

大气电导率测量技术的发展

刘成, 姜秀杰, 刘波, 罗福山, 石惠

中国科学院空间科学与应用研究中心, 北京 100190

摘要 全球大气电回路与人类活动紧密相关, 而大气电导率是大气电学地球空间电动力学过程的重要参数。1905年 Gerdien 电容电导率仪面世, 之后利用升空气球获得了大气电导率直接探测的数据, 已成为有效的大气探测工具, 应用于探测大气电导率、大气正负电离子浓度、空气气溶胶、大范围地区放射性矿产分布调查等领域。本文综述了大气电导率的应用情况, 描述了大气电导率的概念及其作用, 简要回顾了国际大气电导率测量研究进展, 着重介绍了 Gerdien 电容式电导率仪的原理、发展和实际应用及其发展过程。

关键词 大气电导率; Gerdien 电导率仪; 大气探测

中图分类号 TH765

文献标识码 A

文章编号 1000-7857(2010)17-0095-05

Progress of Atmospheric Electrical Conductivity Measurement Technology

LIU Cheng, JIANG Xiujie, LIU Bo, LUO Fushan, SHI Hui

Center for Space Sciences and Applied Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190

Abstract The global atmospheric electrical circuit is closely related to the human activities, and the electrical conductivity is an essential parameter of the atmosphere electrodynamics. In 1905, the cylinder capacitive conductivity instruments were developed by the Gerdien, and the atmospheric electrical conductivity could be measured in-situ on balloon ascents. From then on, the atmospheric electrical conductivity measurement technology has been developing continually and found wide applications, especially with the development of the microelectronics technology and the atmospheric electricity. Now, the Gerdien conductivity meter has developed into an efficient tool for the atmospheric detection, for atmospheric electric conductivity, concentrations of positive and negative ions, air aerosol, and for the investigation of large-scale distributions of radioactive mineral areas. This paper reviews the atmospheric conductivity measurement, including its applications, concepts and roles, and the international measurement progress of atmospheric conductivity. The measurement principle, improvement, application of the Gerdien condenser is mainly discussed. In China, only a few studies have been carried out in the atmosphere conductivity detection area and much more studies are necessary in the basic electrical parameter detection.

Keywords atmospheric electrical conductivity; Gerdien conductivity meter; atmospheric exploration

0 引言

大气电导率作为电磁场麦克斯韦方程组的基本电参量, 反映地球大气的导电性能, 因此测定大气电导率是研究地球空间电动力学过程的基本问题。空气电离使得大气导电, 在高空电离主要受宇宙射线影响, 在接近陆地表面区域电离的主要来源是放射性矿物和从土壤中释放的放射性气体产生的核辐射^[1]。

20世纪, 对中低层大气的电导率直接测量数据都是利用 Gerdien 电容式电导率仪测得的, 运载工具从气球、发展到飞

机甚至火箭。19世纪末的欧洲, 人造气球即已开始被用于进行大气电学参数测量的科学飞行, 测量参数包括大气电势梯度、电导率、空气和大地间的导电电流^[2-3]。人们利用从 1905—1913 年间的 3 次气球飞行获取的大气电导率数据, 研究出大气电导率剖面的基本模型。20世纪 50 年代, Gish 和 Wait 测量了对流层和同温层的双极性电导率, 给出了拟合公式^[4]。1958 年, Kraakevik 从飞机探测结果中得到了 0.2~6.0km 高度的电导率拟合公式^[5]。随着火箭技术的发展, 1980 年 10 月, 挪威用火箭探测获得 20~120km 高度大气电导率的高度剖面。

收稿日期: 2009-11-11; 修回稿日期: 2010-07-27

作者简介: 刘成, 副研究员, 研究方向为探空火箭、探测仪器, 电子信箱: liucheng@cssar.ac.cn

1982年, Volland 还给出了 200km 以下电导率高度剖面模型^[6]。实际探测数据研究表明, 大气电导率是决定全球电回路的关键参数, 一些研究人员还指出, 大气电导率是决定低空和电离层之间耦合程度的关键^[7]。

大气电导率也广泛应用于各地大气污染程度监测, 宇宙射线、放射性矿物探测等领域。1981年, Wilkening 和 Romero 在美国 Carlsbad 洞窟发现洞内岩石含有高浓度 Rn222^[8], 这里的电导率和离子浓度比常规大气高出 2~3 个数量级。另外, 大气电导率受气溶胶影响显著, 通过探测大气电导率研究城市、海洋、极地的大气环境变化^[9-10]。最近, Nagaraja 等还给出了离子气溶胶模型, 通过测量地面大气电导率检测大气的污染程度^[11-12]。国外对大气电导率测量和模型研究进行了多年系统和全面的探索, 中国在大气电导率领域的探测和研究相对较少, 测量的科学数据还很匮乏。

1 大气电导率概述

通常认为地面空气是绝缘的, 这是由于空气中电离度较弱, 带电离子浓度低。但是在大幅度范围, 空气中客观存在的电离度引起的导电性引起了大气电流, 形成全球大气电回路。从微观角度讲, 电导率是带电粒子浓度与迁移率的乘积。大气电导率随高度变化, 70km 以下, 大气基本是各向同性的, 电导率为标量, 可以表示为^[13]

$$\sigma = \sigma_+ + \sigma_- = n_+ e \bar{\mu}_+ + n_- e \bar{\mu}_- = ne \bar{\mu} \quad (1)$$

其中, σ 为电导率, n_{\pm} 为正负粒子浓度, $\bar{\mu}_{\pm}$ 为正负粒子平均迁移率, e 为粒子带电电荷。从宏观角度来说, 根据欧姆定律, 地面电势梯度 PG 、垂直电流密度 J_z 和大气总电导率 σ 存在以下关系:

$$J_z = \sigma \cdot PG \quad (2)$$

在更高的高度上, 由于电离度增加, 地磁场影响作用加重, 大气电导率呈现出各向异性, 为张量。根据电磁场麦克斯韦方程组可推导出广义的欧姆定律, 其中总电导率包括平行电导率、佩德森电导率和霍耳电导率。

大气电导率不是确定的, 存在日变化、年变化、纬度变化和 一些不规则变化, 还受到太阳活动、火山活动等影响。在交换层中, 电导率的高度分布还受到各种气象条件的影响。因此, 研究人员以晴天大气条件获取的大气电导率测量数据为依据, 着重研究大气电导率高度剖面模型。由于对高空大气难以进行原地的持续测量, 大气电导率的这一关键参数远未完全清楚, 大气电学与天气之间的关系也未完全确定。尽管每次对大气电导率进行的气球或者火箭探测, 总会给地球电学研究带来新的成果和问题。

2 电导率测量技术的发展

2.1 Gerdien 原型

Gerdien 在 1904 年阐述了其设计的排气式圆柱形大气电导率仪, 适用于安装在飞艇和热气球上, 如图 1 所示^[14]。对内

部隔离的电极充电, 由于两电极间气体存在一定的电导率, 构成电回路, 电压降逐渐衰减, 通过测量电流或者电压即可计算得气体的电导率。管的一侧装有风扇, 用于排换电极间的气体, 保持内部气体正负离子浓度的恒定。根据内部电极充电电压的正负, 该设备只能对应测定正离子电导率或者负离子电导率, 可以表示为

$$\sigma_{\pm} = \frac{\epsilon_0 i}{CV_{\pm}} \quad (3)$$

其中, C 为两电极间的电容值, i 为电流值, ϵ_0 为介电常数。并非容器内气体中的所有带电粒子都会影响电导率的测量值, 有些带电粒子快速通过容器, 可能并不能到达电极, 因此不同的 Gerdien 容器都对应于一个临界迁移率, 它由电极间电压、空气流速、电极尺寸等因素决定。若电极电压加高, 空气流速减慢, 让所有经过 Gerdien 容器的带电离子均被电极收集, 则可以确定离子浓度和离子数量。

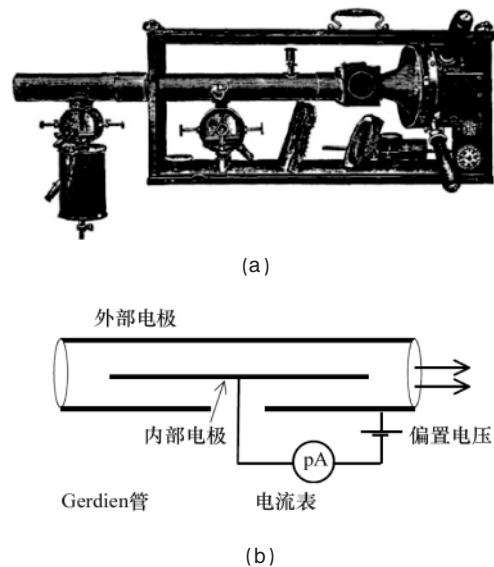


图 1 Gerdien 电导率仪样机 (a) 和原理 (b)
Fig. 1 Prototype (a) and principles (b) of Gerdien conductivity meter

大气电导率值很小, 两电极间的电压也是有限的, 通常电流不足 1pA, 在 20 世纪早期, 利用式 (3) 直接测定电导率并不方便。Gerdien 电导率仪正负电极间放电量很小, 两电极间加压后, 容器可以等效于一个电容器, 其等效原理图如图 2 所示^[15]。

对应的两极间电压随时间衰减公式为

$$V(t) = V_0 \exp\left(-\frac{\sigma t}{\epsilon}\right) \quad (4)$$

通过测定电压随时间的衰减曲线, 即可获取电导率, 对测定的结果进行指数拟合, 决定系数通常大于 0.9。由于大气电导率很低, 电压衰减缓慢, 两电极间电压不用太高, 通常在较长的测定过程中也不用给仪器进行二次加电, 该原理也是早期探测大气电导率采取的普遍方法。但是, 由于该方法需

要的测量时间较长,所以时间分辨率较差。

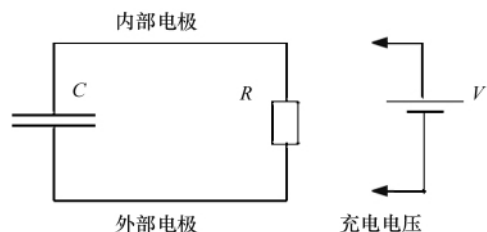


图2 Gerdien 电容式电导率仪的等效原理
Fig. 2 Equivalence principle for Gerdien capacitive conductivity meter

2.2 机载电导率仪

随着飞机等空中运载技术的发展, Gerdien 式电导率仪也得到发展。与汽艇和热气球相比, 机载 Gerdien 电导率仪无需通风扇, 但在结构设计上需要依据飞行速度计算合适尺寸。放射性物质的存在, 会引起大气电导率变化, 研究人员为了调查印度南部西海岸线地区放射性独居石的沉积矿分布情况, 设计安装了飞机上的 Gerdien 电导率仪^[14]。该 Gerdien 电容器驱动电极长 300mm, 直径 65mm, 有一个防护罩管, 尾部被设计用来减小边缘电场。飞机速度可达 80km/h, 电容器无须添加风扇, 但需考虑减少空气阻力, 因此设计电容器的收集极为直径 0.63mm 的铜线, 管壁厚度 1mm, 如图 3 所示。

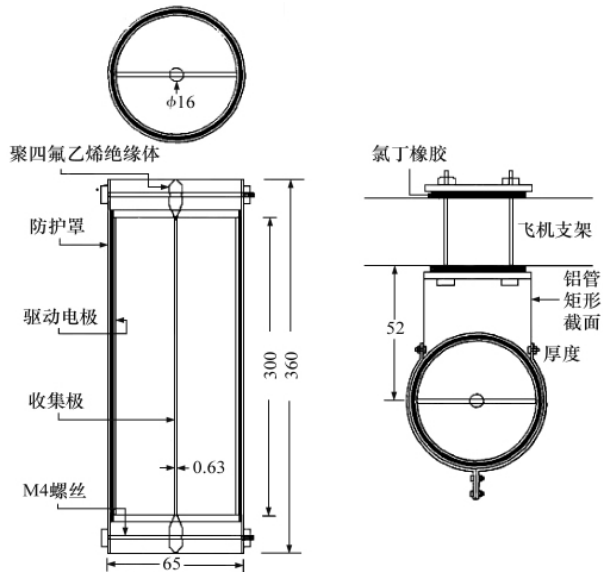


图3 用于测量电导率和放射性矿物关系的大气电导率仪 (单位: mm)
Fig. 3 Device for measuring the relationship between atmospheric conductivity and radioactive minerals (unit: mm)

2.3 正负离子电导率仪

空气中的正负离子浓度能够反映雷电、紫外线、宇宙线照射和地壳上的放射性元素辐射, 也能反映人类生活环境的

空气质量。为了测量空气中的正负离子, 对 Gerdien 电导率仪进行了改进, 最典型的有 U 型 Gerdien 电导率仪, 如图 4 和图 5 所示^[16-17]。U 型 Gerdien 电导率仪 U 型管的两侧圆管内各有一电极, 分别加以正负电压。系统分别扫描两电极, 可分别获得正负离子电导率。1989 年, Dhanorkar 制作的 U 型 Gerdien 电导率仪, 将 2 个管的外部电极加电至 $\pm 35V$, 其临界迁移率大于 $10^{-4}m^2/(V \cdot s)$, 电导率分辨率可达 $3 \times 10^{-16}S/m$ 。

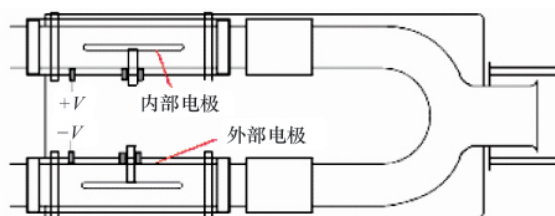


图4 U 型 Gerdien 电导率仪
Fig. 4 U-type Gerdien conductivity meter

图 5 所示电导率仪有 2 个通气管, 外壁分别带正负电荷, 静电计用于探测负极收集的电荷并装化为电压信号, 电路对 2 路信号进行放大并存储在记录器上。该仪器用于测量北极地区大气电导率的高度分布, 测量确定地表至 6km 高度的柱电阻, 并得出负极性电导率与正极性电导率的平均比例为 1.1。

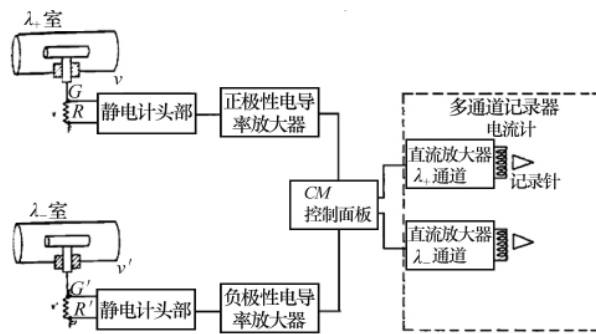


图5 用于测量北极地区大气电导率高度分布的电导率仪
Fig. 5 Device for measuring the conductivity height distribution in the Arctic

2.4 大气离子浓度测量仪

随着 20 世纪 70 年代以集成电路和微处理器为代表的微电子技术的发展, 微弱电流的检测技术也不再是技术瓶颈, 当前 Gerdien 电导率仪更多采用了直接电流检测的方式。通过改变容器的临界迁移率, Gerdien 电导率仪可成为气体离子浓度和离子数量探测仪。

图 6 为可用于离子计数器的大气电导率仪的典型系统结构, 包括 Gerdien 容器、电压发生器、电流放大器、AD 转换器和微控制器, 可连接计算机进行数据处理^[18]。通过调整容器电极电压可以改变容器的临界迁移率和测量的量程。电机电压超过一定值后, 一起可用于测量气体离子浓度。由 Lomas

和 Knight 设计的可测离子浓度的电导率仪,测得的地面大气平均电导率为 $0.5 \times 10^{-14} \text{S/m}$, 电极电压为 20V 时, 电流放大器最小放大电流为 5fA, 离子的平均迁移率为 $1 \text{cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, 可测量到的最低离子浓度为 $20/\text{cm}^3$ 。

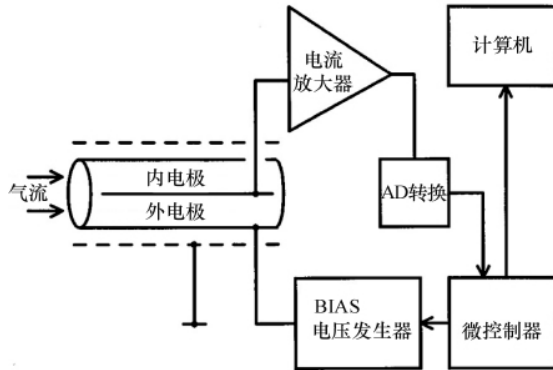


图 6 用于气体离子计数器的电导率仪

Fig. 6 Conductivity meter used for the ion counter

2.5 无线电探空仪

Gerdien 管结合气象无线电探空仪,可同时直接测量大气的多项数据,包括温度、湿度、压力、风速、风向、大气离子浓度和电导率,大大促进对大气电气状态和演化的定量研究。在实际大气探测时,为了同时探测大气电导率和离子浓度通常携带两套电容器,对 Gerdien 容器做简单改变,如变化容器内电极的长度即可改变临界迁移率,而两套电容器的结构和电子电路部分均可保持一致。图 7 是测量云层边界电气参数的无线电探空仪的结构示意图,包括 2 个带风扇的 Gerdien 管和无线气象探空仪。两个 Gerdien 管都用聚苯乙烯块裱起来,尾部各有一台风扇,风扇的通风换气次数约为 2m/s,中央电极通过绝缘措施连接至电路板。探空仪自带降落伞,通过气球送至高空,探测数据通过无线电下传至地面接收设备^[15]。

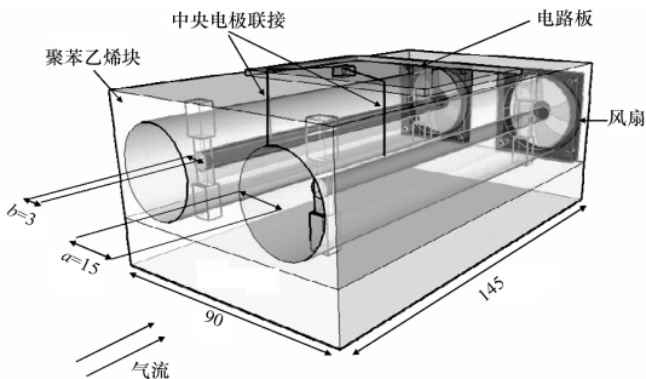


图 7 测量云层边界电气参数的无线电探空仪(单位:mm)

Fig. 7 Radiosonde used for measuring the electrical parameters of the cloud boundaries (unit: mm)

2.6 箭载大气电导率仪

对于 30km 以下高度的大气电导率通常可采用气艇、气球、飞机等运载工具直接测量。对 30km 以上的高层大气甚至电离层电导率的直接测量,通常需采用探空火箭进行搭载测量。相应地,电导率仪需配合火箭做结构的改变,并满足火箭冲击、速度、气压、温度等环境要求。另外, Gerdien 电导率仪需要考虑以下几个重要的问题^[9]。

1) 高层大气稀薄易电离, Gerdien 两电极间的电压容易影响探测气体的离子浓度和电导率,因此电极电压需主动调节变化。一种简单的办法就是在两电极施加周期性的锯齿电压,电压周期性的强弱正负交替变化。

2) 不同高度电导率数值会有数量级的差异,电导率仪的灵敏度需主动调节,而电流放大器模块的增益也需随探测的高度主动变化。

3) 高速运动时 Gerdien 容器中气体流速会对测量造成严重影响。气体通过通气管的速度达到音速时,会在管内产生冲击波,变相地减小通气管的孔径,将严重影响测量精度。

当高度达到 70km 后电导率逐步表现为各向异性,利用现有的探测运载工具进行直接测量比较困难。通常是从粒子平衡方程或是直接从广义的欧姆定律出发,通过其他现有测量技术,如雷达、激光、卫星等技术,测定离子成分、浓度、迁移率、电势梯度等相关参数,构建各种模型以间接获取中高层大气电导率。而在磁层区域,由于离子数密度极低,各离子间碰撞频率很低,基本无碰撞,电导率各向异性,平行电导率为无穷大,佩德森电导率和霍尔电导率近似为零,对电导率的直接测量也就失去了实际意义^[20]。

3 结语

Gerdien 电容式电导率仪器面世已有百年之余,并随着应用处于不断发展改善的过程中:从简单的单极性离子电导率测量发展到双极性离子电导率测量;从电压衰减数据拟合的测量技术发展到增益电压可控的主动测量技术;从单一的电导率测量到结合离子浓度的综合测量;运载工具从气球、气艇发展到飞机、探空火箭。随着材料科学的发展和电子技术的进步,电导率仪有望成为经济的大气探测工具。

大气电导率是地球空间电动力学过程的重要参数,全球大气电路与人类活动紧密相关,大气电学研究是当前世界各航天大国面临的热点课题。中国在大气电导率的探测研究方面相关文献和数据很少,有必要尽快开展大气电导率的探测研究,增强中国在此领域的技术能力。

参考文献 (References)

[1] Bricard J. Action of radioactivity and of pollution upon parameters of atmospheric electricity [C]//Proceedings of the Third International Conference on Atmospheric and Space Electricity. Amsterdam: Elsevier Publishing Company, 1963, 1965.
[2] Venkiteswaran S P, Mani A. Measurements of electrical potential Gradient in the free atmosphere over Poona [J]. *Journal of the*

- Atmospheric Sciences*, 1962, 19: 226–231.
- [3] Harrison R G, Bennett A J. Cosmic ray and air conductivity profiles retrieved from early twentieth century balloon soundings of the lower troposphere [J]. *Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics*, 2007, 69(4–5): 515–527.
- [4] Gish O H, Wait G R. Thunderstorms and the earth's general electrification [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1950, 55(4): 193–203.
- [5] Kraakevik J H. The airborne measurement of atmospheric conductivity[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1958, 63: 161–169.
- [6] Volland H. CRC handbook of atmospheric [M]. Boca Raton, FL: CRC Press Inc, 1982: 65–109.
- [7] Volland H. Electromagnetic coupling between lower and upper atmosphere [J]. *Physica Scripta*, 1987, T18: 287–297.
- [8] Wilkening M, Romero V. 222Rn and atmospheric electrical parameters in the Carlsbad Caverns [J]. *Journal of Geophysical Research*, 1981, 86 (C10): 9911–9916.
- [9] Guo Y, Barthakur N, Bhartendu S. Using atmospheric electrical conductivity as an urban air pollution indicator[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1996, 101(D4): 9197–9203.
- [10] Deshpande C G, Kamra A K. The atmospheric electric conductivity and aerosol measurements during fog over the Indian Ocean[J]. *Atmospheric Research*, 2004, 70(2): 77–87.
- [11] Nagaraja K, Prasad B S N, Datta J. Atmospheric electrical conductivity measurements and modeling for application to air pollution studies[J]. *Advances in Space Research*, 2009, 44(9): 1067–1078.
- [12] Nagaraja K, Prasad B S N, Srinivas N, *et al.* Electrical conductivity near the earth's surface: Ion–aerosol mode [J]. *Journal of Atmospheric and Solar–Terrestrial Physics*, 2006, 68: 757–768.
- [13] Rycroft M J, Harrison R G, Nicoll K A, *et al.* An overview of earth's global electric circuit and atmospheric conductivity [J]. *Space Science Reviews*, 2008, 137(1–4): 83–105.
- [14] Aplin K L. Aspirated capacitor measurements of air conductivity and ion mobility spectra [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, 76(10): 104501.1. 104501.6.
- [15] Sampath S, Sasi Kumar V, Murali Das S. Airborne measurements of atmospheric electrical conductivities [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1994, 143(4): 713–727.
- [16] Nicoll K A, Harrison R G. A double Gerdien instrument for simultaneous bipolar air conductivity measurements on balloon platforms [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2008, doi:10.1063/1.2964927.
- [17] Dhanorkara S, Deshpande C G, Kamra A K. Atmospheric electricity measurements at Pune during the solar eclipse of 18 March 1988 [J]. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, 1989, 51(11–12): 1031–1034.
- [18] Aplin K L, Harrison R G. A computer–controlled Gerdien atmospheric ion counter [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71 (8): 3037–3041.
- [19] Burt D A. The development of a Gerdien condenser for sounding rockets [R]. Accession Number: AD0655808, Fort Belvoir, Virginia: Defense Technical Information Center, 1967(8): 1–55.
- [20] Hoppel W A, Anderson R V, Willett J C. Atmospheric electricity in the planetary boundary layer[M]//US National Research Council, Geophysics Study Committee, American Geophysical Union. The Earth's Electrical Environment, Washington, DC: National Academy Press, 1986: 149–165.

(责任编辑 朱宇)

2010生物质资源化学利用国际学术研讨会

时间: 2010年10月22–26日
地点: 南京

主办单位: 中国林学会

通信地址: 江苏省南京市南京林业大学化工院 (210037)
联系电话: 025–85427396; 传真: 025–85418873
电子信箱: hgwf@njfn.edu.cn