

气候系统性态行为的研究

林振山 著



气象出版社

P45
LZS

国家重点基础研究发展规划项目：

我国重大气候灾害形成机理和预测理论的研究 资助

气候系统性态行为的研究

林振山 著

气象出版社

内 容 简 介

本书是作者参加国家攀登项目“气候动力学和预测理论研究”和国家重点基础研究发展规划项目“我国重大气候灾害形成机理和预测理论的研究”的部分研究成果。内容涉及气候多平衡态、稳定性、扰动响应、突变和演化等。

本书是新三论和气候动力学互相结合的产物,以数理分析为主、数值模拟为辅。全书观点新颖独特,方法简单严谨,论述深刻透彻,适合于大气科学高年级本科生、研究生以及从事气候研究的教师和科研人员阅读。

图书在版编目(CIP)数据

气候系统性态行为的研究/林振山著. - 北京:气象出版社,1999.8

ISBN 7-5029-2750-6

I. 气… II. 林… III. ①气候学:大气动力学 IV. P461

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 33408 号

气候系统性态行为的研究

林振山 著

责任编辑:陶国庆 终审:纪乃晋

封面设计:林雨晨 责任技编:谷 青 责任校对:谷 青

气象出版社 出版

(北京海淀白石桥路 46 号 邮政编码:100081)

北京怀柔新华印刷厂印刷

新华书店总店北京发行所发行 全国各地新华书店经销

开本:850mm × 1168mm 1/32 印张:5.5 字数:141 千字

1999 年 8 月第 1 版 1999 年 8 月第 1 次印刷

印数:1~1500 定价:10.00 元

前 言

在了解地球气候形成和它的变化机制中,我们面对着一个极其复杂的物理系统。这个系统不仅包含着我们比较熟悉的大气行为,而且包含着我们仍了解不多的世界海洋、冰体和陆地表面各种各样的变化。除了物理过程以外,还有复杂的化学、生物过程影响着气候,这些过程在各种不同的时间和空间尺度上有着复杂的相互作用,并构成一个耦合的气候系统。

为了生存,人类有着极强的求知欲。为了了解、掌握复杂气候系统的复杂的性态行为,在 20 世纪的最后 20 年里,人类动用了亿美元的经费,研制了难以数计的大小、形形色色的气候模式。遗憾的是,人们发现,随着模式的加大、加细,随着计算精度和速度的提高,气候的预测准确率仍是时好时坏,放荡不羁的“圣婴”的怪异行径仍让气候学家们捉摸不透,这不能不发人深思。

气候是一非线性无标度系统。无标度性是人类难以把握气候演化的原因,而非线性则是其复杂性态行为的根本。对于无标度系统,只用某一时空尺度(层次)来研究问题,不啻于带上有色眼镜来看世界。对于非线性系统,总用确定性论来处理问题,如同盲人摸象。不知道高层次气候系统的演化特性规律(或谓之自然变率),而要准确预报低层次的气候行为,充其量只能是事倍而功半,多半则是徒劳而无益的。

20 世纪 80 年代以来,数学家发展了非线性科学。非线性科学研究大千世界中复杂奇妙现象,独步经典科学之外,另辟蹊径。非线性科学改变了科学世界的图景,认为世界是一个有序与无序的统一,稳定性与不稳定性的统一,完全性与不完全性的统一,自相似性与非自相似性的统一。归根结底是复杂性和简单性的统一。换言之,支配万千复杂现象的规律往往简单得让人难以

置信。最简单的 46 个染色体构造了最为复杂的人类生命；二进制计算机语言开辟了最先进、最复杂的计算新纪元。全球气温确实是莫名其妙地在变暖，元凶究竟是 CO_2 、 CFC_5 、 O_3 ，还是火山爆发、森林燃烧，人类研究了几十年仍无定论。由于气候不具备可实验性，我们无法区分所谓的扰动和所谓的自然变率，种种理论争执仍将继续下去。也许自然变暖这一最最简单的答案便是数百年以后的最终裁决。

二氧化碳温室效应的模拟试验也进行过成千上万次。 CO_2 加倍、四倍等各种方案不胜枚举，但至今还没有任一个权威性实验室能用计算机模拟结果来回答这样一个简单的问题：大气中 CO_2 浓度增加到什么程度时，会导致气候的突变？因为连续流场的奇异性问题不是可以用连续叠代来解决的。

大气科学的发展必然要受到其它自然科学，尤其是物理学和数学发展水平的制约和推动。在非线性科学取得重大发展的背景下，我们有理由将传统的气候动力学与非线性科学结合起来，开辟气候研究的新途径。我从来不反对研制越来越复杂、越来越精细的气候模式，并用于模拟、预测远比模式更为复杂的气候及其性态行为。但性好偷懒的我，却时常希望，支配复杂的气候系统的内在规律是简单而明了的。正是这一丝的希望，激励着我不时地研制一、二个极其简单的气候模式，企图能窥视支配气候性态行为的某些简单的内在规律，十多年下来，便有了这本小册子。更盼能收抛砖引玉之效。此书虽是本人十多年来的部分工作总结，萃取于作者在国内核心刊物发表的 80 余篇论文里，然而还是得意的少，不满的多。盖因作者学识浅薄，水平有限，时间亦仓促。书中种种之谬误和不当之处，更是难免。谨此，恳请有关专家和读者不吝赐教，不胜感激。

令人欣慰的是美国的某研究所计划应用本书所提出的气候层次理论和有关的建模技术来研究生物对全球气候变化的影响，并已下了聘书。估计在拙作与读者见面时，余已在美国沿袭发展本

书的思路和技术路线来构造另外一些简单的气候模式。但愿所有简单的气候模式对了解复杂气候系统的性态行为有所补益,更盼能收事半功倍之效。但这毕竟是一厢情愿的事。谋事在人,成事在天,企望通过人的努力能越来越接近自然规律。

河南师范大学赵之桐教授和河南平原大学的赵佩章同志参加了 1.1 中第一部分的研究工作。南京大学硕士研究生苗娟、王晓彬和原北京师范大学研究生王勤耕、原南京大学本科生王国复分别参加了 1.3、1.6、2.3 的研究和撰写工作;江西师范大学物理系的刘三秋教授、烟台师范学院的龚玉斌副教授分别参加了 2.2、3.4 的研究和撰写工作。谨此说明并致谢。

在进行与本书有关、长达 10 多年的研究工作中,余自始至终得到导师赵柏林先生、陈家宜先生、刘式达先生、李湘如先生和有关项目的首席科学家及课题组长曾庆存先生、黄荣辉先生、丑纪范先生和王绍武先生的悉心指导和大力扶持。谨此向他们暨所有关心和支持我的前辈科学家们致以崇高的敬意和衷心的感谢!

林振山

1999 年 7 月于南京大学契阔斋

目 录

前 言

1. 气候参数和多平衡态	(1)
1.1 日食-El Nino 系数及其应用	(1)
1.1.1 日食诱发 El Nino 的热动力机制	(1)
1.1.2 日食-El Nino 系数	(3)
1.2 关于行星反照率假设的讨论	(11)
1.2.1 关于 Wang's 假设的讨论	(11)
1.2.2 关于行星反照率取值范围的讨论	(13)
1.2.3 对 Budyko 和 Sellers 假设的讨论	(14)
1.2.4 对 North 等人的假设的讨论	(14)
1.2.5 关于行星反照率的非线性反馈假设	(15)
1.2.6 结论	(16)
1.3 多参数非线性零维气候系统	(16)
1.3.1 模式的建立	(17)
1.3.2 反照率反馈作用对气候性态行为的影响	(18)
1.3.3 有效放射率对气候性态的影响	(21)
1.3.4 反照率、有效放射率共同作用对气候性态行为的影响	(22)
1.3.5 结论	(23)
1.4 普适双变量一维气候系统的分岔约束条件	(25)
1.5 天气-气候系统的反演建模及其应用	(27)
1.5.1 反演方法	(28)
1.5.2 天津局地气候系统的反演建模	(31)
1.5.3 定性分析	(33)
1.6 大气对流的阻尼模型	(36)
1.6.1 阻尼对流模型	(38)
1.6.2 性态行为的研究	(39)
1.6.3 结论	(45)

1.7 间隙湍流的 β 模式	(45)
1.7.1 二维流的相体积和标度尺度	(46)
1.7.2 Renyi 维数, 奇异值和权重函数	(48)
1.7.3 能谱指数与分维和波数比的关系	(48)
1.7.4 结论	(50)
2. 气候振子系统	(51)
2.1 海-气相互作用气候振子模式	(51)
2.1.1 模式的建立	(51)
2.1.2 非线性稳定分析	(54)
2.1.3 非线性扰动方程的素动态性	(55)
2.1.4 存在阻尼时的分岔条件	(58)
2.1.5 分岔点和极限环的存在唯一性	(58)
2.1.6 在周期扰动下系统的素动态行为	(59)
2.1.7 结 语	(61)
2.2 Saltzman 振子气候系统	(61)
2.2.1 自由 Saltzman 振子的 Hopf 分岔点	(63)
2.2.2 随机噪声作用下的 Saltzman 振子	(69)
2.2.3 气候演变中的非周期运动	(74)
2.2.4 差分方程及计算机模拟结果	(76)
2.3 多参数高阶 Saltzman 振子系统	(79)
2.3.1 模式的建立	(80)
2.3.2 稳定性分析	(83)
2.3.3 敏感性试验	(85)
2.3.4 系统演变的数值模拟	(87)
2.4 附 录	(91)
3. 气候突变和约束条件	(94)
3.1 气候层次建模技术及其应用	(94)
3.1.1 气候层次理论	(94)
3.1.2 数据	(96)
3.1.3 模式	(97)
3.1.4 突变时间	(101)

3.2	一维单变量气候模式及其突变判据	(104)
3.2.1	模式与方程	(104)
3.2.2	超熵产生	(106)
3.2.3	讨论	(108)
3.3	一维海-气耦合模式及其突变判据	(110)
3.3.1	模式的建立	(111)
3.3.2	超熵产生和气候突变判据	(114)
3.3.3	讨论	(117)
3.4	大气 CO_2 含量和气候突变	(118)
4.	随机气候系统	(123)
4.1	高阶非线性随机气候模式	(123)
4.1.1	一维高阶非线性气候模式的建立	(123)
4.1.2	关于 T_0 的概率密度分布及其讨论	(125)
4.1.3	最可几态温度与时间和纬度的关系	(133)
4.2	双变量随机气候模式	(136)
4.3	大气(气候)系统可预报性问题的讨论	(139)
4.3.1	可预报性的有关理论	(139)
4.3.2	非线性可预报动力系统和非线性混沌动力系统 ..	(142)
4.3.3	关于模式系统可预报性问题的讨论	(143)
4.3.4	关于模式系统可预报时间尺度问题的讨论	(143)
附录 1	反演建模参考程序	(145)
附录 2	从时间序列提取 Lyapunov 指数的参考程序	(155)
参考文献		

1. 气候参数和多平衡态

1.1 日食-El Niño 系数及其应用

El Niño 具有区域性强, 能量变化大, 活动频繁、有规(如锁相)但无严格周期等特点。目前有关 El Niño 的起因众说纷纭。从流体动力学出发的有南方涛动减弱、太平洋信风增强、太平洋副热带高压及热带太平洋洋流异常等学说。从能量学出发的有太阳黑子活动异常、火山活动及地脉湍流等学说。然而所有现有的种种学说都无法与 El Niño 所有的众多特点相吻合。如太阳黑子活动异常学说在周期性上不能自圆其说。由于目前所有有关 El Niño 起因的学说都有不足之处, 人们至今仍无法准确地预报 El Niño。所以当前反思现有的种种理论和方法, 寻找 El Niño 预测新途径, 很有必要。

1.1.1 日食诱发 El Niño 的热动力机制

1.1.1.1 位能增量

取太阳常数为 $8.19\text{J}/\text{cm}^2\text{min}$, 大气比热(c) $1008\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$, 赤道一次日全食约 2 小时, 折合完全无光 1 小时。设大气吸收($R19\%$)的 100% 和海洋陆地吸收($R51\%$)的 70% 决定了日食区的减温量, 则日食区减温:

$$\Delta T = \frac{\Delta Q}{c} = 8.19 \times (0.19 + 0.51 \times 0.7) \times \frac{60}{1008} = 0.3^\circ\text{C} \quad (1.1)$$

设大气密度为 ρ_1 , 单位气柱质心高度为 $Z_c (= 5500\text{m})$, 位能增量和单位质量位能增量分别为 ΔE 和 Δe , 因为

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\Delta T}{T} = \frac{0.3}{273} = 0.11\% \quad (1.2)$$

$$\Delta E = \frac{g \Delta M Z_c}{2} \quad (1.3)$$

则

$$\Delta e = \frac{\Delta E}{M} = \frac{g \Delta T Z_c}{2} \times 273 = 30 \text{ J/kg} \quad (1.4)$$

1.1.1.2 赤道日食区附近水平对流附加速度 V 和垂直对流附加速度 $V_{\perp}$

设大气位能增量的有效转化率为 P , 根据能量守恒定律

$$\frac{V^2}{2} = eP \quad (1.5)$$

假设大气位能增量的有效转化率取 $P = 15\%$, 则日食区附近水平对流附加速度为

$$V = 3.0 \text{ m/s} \quad (1.6)$$

设赤道日食区内垂直对流附加速度为 $V_{\perp}$, 由于日食带长度折合中午见食约占纬圈的 $1/6$, 根据连续性原理, 有

$$\frac{V_{\perp}}{V} = \frac{H - Z_c}{\text{赤道}/6} = \frac{18000 - 5500}{3 \times 10^7/6} \quad V_{\perp} = 7.5 \text{ mm/s}$$

1.1.1.3 日食区内气柱对外做功时间

由于日食区内平均气温要比外界的低, 日食区下垫面将向气柱输送更多的感热和潜热, 从而对外作正功。由于实际空气分子的碰撞为非完全弹性碰撞, 设气体碰撞的热交换系数为 0.75 。则对外做功的时间等于气柱质心上升到对流层的时间 $1/0.75$:

$$t = \frac{18000 - 5500}{0.0075 \times 0.75} = 2.22 \times 10^6 (\text{s}) = 25 (\text{d}) \quad (1.8)$$

对于极地日食, 其日照强度约是赤道 $\cos 66.5^\circ = 0.4$ (倍), 而大气厚度则是赤道的 $8/18 = 0.4$ (倍), 所以极地日食区内气柱对外做功时间

$$t = 25 \times 0.4 / 0.4 = 16 (\text{d}) \quad (1.9)$$

结论 1: 如不考虑外界影响,则每次日食对大气环流的平均作用时间为 20 天左右,每年 2~6 次的日食将对大气环流产生长期而巨大的影响。

结论 2: 日食区气柱对外作正功是日食诱发 El Nino 现象的热-动力机制之一。由于日食区内平均气温要比外界的低,日食区下垫面将向日食区气柱输送更多的感热和潜热(日食往往伴随降水),从而使日食区内气柱对外作正功而诱发 El Nino 现象。

结论 3: 中纬以上连续 3~6 次同位相减弱赤道东风的代数叠加是日食诱发 El Nino 现象的动力机制之一。由于每次高纬或极区的日食都将使极地下沉气流减弱,从而使赤道东风减弱。而 1~2 年内在中纬以上地区连续发生 3~6 次日食,将使赤道东风减弱逐次得到加强,从而诱发 El Nino 现象。

有必要指出,这里强调的是 1~2 年内在中纬以上地区连续 3~6 次日食对 El Nino 的诱发作用,而不是指一次日食的作用。前者不具有周期性,后者则具有周期性。

1.1.2 日食-El Nino 系数

1.1.2.1 日食-El Nino 系数、年日食-El Nino 系数和累积日食-El Nino 系数

日食具有区域性强,能量变化大,活动频繁有规律等特点。如果再考虑到:

①日食的三个主要周期沙罗周期(18 年 10.33 天至 18 年 11.33 天)、沙罗族周期(3 个沙罗周期)及沙罗系列周期(68~75 个沙罗周期)均不是定数(由于日食的径向偏离和纬向级进所至),所以日食不是严格的周期现象。而中纬以上地区连续出现 3~6 次日食更不具有周期性;

②认为 El Nino 是一纯随机现象,是无科学依据的(至少在目前还没有充分的科学依据)。那么 El Nino 现象的主要特点就与日食的特点完全一致了。为此我们提出以下假设:

假设 1: 连续若干次的日食是诱发 El Niño 现象的主要因素之一。

为了证明上述假设的客观性,我们分析了本世纪以来所有的 El Niño 年和日食资料。通过比较,我们发现日食和 El Niño 现象之间存在着以下的关系:

① 凡是一年内在极区(南、北极)连续发生三次或三次以上的日食,则当年必发生 El Niño 现象。

② 凡是一年内在赤道附近连续发生三次或三次以上的日食,则当年必发生反 El Niño(拉尼娜)现象。

为了进一步证明假设 1 的充分性,我们首先定义日食-El Niño 系数 r_i 、年日食-El Niño 系数 R_1 和累积日食-El Niño 系数 R_2 :

设日食中心纬度、日出见食纬度、中午见食纬度、日落见食纬度分别为 Ψ 、 Ψ_m 、 Ψ_n 和 Ψ_a , 则

$$\Psi = \Psi_n + 0.18(\Psi_m + \Psi_a - 2\Psi_n) \quad (1.10)$$

考虑 A 和 B, 我们定义日食-El Niño 系数为 r_i :

$$r_i = \begin{cases} 3 & (66.5^\circ N < \Psi \leq 90^\circ N, -90^\circ N \leq \Psi < -66.5^\circ N) \\ 1.5 & (45^\circ N < \Psi \leq 66.5^\circ N, -66.5^\circ N \leq \Psi < -45^\circ N) \\ 1 & (22.3^\circ N < \Psi \leq 45^\circ N, -45^\circ N \leq \Psi < -22.3^\circ N) \\ -1 & (5^\circ N < \Psi \leq 22.3^\circ N, -22.3^\circ N \leq \Psi < -5^\circ N) \\ -2 & (-5^\circ \leq \Psi \leq 5^\circ N) \end{cases} \quad (1.11)$$

定义 1: 年日食-El Niño 系数 R_1 : $R_1 = \sum r_i, i = 1, 2, \dots, n$ 。这里的 n 为一年内发生日食总次数。

定义 2: 累积日食-El Niño 系数 R_2 : $R_2 = \sum r_i, i = 1, 2, \dots, m$ 。这里的 m 为连续二年内发生日食的总次数。

1.1.2.2 El Niño 的 $R_1 - R_2$ 预测定理

根据综合分析日食及 El Niño 的历史资料,我们提出以下预测 El Niño 年的 $R_1 - R_2$ 预测定理

- ① $R_1 \geq 9$, 当年为 El Nino 年;
 ② $R_2 > 10$, 当年至次年为 El Nino 年;
 ③ $R_2 = 10$, 次年为 El Nino 年;
 ④ $R_1 \geq 12$, 当年为强 El Nino 年。

1.1.2.3 资料检验

表 1.1 日食-El Nino 系数表

日 食 时 间	中午见食纬度	日食中心区	r_i	R_1	R_2
1948 年 5 月 9 日	6	北中纬	1		
1948 年 11 月 1 日	44	南中纬	1	2	
1949 年 4 月 28 日	P	北极区	3		
1949 年 10 月 21 日	P	南极区	3	6	8
1950 年 3 月 18 日	P	南极区	3		
1950 年 9 月 12 日	P	北极区	3	6	12
1951 年 3 月 7 日	-21	南低纬	-1		
1951 年 9 月 1 日	19	北低纬	-1	-2	4
1952 年 2 月 25 日	22	北低纬	-1		
1952 年 2 月 14 日	-30	南中纬	1	0	-2
1953 年 2 月 14 日	P	北极区	3		
1953 年 7 月 11 日	P	北极区	3		
1953 年 8 月 9 日	P	南极区	3	9	9
1954 年 1 月 5 日	-8.5	南低纬	-1		
1954 年 6 月 30 日	62	北中纬	1		
1954 年 12 月 25 日	-39	南中纬	1	1	
1955 年 6 月 20 日	15	南低纬	-1		
1955 年 12 月 14 日	2	北低纬	-1	-3	-2
1956 年 6 月 8 日	-40	南中纬	1		
1956 年 12 月 2 日	P	北极区	3	4	1
1957 年 4 月 29 日	P	北极区	3		
1957 年 10 月 23 日	P	南极区	3	6	10
1958 年 4 月 19 日	28	北中纬	1		
1958 年 10 月 12 日	-26	南中纬	1	2	8
1959 年 4 月 8 日	-21	南低纬	-1		
1959 年 10 月 2 日	23	北低纬	-1	-2	-4
1960 年 3 月 7 日	P	南极区	3		
1960 年 9 月 20 日	P	北极区	3	6	4

日 食 时 间	中午见食纬度	日食中心区	r_i	R_1	R_2
1961年2月15日	53	北高纬	1.5		
1961年8月11日	-50	南高纬	1.5	3	9
1962年2月5日	-4	北赤道	-2		
1962年7月31日	12	南低纬	-1	-3	0
1963年1月25日	-49	南中纬	1		
1963年7月20日	62	北中纬	1	2	-2
1964年1月14日	P	南极区	3		
1964年6月10日	P	南极区	3		
1964年7月9日	P	北极区	3		
1964年12月4日	P	北极区	3	12	14
1965年5月30日	-4	南赤道	-2		
1965年11月23日	4	北赤道	-2	-4	8
1966年5月20日	41	北低纬	-1		
1966年11月12日	-38	南中纬	1	0	-2
1967年5月9日	P	北极区	3		
1967年11月2日	P	南极区	3	6	4
1968年3月28日	P	南极区	3		
1968年9月22日	P	北极区	3	6	12
1969年3月18日	-19	南低纬	-1		
1969年9月11日	19	北低纬	-1	-2	4
1970年3月7日	25	北中纬	1		
1970年8月31日	-29	南中纬	1	2	0
1971年2月25日	P	北极区	3		
1971年7月22日	P	北极区	3		
1971年8月20日	P	南极区	3	9	11
1972年1月16日	P	南极区	3		
1972年7月10日	67	北高纬	1	4	
1973年1月4日	-39	南低纬	-1		
1973年6月30日	19	南赤道	-2		
1973年12月24日	1	北低纬	-1	-4	0
1974年6月20日	-32	南中纬	1		
1974年12月13日	P	北极区	3	4	0
1975年5月11日	P	北极区	3		
1975年11月3日	P	南极区	3	6	10
1976年4月29日	35	北低纬	-1		
1976年10月23日	-31	南低纬	-1	-2	-4

日 食 时 间	中午见食纬度	日食中心区	r_i	R_1	R_2
1977 年 4 月 18 日	-13	南低纬	-1		
1977 年 10 月 12 日	16	北低纬	-1	-2	-4
1978 年 4 月 7 日	P	南极区	3		
1978 年 10 月 2 日	P	北极区	3	6	4
1979 年 2 月 26 日	61	北高纬	1.5		
1979 年 8 月 22 日	P	南高纬	1.5	3	9
1980 年 2 月 16 日	1	北赤道	-2		
1980 年 8 月 10 日	4	南赤道	-2	-4	-1
1981 年 2 月 4 日	-45	南中纬	1		
1981 年 7 月 31 日	54	北中纬	1	2	-2
1982 年 1 月 25 日	P	南极区	3		
1982 年 6 月 21 日	P	南极区	3		
1982 年 7 月 20 日	P	北极区	3		
1982 年 12 月 15 日	P	北极区	3	12	14
1983 年 6 月 11 日	-7	南低纬	-1		
1983 年 12 月 4 日	2	北低纬	-1	-2	
1984 年 5 月 30 日	38	北中纬	1		
1984 年 11 月 22 日	-39	南中纬	1	2	0
1985 年 5 月 19 日	P	北极区	3		
1985 年 11 月 12 日	P	南极区	3	6	8
1986 年 4 月 9 日	P	南极区	3		
1986 年 10 月 3 日	P	北极区	3	6	12
1987 年 3 月 29 日	-17	南低纬	-1		
1987 年 9 月 23 日	19	北低纬	-1	-2	4
1988 年 3 月 18 日	28	北中纬	1		
1988 年 9 月 11 日	-28	南中纬	1	2	0
1989 年 3 月 7 日	P	北极区	3		
1989 年 8 月 31 日	P	南极区	3	6	8
1990 年 1 月 26 日	P	南极区	3		
1990 年 7 月 22 日	P	北极区	3	6	12
1991 年 1 月 15 日	-38	南中纬	1		
1991 年 7 月 11 日	22	南低纬	-1	0	6
1992 年 1 月 4 日	2	北低纬	-1		
1992 年 6 月 30 日	26	北中纬	1		
1992 年 12 月 24 日	P	北极区	3	4	3
1993 年 5 月 21 日	P	北极区	3		

日 食 时 间	中午见食纬度	日食中心区	r_i	R_1	R_2
1993 年 11 月 13 日	P	南极区	3	6	10
1994 年 5 月 10 日	42	北中纬	1		
1994 年 11 月 3 日	-36	南中纬	1	2	8
1995 年 4 月 29 日	-6	北赤道	-1		
1995 年 10 月 24 日	10	南赤道	-1	-2	0
1996 年 4 月 17 日	P	南极区	3		
1996 年 10 月 12 日	P	北极区	3	6	4
1997 年 3 月 9 日	P	北极区	3		
1997 年 9 月 1 日	P	南极区	3	6	12
1998 年 2 月 26 日	6	北赤道	-1		
1998 年 8 月 22 日	-4	南赤道	-1	-2	4
1999 年 2 月 16 日	-41	中纬	1		
1999 年 8 月 11 日	46	中纬	1	2	0
2000 年 2 月 5 日	P	极区	3		
2000 年 7 月 1 日	P	极区	3		
2000 年 7 月 31 日	P	极区	3		
2000 年 12 月 25 日	P	极区	3	12	14
2001 年 6 月 21 日	-12	低纬	-1		
2001 年 12 月 14 日	1	赤道	-2	-3	6
2002 年 6 月 10 日	35	中纬	1		
2002 年 12 月 4 日	-40	中纬	1	2	-1
2003 年 5 月 31 日	60	高纬	1.5		
2003 年 11 月 23 日	-51	中纬	1	2.5	4.5
2004 年 4 月 19 日	P	极区	3		
2004 年 10 月 14 日	P	极区	3	6	8.5
2005 年 4 月 8 日	-16	中纬	-1		
2005 年 10 月 3 日	18	低纬	-1	-2	4
2006 年 3 月 29 日	29	中纬	1		
2006 年 9 月 22 日	-27	中纬	1	2	0
2007 年 3 月 19 日	P	极区	3		
2007 年 9 月 11 日	P	极区	3	6	8
2008 年 2 月 7 日	P	极区	3		
2008 年 8 月 1 日	P	极区	3	6	12
2009 年 1 月 26 日	-26	中纬	1		
2009 年 7 月 22 日	25	中纬	1	2	8
2010 年 1 月 15 日	3	赤道	-1		