天山乌鲁木齐河源 1号冰川 NH_4^+ 沉积特征研究

王 鹏[1],李忠勤[1,2],张明军[1],李慧林[2],董志文[2],高文华[1]　(1.西北师范大学地理与环境科学学院,甘肃兰州 730070; 2.中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈科学国家重点实验室天山冰川站,甘肃兰州 730000)

摘要　气溶胶和表层雪样品取自 2004年 3月～2005年 3月,取样间隔为 7 d,取样地点在乌鲁木齐河源 1号冰川积累区海拔 4 130 m,对 1号冰川上大气气溶胶中 NH_4^+雪冰沉积与后沉积过程进行分析。结果表明,气溶胶及表层雪中 NH_4^+浓度都存在明显的季节变化规律。春－夏季表层雪和气溶胶中的 NH_4^+浓度表现出线性关系,说明春夏温湿条件有利于 NH_4^+在气－雪之间的交换。在秋冬季节,湿度是 NH_4^+沉积的重要影响因素。气溶胶中与表层雪中 NH_4^+的浓度变化趋势相似,表明大气中 NH_4^+的演化信息可以被很好地保存在冰川表层雪中。此外,讨论了 NH_4^+可能来源。结果表明,人类放牧活动对冰川区中 NH_4^+有重要贡献。

关键词　1号冰川; NH_4^+; 雪冰过程研究; 相关性
中图分类号　P332.8　　文献标识码　A　　文章编号　0517－6611(2010)25－13921－03

Depositional Characteristics of NH_4^+ from Glacier No. 1 at Headwater Urumqi River in Eastern Tianshan, China

WANG Peng et al　(Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou, Gansu 730070)

Abstract　Aerosol and surface snow samples were collected concurrently on a weekly basis from March 2004 to March 2005 in UG1 accumulation zone at the headwaters of the Urumqi River, eastern Tianshan. All samples were analyzed for NH_4^+ and other chemical species. The seasonal variations of NH_4^+ were investigated. A significant linear relationship between NH_4^+ concentration in surface snow and aerosol was found during spring and summer, indicating that the warm-wet condition facilitated the air-snow exchange of NH_4^+. Humidity was found to be a significant meteorological factor influencing NH_4^+ in deposition in autumn and winter. The NH_4^+ concentration in aerosol clearly showed a trend similar to that in surface snow, suggesting that the variation of atmospheric NH_4^+ might have been preserved in the surface snow. The possible source of NH_4^+ was also discussed.

Key words　UG1; NH_4^+; PGPI; Correlation

大气中的气态氨(NH_3)在大气化学中占有重要的地位[1]。大气中包含 NH_4^+的化合物由于转化时间较短,在一个区域降水中的变化情况可以反映该区域氨的来源和沉降强度、传输状况以及以上因素的综合变化[2]。当气态氨被水吸收或者与大气中酸性物质发生反应后就形成 NH_4^+。NH_4^+在雪层与冰芯中表现出较稳定的季节性变化[3]。由于冰芯中 NH_4^+记录对于冰芯定年研究和评价潜在人为影响具有明显优势,已引起人们越来越多的关注[1,3]。NH_4^+经过 2个步骤从大气传输到冰芯中,即由大气沉降进入冰川表面的雪层以及雪层中后沉积过程。由于 NH_3是一种可挥发气体,NH_4^+的沉降过程是可逆的,在大气与雪层之间发生着复杂的交换。为了深入研究山地冰川中 NH_4^+的沉积过程,笔者对 1号冰川 2004年 3月～2005年 3月气溶胶和表层雪中 NH_4^+的特点和变化进行了研究[4－6]。

1　材料与方法

1.1　研究区域概况　1号冰川(43°06′N, 86°49′E)处于天山东部,四周几乎都被沙漠和戈壁包围,东面有蒙古的沙漠和戈壁高原,南面是塔克拉玛干沙漠,西面有萨雷－伊施科特劳等中亚地区的沙漠,北面是古尔班通古特沙漠。因此,总体上 1号冰川地处荒漠环境,植被覆盖面积极小。天山地处欧亚大陆腹地,高空受北半球西风带控制。1号冰川是夏季补给型冰川,其降水主要发生在每年 5～9月,这段时期的降水量占全年降水总量的 88%[7－9]。不仅如此,5～9月也是全年降水频次最高的时期[8]。降水的形式主要是湿雪、雹和霰。

1号冰川位于中亚东天山乌鲁木齐河河源。该冰川所处区域属于典型的大陆性气候,处于西风急流盛行的高山地区。1号冰川由东西 2支朝向东北的山谷冰川组成,面积 1.677 km^2。1959～2003年冰川 0平衡线平均海拔约 4 055 m,年平均降水量东支为 645.8 mm[7－9]。该研究所需的气溶胶和雪样采集于海拔 4 130 m的冰川粒雪盆。该区域位于冬天没有阳光直射的山脊阴影处。1985～2003年该区域的年平均温度和降水量分别为 －9.2 ℃和 700 mm。最大降水量出现在每年 6～9月。在该研究区域,春、夏、秋、冬 4个季节可以依照温度、降水状况分别定为 4～5、6～9、10～11及 12～3月。在 1号冰川周围,只有 1个大型城市和少数的乡镇有工业设施。其中,距离 PGPI研究区东北 105 km是拥有超过 200万人口的新疆维吾尔自治区首府乌鲁木齐市。冰川东北方向 50 km处是坐落在乌鲁木齐河谷中的后峡镇。该镇自 1985年以来建有 2个电厂、1个水泥厂和各种其他工厂。这些近距离城镇的工业生产和居民生活所排放的大气污染物在适宜的条件下可被地方性的环流系统和山谷风携带到 1号冰川。

1.2　研究方法　样品在乌鲁木齐河源 1号冰川 4 130 m取样观测定位场进行采集。连续取样工作已于 2002年 9月 14日开始,频率为 7 d 1次(夏季更加密集),全年度取样。样品采集包括大气气溶胶和用于化学离子分析的雪冰样品。笔者对 2004年 3月～2005年 3月 94个大气气溶胶和表层雪样品的分析结果进行研究。气溶胶样品采集使用的是 Pall Corporation生产的 Zefpur Teflon膜(直径 47 mm,孔径 2 μm)。采样体积用在线体积流量计测量。采样期间,每隔 1 h测量 1次大气压和温度值,用以计算流经滤膜空气的标准

基金项目　国家重点基础研究发展规划(973)项目(2007CB411501);中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX-YW-127);国家自然科学基金项目(40631001, 40571033, 40701034, 40701035, 40121101, J0630966);霍英东教育基金(grants 101019)项目;冰冻圈科学国家重点实验室自主研究课题;教育部新世纪优秀人才支持计划(NCET-10-0019);西北师范大学知识与科技创新工程科研骨干培育项目(NWNU-KJCXGC-03-45);西北师范大学自然地理学省级重点学科资助项目。

作者简介　王鹏(1984－),男,陕西城固人,硕士研究生,研究方向:冰川与全球变化。

收稿日期　2010-05-17

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

体积(标准状态,1.013×10⁵ Pa,0 ℃)。该研究采样时的平均流速为 1.27 m³/h,这种流速使得孔径为 2 μm的 Teflon滤膜对粒径>0.035 μm粒子的收集效率>97%[10]。依据采样时天气状况,每次采样 3~9 h,有降雪时不采样。采样仪器被安置在宽敞平坦且无山脊遮蔽的冰面上(风吹雪影响较小),采样头距冰面 1.5 m。

对样品进行收集和运输的过程中,为了防止污染,严格按照化学样本采集规范进行,包括使用一次性聚乙烯手套,佩戴口罩和清理样本容器等[6]。表层雪样本通常是雪层表面 1~5 cm新雪,其主要成分是春夏季(湿季)降的新雪和秋冬季(干季)零星降水形成的相对老的雪。尽可能地采集新鲜的、保存完好的表层雪(即没有受到像升华或融化这样的后沉积过程影响的雪)。天山地区冬季降雪较少。该季节只对雪层表层 3 cm进行取样。如果恰好在取样前发生降雪,则采集表层 1 cm的新雪作为样品。夏季降水充沛,雪层表面 3~5 cm的雪通常来自于近 2 d的降水,可以取这部分作为样品。雪坑样品在野外保存、运输的过程中或在实验室中都处于冻结条件下,直到分析之前才会将其融化。为了评估气溶胶样品的人为污染情况,对经历过野外操作及未离开过实验室的空白膜进行对比分析,发现在样品采集、运输及接下来的分析过程中,对于样品的污染都是微不足道的。气溶胶和雪坑样品都在天山冰川站使用 Dionex Ion Chromatograph model DX-320进行分析。具体分析过程在 Buck等的研究[11-13]中有较为详细的介绍。

2 结果与分析

2.1 NH_4^+浓度在气溶胶和表层雪中的变化 由图 1可知,气溶胶中,NH_4^+浓度平均值为 5.1 neq/m³,波动范围从仪器检测限到浓度最大值 36.4 neq/m³,表现出明显的季节变化特性。春、夏、秋、冬 NH_4^+平均浓度值分别为 5.4、6.8、5.9和 2.9 neq/m³。可见,平均浓度最高值出现在夏季。然而,由于这个季节的平均浓度相比其他季度偏高,一定程度上受 2004年 6月 11日浓度极高值的影响。根据 Lee等研究[21],乌鲁木齐市的大气污染物可以通过区域环流被带到冰川上,后峡镇工厂排出的污染物也较易沿着乌鲁木齐河谷到达 1号冰川。6月 11日的浓度高值很可能是由一次极端污染事件引起的。2004年 3~6月底表层雪中 NH_4^+浓度持续偏高,其中最高值出现在 2004年 6月 11日。之后从 2004年 7月开始,NH_4^+浓度波动减少并且下降到较低水平。2004年 8~10月,除 2004年 10月 5日出现极低值外,NH_4^+浓度整体相对较高。从整个研究时段来看,表层雪中 NH_4^+浓度水平呈现出明显的季节性变化,其平均浓度在春夏季非常相近,分别为 214.0和 210.4 ng/g,与气溶胶中的季节变化不同,表层雪中 NH_4^+的浓度在秋季最高(平均值 262.8 ng/g),冬季最低(平均值 89.3 ng/g),并且浓度相对稳定。在整个研究时段上,样品浓度平均值为 173.4 ng/g。

国际上开展过针对冰川表面气溶胶中 NH_4^+的研究。与 1号冰川区相比,格陵兰 Summit区域与尼泊尔 Hidden Valley气溶胶中 NH_4^+浓度均较低,平均值分别只有 0.6~1.2和 2.3 neq/m³[14-15]。在南极沿海区域,同样发现气溶胶中浓度最大值出现在夏季,波动范围为 0.7~14.4 neq/m³[16]。

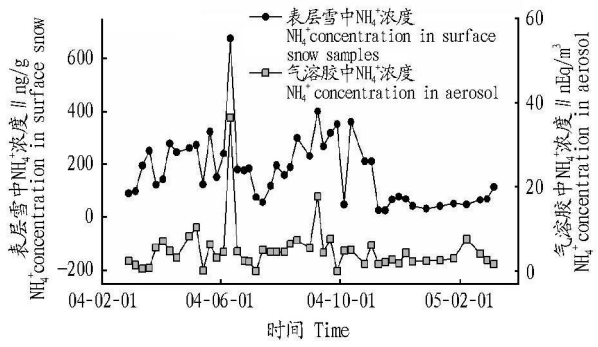

图 1 1号冰川的气溶胶和表层雪样品中的 NH_4^+浓度

Fig.1 NH_4^+ concentrations in aerosol and surface snow samples collected on UG1. The precipitation is included to categorize the dry and wet seasons

在加拿大 Nunavut NH_4^+浓度的平均值为 5.0~6.9 neq/m³,与 1号冰川相近[17]。对比 1号冰川与世界其他区域表层雪样品中所含 NH_4^+浓度,发现 1号冰川上相应浓度明显高于其他区域,约为格陵兰中央区域的 26倍[14]。南极的浓度平均为 18 ng/g,也远低于 1号冰川[18]。从喜马拉雅山收集的表层雪中 NH_4^+浓度平均值相对较高,波动范围从低于检测限到 174.6 ng/g,略低于 1号冰川而高于上述其他区域[15,19]。另外,喜马拉雅山区气温低,冰川上覆雪层所受淋溶作用可忽略不计,因此亦选取临近时段该区域粒雪芯样品与 1号冰川表层雪样品中 NH_4^+浓度进行比较,发现中值浓度为 138.06 ng/g,也明显低于 1号冰川[20]。

降水数据是由距 1号冰川 3 km的大西沟气象站所测得的。2004年 6~8月的降水量超过全年降水量的 80%。相比之下,2004年 3月和 2004年 10月~2005年 2月降水却很少。根据年度降水分布的情况,该研究时段被分为湿季(2004年 4~9月)和干季(其余月份)。

2.2 气溶胶和表层雪中 NH_4^+之间的关系 NH_4^+从大气到冰面的沉积是通过干、湿沉降 2种过程共同实现的。这 2种沉降过程都受气候要素(降水和风等)的明显影响。夏季(湿季)采集的表层雪样品主要是新雪,而冬季(干季)由于降水较少所采的样品相对来说较旧。同样,由于冬季降水少,表层雪因受干沉积、风蚀、升华和凝结等后沉积过程的影响比夏季明显。由图 2可知,湿季(2004年 4~9月)表层雪和气溶胶中的 NH_4^+浓度之间存在显著的线性关系($R^2=0.70$, $N=21$, $P<0.01$),而干季(2004年 10月~2005年 3月)两者的相关性很差($R^2=0.05$, $N=23$, $P<0.01$)。在 1号冰川上曾发现气溶胶和表层雪 NO_3^-浓度之间存在反相关关系[6]。

在春夏季新雪中的 NH_4^+有 2个主要来源:①水汽中本身携带,由远处输送而来的 NH_4^+;②冰川区上空大气中包含的部分 NH_4^+被降水冲刷携带进入雪层。气溶胶和表层雪中的 NH_4^+浓度之间呈良好的相关性,表明气-雪之间的 NH_4^+交换强于降水清除的作用。在春季和夏季,1号冰川上的气候具有降水丰富、高湿度、高气温和消融强烈等特点。在这样的气候条件下,具有很高挥发性的离子(如 NH_4^+)会很快地在雪层与空气之间达到平衡[21-22],使得气溶胶和表层雪样品中 NH_4^+浓度之间表现出 0.05水平显著的相关性。

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

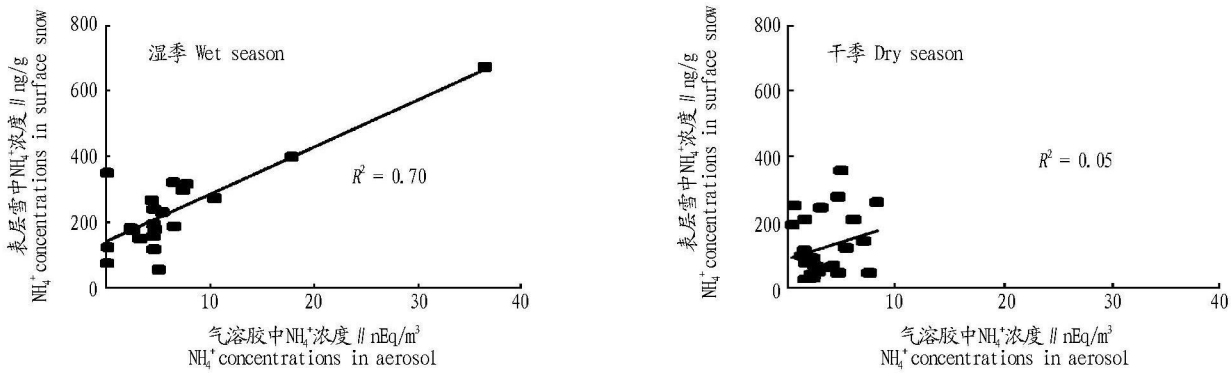

图 2　干季和湿季气溶胶和表层雪中的 NH_4^+ 浓度之间的线性关系

Fig. 2　Linear correlation between aerosol and surface snow NH_4^+ in both wet and dry seasons

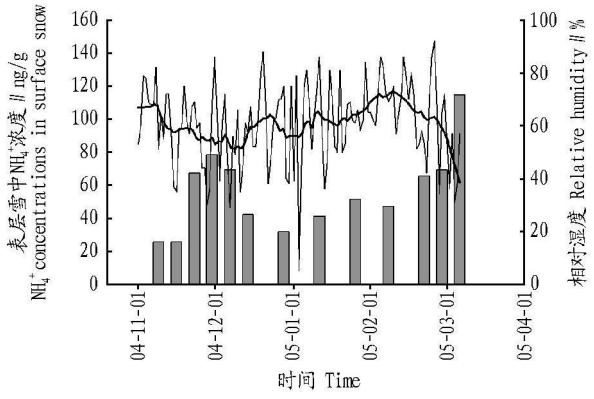

图 3　干季表层雪中的 NH_4^+ 浓度和湿度对比

Fig. 3　Comparison between surface snow NH_4^+ in dry season and humidity

在干季，气溶胶和表层雪中 NH_4^+ 之间关系非常复杂。这是由于气—雪之间未达成平衡及空气中 NH_4^+ 浓度本身存在垂直梯度造成的。为了探寻相关性低的原因，笔者把大西沟气象站的气象数据和表层雪中 NH_4^+ 浓度进行对比。由图 3可知，气温和局地山谷风强度对 NH_4^+ 浓度并没有明显的影响，而 NH_4^+ 浓度与湿度则表现出反相关关系。然而，两者之间存在该种关系的原因尚不明确，需要对此进一步探究。在这种情况下，干季表层雪中的 NH_4^+ 浓度并不能反映大气中的 NH_4^+ 浓度水平。这与有充足降水的湿季的情况是不同的。

由图 1可知，气溶胶和表层雪中的 NH_4^+ 浓度变化趋势相似，表明大气中 NH_4^+ 的变化信息可以被保存在表层雪中。NH_4^+ 的来源是通过研究它在气溶胶和表层雪中的浓度来确定的。由于 NH_3 在大气中的转化周期很短，已有研究认为 NH_4^+ 是一种局地源离子[2]。它主要来源于植物、土壤和动物的生物排放以及生物材料的燃烧（森林和草地火灾）[23]。人为排放的 NH_3 主要来自于化学肥料的使用、禽畜排泄物的生物分解以及能源消耗[24-26]。除能源消耗外，所有的人为来源都呈现出明显季节性，春夏暖季排放相对较强。研究表明，1号冰川上的 NH_4^+ 是通过山谷风从乌鲁木齐和后峡镇来的人为源污染物[4]。同时，1号冰川附近的牧民放牧活动从早春（每年 4~5月）开始，早秋（每年 9月左右）结束。在这 2个时期，成千上万头羊、牛和马匹被驱赶穿过 1号冰川附近的区域，恰好对应大气中 NH_4^+ 浓度的高峰期。因此，放牧活动对研究区中 NH_4^+ 浓度有影响。

3　结论

笔者通过对天山乌鲁木齐河源 1号冰川气溶胶和表层雪样品中 NH_4^+ 浓度的分析，研究了 NH_4^+ 的季节性变化和沉积特征。研究表明，表层雪和气溶胶中 NH_4^+ 浓度的变化趋势相似，在春、夏及秋季具有较高值，低值则出现在冬季。这表现出明显的季节变化规律，反映冰川区自然和人为活动影响的季节差异。2种样品中的 NH_4^+ 浓度值湿季时在 0.01 水平显著线性相关，说明较高的温度、湿度有利于 NH_4^+ 进行气—雪交换；在干季二者的相关性很低，表明湿度可能对干沉积过程存在干扰。与其他区域相比，1号冰川的 NH_4^+ 浓度相对较高。尽管通常 NH_4^+ 主要来源于植物、土壤和动物的生物排放以及生物材料的燃烧，但该研究区域 NH_4^+ 的高积累主要与人类的放牧活动有关。

参考文献

[1] FUHRER K, NEFTEL A, ANKLIN M, et al. High-resolution ammonium ice core record covering a complete glacial-interglacial cycle [J]. Geophys Res, 1996, 101(D2): 4147-4164.
[2] HOU S Q, ND, ZHANG D, et al. A 154 a high-resolution ammonium record from the Rongbuk Glacier, north slope of Mt. Qomolangma (Everest), Tibet-Himal region [J]. Atmos Environ, 2003, 37(5): 721-729.
[3] SIGG A, FUHRER K, ANKLIN M, et al. A continuous analysis technique for trace species in ice cores [J]. Environ Sci Technol, 1994, 28(2): 204-209.
[4] LI Z Q, EDWARDS R, MOSLEY-THOMPSON E, et al. Seasonal variability of ionic concentrations in surface snow and elution processes in snow-firn packs at the PGPI site on Urumqi glacier No. 1, eastern Tien Chan, China [J]. Ann Glaciol, 2006, 43: 250-256.
[5] WANG T, LI Z Q, YOU X N, et al. Seasonal evolution of aerosol stratigraphy in Urumqi glacier No. 1 percolation zone, eastern Tien Shan, China [J]. Ann Glaciol, 2006, 43: 245-249.
[6] ZHAO Z, LI Z, EDWARDS R, et al. Atmosphere-to-snow-to-firn transfer of NO_3^- on Urumqi glacier No. 1, eastern Tien Shan, China [J]. Ann Glaciol, 2006, 43: 239-244.
[7] 王德辉，张丕远. 天山乌鲁木齐河谷气候特征[J]. 冰川冻土，1985, 7(3): 239-248.
[8] 杨大庆，康尔泗，FELIX B. 天山乌鲁木齐河源高山区的降水特征[J]. 冰川冻土，1992, 14(3): 258-266.
[9] 杨大庆，姜彤，张寅生，等. 天山乌鲁木齐河源降水观测误差分析及改正[J]. 冰川冻土，1988, 10(4): 384-399.
[10] LU B Y H, PUI D Y H, RUBOW K L. Characteristics of air sampling filter media[M]//MARPLE V A, LIU B Y H. Aerosols in the mining and industrial work environments, Vol. 3: Instrumentation. Ann Arbor, MI: Ann Arbor Science, 1983: 989-1038.
[11] BUCK C F, MAYEWSKI P A, SPENCER M J, et al. Determination of major ions in snow and ice cores by ion chromatography [J]. Chromatogr, 1992, 594(1/2): 225-228.
[12] WAKE C P, MAYEWSKI P A, WANG P, et al. Anthropogenic sulfate and Asian dust signals in snow from Tien Shan, northwest China [J]. Ann Glaciol, 1992, 16: 45-52.

（下转第 13947页）

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

各级人民政府批建了机构，但仍有少数保护区只挂牌子，没有机构编制，必须尽快健全机构，并且确定固定的事业费来源渠道。同时，应加强自然保护区工作人员的专业教育和业务培训，使他们能更加清楚地理解生物多样性保护的意义。

(2)完善与新建一批风景名胜区和森林公园。充分发挥现有风景名胜区和森林公园就地保护作用的同时，新建一批风景名胜区和森林公园。建立以自然保护区及风景名胜区、森林公园为面，其他自然保护地和保护小区为点，并以林场、湖泊以及林带、河流为保护走廊线，将点、线、面串连起来联网，从而形成安徽省自然保护区综合保护体系。

(3)建立安徽省植物多样性信息和监测网络。生物多样性保护行动的正确决策，必须由高效率的监测网络来提供准确的信息。因此，在安徽全境各保护区与其他保护地建立布局合理的监测网络，采用定位、半定位监测方法，结合地理信息系统(GIS)、遥感系统(RS)和全球定位系统(GPS)等先进监测技术，对安徽的生物多样性状况进行长期动态监测，这是保护生物多样性的重要手段。

(4)加强法制建设和宣传教育工作。我国已相继出台一系列的法规，从而使生物多样性保护有法可依。安徽省应根据自身特点，在这些法规的基础上根据本地的实际情况来制订相应的措施。生物多样性保护问题的根本解决还有赖于公众的积极参与、普及生物多样性保护的知识与意义，使公众自觉参加到保护中来。

参考文献

[1] 曾从盛. 福建典型区生态环境研究[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2006

[2] 张桂宾. 河南省植物多样性研究[J]. 河南大学学报: 自然科学版, 2005, (3): 61-64

[3] 汪权方. 安徽省生物多样性的保护[J]. 国土与自然资源研究, 2000, (3): 56-57

[4] 张慧冲. 安徽国家重点保护野生植物的分布[J]. 黄山高等专科学校学报, 2001, 3(2): 110-113

[5] 中国植物学会. 《国家重点保护植物名录》第一批[J]. 植物杂志, 1994, (5): 4-11

[6] 孙叶根. 安徽种子植物特有属的生物多样保护[J]. 山地研究, 1998, 16(3): 210-214

[7] 汪松, 解焱. 中国物种红色名录(第一卷)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004

[8] 《安徽植被》协作组. 安徽植被[M]. 合肥: 安徽科学技术出版社, 1981

[9] YUE Q N, GE J, WANG L, et al. Genetic diversity in main cultivars of safflower in Xinjiang uigh ur autonomous region based on RAPD analysis[J]. Agricultural Science & Technology, 2008, 9(4): 34-38

[10] ZHAO J F, ZHANG W N, PENG X M, et al. Genetic diversity in wild populations of Poacynum hendersonii from inland arid regions of northwest China[J]. Agricultural Science & Technology, 2008, 9(4): 39-43

[11] BAI X G, CHENG Z Q, LIN Z L, et al. Comparison of genetic diversity between local cultivated Aro-Matic and non-aromatic rice in Yunnan Province[J]. Agricultural Science & Technology, 2009, 10(1): 56-59

(上接第 13923 页)

[13] 赵中平, 李忠勤. 离子色谱法测定大气气溶胶中的可溶性离子[J]. 现代科学仪器, 2004(5): 46-49

[14] SILVENTE E, LEGRAND M. Ammonium to sulphate ratio in aerosol and snow of Greenland and Antarctic regions[J]. Geophys Res Lett, 1993, 20(8): 687-690

[15] SHRESTHA A B, WAKE C, DIBB J. Chemical composition of aerosol and snow in the high Himalaya during the summer monsoon season[J]. Atmos Environ, 1997, 31(17): 2815-2826

[16] LEGRAND M, DUCROZ F M, WAGENBACH D, et al. Ammonium in coastal Antarctic aerosol and snow: role of the polar ocean and penguin emissions[J]. Geophys Res, 1998, 103(D9): 11043-11056

[17] IANNIELLO A, BENE H J, SPARAPANI R, et al. Denuder measurements of gas and aerosol species above Arctic snow surfaces at Alert 2000[J]. Atmos Environ, 2002, 36(34): 5299-5309

[18] DELMAS R, BRIAT M, LEGRAND M. Chemistry of South Polar snow[J]. Geophys Res, 1982, 87(D6): 4314-4318

[19] MAYEWSKI P A, LYONS W B, AHMAD N. Chemical composition of a high altitude fresh snowfall in the Ladakh Himalayas[J]. Geophys Res Lett, 1983, 10(1): 105-108

[20] 王朋岭, 姚檀栋, 田立德, 等. 喜马拉雅山中段达索普最新粒雪芯高分辨率化学记录[J]. 科学通报, 2007, 52(21): 2549-2555

[21] ANDERSEN H V, HOVMAND M F, HUMMELSHØJ P, et al. Measurements of ammonia concentrations, fluxes and dry deposition velocities to a spruce forest 1991-1995[J]. Atmos Environ, 1999, 33(9): 1367-1383

[22] LEE X, QIN D, JIANG G, et al. Atmospheric pollution of a remote area of Tian Shan Mountain: ice core record[J]. Geophys Res, 2003, 108(D14): 4406

[23] ADAMS P J, SEINFELD J H, KOCH D M. Global concentrations of tropospheric sulfate, nitrate and ammonium aerosol simulated in a general circulation model[J]. Geophys Res, 1999, 104(D11): 13791-13823

[24] DAVIDSON C, LIN S, OSBORN J F, et al. Indoor and outdoor air pollution in the Himalayas[J]. Environ Sci Technol, 1986, 20(6): 561-567

[25] BUIJSMAN E, MAAS H F M, ASMAN W A H. Anthropogenic NH_3 emissions in Europe[J]. Atmos Environ, 1987, 21(5): 1009-1022

[26] BOUWMAN A F, LEE D S, ASMAN W A H, et al. A global high-resolution emission inventory for ammonia[J]. Global Biogeochem Cy, 1997, 11(4): 561-587

?1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net