

魏鼎文论文选集

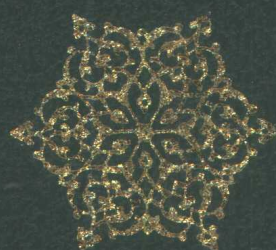
SELECTED WORKS OF WEI DINGWEN

臭氧层 · 台风 · 空间物理

OZONE LAYER

TYPHON

SPACE PHYSICS



武汉大学出版社



魏鼎文论文选集

SELECTED WORKS OF WEI DINGWEN

臭氧层·台风·空间物理

OZONE LAYER TYPHON SPACE PHYSICS

武汉大学出版社

装帧设计:汪 卉
责任编辑:金丽莉
责任校对:龙 瑜

图书在版编目(CIP)数据

臭氧层·台风·空间物理:魏鼎文学术论文集/魏鼎文著·

—武汉:武汉大学出版社,1995.9

ISBN 7-307-02046-7

I. 臭…

I. 魏…

Ⅱ. ①臭氧层—文集 ②台风—文集 ③空间物理学—文集

④魏鼎文—文集

Ⅳ. P421.33 P444 P35

武汉大学出版社出版发行

(430072 武昌 珞珈山)

正佳彩色制作输出中心排版

湖北毕昇印刷总厂印刷

1995年9月第1版 1995年9月第1次印刷

开本:787×1092 1/16 印张:17.125 插页:3

字数:423千字 印数:1—500

ISBN 7-307-02046-7/P·2 定价:28.00元

序

本文集所收录的论文是作者科学研究成果中最重要的部分。其中以大气臭氧层和台风的研究为主。尽管有关空间物理方面的论文仅有一篇,但它却断断续续地花费了作者 20 多年时间,所以它对于作者具有特别的意义。本文集的出版,首先是作者对自己数十年研究工作的一个总结,同时更希望能对青年科学工作者在思想方法以及科学概念的建立上有所帮助。

近 20 年来,随着人们对环境问题的关注,大气臭氧层业已成了热门话题。尤其是关于臭氧层的变薄和南极臭氧层空洞,更是如此。我们研究的课题主要集中在臭氧总量的观测和分析、臭氧层垂直分布遥感的原理与方法以及南极臭氧层空洞形成的理论等方面。由作者领导建立的北京(香河)和昆明两臭氧站是我国首次参加国际臭氧网并长期进行系统观测的台站。其观测质量在国际权威刊物上受到高度评价。作者关于臭氧层垂直分布的研究,开始于 50 年代末期,当时人们已经知道逆转曲线与臭氧层的垂直分布是有关的,并建立了求解该分布的数学模型,但却不知道逆转曲线和描写它的遥感方程究竟包含了多少独立的信息量以及逆转曲线形成的详细物理过程。作者对此作了深入、详尽的研究,在遥感领域内取得几个突破性的发现与结果:(1)首先提出了权重函数的分析与应用,证明了大气遥感方程所包含的独立信息量是有限的;(2)指出遥感方程的解具有不唯一和不稳定的问题,处理应十分小心;(3)证明了当时国际流行的遥感臭氧垂直分布的逆转方法 B 的解是不唯一的,应当放弃使用。这些发现和结果,由于卫星技术的飞速发展,不仅对大气臭氧层,而且对其它一些地学遥感反演科学均有重要的和普遍的意义。这些研究成果在 1961 年完成,当时虽然受到某些非难,但终于在 1962 年获得正式发表。这就是本集的第一、二篇论文。之后,在 1964 年,一位加拿大科学家得到了基本相同的结论,并于 1965 年发表。这里应当指出,除少数科学家外,长期以来有相当多的西方科学家在触及上述那段历史或应用上述结果时,要么只引用加拿大那位科学家的论文,要么就是根本不提谁首先发现它们的。作者希望本人的发现权应该得到公平对待和尊重。

南极臭氧空洞的成因是国际环境领域里一个注目焦点。目前,在各种解释中,最流行的一种观点认为它是由于氟里昂(CFCS)大量使用而导致了一系列物理、化学反应的结果。这可称之为“人为”假说。作者根据长期观察和大量数据统计分析,提出了一个新的观点,认为南极臭氧空洞与太阳射出的带电粒子多少或周期有关,与极区的平流层的大气环流有关,同时还与近年来多次爆发的大火山所喷发的大量含氯气体有关。这些因素都对平流层臭氧含量的减少起了重要作用。作者也第一次提出了太阳的带电粒子流是参与制造极区平流层臭氧的重要因素。这一观点可称为“自然”假说。我们相信将来的事实会作出正确回答。

台风是我国最重要的天气现象之一,常常给沿海人民带来严重的灾难,因而历来是气象学家研究的重点对象。这里收集的论著,主要是实验模拟的研究成果。其特点是在实验室内,以气体为介质,以烟的红外吸收模拟潜热加温,以大型转台模拟出地球自转的科氏力。在国际上首次造出了有这种特色的室内气体模型台风,赢得了高度的评价。利用这个物理模型,进行了地形对台风运动和结构影响的研究,冷空气对台风作用的研究,双台风相互作用的研究,台风

内重力波的研究,等等。其中台湾岛地形影响台风结构并使之中心分裂的研究成果引起了国内外同行的极大兴趣。作者与国际著名台风专家 Gray 教授共同提出的关于台风形成的多尺度组合理论也颇受同行的重视。它解释了过去无法解释的台风形成过程中的某些现象。

本文集的最后一篇是有关空间物理的论文。该论文的最初思想是从 50 年代开始的。那时作者还是一个大学学生。后来经过不断的思索、争论、改进,最后在 70 年代末期得已发表。本理论的一个最主要的结果是提出了光对空间带电粒子的斥力公式:

$$F = \varphi \frac{(je)^2}{c^2 m} \int_{\lambda} \frac{S_{\lambda}}{\omega} d\lambda \quad (\text{符号意义见正文})$$

它与人们熟悉的光压力有本质的不同,其大小可高出光压力几个数量级。既然人们公认宇宙物质 90% 以上为带电粒子,而宇宙间又有极其众多的强发光星体,据此,则在广阔的宇宙空间就应该存在着与万有引力相抗衡的具有普遍意义的力——光斥力。它与万有引力恰好构成对立的统一。应当指出:这里关于太阳风的形成仅被用来作为光斥力存在的一个例证。随着激光技术的发展,原则上讲,光斥力应该有可能在实验室内得到检验。但必须承认,光对空间带电粒子的斥力,目前还只是一种假说,一旦被证实,它的巨大科学意义将是不言而喻的。

在本文集中,有一些论文是作者与其它学者合作的。其中有著名的科学家叶笃正教授,国际著名台风专家 W. M. Gray 教授,国际著名空气动力学家张捷迁教授。还有一些是我的朋友或学生。在此,谨向他们表示我深深的谢意。

魏鼎文

1994 年 12 月于北京

Preface

The papers in this collected works are the most important achievements of the writer's scientific research. It mainly includes the studies of the atmospheric ozone layer and typhoon. Although there is only a thesis about space physics, it takes the writer more than twenty years off and on to finish it. Thus, it has special meaning to the writer. This book, at first, is a summarizing of the author's research works and also the author wishes it can help the following young scientific workers in the made of thinking of the scientific method as well as the foundation of the scientific concept.

Recently the atmospheric ozone layer has become a very popular topic. Especially about the total ozone is decreasing gradually and the Antarctic hole. The subject of our research mainly focuses on observing and analysing total ozone; on the theory and methods of remote sensing the ozone vertical profile; on the theory of the formation of the Antarctic ozone hole etc.. The two ozone stations in Beijing (Xianghe) and Kunming which are in charge of the author of this book are the stations that joined international ozone network and have done long—term systematic observation in China for the first time. The accuracy of observation was highly praised by the international authoritative publications. The author began his studies on the Umkehr effect for remote sensing the ozone vertical profile by the end of 1950s. At that time, people still had no idea about how many independent informations in the Umkehr curve or in its remote sensing equation. The author studied them very deeply and thoroughly, and discovered several very important results and published them in 1962. (1) He presented firstly the weighting function and applied it in the Umkehr remote sensing equation; and pointed out clearly that the independent informations on the ozone vertical distribution contained in the Umkehr curve are limited. (2) The problems of the non-uniqueness and instability of solution of atmospheric remote sensing equation were found firstly. (3) As verification, he demonstrated the non-uniqueness of the resolution of the Umkehr method (B) which was recommended by the IOC and was very popular in that time, and pointed out that this method should be given up to use. Obviously, these discoveries not only for Umkehr but also for the general atmospheric remote sensing have important and fundamental meaning. These are the first thesis and the second paper in the book. Two years later, in 1964, a Canadian scientist drew a similar conclusion and published in a formal journal in 1965. Here should point out that for a longer time, scientists, touching or applying the results mentioned above, besides a few, many of them only quoted that Canadian scientist's paper or do not indicated who discovered those three rules at all. Therefore, the author hope that his discovering right can be dealt with fairly in the future.

The formation of the Antarctic ozone hole is one of the focuses in the field of environment.

tal science. At present the most popular view point is that the hole was caused by the profusely using of CFCS, which leads to a series of physical and chemical reactions to deplete the ozone in stratosphere. For this we can call it as "artificial hypothesis". According to data statistics analysing, the author presented a new view-point that the Antartic ozone hole has much to do with the charged particle sent out by sun with 11-year cycle; with the circulation of stratosphere in Polar region; with the gases containing the chlorine spurted from the explosion of big volcano in recent years. These factors functioned mainly to reduce the amount of ozone in the stratosphere. Especially, the writer first pointed out that the changed particle current of sun is a major factor to produce stratospheric ozone in the polar region. This view-point can be called "natural hypothesis". It is believed that the fact will give the correct answer as time goes by.

Typhoon is an important weather system in China and it always brings disaster to the coastal people. So it has been emphasized as a researching object by meteorological experts. The papers in the book chiefly are the results of experimental simulation in laboratory. It taking air as medium; taking infrared absorption of smoke to simulate the latent heat; taking a larger rotating table to simulate the coriolis force. This kind of physical model typhoon according to similarity theory was created in the world for the first time.

With the physical model, the topographical influences on typhoon; the cool air effects on typhoon; the interaction between binary typhoons; and the gravity wave in typhoon etc. had been done. Among which, a spacial result that when the typhoon approaches to the Taiwan Island from east or south-east, its center splits into two, one to the SE and the other to the NW of the island. Which has caused many meteorologists's interesting in the world. About typhoon's formation, it presented the THEORY OF MULTI-SCALE ORGANIZATION. Which explained some phenomenon that could not be explained in the past.

The last paper of the book is about space physics. The primary thought of this thesis was started in early 1950s, when the writer was a university student. It was published by the end of the 1970s after a series of constantly consideration, arguement and improvement. An important result of this theory is the light repulsion formula about light action on space charged particle. (about the symbols, see the last paper in the book).

$$F = \varphi \frac{(je)^2}{c^2 m} \int_{\lambda} \frac{S_{\lambda}}{\omega} d\lambda$$

It is different from the light pressure in essence. Its strength can be higher more than some orders than that of light pressure. Scientists believe that more than 90% substances in universe are the charged particles and there are a lot of stars with very strong light in the universe, therefore, the light repulsion should be a fundamental force to contend with the universal gravitation. The both might form a law of unity of opposition in the universe.

By the light repulsion, it has explained the formation of the solar wind. At present, laser technology have been developed greatly. In principle, light repulsion can be tested in the laboratory. But here we must recognize that right now, the light repulsion is still a hypothesis. However, if it will be verified in future, its scientific meaning should be beyond measure.

In this collected works, some papers were cooperated with other scholars. some of them are famous scientist; Professor T. C. yeh, the famous meteorologist; Professor W. M. Gray, the famous typhoon expert and Professor C. C. Chang, the famous expert of air dynamics. The others are the writher's friends or students. Their names have been listed in the catalogue. Here, I am would likd to take this opportunity to give them grateful acknowledgement.

Wei Dingwen
December, 1994 Beijing

目 录

1 Götz 逆转效应中 $I_{3112\text{\AA}}$ 的有效散射高度上升过程的跳跃性及逆转方法 B 解的不唯一性	1
2 THE NON-UNIQUENESS OF THE SOLUTION FOR THE VERTICAL DISTRIBUTION OF OZONE FROM THE CALCULATION BY THE UMKEHR METHOD (B)	12
3 测量大气臭氧垂直分布的逆转方法(C)——对逆转方法(A)(B)的改进	17
4 THE UMKEHR METHOD "C" FOR THE MEASUREMENT OF VERTICAL DISTRIBUTION OF OZONE——AN IMPROVEMENT ON THE UMKEHR METHODS "A" AND "B"	29
5 OBSERVATIONS AND ANALYSES OF THE TOTAL AMOUNT OF ATMOSPHERIC OZONE IN THE BEIJING REGION AND IN THE REGION OF JOLMOLUNGMA MOUNTAIN IN TIBET	42
6 中国北京地区大气臭氧层的基本状态及其与气象要素的相关分析	46
7 ADVANCES IN SURFACE REMOTE SENSING OF ATMOSPHERIC OZONE IN CHINA AND ITS SIGNIFICANCE IN MODERN ATMOSPHERIC REMOTE SENSING	55
8 THE OBSERVATIONS AND STUDIES OF ATMOSPHERIC OZONE IN BEIJING AND KUNMING, CHINA	63
9 论南极 O_3 层空洞的形成及其演变趋势的预测	69
10 ON THE FORMATION OF THE ANTARCTIC OZONE HOLE AND ITS TREND PREDICTIONS	77
11 北京地区臭氧垂直分布的演变趋势与特征的研究——卫星 SBUV 资料与地面遥感对比分析	86
12 NEW EVIDENCES SUPPORTED THE WEI HYPOTHESIS ABOUT THE FORMATION OF THE ANTARCTIC OZONE HOLE	97
13 TRENDS AND CHARACTERISTICS OF TOTAL OZONE AND VERTICAL PROFILE IN KUNMING AND BEIJING, CHINA	101
14 中国北京和昆明地区大气臭氧层的异常变化	108
15 一个新的遥感大气臭氧层垂直剖面模式	111
16 台风结构和中国东南沿海地形对台风影响的初步实验研究	122

17	AN EXPERIMENTAL SIMULATION ON THE STRUCTURE AND TOPOGRAPHICAL INFLUENCE OF TYPHOON	135
18	台风路径的某些模拟实验研究	150
19	热带风暴的结构及其螺旋云带的形成——模拟实验研究	159
20	由模拟实验研究提供的几点台风预报意见	171
21	SUGGESTIONS FOR THE FORECAST OF TYPHOON TRACK FROM THE EXPERIMENTAL SIMULATIONS	179
22	双台风相互作用的流体动力学模拟实验研究	188
23	LABORATORY SIMULATION ON THE INTERACTION BETWEEN BINARY TYPHOONS WITH HYDRODYNAMIC MODEL EXPERIMENTS	198
24	冷空气对台风影响的流体动力学模拟实验研究	210
25	THE ACTIONS OF THE COOL AIR ON THE TROPICAL CYCLONE: AN EXPERIMENTAL STUDY	220
26	STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF TYPHOON CLOUD, CONVECTIVE BANDS, AND CLEAR REGIONS	226
27	PROGRESS ON THE LABORATORY HYDRODYNAMIC MODELLING OF TROPICAL CYCLONE IN CHINA	230
28	热带气旋形成的多尺度组合理论——流体动力学实验模拟与合成分析的结合	235
29	THE THEORY OF MULTI-SCALE ORGANNIZATION OF THE FORMATION OF TROPICAL CYCLONE — A RESEARCH WITH THE COMBINATION OF PHYSICAL MODEL AND COMPOSITE ANALYSIS	245
30	光对空间带电粒子产生斥力的一种假说与太阳风的起源	257

Götz 逆转效应中 $I_{3112\text{Å}}$ 的有效散射高度上升过程的跳跃性及逆转方法 B 解的不唯一性

魏 鼎 文

(中国科学院地球物理研究所)

摘 要

本文探讨了 Götz 逆转效应中,单色天顶散射光强 $I_{3112\text{Å}}$ 的有效散射高度 h_E 的上升过程.首先从理论上证明: h_E 并非沿高度连续上升,而是跳跃上升的,通过实际观测数据的计算,证实了理论结果,从而指出,由于 h_E 的跳跃,在应用逆转效应,建立测定大气臭氧垂直分布方法时,如果将大气分层较多,那么可能在臭氧层中下部所得的结果是不唯一的.基于上述结果,进一步研究了方法 B ,发现目前国际上通用的,由 Ramanathan 与 Dave 所给出的逆转方法 B 的解是不唯一的.这些解之间有着巨大的差异.因此以该方法计算出的各层臭氧含量,并不能肯定大气臭氧的垂直分布情况.

一、引 言

自从 1934 年以来,以 Götz 逆转效应(Götz umkehr-effect)为基础,所建立起来的测量大气臭氧垂直分布方法 A 与 B ^[1],到目前为止仍然是间接测量方法中最主要的方法.逆转效应的现象是:在太阳天顶角 Z 很大时($z > 85^\circ$),由 Dobson 臭氧光度计所测量出的两条单色天顶散射光强的比值 $I_{3112\text{Å}}/I_{3323\text{Å}}$,随着天顶角 Z 的增大,发生逆转^①.Götz 对该现象的解释的基本点是,由于大气臭氧的存在,及其在空间的位置和分布,使得在天顶角 Z 很大时, $I_{3112\text{Å}}$ 的有效散射高度上升到臭氧层上部,而 $I_{3323\text{Å}}$ 的有效散射高度始终处于比较低的高度上,于是导致了 $I_{3112\text{Å}}/I_{3323\text{Å}}$ 的逆转.然而对于这种解释,在历史上曾经有过争论^[2,3],但经过近三十年的实践证明,Götz 的解释是正确的.

显然,只有当太阳的天顶角 Z 较大时, $I_{3112\text{Å}}$ 的有效散射高度已经上升到高于臭氧层的低层时,在地面所测量到的 $I_{3112\text{Å}}/I_{3323\text{Å}}$,才和臭氧层的高度分布发生一定的关系,这样才有可能用测量出的 $I_{3112\text{Å}}/I_{3323\text{Å}}$ 去计算臭氧的高度分布.这清楚地表明,有效散射高度所在的位置是以逆转效应和应用逆转效应去测量大气臭氧垂直分布中的一个重要内容.

在本文的第一部分,我们详细的研究了有效散射高度的上升过程,即在不同的天顶角 Z ,它所在的位置.结果从理论上证明了 $I_{3112\text{Å}}$ 的有效散射高度,随着 Z 的增大,是跳跃上升的,然后用实际观测数据的计算证实了这个结果.在这个基础上,我们进一步提出了在应用 Götz 逆转效应测定大气臭氧垂直分布时,如果对大气分层较多,则有可能在臭氧层中、下层所得到的结果是不唯一的.

本文原载《地球物理学报》第 11 卷第 2 期,1962.

① 波长 3112Å 与 3323Å 是光度计的 C 波长组,其他波长组亦有逆转效应,但通用的是 C 波长组.

基于上述结果,我们提出了这样的问题:现在国际上通用的逆转方法 $B^{[4]}$ 所得的结果是否唯一? 因为在该方法中,对大气的分层是较多的. 关于逆转方法 B ,首先由 Götz、Meetham 与 Dobson^[1] 建立. 其后, Karandikar 与 Ramanathan^[5] 在印度使用了方法 B ,但在方法的细节上,与前者有了一些细小的不同. 在他们的这篇文章内简短的提到,对于给定的一条逆转曲线,按方法 B 计算,不止一个解,但是他们立即指出,这些解之间,没有充分的不同. 因此,实质上按照他们的意见,这些解之间的差异,是在容许的误差范围之内,亦即解仍然具有意义. 在 1957 年,国际地球物理年开始后, Ramanathan 与 Dave^[4] 给予了方法 B 以极其详细的描述,并且在方法的具体作法上又增加一些新内容. 他们的这个方法,被国际臭氧委员会推荐为标准方法,在世界范围内被广泛地应用着. 在该方法中,把大气分为 10 层,因此它是属于分层较多的. 在本文的第五节内,我们用充分的计算实例证明,根据该方法 B ,对于一个给定的逆转曲线,可以得到若干个完全不同的臭氧垂直分布. 亦即解是不唯一的. 并且由于这些解之间的较大差异,因而解是没有意义的.

二、有效散射高度跳跃上升的理论

有效散射高度的定义如下:在太阳天顶角为 Z 时,地面上所观测到的波长为 $3112 \text{ \AA}$ 的单体天顶散射光的强度为 $I_{3112\text{\AA}}$. 此 $I_{3112\text{\AA}}$ 为天顶方向所有高度上向下散射,而达地面光强之总和. 在这所有的高度中,散射到地面光强最大的那个高度,就称为有效散射高度,并以 h_E 表示. 本节将从理论上证明 h_E 是跳跃上升的.

1. 在平面大气下 h_E 的跳跃

在天顶角为 Z 时, I (即 $I_{3112\text{\AA}}$) 的表达式为:

$$I = \frac{3}{16\pi} \frac{\beta}{H_0 \rho_0} (1 + \cos^2 Z) I_0 \sum \rho_h 10^{-\alpha S_h} 10^{-\beta y_h} \Delta h, \quad (1)$$

上式是人们所熟悉的,由此有:

$$\Delta I_h = K (1 + \cos^2 Z) \rho_h 10^{-\alpha S_h} 10^{-\beta y_h}, \quad (2)$$

ΔI_h 的意义为在 h 高度上到达地面的天顶散射光强. 式中 β 为大气散射系数, α 为臭氧吸收系数, S_h 为光线在散射点前后所通过的臭氧厚度; H_0 为均质大气的高度, ρ_0 为其密度, ρ_h 为 h 高度上的大气密度, y_h 为光线在散射点前后所通过的大气质量,在平面大气下,以下式表示:

$$y_h = 1 + \frac{P_h}{P_0} (\sec Z - 1). \quad (3)$$

我们于臭氧随高度递增区 AB 中 (如图 1) 任取三点: $h, h + \Delta h, h + 2\Delta h$, 它们到达地面的散射光强,相应的以 $\Delta I_h, \Delta I_{h+\Delta h}, \Delta I_{h+2\Delta h}$ 表示. 按照 (2) 式,在平面大气下显然有 (见图 2):

$$\Delta I_{h+\Delta h} / \Delta I_h = 10^{-\Delta h/H' + \alpha x_h (\sec Z - 1) \Delta h + \beta (y_h - y_{h+\Delta h})}. \quad (4)$$

$$\frac{\Delta I_{h+2\Delta h}}{\Delta I_{h+\Delta h}} = 10^{-\Delta h/H' + \alpha x_{h+\Delta h} (\sec Z - 1) \Delta h + \beta (y_{h+\Delta h} - y_{h+2\Delta h})}. \quad (5)$$

在 (4) (5) 两式内,应用了等温大气中的 ρ_h 的指数表达式: $\rho_h = \rho_0 e^{-h/H}$, 式中 H 为标高, H' 表示以 10 为底的标高值.

现在来讨论 (4) (5) 两式. 设

$$\tau = \alpha x_h (\sec Z - 1) \Delta h + \beta (y_h - y_{h+\Delta h}), \quad (6)$$

$$\tau' = \alpha x_{h+\Delta h} (\sec Z - 1) \Delta h + \beta (y_{h+\Delta h} - y_{h+2\Delta h}). \quad (6')$$

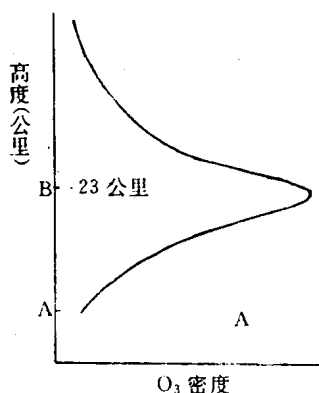


图1 大气臭氧垂直分布的一般型式

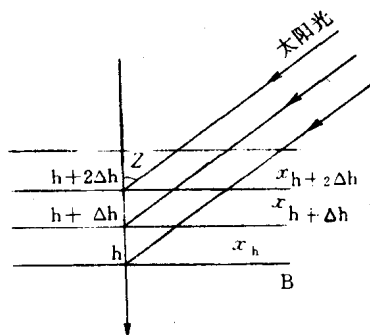


图2 平面大气散射光路径

从(3)式可知, y_h 是天顶角 Z 的单调递增函数. 由此可见, τ, τ' 都是天顶角 Z 的单调递增函数. 随着 Z 由小变大, 到达某一定 Z 值时, 则有

$$|\tau| > \left| \frac{\Delta h}{H'} \right| \quad (7)$$

而在另一个 Z 时有:

$$|\tau'| > \left| \frac{\Delta h}{H'} \right| \quad (7')$$

(7)(7')两式成立时, 则有 $\Delta I_{h+\Delta h}/\Delta I_h > 1$ 与 $\Delta I_{h+2\Delta h}/\Delta I_{h+\Delta h} > 1$, 这等价于 $\Delta I_{h+\Delta h} > \Delta I_h$, 与 $\Delta I_{h+2\Delta h} > \Delta I_{h+\Delta h}$. 现在我们要考察的是, 随着 Z 的增大 $\Delta I_{h+2\Delta h} > \Delta I_{h+\Delta h}$ 与 $\Delta I_{h+\Delta h} > \Delta I_h$ 两者间那一个出现得快些? (即两者间, 那一个要求的 Z 小些?) 由于在 Z 甚小时有 $\Delta I_{h+2\Delta h} < \Delta I_{h+\Delta h} < \Delta I_h$, 而随着 Z 增大到一定程度, 变成了 $\Delta I_{h+2\Delta h} > \Delta I_{h+\Delta h} > \Delta I_h$. 如果 $\Delta I_{h+2\Delta h} > \Delta I_{h+\Delta h}$, 比 $\Delta I_{h+\Delta h} > \Delta I_h$ 出现得快, 则按照 h_E 的定义, h_E 始终没有可能出现在 $h + \Delta h$ 高度上, 亦即 h_E 的上升是跳过 $h + \Delta h$ 点的. 显然, 我们要证明 $\Delta I_{h+2\Delta h} > \Delta I_{h+\Delta h}$ 比 $\Delta I_{h+\Delta h} > \Delta I_h$ 出现得快些, 只要条件 $\tau' > \tau$ 在 $Z > 0$ 的任何 Z 值时都成立即可. 按照(6)(6')两式, 条件 $\tau' > \tau$ 等价于不等式

$$\alpha(x_{h+\Delta h} - x_h)\Delta h(\sec Z - 1) > \beta[(y_h - y_{h+\Delta h}) - (y_{h+\Delta h} - y_{h+2\Delta h})] \quad (8)$$

取(8)式的极限, 则有

$$\alpha \left(\frac{dx(h)}{dh} \right) (\sec Z - 1) > \beta \left(\frac{d^2 y_h}{dh^2} \right) \quad (9)$$

根据(3)式, 而 $P_h = P_0 e^{-h/H}$

所以有

$$d^2 y_h / dh^2 = \frac{1}{H^2} e^{-h/H} (\sec Z - 1). \quad (10)$$

将(10)式代入(9)式, 则

$$dx(h)/dh > \frac{\beta}{\alpha} \left[\frac{1}{H^2} e^{-h/H} \right]. \quad (11)$$

不等式(11)的左端表示臭氧密度随高度的递增率, $x(h)$ 的单位是每公里厚度内含有若干厘米厚的臭氧, 递增率为每上升一公里增加的臭氧密度. 这样, 在不等式的右端 h 的单位也应是公里, H 值取 8 公里. 对 3112 Å 而言 $\alpha = 1.23, \beta = 0.464$, 因此, 在 $h \geq 13$ 公里时, 有

$$\frac{\beta}{\alpha} \left[\frac{1}{H^2} e^{-h/H} \right] \leq 0.0011. \quad (12)$$

由于 $h, h+\Delta h, h+2\Delta h$ 在臭氧递增区内是任取的, 因此, 只要臭氧的递增率在该区域内处处满足不等式(11), 则 h_E 将始终不可能出现在该区域内, 亦即 h_E 的上升是跳过该区域的. 它的物理本质是 $\Delta I_h - h$ 曲线的反转 (Z 小时 ΔI_h 随 h 递减, Z 大时在一定高度下变为递增) 是从该区域以上开始而向下传播. 由许多直接测出的臭氧垂直分布表明: 在最大密度下面的臭氧随高度的递增区内, 不等式(11)是经常被满足的. 因此, 在实际大气里 h_E 的上升是跳跃的.

2. 曲率大气下 h_E 的跳跃

以 l 表示在曲率大气下, 太阳光路径的斜长(如图3所示)为:

$$l = [(R+h_i)^2 \cos^2 Z + h(2R+h+2h_i)]^{\frac{1}{2}} - (R+h_i) \cos Z \quad (13)$$

因为 h_i, h 比起 R 来甚小 (R 是地球半径), 故上式可以近似的写成:

$$l = R \cos Z \left[\sqrt{2h/R \cos^2 Z + 1} - 1 \right] \quad (14)$$

这种简化的几何意义为: 在图3内, 线段 $\overline{BC}$ 、 $\overline{FG}$ 均可以 $\overline{KL}$ 代替, $\overline{AB}$ 、 $\overline{EF}$ 均可以 $\overline{JK}$ 代替, 余此类推. 而图中 L, G, C 三点, 仍相应的以臭氧递增区任取的三点 $h, h+\Delta h, h+2\Delta h$ 表示. 在曲率大气下, 不等式(8)的左端变为:

$$\alpha [(S_{h+\Delta h} - S_{h+2\Delta h}) - (S_h - S_{h+\Delta h})] \quad (15)$$

以 σ 表示(15)式方括弧内值. 如图3. 在只有三层的情况下有:

$$\sigma = [(JK - KL) - (IJ - JK)]x_2 + (KL - JK)x_1 + (KL - \Delta h)(x_1 - x_0) \quad (16)$$

在共有四层的情况有:

$$\sigma = [(IJ - JK) - (HI - IJ)]x_3 + [(JK - KL) - (IJ - JK)]x_2 + (KL - JK)x_1 + (KL - \Delta h)(x_1 - x_0). \quad (17)$$

如果在 h_i 以上至臭氧密度为零的空间, 分为 n 层, 这每层之间相隔 Δh , 于是如图3在 n 层情况之下, 有

$$\sigma = [(XY - YZ) - (WX - XY)]x_{n-1} + \dots + [(IJ - JK) - (HI - IJ)]x_3 + [(JK - KL) - (IJ - JK)]x_2 + (KL - JK)x_1 + (KL - \Delta h)(x_1 - x_0) \quad (18)$$

现在来分析(18)式方括弧内所代表的意义. 因为:

$$XY = R \cos Z \left[\sqrt{\frac{2(h+2\Delta h)}{R \cos^2 Z} + 1} - 1 \right] - R \cos Z \left[\sqrt{\frac{2(h+\Delta h)}{R \cos^2 Z} + 1} - 1 \right] = l(h+2\Delta h) - l(h+\Delta h).$$

$$\text{同理 } YZ = l(h+\Delta h) - l(h), WX = l(h+3\Delta h) - l(h+2\Delta h)$$

$$\text{于是 } [(XY - YZ) - (WX - XY)]$$

$$= -[l(h+3\Delta h) - 3l(h+2\Delta h) + 3l(h+\Delta h) - l(h)] = -[\Delta^3 l]. \quad (19)$$

上式的成立是它满足 n 级差分的一般表达式

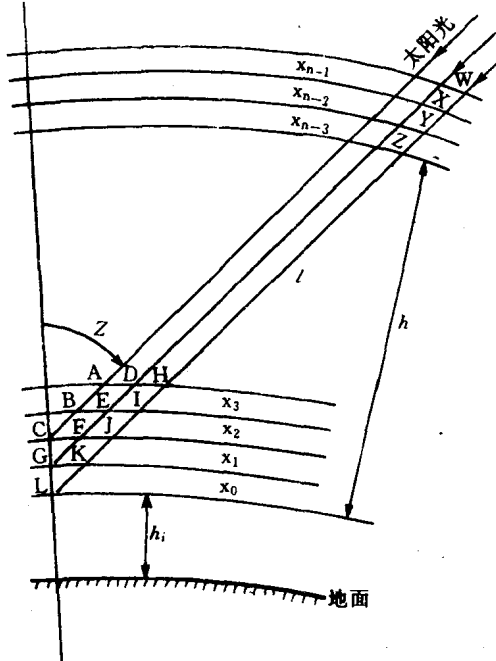


图3 曲率大气散射光路径

$$\Delta^n y = f(x+nh) - \frac{n}{1} f(x+\overline{n-1}h) + \frac{n(n-1)}{2!} f(x+\overline{n-2}h) - \dots + (-1)^k \frac{n(n-1)\dots(n-k+1)}{k!} f(x+\overline{n-k}h) + \dots + (-1)^n f(x) \quad (20)$$

同理可证,其他方括弧内均为三级差分的负数.并且可证

$$(KL - JK) = -[\Delta^2 l], \quad KL = \Delta l, \quad \text{于是有}$$

$$\sigma = [-\Delta^3 l]_{n-1} x_{n-1} + [-\Delta^3 l]_{n-2} x_{n-2} + \dots + [-\Delta^3 l]_3 x_3 + [-\Delta^3 l]_2 x_2 + [-\Delta^2 l]_1 x_1 + [\Delta l - \Delta h](x_1 - x_0).$$

在 Δh 很小时,差分可以以微分代替,并忽略低一级的无穷小量,则有

$$\sigma = \left[-\frac{\partial^2 l}{\partial h^2} \right]_1 x_1 dh^2 + \left[\left(\frac{\partial l}{\partial h} \right)_0 - 1 \right] \left[\frac{\partial x(h)}{\partial h} \right]_0 dh^2. \quad (21)$$

在考虑了大气曲率以后,则

$$y_h = 1 + \frac{P_h}{P_0} [\text{ch}(Z) - 1]. \quad (22)$$

式中 $\text{ch}(Z)$ 为 Chapman 函数. 我们不计其高度变化,因此有

$$[(y_h - y_{h+\Delta h}) - (y_{h+\Delta h} - y_{h+2\Delta h})] = \frac{1}{H^2} e^{-\frac{h}{H}} [\text{ch}(Z) - 1] dh^2. \quad (23)$$

联合(21)与(23)式,于是在曲率大气下,相应于不等式(11)的不等式就变为:

$$\left[-\frac{\partial^2 l}{\partial h^2} \right]_1 x_1 + \left[\left(\frac{\partial l}{\partial h} \right)_0 - 1 \right] \left[\frac{\partial x}{\partial h} \right]_0 > \frac{\beta}{\alpha} \frac{1}{H^2} e^{-\frac{h}{H}} [\text{ch}(Z) - 1]. \quad (24)$$

即在曲率大气下,在臭氧的递增区,处处满足不等式(24),则有效散射高度 h_E 跳跃发生.

在不等式(24)式中

$$\left[-\frac{\partial^2 l}{\partial h^2} \right]_1 x_1 = \left[\left(\frac{2h}{R} + \cos^2 Z \right)^{-\frac{3}{2}} \frac{1}{R} \right]_1 x_1 > 0, \\ \left(\frac{\partial l}{\partial h} \right)_0 = \left[\frac{1}{\sqrt{\frac{2h}{R} + \cos^2 Z}} \right]_0 = \sec Z,$$

$$\text{当 } h \rightarrow 0, Z < 90^\circ \text{ 时即有 } \left[\left(\frac{\partial l}{\partial h} \right)_0 - 1 \right] \geq [\text{ch}(Z) - 1]$$

这样我们就可以得到这样的结论:只要满足不等式(11),则不等式(24)是一定满足的.而如上所述,在实际大气里,不等式(11)是经常被满足的,因此考虑了大气曲率以后, h_E 仍然是跳跃上升的.

三、理论的验证

为了确实证明上述结论是正确的,我们必须用实际观测数据加以计算验证.

由(2)式出发,在天顶角 z 一定时,我们比较不同高度上的 ΔI_h 的大小.为此我们要算出不同高度上的 $\rho_h 10^{-\alpha_s} 10^{-\beta_y h}$. 设

$$T_h = \rho_h 10^{-\alpha_s} 10^{-\beta_y h} \quad (25)$$

$$C_z = K(1 + \cos^2 z) \quad (26)$$

则(2)式变为

$$\Delta I_h = C_z T_h \quad (27)$$

算出了 T_h 之后,找出其中最大者,并以 T_m 表示.相应的 ΔI_h 以 ΔI_m 表示,则有

$$\Delta I_m = C_z T_m \quad (28)$$

取(27)(28)两式的比值

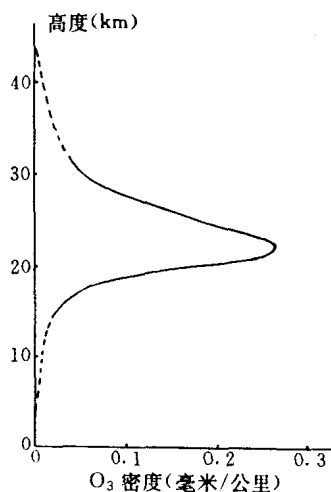


图4 大气臭氧垂直分布(取自 Regener 气球探测结果,图中虚线是作者所作的适当外延)

$$\frac{\Delta I_h}{\Delta I_m} = \frac{T_h}{T_m} \quad (29)$$

以(29)式计算的结果为横坐标,以 h 为纵坐标做图. 显然, T_m 所在的高度就是 h_E , 在我们所做的图中 $\Delta I_h/\Delta I_m = 1$ 的高度, 就是 h_E . 从相近的 z 所做的图确定 h_E 后, 即可断定 h_E 是否跳跃. 并且可以了解各个 z 时, ΔI_h 的分布情况.

我们只计算平面大气下的情况, 这是因为考虑由理论推测到: h_E 不管在平面大气下, 还是在曲率大气下均是跳跃上升的; 并且还证明, 跳跃性如果在平面大气里发生, 则在曲率大气里也一定发生. 计算的高度间隔取为一公里. 在计算中, ρ_h, P_h 的数据取自火箭探测结果^[4,6], 如表1与表2; 臭氧的垂直分布数据取自 Regener^[7]的气球探测结果, 如图4, 吸收系数取 $\alpha_{3112\text{\AA}} = 1.23$, 散射系数取 $\beta = 0.464$. 计算的最后结果表示在图5(A-G)与图6里. 从而我们可以看出下述情况.

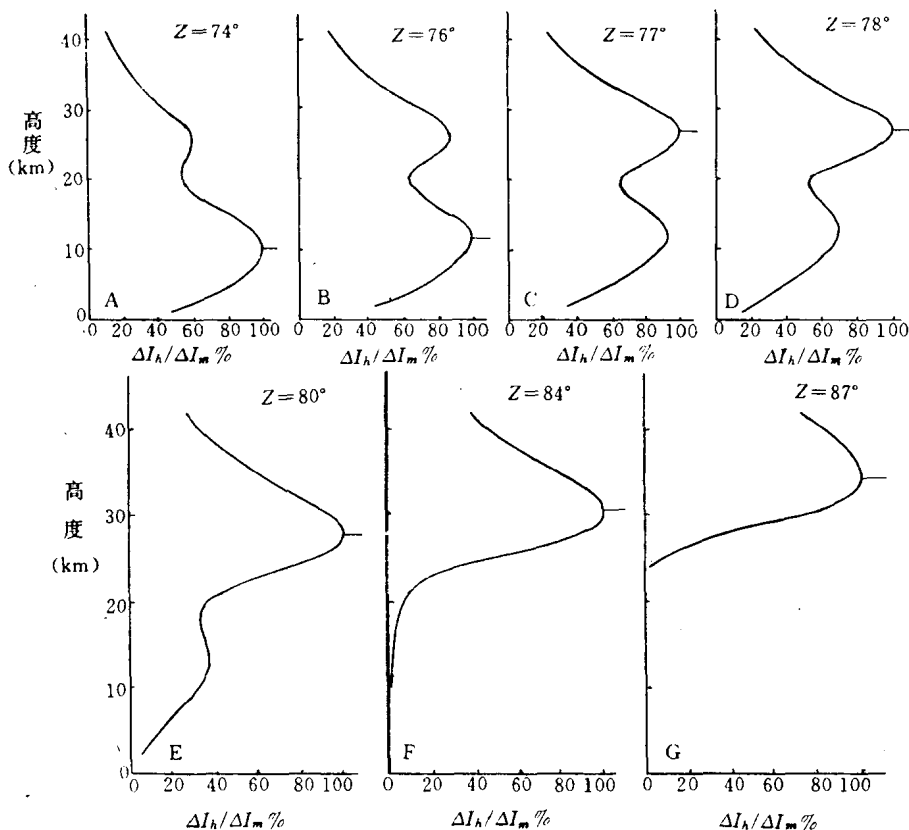


图5 (A-G)计算出的 $\Delta I_h/\Delta I_m$ 随高度分布(记号“—”表示 h_E 的位置)

1. h_E 在 $Z=76^\circ$ 变到 $z=77^\circ$ 时, 从 12 公里跳到 27 公里; 而在 $Z<76^\circ$, 和 $Z>77^\circ$ 时 h_E 的上升是缓慢的和连续的, 这和理论的结论是一致的, 即证实了 h_E 跳跃上升的结论.

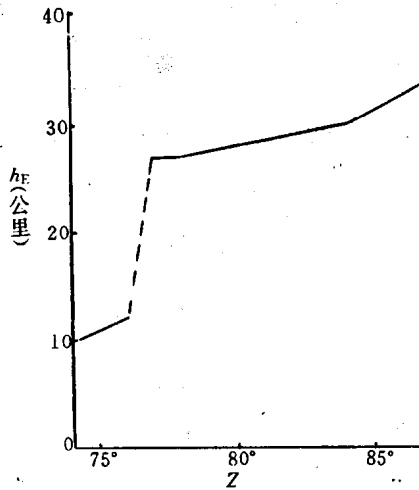


图 6 不同的天顶角 Z 对应的有效散射高度 h_E (在 Z 由 76° 变到 77° 时, h_E 的跳跃发生)

2. 可以清楚的看到, h_E 跳跃的物理本质是, 在臭氧层最大密度层以上的 ΔI_h 随着 Z 的增大, 相对 (相对于低层) 不断的增大. 这和上述的 ΔI_h-h 曲线反转, 从臭氧递增区以上开始并向上传播的理论结果是一致的. 由于这样, 在 $Z \simeq 77^\circ$ 附近造成两个散射主要区, 亦即这时散射区被拉得很宽, 大约在 35 公里以下的各个 ΔI_h 对 I 的贡献起着相差不多的作用.

3. 在 $Z \geq 84^\circ$ 以后, 可以说 $I_{3112\text{\AA}}$ 完全来自 24 公里以上. 而在另一方面, C 波长组的长波 $3323\text{\AA}$ 的吸收, 比起 $3112\text{\AA}$ 来是很微弱的, 亦即臭氧分布作一定的变动时对 $I_{3323\text{\AA}}$ 的影响是很小的. 因此可以认为在 $Z \geq 84^\circ$ 以后, 地面所接收到的 $I_{3112\text{\AA}}/I_{3323\text{\AA}}$ 与 24 公里以下的臭氧分布关系是很小的.

表 1 密度的高度分布^[6]

h (公里)	ρ (lg 克/厘米 ³)	h (公里)	ρ (lg 克/厘米 ³)
1.216	-2.977	26	-4.458
2	-3.003	28	-4.594
4	-3.095	30	-4.728
6	-3.185	32	-4.861
8	-3.276	34	-4.994
10	-3.375	36	-5.126
12	-3.484	38	-5.256
14	-3.606	40	-5.380
16	-3.739	42	-5.499
18	-3.883	44	-5.612
20	-4.030	46	-5.722
22	-4.176	48	-5.829
24	-4.318	50	-5.936

表 2 气压随高度分布^[4]

h (公里)	P (毫巴)	h (公里)	P (毫巴)
0	1013	26	22.5
2	803.5	30	12.5
6	478.5	32	9.31
8	372.4	36	5.32
12	206.5	38	4.07
14	150.7	42	2.43
18	78.5	44	1.90
20	56.9	48	1.15
24	30.5	50	0.902

四、 h_E 跳跃上升可能产生的影响

这里所说的影响, 主要是指由于 h_E 的跳跃上升对应用逆转效应, 建立测定大气臭氧垂直分布的方法可能会有哪些影响. 如上所述, 在 $Z \geq 84^\circ$ 时, $I_{3112\text{\AA}}/I_{3323\text{\AA}}$ 与 24 公里以下的臭氧分布关系很小. 而由计算结果可以看出, 实际上在 $Z=80^\circ$ 时, 在 24 公里以下的所有 ΔI_h 之和, 在总的 I 内所占的比例已经是不大了. 而在另一方面, 在 Z 较小时 (比如 $Z < 70^\circ$), $I_{3112\text{\AA}}/I_{3323\text{\AA}}$ 和臭氧的分布之间的关系也是很小的. 这样, 控制中下层的臭氧分布任务就落在 $Z=70^\circ$ 到 $Z=80^\circ$ 这一段时间里了. 但是, 由于 h_E 的跳跃上升, 恰恰在这一段时间里有效散射区被拉得很长, 这就使得臭氧中下层的分布有一定的变动对整个 $I_{3112\text{\AA}}$ (或者 $I_{3112\text{\AA}}/I_{3323\text{\AA}}$) 的影响是不大的. 于是