国内外交流的需要,为了更好地促进研究成果转化为生产力,进而为国民经济建设服务,本刊将有关成果汇编成册,出版第38卷增刊——“油储地球物理研究文集”,内容丰富,已订阅本刊的单位和个人,请继续补订此增刊,并欢迎新订户。预订者速与本刊编辑部联系。地址:北京9701信箱(邮编100101),联系人:陈美秀,电话:(010)62011118转2131。

《地球物理学报》编辑部