

文章编号:1001-8166(2007)11-1099-10

太阳活动驱动气候变化空间天气机制研究进展*

周立旻^{1,2}, Brian A. Tinsley², 郑祥民¹, 王世杰³

(1. 华东师范大学, 地理信息科学教育部重点实验室, 上海 200062; 2. University of Texas at Dallas, Richardson TX, US 75080; 3. 中国科学院环境地球化学国家重点实验室, 贵州 贵阳 550002)

摘要:大量研究表明,从数小时到十年、百年时间尺度上的天气、气候变化受太阳活动影响显著。近年来,全球云量、北大西洋冬季气旋等气候、气象要素与银河宇宙射线通量变化、太阳能量粒子事件等空间天气事件显著的统计相关被陆续发现。在此基础上,提出太阳活动驱动气候变化空间天气机制,其基本观点是:空间天气事件通过改变云物理特性影响气象、气候,其核心是:太阳活动造成的空间天气事件与云微物理过程的联系,目前空间天气理论分化为离子诱导成核机制和全球大气电路—静电云微物理机制(简称 Tinsley 机制)。主要回顾和总结了近年来空间天气机制研究的发展,包括观测与理论,取得的成果,并对其未来的发展提出展望。

关键词:太阳活动;气候变化;空间天气机制

中图分类号:P467 **文献标识码:**A

1 引言

古气候学、现代气候学研究揭示,太阳活动是影响十年尺度到百年尺度的地球气候变化主要的自然驱动力^[1-7]。在各种气候记录与太阳活动记录统计关系研究的基础上,为了更好、更准确地预测未来太阳活动对气候的影响,更为清晰地揭示人类活动对气候系统的影响,太阳活动影响地球气候机制的探讨已引起广泛关注。目前提出的三大主要机制理论是:

(1) 太阳总辐射机制(TSI 机制),该机制认为太阳活动引起的太阳常数变化(即到达地球大气上界的总太阳辐射变化),驱动了气候变化^[8]。

(2) 太阳短波辐射变化机制(UV 机制),该机制认为在太阳活动周期中占太阳总辐射变化量32%的太阳紫外辐射变化能引起地球中高层大气理化性质的变化,通过行星波作用等将中高层大气性状变化传递到对流层,引起天气、气候变化^[9,10]。

(3) 空间天气机制(Spaceweather 机制),该机制认为太阳活动影响地球空间天气(主要影响空间环境中的各种粒子通量),通过对特定区域云微物理过程的影响,导致云层宏观特征变化,在短时间尺度上引起气象要素变化(如气压、降水等),长时间尺度上引起全球云量变化和云寿命变化,导致全球辐射平衡变化,驱动气候变化^[11-13]。

TSI 机制认为太阳活动通过影响太阳常数导致气候变化,这一机制被广泛应用于解释古气候研究领域发现的太阳活动和地球气候间的相关关系。然而,近几个太阳活动周期中通过卫星对太阳常数的观测表明,从太阳活动极小期到极大期虽然太阳常数值上升,但其变化量仅约为 1.3 W/m^2 (占太阳总辐射的 0.1%)^[8]。根据目前的气候模式,0.1% 的太阳常数变化还不足以造成明显的气候变化。

在总辐射机制遇到重重困难之时,紫外辐射机制、空间天气机制应运而生。其中空间天气机制在近十几年来中从观测到理论体系研究均取得了长足的

收稿日期:2007-05-10;修回日期:2007-09-11.

* 基金项目:国家自然科学基金面上项目“太阳活动驱动气候变化空间天气机制及其环境效应研究”(编号:40701195)资助。

作者简介:周立旻(1976-),男,上海人,博士后,主要从事全球环境变化研究和太阳活动驱动气候变化机制研究。

E-mail:zhoulim@gmail.com

进步,是一个生机勃勃的新领域。Ney^[14]最早提出宇宙射线的变化本身可能通过对云的影响导致气候变化。通过全球云气候学计划(ISCCP)数据发现了十年尺度上受太阳活动影响的银河宇宙射线通量变化与全球低层云云量间的联系^[15-17]。与此同时,在更短时间尺度上(数小时到数天尺度),发现对流层大气对太阳活动事件,如日冕物质爆发(CME)事件、太阳能量粒子事件(SEP)、行星际磁场变化(IMF变化)等,亦存在显著的响应。在这些观测分析基础上,不少学者尝试进行空间天气机制的理论研究。空间天气机制理论认为,太阳活动通过影响空间天气过程影响全球云宏观物理特征,改变气候系统辐射平衡,从而驱动气候变化^[13]。这一过程的核心是空间天气变化与云微物理过程的联系,目前已提出了两大主要理论:

(1) 离子诱导成核理论(Ion Mediate Nuclei Theory,简称IMN理论)^[11]。

(2) 空间天气—全球大气电路—静电云微物理学理论(文中简称Tinsley理论)^[12]。

本文主要回顾近十年来在太阳活动通过影响空间天气驱动地球天气、气候研究领域观测研究和空间天气机制理论研究的进展、存在的问题并展望这一领域未来的发展。

2 太阳活动引起空间天气变化造成对流层大气变化的观测研究进展

2.1 银河宇宙射线通量变化与全球云量变化

从近现代观测记录,到地质记录研究,如冰川、树轮中¹⁴C、¹⁰Be含量的变化都表明,太阳活动强度十年—百年尺度的变化能直接导致银河宇宙射线通量(GCR)相应地周期性波动^[18]。长久以来,银河宇宙射线的变化仅仅被作为太阳活动强度的代用指标加以研究,而并没有将气候变化和宇宙射线通量变化联系在一起。1959年Ney^[14]提出银河宇宙射线变化可能通过影响云量变化对地球气候产生影响。然而受到当时观测手段的限制,他的预测没有得到实际验证,同时他也没有能提出更为详细的物理机制。随着卫星技术的发展,在NIMBUS-7、SMM和UARS等卫星对全球云量进行监测的基础上开展的“全球云气候学研究计划”(International Satellite Cloud Climatology Project, ISCCP),建立了全球云数据库^[15]。1997年Svensmark和Friss-Christensen利用ISCCP-C2数据库所记录的1982—1993年全球云量数据与同期银河宇宙射线(GCR)数据进行相关

分析,发现两者具有良好的相关性^[16,17],他们认为银河宇宙射线通量的变化直接导致了全球云量的变化,银河宇宙射线通量变化与全球云量间的联系也许正是太阳活动与地球气候变化之间缺失了的重要一环^[11]。他们的观点一提出即引来了众多争论,不少研究者质疑Svensmark的数据分析方法,这主要针对Svensmark等对ISCCP数据库中缺失记录的处理和不同卫星记录数据间的耦合^[19];另一部分则认为Svensmark等所述的全球云量11年的周期变化是由地球系统内在因子作用产生,如El Niño^[20]。2000年,Marsh等^[21,22]进一步利用ISCCP-D2数据库记录的1983—2000年分层云量数据和同期银河宇宙射线通量数据进行了统计分析,结果发现1997年研究中所发现的1982—1993年全球平均云量与银河宇宙射线之间良好的相关关系并没有出现,但他们却发现低层云云量变化与银河宇宙射线通量变化有良好的关系相关。此外,Marsh等^[21]在研究中还发现宇宙射线的变化与低层云顶温度有很强的相关性。

Veretenenko等^[23]利用俄罗斯大气辐射网1961—1986年的低层云量记录,验证了低层云云量与银河宇宙射线通量间的良好相关性。同时Veretenenko在研究中发现,低层云云量和银河宇宙射线通量间的相关性存在很强的纬度效应,在50°N(地磁纬度)以北地区低层云云量和银河宇宙射线通量呈正相关关系,而在50°N(地磁纬度)以南地区两者呈反相关关系。Udelhofen等^[24]利用美国大气辐射网1900—1987年低层云量记录,重复了上述工作,得到了相同的结果。

更短事件尺度上空间天气事件造成的银河宇宙射线通量变化亦能造成全球云量的显著变化,如太阳日冕物质爆发事件(CME)。CME事件中高能粒子流通过地球时,造成低能银河宇宙射线(能量小于10 GeV)数小时内强烈下降,这个过程被称为“福布希下降”(Forbush Decrease)^[25]。Todd等^[27]利用ISCCP数据对“福布希事件”中全球云量变化进行了分析,发现伴随“福布希下降事件”中银河宇宙射线通量的变化全球低层云量亦有相应的变化。

通过对卫星观测以及地面大气辐射观测网数据的研究,目前对银河宇宙射线通量变化与全球云量间的相互关系有了较清晰的认识,即银河宇宙射线通量与低层云云量有显著的相关关系,同时这种相关关系存在明显的纬度分异,即高纬度云量与银河宇宙射线通量变化呈正相关,而低纬度呈反相关。

2.2 其他空间天气事件与气象要素变化

短时间尺度的太阳活动事件,如 CME 事件、SEP 事件、IMF 变化等往往使地球空间天气产生从数小时到数天时间尺度上的响应,使进入地球大气层的各种粒子通量发生相应的变化。众多研究表明,短时间尺度的空间天气变化与气象要素变化间有显著的相关关系。

Tinsley 等^[26]对 1953—1985 年间 CME 事件引起的“福布希下降事件”与同期北半球高纬度冬季气旋的涡度进行了统计研究。结果表明,在 40 ~ 60°N 海洋上的冬季气旋涡度变化与“福布希下降事件”有很好的相关性,冬季气旋涡度变化的强度与“福布希下降”的强度成反比。

SEP 事件:太阳能量粒子主要是太阳活动时被抛射出的高能粒子主要成分为质子(能量 < 100 MeV),在地球空间受地球磁场调制仅仅在南北纬(地磁纬度)50 ~ 70°范围进入地球大气。在太阳能量粒子事件爆发期间,太阳能量粒子可到达约 20 km 高空。Vereteneko 等^[28]的研究表明,太阳能量粒子事件期间的北大西洋冬季气旋涡度对太阳能量粒子通量变化有显著的响应,即随能量粒子通量上升气旋涡度明显的增强。

日球电流片转换事件(HCS):日球电流片是太阳内部磁极性发生转换的表面,电流片两侧由于磁性的差异造成太阳风速度变化^[29]。当日球电流片转换时,太阳风速度的变化将导致来自磁层的相对论电子沉降通量变化。Tinsley 等^[30]对 1964—1970 年间 HCS 转换事件中的北大西洋冬季气旋涡度变化进行了研究,发现两者有很好的相关性。Tinsley 等^[30]认为,HCS 转换事件引起的相对论电子沉降通量发生变化影响了冬季气旋的涡度。Kenevnton 等^[31]对 HCS 转换事件前后的全球云量变化进行了研究,表明 HCS 转换事件与全球云量变化有很好的相关,特别是 1993 年。1993 年为 Pinatubo 火山爆发后两年,Kniventon 等^[31]的研究表明在这一年中 HCS 转换事件与低纬度低层云云量呈正相关关系,而与高纬度低层云云量呈反相关关系。

行星际磁场(IMF)是被束缚于太阳风中,它的方向受到太阳风和太阳磁场的影响,其中东西向分量(By)变化能通过影响磁层顶场向电流,影响极盖电势,同时南北两极极盖电势呈相反变化趋势。Mansurov^[32]研究揭示,行星际磁场东西向分量变化之后,南极表面气压有显著的变化。Tinsley 等^[33]更进一步将东西向分量变化前后北极地区表面气压的

变化进行了相关分析,结果不但验证了 Mansurov 的发现,同时发现在东西向分量变化之后,南、北两极的表面气压出现了相反的变化趋势。Burns 等^[34,35]利用南极 Vostock 站 2001—2003 年大气观测资料再次验证了 Mansurov 现象。

由于数小时到数天尺度上空间天气变化与低空大气气象要素间的相关关系,排除了 El Niño 等长时间气候系统内在因子的干扰。这一系列的显著关联表明,太阳活动造成的空间天气变化确实能够对低层大气产生显著的影响。同时除了空间变化造成的银河宇宙射线通量变化可以造成对流层大气变化外,其他太阳活动事件造成的空间天气变化亦能对对流层大气产生显著影响。

以上短期和中长期统计研究表明全球低层云量及其它气象要素变化与空间天气变化之间可能存在着联系,特别是其中的空间天气变化对全球云量的影响对认识太阳活动驱动气候变化机制尤为重要。云在气候系统中对辐射平衡起着至关重要的作用,IPCC 在 1996 年的报告中指出全球云的变化可能控制着全球气候变化^[36]。Hartmann^[37]指出,全球云量、云的分布以及云的辐射特征微小的变化都可能引起全球气候巨大的变化。如果银河宇宙射线等空间粒子与低层云之间联系的确存在,那么困扰太阳活动驱动地球气候变化的机制问题将能得到很好的解决。因此,太阳活动造成的空间粒子通量变化影响低层云的机制研究显得尤为迫切。

3 太阳活动影响低层大气机制的理论研究

在上述大量统计研究的基础上,近年来根据空间物理学与云物理学理论,大量研究者认为太阳活动通过改变空间粒子通量影响低层大气的过程,其关键在于空间粒子通量变化影响云微物理过程的过程,即空间粒子通量变化有效地改变云层中气溶胶、凝结核和云滴的粒子谱分布^[13]。由此,目前提出了两种主要机制理论:银河宇宙射线诱导云凝结核产生理论(IMN)^[11]和空间天气—全球电路—云粒子静电捕获机制理论(Tinsley 理论)^[12]。

3.1 太阳活动对空间粒子通量的调制

无论是银河宇宙射线还是太阳宇宙射线、相对论电子,其通量都受到太阳活动的影响。宇宙射线对低层大气的直接作用主要是对低层大气的电离作用。银河宇宙射线通量直接决定了低层大气(地表 1 km 以上对流层)的电离过程,决定了大气中自由

轻离子的浓度,影响大气电离度。

太阳活动对银河宇宙射线的调制作用主要集中在其低能部分。在地球空间环境中在太阳风和地磁场的作用下,银河宇宙射线中的低能部分(能量小于 5 GeV/n) 通量受到强烈的调制,使进入地球大气的银河宇宙射线通量的时空分布发生变化。在地球磁场作用下,大量低能的宇宙射线趋向在高纬度和两极地球进入大气^[38]。在一个太阳活动周期内,磁纬 40° 的地区能量大于 1 GeV/n 的银河宇宙射线通量变化 20%,而在磁赤道地区仅出现 3%~5% 的变化^[39]。在两极地区,由于集中了大量的低能宇宙射线,在太阳活动周期内宇宙射线通量的变化比其他地区更大。通过古气候学¹⁰Be 的研究表明,百年尺度上太阳活动对低能银河宇宙射线通量的影响远大于一个太阳活动周期内的变化。McCracken 等^[40] 研究表明,在百年尺度上的低能银河宇宙射线通量的变化可能达到 60%。

能量相对较低的太阳能量粒子、相对论电子等

仅能在高磁纬地区进入大气,通量受太阳活动的影响较大。它们虽然无法到达低层大气,只能影响平流层以上大气电离度,但是通过对平流层大气电离度的强烈调制,也可间接影响低层大气^[25]。

3.2 宇宙射线诱导凝结核形成机制

针对银河宇宙射线对成云过程的影响,1975 年, Dickinson^[41] 提出了离子凝结作用成核理论。 Dickinson^[41] 认为银河宇宙射线的作用能促进 H₂SO₄ 聚集形成云凝结核 (CCN) 过程,促进高层云的形成。 Yu 等^[12,42-45] 在 Dickinson 的基础上结合计算机模拟提出了离子诱导凝结核形成理论 (IMN 理论)。该理论认为在低层大气中由于光化学作用形成了过饱和的 H₂SO₄,在银河宇宙射线作用下大气电离形成的轻离子能够吸引更多的 H₂SO₄ 形成稳定的离子簇,离子簇相互碰撞形成凝结核 (CN),进一步形成 CCN 和云滴 (Cloud Droplet),从而改变云滴粒子谱分布,影响云层的宏观特征 (图 1)。

根据 IMN 理论,宇宙射线通量增加将导致离子

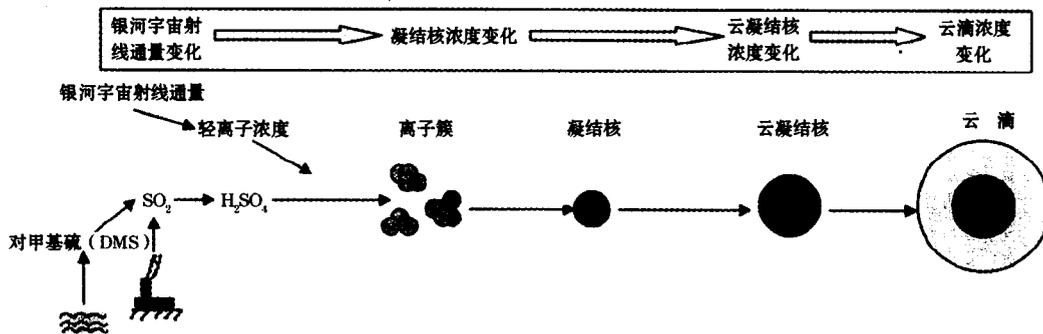


图 1 离子诱导成核理论 (IMN 理论) 结构图^[11]

Fig. 1 The schematic diagram of the ion mediated nuclei theory^[11]

诱导过程作用下形成更多的凝结核, CN 的增加导致 CCN 和云滴密度的增加,改变了凝结核、云滴粒子谱分布,这将影响云层的宏观物理特性,从而改变大气辐射平衡。1 km 以上对流层中大气轻离子浓度及电离度受到银河宇宙射线通量的调制,大气轻离子浓度及电离度随太阳活动出现明显的波动。太阳活动极大期,宇宙射线通量下降,大气轻离子浓度和电离度下降;太阳活动极小期,宇宙射线通量上升,大气轻离子浓度和电离度上升^[46]。根据离子诱导凝结核形成理论,大气轻离子浓度变化导致了离子诱导凝结核量的变化,从而导致云量出现周期性的变化。

然而离子诱导凝结过程是否能够真正影响云的形成过程,这一过程形成的云是否能够影响气候系

统。2005 年 Kazil^[47] 利用全球对流层 H₂SO₄ 分布数据结合离子诱导凝结过程形成的云进行的模拟研究,结果表明在目前理论下受这一过程影响的云量还足以影响气候系统。此外,根据离子诱导成核理论,太阳活动不仅可以影响低层云中凝结核数量,而且也可以影响到中高层云层中凝结核量,因此该理论目前也无法很好地解释从观测数据中发现的宇宙射线通量仅与低层云量变化相关的现象,以及太阳活动事件与低层云量变化间关系的纬度差异。 Yu^[48] 和 Sevensmark 等^[49] 认为这主要是对目前宇宙射线作用离子诱导过程形成的云凝结核数量缺乏了解,现有的研究仅仅是模拟计算的结果。 Sevensmark 等正致力于建造带有辐射源能产生与银河宇宙射线相当能量射线的云室,以求在实验室条件下

研究离子诱导成核过程(个人通讯)。

3.3 Tinsley 理论

Tinsley 等^[11,26,30,33,50-53]自 1989 年以来通过对大量的空间天气事件与气象、气候指标的对比、分析,指出太阳活动除了通过对银河宇宙射线通量的调制来影响低层大气云微物理过程外,其他受太阳活动影响的空间天气事件也能通过全球大气电路系统对低层云微物理过程产生影响,从而影响天气、气

候过程,并提出了空间天气—全球大气电路—静电捕获理论。将云微物理过程与受宇宙射线影响的大气电场联系起来,形成太阳活动→空间天气变化→全球大气电路→云微物理→云层宏观特征变化→天气、气候变化过程(本文中简称其为 Tinsley 理论),图 2 为该理论体系结构示意图。Tinsley 理论的核心是云层中粒子间的静电碰撞机制、云层中电荷分布机制和全球大气电路对太阳活动的响应。

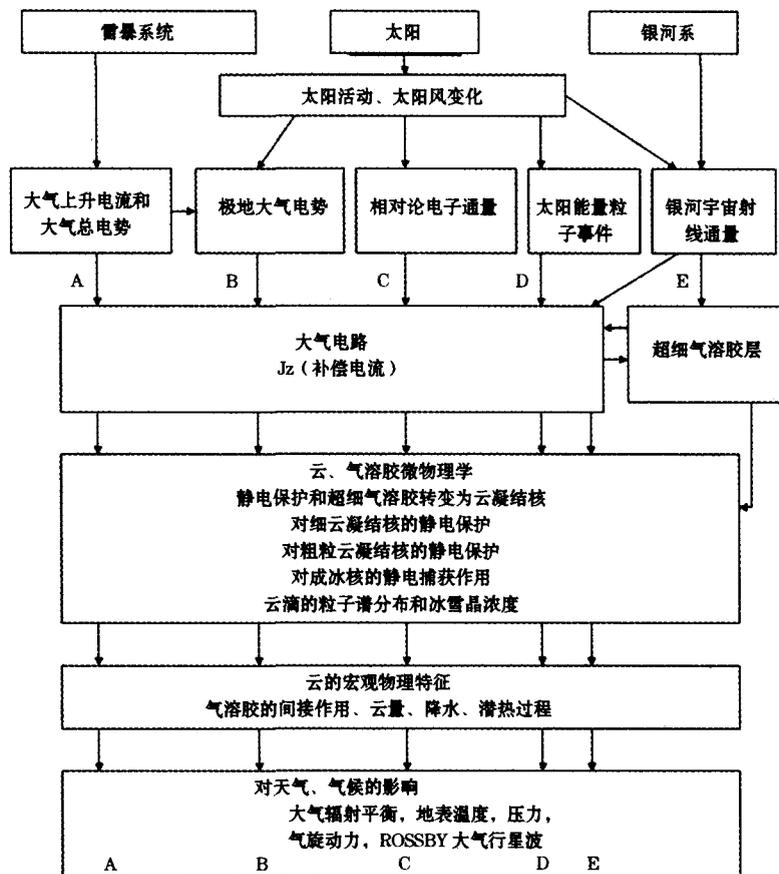


图 2 太阳活动—空间天气—大气电路—静电云微物理机制理论结构图^[54]

Fig. 2 The diagram of the solar activity-spaceweather-global circuit-cloud microphysics theory^[54]

研究表明,在云、雨滴形成过程中云粒子间的碰并增长起着重要的作用^[55]。以往的研究认为^[56-59]云层中各种粒子的碰撞效率主要受到粒子自身重力、粒子表面温度与环境温度间差异形成的粒子间热致力,由于粒子与环境间饱和水汽压差异形成的致力,以及流场作用等因素的影响。仅仅当碰撞粒子间带大量异号电荷,且处于强电场作用下时,粒子间的静电力才能对碰撞过程产生影响。根据观测云层边界层中存在着大量带电气溶胶和云滴,但他们往往带同种电荷,因此无法对云的微物理过程产生

影响。然而这些研究中仅仅采用点电荷假设来描述粒子间的静电力。近 10 年来,Tinsley 等^[53]根据静电场的映射电荷理论提出,气溶胶或云凝结核接近云滴,当两者间距离小于云滴半径时,点电荷假设不再成立,云滴相对于气溶胶成为导电面,应采用映射电荷理论计算粒子间的静电力(即带电气溶胶对云滴的极化作用使两者间产生短程引力)。通过大量的计算机模拟与实验研究,Tinsley^[53]提出了静电捕获机制(electricscavenging)。该机制认为,即使在弱电场条件下静电力在云滴碰并增长过程中有着重要

作用,特别是对于粒径 $0.01 \sim 1 \mu\text{m}$ 的粒子(气溶胶或凝结核),他们被云滴捕获的过程受静电力的作用最为明显。在静电力的作用参与下带电的粒子与云滴碰并效率显著增加,无论云滴与粒子之间带同种或异种电荷,或云滴不带电。Tinsley 等^[60]的计算表明,静电力对云层中粒子间碰撞效率的影响在低空较为明显,随云层高度增加影响逐渐减弱。

Tinsley^[11]认为,对带电成冰核的捕获可造成过冷云滴在较高温度下转化成为冰晶。在纯净大气中, -40°C 摄氏度以下才能使液滴冻结成冰晶,然而由于静电捕获作用使过冷水捕获成冰核后在异化成核作用下在高于 -40°C 的条件下冻结。根据静电捕获,云顶层过冷云滴与带电成冰核碰撞效率的增加促进了大气中冰核的形成,将导致云层中冰雪晶数量的增加。因此这一过程也被称为静电冷动理论^[61]。Tinsley 认为静电冷冻机制能够解释 Hobbs 等^[62,63]发现的云顶层冰雪晶浓度异常现象。Tinsley 等^[11]认为在北大西洋冬季气旋中,由于静电捕获作用,冰雪晶浓度增加,造成降水量增加,气旋中心绝热升温量随之增加,从而导致气旋中心的势能与对流增加,增加气旋的涡度。此外,静电捕获作用将有可能改变云层中云滴、凝结核、冰雪晶、气溶胶的浓度与粒子谱分布,从而影响云的宏观物理特征,如云层反射律、降水量和云寿命等。

云层中静电碰撞过程依赖于云层中电荷的分布。Zhou 等^[64]建立了准静止条件下,层云边界层中电荷分布模型,讨论了云层高度变化、太阳活动造成的大气补偿电流等参数变化对云层中电荷分布的影响。结果表明:该模型数值模拟的云边界层云滴带电量与 Beard 等^[65]在五大湖地区的观测结果能很好地对应。通过 Zhou 等^[64]模型模拟,大气补偿电流变化对云层边界层中电荷分布影响显著,且对低层云边界层中电荷分布的影响大于高层云。

大气补偿电流强度变化受到全球电路特性的调控,主要决定于大气柱电导率和电离层电势。通常条件下大气柱电导率取决于对流层大气中自由轻离子的浓度,它受控于大气自由轻离子产率(在对流层受控于银河宇宙射线通量)和自由轻离子的损失率(气溶胶吸附损失和异种离子碰撞湮灭损失)。在对流层中自由轻离子的产率受银河宇宙射线通量控制,而损失率受气溶胶浓度的影响^[66]。此外, Li^[67,68]等发现在火山爆发后高纬度地区平流层中高层中(40 km 左右)出现大量超细气溶胶,它们的产生用离子诱导凝结核理论可很好地解释^[12]。Tins-

ley^[69]提出在火山爆发后进入平流层中高层的大量 H_2SO_4 ,在 Browern-Dorbson 环流的作用下,在低纬度蒸发,在高纬度和极地受离子诱导成核机制作用凝结,形成超细气溶胶层,超细气溶胶层的存在将影响大气柱电导率。Zhou 等^[54]和 Tinsley 等^[72]在以往 Makino^[70]全球电路模型和 Sapokota^[71]全球电路模型的基础上,建立了 TZ-06 大气电路模型,该模型首次定量探讨了太阳活动对全球大气柱电阻的影响,以及不同火山活动背景下(融入了对流层和平流层气溶胶)全球电路对太阳活动事件响应的差异^[54,72]。结果表明,太阳活动对极地区大气柱电导率的影响大于低纬度、赤道地区;火山活动造成的对流层和平流层下层气溶胶层对大气柱电阻的影响较小,而平流层中上层的超细气溶胶层对大气柱电导率的影响较大;由于平流层中上层超细气溶胶层的存在导致太阳活动造成的大气柱电阻在高纬度、极地地区的变化量远大于火山活动平静期,而对低纬度地区大气柱电导率影响不大。通过 TZ-06 模型,正是由于太阳活动造成的大气电导率变化的纬度差异,在全球总上升电流不变条件下,是高低纬度大气补偿电流强度将出现相反的变化,而且这种差异在火山活动活跃期显得尤为显著。这很好地解释了 Kniventon 等^[31]发现的 Pinatobu 火山爆发后,“富布希”事件过程中出现的高低纬度低层云云量差异性的变化。

全球大气电路系统中的大气电离层电势与全球雷电路活动密切相关,在中低纬度地区,其平均值为 250 kV。它也有着日变化与季节性变化,而对于其在太阳活动周期中的变化规律还不十分清楚。

根据 Tinsley 理论,太阳活动除了通过影响能量低于 10 GeV 的银河宇宙射线通量,还可以通过影响相对论电子沉降通量、太阳能量粒子沉降通量等来影响全球大气电路^[11],但目前缺乏对这些过程的定量研究。

通过 10 多年的努力,Tinsley 理论已建立了比较完备的理论体系。大量野外观测表明这一机制的合理性,近年来云微物理模型、云层电荷分布模型和全球电路模型的建立和完善,对以往观测中发现的大量统计相关事件给出了较为合理的解释。但目前该理论依然存在不少问题,需要进一步完善:太阳活动对全球电路系统电离层电势影响的观测仅仅完成了在南极 Vostock 站的初步工作,格陵兰和夏威夷观测站正在建立中,青藏观测站正在酝酿中,通过对高、低纬度大气电离层电势的观测,揭示太阳活动周

期中大气电离层电势的变化规律;云微物理模型仅仅完成了映射电荷方法的计算工作,然而当带电碰撞颗粒的粒径接近时,映射电荷方法也不再精确,需要考虑碰撞颗粒间相互的极化作用,这部分工作正有待完善;对静电云微物理的研究目前主要集中于计算机模拟阶段,目前继续解决云室中在线测量颗粒带电量问题,从而实现在实验室条件下,通过云室模拟、验证静电微物理过程;云层中电荷分布的研究虽然完成了准静止状态电荷分布模型,并对云层边界层云滴带电量进行了较为精确的测定,进一步的工作考虑将云层电场、云层气流动力融入电荷分布模型中,同时进一步在不同太阳活动背景下对不同类型非雷暴云中电荷分布变化进行观测。

5 结 语

近十几年来随着全球云量变化与宇宙射线相关性研究的开展,大量证据表明太阳活动可能通过调节进入大气的宇宙射线等空间粒子的通量造成全球云量变化来影响全球气候,但日期对这一过程的观测与理论机制研究依然处于起步阶段。

空间天气机制(包括离子诱导成核理论和 Tinsley 理论),通过建立空间粒子通量变化与云微物理学的联系机制,将太阳活动与全球云量、气候系统辐射平衡联系起来,丰富了太阳活动与气候间联系机制的研究,然而目前该机制依然需要进一步完善理论体系,并深化实验室模拟实验与野外观测验证工作。

太阳活动通过大气电过程或宇宙射线诱导过程影响地球气候过程还存在时间尺度的问题。太阳活动事件对大气的影晌往往只有几分钟—几天时间,如何将短时间的影晌与长时间如 10 年、20 年和 100 年尺度的气候变化联系起来,还需要对现有模式进行深入地研究。

太阳活动通过全球电路对全球气候的影晌还可能通过对雷电的影晌导致大气动力状态变化来实现^[73],这一过程也值得引起重视。

参考文献 (References):

- [1] Stuiver M. Solar variability and climate change during the current millennium[J]. *Nature*, 1980, 286: 868-871.
- [2] Eddy J A. The Maunder minimum[J]. *Science*, 1976, 192: 1 189-1 202.
- [3] Raisbeck G M, Yiou F, Jouzel J, et al. ¹⁰Be and ^δ²H in polar ice cores as a probe of the solar variability's influence on climate[J]. *Philosophical Transactions of The Royal Society of London*, 1990, A330: 463-470.
- [4] Magny M. Solar influence on Holocene climate changes Illustrated by correlation between past lake-level fluctuations and the atmospheric ¹⁴C record[J]. *Quaternary Research*, 1993, 40: 1-9.
- [5] Karlen W, Kuylenstierna J. On solar forcing of Holocene climate: Evidence from Scandinavia[J]. *The Holocene*, 1996, 6: 359-365.
- [6] Eddy J A. Climate and the changing sun[J]. *Climate Change*, 1977, 1: 173-190.
- [7] Wang Y J, Chen H, Edwards R L, et al. The Holocene Asian monsoon: Links to solar charges and North Atlantic climate[J]. *Science*, 2005, 308: 854-857.
- [8] Willson R. Total solar irradiance trend during solar cycle 21 and 22 [J]. *Science*, 1997, 277: 1 963-1 965.
- [9] Haigh J D. The role of stratospheric ozone in modulating the solar radiative forcing of climate[J]. *Nature*, 1994, 370: 544-546.
- [10] Haigh J D. The impact of solar variability on climate[J]. *Science*, 1996, 272: 981-984.
- [11] Tinsley B A. Influence of the solar wind on the global electric circuit, and inferred effects on cloud microphysics, temperature, and dynamics of the troposphere [J]. *Space Science Reviews*, 2000, 94: 231-258.
- [12] Yu F, Turo R P. Ultrafine aerosol formation via ion mediation nucleation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27: 883-886.
- [13] Carslaw K S, Harrison R G, Kirby J. Cosmic rays, clouds, and climate[J]. *Science*, 2002, 298: 1 732-1 737.
- [14] Ney E P. Cosmic radiation and the weather[J]. *Nature*, 1959, 183: 451.
- [15] ISCCP D2. International Satellite Cloud Climate Project-Climatological Summary Product [EB/OL]. ftp://isccp.giss.nasa.gov/pub/data/d2/.
- [16] Svensmark H, Friis-Christensen E. Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage—A missing link in solar climate relations[J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1997, 59: 1 225-1 232.
- [17] Friis-Christensen E, Svensmark H. What do we really know about Sun-climate connection? [J]. *Advances in Space Research*, 1997, 20: 913-921.
- [18] Eddy J A. Climate and the changing sun[J]. *Climate Change*, 1977: 1 173-190.
- [19] Farrar P D. Are cosmic ray influencing oceanic cloud coverage-or is it only El Niño? [J]. *Climatic Change*, 2000, 47: 7-15.
- [20] Wagner G W, Livingstone D M, Masarik J, et al. Some results relevant to the discussion of a possible link between cosmic rays and the Earth's climate [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106: 3 381-3 387.
- [21] Marsh N, Svensmark H. Cosmic rays, cloud, and climate[J]. *Space Science Review*, 2000, 94: 215-230.
- [22] Marsh N, Svensmark H. Low cloud properties influenced by cosmic ray[J]. *Physical Review Letters*, 2000, 85: 5 004-5 007.
- [23] Veretenenko S V, Pudovkin M I. Variations in solar radiation input to the lower atmosphere associated with different helio/geophysical factor [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial*

- Physics*, 1999, 61:521-529.
- [24] Udelhofen P M, Cess R. Cloud cover variations over the United States: An influence of cosmic rays or solar variability? [J]. *Geophysical Research Letter*, 2001, 28:2 617-2 620.
- [25] Rasmus E B. *Solar Activity and Earth's Climate* [M]. Berlin: Springer, 2001.
- [26] Tinsley B A, Deen G W. Apparent tropospheric response to MeV-GeV particle flux variation: A connection via electrofreezing of supercooled water in high level clouds? [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96:22 283-22 296.
- [27] Todd M C, Kniventon D R. Changes in cloud cover associated with Forbush decreases of galactic cosmic rays [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106:32 031-32 041.
- [28] Veretenenko S, Thejll P. Effects of energetic solar proton events on the cyclone development in the North Atlantic [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 2004, 66:393-405.
- [29] Cai Hongchang, Wei Fengsi. 2-D structure of solar wind speed and heliospheric current sheet [J]. *Chinese Journal of Space Science*, 1992, 12(3): 171-177. [蔡红昌, 魏奉思. 二维太阳风速度结构与日球电流片 [J]. *空间科学学报*, 1992, 12(3): 171-177.]
- [30] Tinsley B A, Heelis R A. Correlation of atmospheric dynamics with solar activity: Evidence for a connection via electrofreezing of supercooled water in high level clouds? [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98:10 375-10 384.
- [31] Kniveton D R, Tinsley B A. Daily changes in global cloud cover and Earth transits of the heliospheric current sheet [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109: D11201, doi: 10. 1029/2003JD004232.
- [32] Mansurov S M, Mansurova L G, Mansurov G S, et al. North-south asymmetry of geomagnetic and tropospheric events [J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1974, 36:1 957-1 962.
- [33] Tinsley B A, Heelis R A. Correlation of atmospheric dynamics with solar activity: Evidence for a connection via electrofreezing of supercooled water in high level clouds? [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1993, 98:10 375-10 384.
- [34] Burns G B, Tinsley B A, Troshichev O A, et al. Interplanetary magnetic field and atmospheric electric circuit influences on ground level pressure at Vostok [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2007 (in press).
- [35] Burns G B, Frank-Kamenetsky A V, Troshichev O A, et al. Inter-annual consistency of bi-monthly differences in diurnal variation of the ground level, vertical electric field [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2005, 110, D10106, doi:10. 1029/2004JD005469.
- [36] IPCC. *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*, Intergovernmental Panel on Climate Change [C] // Houghtou J T, et al, eds. *Intergovernment Panel on Climate Change*. New York: Cambridge University Press, 1996.
- [37] Hartman D L. Radiative effects of clouds on Earth's climate [C] // Hobbs P V. *Aerosol-Cloud-Climate Interactions*. San Diego: Academic Press Inc., 1993.
- [38] Fluckiger E O, Smart D F, Shea M A. A procedure for estimating the change in cosmic ray cutoff rigidities and asymptotic directions at low and middle altitudes during periods of enhanced geomagnetic activity [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1986, 91:7 925-7 930.
- [39] Hoppel W A, Anderson R V, Willett J C. Atmospheric electricity in the planetary boundary layer [C] // *The Earth's Electrical Environment*. Washington DC: NAS Press, 1986:149-165.
- [40] McCracken K G, Beer J, McDonald F B. Variations of cosmic radiation 1890-1986, and the solar and terrestrial implications [J]. *Advances in Space Research*, 2004, 34:397-406.
- [41] Dickinson R E. Solar variability and the lower atmosphere [J]. *Bulltin American Meteorology Society*, 1975, 56:1 240-1 248.
- [42] Yu F. On the mechanism controlling atmospheric particle formation [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2001, 32(S1):603-604.
- [43] Yu F, Turco R P. Ultrafine aerosol formation via ion-mediated nucleation [J]. *Journal of Geophysical Research Letters*, 2000, 27:883-886.
- [44] Yu F, Turco R P. From molecular clusters to nanoparticles: The role of ambient ionization in tropospheric aerosol formation [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106:4 797-4 814.
- [45] Yu F. Altitude variations of cosmic ray induced production of aerosols: Implications for global cloudiness and climate [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2002, 107:8-1, 8-10.
- [46] Gringel W, Rosen J M, Hoffman D J. Electrical Structure from 0 to 30 kilometers [C] // *The Earth's Electrical Environment*. Washington DC: National Academy Press, 1986:166-182.
- [47] Kazil J, Lovejoy E R. Tropospheric ionization and aerosol production: A model study [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109, D19206, doi:10. 1029/2004JD004852.
- [48] Yu Fangjun. From molecular clusters to particles of CCN sizes: Effect of variations in galactic cosmic ray flux [J]. *EOS Transaction, AGU*, 2005, 86(52), *Fall Meeting Supplement*, Abstract A52B-05.
- [49] Svensmark H, Pedersen J P, Marsh N, et al. New Ion-Nucleation mechanism relevant for the Earth's atmosphere: Experimental results [J]. *EOS Transaction, AGU*, 2005, 86(52), *Fall Meeting Supplement Abstract A52B-05*.
- [50] Tinsley B A, Deen G W. Apparent tropospheric response to MeV-GeV particle flux variations: A connection via electrofreezing of supercooled water in high level clouds? [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1991, 96:22 283-22 296.
- [51] Tinsley B A. Correlations of atmospheric dynamics with solar wind-induced changes of air-Earth current density into cloud tops [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101:29 701-29 714.
- [52] Tinsly B A, Liu W, Rohrbaugh R P, et al. South pole electric field responses to overhead ionospheric convection [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1998, 103:26 137-26 146.
- [53] Tinsley B A, Rohrbaugh R P, Hei M. Electroscavenging in clouds with broad droplet size distributions and weak electrification [J]. *Atmosph Research*, 2001, 59-60:115-135.
- [54] Zhou Limin, Tinsley B A. The response of a global circuit model with stratospheric and tropospheric aerosol to cosmic ray flux

- changes[J]. *EOS Transaction AGU*, 2005, 86(52); *Fall Meeting Supplement, Abstract A43C-0103*, 2005;44.
- [55] Sheng Peixuan, Mao Jietai, Li Jianguo, *et al.* Atmospheric Physics[M]. Beijing: Peking University Press, 2003. [盛裴轩, 毛节泰, 李建国, 等. 大气物理学[M]. 北京: 北京大学出版社, 2003.]
- [56] Wang P K, Grover S N, Pruppacher H R. On the effects of electric charge on the scavenging of aerosol particles by clouds and small raindrops [J]. *Journal of Atmospheric Science*, 1978, 35: 1 735-1 743.
- [57] Grover S N, Beard K V. A numerical determination of the efficiency with which electrically charged cloud drops and small raindrops collide with electrically charged spherical particles at various densities [J]. *Journal of Atmospheric Science*, 1975, 32: 2 156-2 165.
- [58] Grover S N, Pruppacher H R, Hamielec A E. A numerical determination of the efficiency with which spherical aerosol particles collide with spherical water drops due to inertial impaction and phoretic and electrical forces[J]. *Journal of Atmos Science*, 1977, 34: 1 655-1 663.
- [59] Schlamp R J, Grover S N, Pruppacher H R, *et al.* A numerical investigation of the effect of electric charges and vertical external electric fields on the collision efficiency of cloud drops[J]. *Journal of Atmospheric Science*, 1976, 33: 1 747-1 755.
- [60] Tinsley B A, Limin Zhou, Plemmons A S. Changes in scavenging of particles by droplets due to weak electrification in clouds [J]. *Atmospheric Research*, 2006, 79: 266-295.
- [61] Hong Yetang. Progress in study on relationships between solar variability and climate changes [J]. *Advances in Earth Science*, 2000, 15(4): 400-405. [洪业汤. 太阳变化驱动气候变化研究进展[J]. 地球科学进展, 2000, 15(4): 400-405.]
- [62] Hobbs P V, Rangno A L. Ice particle concentrations in clouds [J]. *Journal of Atmospheric Science*, 1985, 42: 2 523-2 549.
- [63] Rangno A L, Hobbs P V. Ice particle concentrations and precipitation development in small polar maritime cumuliform cloud [J]. *Quarterly Journal of Royal Meteorological Society*, 1991, 117: 207-241.
- [64] Zhou Limin, Tinsley B A. The production of space charge in layer clouds [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 112, D11203, doi: 10. 029/2006JD009768.
- [65] Beard K V, H T Ochs III, Twohy C H. Aircraft measurements of high average charges on cloud drops in layer clouds [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31, L14111, doi: 10. 1029/2004GL020465.
- [66] Isral H. Atmospheric Electricity, Vol II, Fields, Charges and Currents [R]. Israel Program for Scientific Translation, US Dept. of Commerce NTIS Doc. , 1973, TT-67-51394/2.
- [67] Li X, Temerin M, Baker D N, *et al.* Quantitative prediction of radiation belt electrons at geostationary orbit based on solar wind measurements [J]. *Geophysical Research Letter*, 2001a, 28: 1 887-1 890.
- [68] Li X, Baker D N, Kanekal S G, *et al.* Long term measurements of radiation belt electrons at geostationary orbit based on solar wind measurements [J]. *Geophysical Research Letter*, 2001b, 28: 3 827-3 830.
- [69] Tinsley B A. On the variability of the stratospheric column resistance in the global electric circuit [J]. *Atmospheric Research*, 2005, 76: 78-94.
- [70] Makino M, Ogawa T. Quantitative estimation of global circuit [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1985, 90 (D4): 5 961-5 966.
- [71] Sapkota B K, Varshneya N C. On the global atmospheric electrical circuit [J]. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 1990, 50: 1-20.
- [72] Tinsley B A, Limin Zhou. Initial results of a global circuit model with stratospheric and tropospheric aerosol [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111, D16205, doi: 10. 029/2005JD006988.
- [73] Yan Muhong, Zhang Yijun. Review of research on atmospheric electric processes and climate change [J]. *Plateau meteorology*, 1996, 15(2): 234-242. [言穆弘, 张义军. 浅论大气电过程与天气气候 [J]. 高原气象, 1996, 15(2): 234-242.]

The Advanced in Mechanism of the Effect of the Solar Activity on the Climate by Space-Weather

ZHOU Li-min^{1,2}, Brian A. Tinsley², ZHENG Xiang-min¹, WANG Shi-jie³

(1. The Key Laboratory for the Geographical Information, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 2. University of Texas at Dallas, Richardson TX 75080, US;

3. State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Chinese Academy of Science, Guiyang 550002, China)

Abstract: Reports of a variety of long-term climatological and short-term meteorological responses to solar activity indicate that solar activity controls these changes. There is the need for the mechanism of effect of solar activity on the climate change. The correlations of various climate and meteorological parameters, such as the cloud cov-

erage, with space weather events due to solar activity, such as the variation of the galactic cosmic ray flux (GCR), on a wide range of time scales have been published. According to these correlations, the mechanism of effect of solar activity on the climate, called spaceweather mechanism, has been suggested, which is including two sub-mechanisms: (1) the ion mediated nuclear formation theory (IMN theory); (2) Spaceweather-global circuit-cloud micro-physics theory (inhereto Tinsley Theory). In this paper we review the progresses of the statistic research on correlation between spaceweather events and meteorological and climatological parameters and the proceeding of the work on mechanism of the space-weather effect theory, which includes the proceeding in the ion mediate nuclei formation theory and the Tinsley theory. Although there are lots of work which have been done in the past ten years and the theories grow fast. However there are still some observation and modeling work need to be improved.

Key words: Solar activity; Climate changes spaceweather mechanism.

《地球科学进展》“973 项目研究进展”专栏公告

1997年6月4日,国家科技领导小组第三次会议决定要制定和实施“国家重点基础研究发展规划”,随后由科技部组织实施了国家重点基础研究发展计划(亦称“973”)。其战略目标是加强原始性创新,在更深的层面和更广泛的领域解决国家经济与社会发展中的重大科学问题,以提高我国自主创新能力和解决重大问题的能力,为国家未来发展提供科学支撑。

自1998年起至2006年,围绕农业、能源、信息、资源环境、人口与健康、材料、综合交叉和重要科学前沿等领域,已先后批准了297个项目,其中资源环境领域有44项,此外,其他方面含有资源环境和全球变化范畴的项目约有28项,合计达72项,占总项目的24.2%。

为了更好地宣传、交流我国“973”原创性项目的研究成果,提升这些项目的科学价值,《地球科学进展》编辑部自2005年第11期开辟“973项目研究进展”专栏以来,到2006年第12期已刊登了13项的15篇综述论文,得到了广大读者的好评和积极关注,普遍认为增进了对“973”项目的了解,有利于项目之间的交流。为此,我们希望继续不断得到广大“973”项目首席科学家的大力支持和踊跃投稿,扩大刊登“973”项目中有关资源环境和全球变化方面的项目介绍、最新研究成果和进展。该专栏文章可包括以下几方面内容:

(1)对已结题的项目,主要围绕该项目取得的研究成果及其应用价值、发展前景、与国际水平的差距等内容。

(2)对正在进行的项目,主要就项目研究的现状、进展、新成果及发展前景等内容。

(3)对刚申请批准的项目,围绕该项目研究的目的、意义、关键科学问题及其要达到的目标等内容。

凡是无项目首席科学家署名的来稿,最好经首席科学家的同意和认可,并签署意见。撰写的文章要求客观、公正、实事求是,内容完整,数据翔实,应有必要的文献、英文文摘等内容。具体格式要求参阅《地球科学进展》的投稿须知。

专栏负责人:林海 教授 联系方式:linhai@mail.nsf.gov.cn; linh@igsnr.ac.cn

编辑部地址:兰州市天水中路8号 730000 电话:0931-4968256

E-mail: adearth@lzb.ac.cn 网址: <http://www.adearth.ac.cn>

投稿时请注明“973项目研究进展”栏目,栏目稿件经审核达到发表要求的将尽快刊出,免收审稿费,酌收一定的版面费并致稿酬,同时免费赠送全年期刊一套(1~12期)。

欢迎从事“973”项目研究的科学家、学者赐稿;谢谢对我们工作的支持和帮助。

《地球科学进展》编辑部

2007年11月