文章编号:1000-0240(2009)05-0896-11

过去1000 a 大气中主要温室气体 冰芯记录研究概述

李传金, 任贾文

(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, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 对南北两极和中低纬度山地冰芯中开展的温室气体的相关研究进行了回顾. 结果显示: 在 1 000 a BP到工业革命阶段,大气中 CO₂, CH₄和 N₂O 等温室气体的浓度及气体稳定同位素受各种自 然来源影响显著,平均含量较低,浓度波动也较小;工业革命之后,随着人类工农业等活动对环境的影响的加剧,大气中 3 种温室气体的含量呈现出剧烈的上升趋势. 2007 年 IPCC 第四次评估报告显示,目前 CO₂、CH₄和 N₂O 气体浓度的全球大气平均含量分别达到 379 mL ° m⁻³、1 774 μ L ° m⁻³ 和 319 μ L ° m⁻³. 对影响工业革命前南极、格陵兰及青藏高原冰芯中温室气体的含量的因素总结发现. 由于 受不同的温度、杂质含量等条件的影响. 温室气体含量区域差异较大. 1800 A. D. 以前,格陵兰冰芯中 CO₂的含量较 南极冰芯高出 9 m L ° m⁻³,青藏高原达索普冰芯 CH₄平均含量较南极和格陵兰冰盖高出 15% ~ 20%,格陵兰冰芯中的 N₂O 含量也明显高于南极冰芯.工业革命以后,冰芯中 3 种气体浓度表现出强烈的上升趋势,并均达到 1000 A. D. 以来的最高值.

关键词: 温室气体; 气体稳定同位素; 过去1 000 a; 冰芯记录; 工业革命; 人类活动 中图分类号: P343.6 文献标识码: A

0 引言

温室气体是大气中的微量成分,其含量均在 400 mL°m⁻³以下,这些气体尽管在大气层中所占 的比例很小,但它们吸收地球向外的红外辐射,其 本身也放出红外辐射,加热对流层大气,对气候变 化有至关重要的影响^[1].近百年来的气候波动特别 是全球变暖引起了人们对自己生存环境的强烈关 注,比较普遍的看法是近百年来全球气温的上升与 大气中温室气体的含量增长具有很强的相关性. CO_2 、 CH_4 和 N_2O 是大气中 3 种重要的温室气体, 由于 CO_2 含量远大于其它温室气体,因此它的温室 效应最大.2007 年 IPCC 第四次评估报告显示^[3], 目前这 3 种气体的全球大气平均含量分别达到 379 mL°m⁻³、1 774 μ L°m⁻³ 和 319 μ L°m⁻³.温室 气体的另一个特性是它们在大气中的生命周期相当 长, CO_2 为 50~200 a, CH_4 为 12~17 a, N_2O 约为 120 a.

大气中各种温室气体的含量与各种自然源的贡献及人类活动的影响密不可分,其中以工业革命为界,这两种主要来源的贡献量有较大变化.工业革命之前,温室气体的含量受各种自然来源的影响较为显著.工业革命以后,由于人类生产和生活活动持续向大气中排放出大量的温室气体,致使这些气体的含量呈快速增加的趋势,并带来的一系列不同程度的影响^[2].过去1000 a是全球变化研究者较为关注的一段时期,它不仅涵盖了工业革命前后这一变化阶段,而且这段时期的地球环境与现在最为相似,对这一阶段气候变化的研究无论是在检测过去、监测现在还是预测未来全球变化方面,都有至关重要的意义.

人类对大气中温室气体的直接监测始于 20 世 纪 60 年代,但对此前大气中温室气体的含量及变 化情况,人们只能通过一些替代指标或通过对保存

收稿日期: 2009-03-16; 修订日期: 2009-06-04

基金项目:科技部支持项目(2006 BA B18B01);中国科学院项目(KZCX3-SW-354);海洋局极地科学考察办公室项目(0852H71001)资助 作者简介:李传金(1981-),男,山东泰安人,2004 年毕业于佳木斯大学,现为中国科学院寒区旱区环境与工程研究所在读博士研究生, 研究方向为冰芯中温室气体及环境. E-mail; chuanjin 1605 @163. com

⁽C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

897

于冰芯中的气体进行分析研究.目前,对包裹于冰 川(冰盖)中气体的提取分析是恢复过去大气组成历 史的最直接、最连续的方法⁴⁴.冰芯对于恢复过去 历史大气的环境信息具有时间序列长,分辨率高等 特点.自从1957—1958年的国际地球物理年在南 极 Byrd 和 Ross 冰架成功钻取第一支冰芯开 始^[5-6],冰芯中包裹气体的研究揭开了序幕.截止 到目前为止,大量的冰芯已经从南极、格陵兰、青 藏高原等地区成功钻取,并应用于或计划应用于大 气温室气体的恢复.已有的研究结果已经将大气组 成的历史记录恢复到 700 ka BP 以前^[7].

冰芯中保存的温室气体记录的质量与研究地点 的温度、降水量、地形等各种环境因素密切相关. 其中,低温无融化事件和合适的地形是获取良好冰 芯记录的首要条件,在此基础上,低降水量可保证 长时间序列冰芯记录的获取,高降水量地区的冰芯 记录的时间分辨率往往较高.因此,受不同的温 度、地形、周围环境及人类活动影响,不同采样地 点冰芯气泡中温室气体的含量、分辨率及受沉积后 过程的影响不尽相同.目前冰芯中气泡气体的良好 记录研究多在两极地区,南极冰盖具有独特的地理 位置及周边环境,低温和降水量少等条件保证了冰 芯中温室气体记录的时间序列较长: 格陵兰冰盖温 度较低,降水量较大,其冰芯记录的分辨率较高, 国际上一些大型的研究计划(EPICA、GISP 等)均 在南极和格陵兰冰盖上进行. 山地冰川由于所处的 结度较低,冰体温度较高,且距离人类活动区近, 对冰芯中保存的温室气体含量有较大影响,难以获 得高质量的温室气体浓度数据. 目前, 只在青藏高 原达索普冰川,祁连山敦德冰川及南美洲 Sajama 冰川上有少量相关研究^[8-10].表1列出了目前对冰 芯中温室气体研究较为深入的几个研究地点[11-48].

冰芯中温室气体获取与冰-气年龄差的确 定方法

自 20 世纪 60 年代初期开始,各国的科学家就 开始对从冰芯气泡中提取温室气体的技术进行探 索.但到目前为止,如何有效的从冰芯中提取痕量 温室气体仍是技术难度较大的一项工作.目前,获 取冰芯中温室气体的方法主要有两种.一种是钻取 冰芯,从固态冰芯中提取并测定气泡中气体含量的 方法;另一种方法是从冰芯钻孔上部未完全封闭的 粒雪层直接抽取气体样品^[45].

冰芯气体分析过程中最重要的一步,目前,国际上 已经形成了针对不同气体成分的两种不同的提取方 法:融化(包括低温升华)和低温粉碎冰芯法,又分 别称作湿提取和干抽提. 前者主要适用于对不溶性 (或溶解度较低)气体如 CH_4 、 N_2O 等的提取分析, 而后者主要应用于溶解度较大和容易受冰芯内杂质 影响的气体成分如 CO_2 等的提取分析,另外,湿提 取方法可以在最大程度上实现全部气体的提取,于 抽提方法提取的气体的量与冰芯的磨碎程度有关, 磨碎程度越低,冰芯中包含的气体越不能有效的释 放. 使用融化-再凝结方法提取冰芯中痕量气体的 方法,首先将冰芯样品在密闭的直空容器中融化, 而后以特殊的方式使融水自容器底部向上层状凝 结,在容器上部获得冰芯气泡中气体,然后打开容 器,用高速载气将气体载入气相色谱分析仪器中进 行分析测定,研究使用的气体提取装置及提取过程 详见文献 491. 干抽提的方法在打开气泡的方法上 有所不同,它是通过将真空容器中的冰芯采取机械 粉碎的方法而使气体释放出来,然后进行含量测 定,对冰芯的机械粉碎方法有球磨粉碎和针阵粉碎 等[22,50-51].

冰芯中气泡的封闭是一个非常缓慢的过程,新 雪降落在冰川表面得以保存,而后在越来越厚的上 覆积雪作用下, 经密实化过程形成冰川冰, 在这一 过程同时、粒雪内的气体也经历了由与大气圈畅 通、阻滞到完全被封闭的过程.因此,同层位冰体 和气泡存在一定的年龄差¹⁵².冰-气年龄差的有效 确定,可以保证从冰芯气泡内恢复古大气成分和痕 量气体时,有精确的时间尺度,但如何有效的确定 年龄差是一项难度较大的工作^[45, 53]. Barnola 等^[54] 以东南极洲 Vostok 站为例, 对这一问题做了较为 深入的研究. Barnola 等^[54] 假设过去的年平均降水 量和年平均气温均未发生变化,则气泡闭合深度为 常量, 取密 度为 $815 \text{ kg} \circ \text{m}^{-3}$ 的冰芯 所处的 深度 (57.2 m)为气泡闭合深度,并假设闭合深度以上的 气泡与大气圈联通,则闭合深度上的气泡与冰体的 年龄差为△t,与闭合深度相关的、过去的年平均积 累速率为 $\lambda(t)$. 由于冰盖表面的积累速率受控于冰 盖上空逆温层内水汽的含量, $\lambda(t)$ 取决于降水形成 时的温度,而这一温度可利用地面温度推算出来, 采用下式则可估算出 Vostok 冰芯的年代:

 $\lambda(t) = \lambda_0 [T_0^2 / T(t)^2] \exp\{273 \mathrm{K} [1 / T_0 - 1 / T(t)]\}$

(C)1994-2019 China Academic butter 泡中气体是 $D_{ublishing}$ House. Alternative Served. T(t)是在时

⁽¹⁾

表 1 南极、格陵兰冰盖及高海拔山地冰川冰芯中温室气体部分研究及时间序列

Table 1 Some CO2, CH4 and N2O studies in Antarctica, Greenland ice sheet, Tibetan Plateau

and South America, their time series, researchers and documents

	温室气体	冰芯钻取点	时间序列	研究者及参考文献
南极	CO ₂	Law Dome	1006—1978 A.D.	Etheridge DM, et al. [11]
		Dronning Maud Land	1000—1800 A.D.	Siegenthaler, et al. [12]
		South pole	约900—1980 A.D.	Siegenthaler, et al. [13]
		Byrd	47~12 ka BP	Blunier, et al. ^[14]
		Dome C	22~10 ka BP	Monnin, et al. ^[15]
			0~10 ka BP	Fluckiger, et al. ^[16]
		Vostok	0~160000 a BP	Barnola, <i>et al</i> . ^[17]
			约 0~270000 a BP	Fischer, et al. ^[18]
			$0 \sim 420000$ a BP	Petit, <i>et al.</i> ^[19]
		Siple station	1744—1953 A.D.	Friedli, et al. ^[20]
			1734—1983 A.D.	Neftel A, et al. ^[21]
		D 57	900—1990 A.D.	Barnola <i>et al</i> . ^[22]
		Taylor Dome	0~11000 a BP	Indermuhle, et al. ^[23]
			60~20 ka BP	Indemuhle, $et al.$ ^[24]
	CH ₄	Law Dome	1008—1980 A.D.	Ethenidge D M, et al. [25]
		Dronning Maud Land	1950—2000 A. D.	BraunlichM, et al. ^[26]
			1820—2001 A.D.	SowersT, <i>et al</i> . ^[27]
		South pole	约1900—1996 A.D.	Battle M, et al. ^[28]
		Byrd	约900—1980 A.D.	Blunier, et al. ^[13]
		Dome C	22~10 ka BP	Monnin, et al. ^[15]
			0 ~ 10k a BP	Fluckiger, et al. ^[16]
		Vostok	0~420000 a BP	Petit, $et al.$ ^[20]
			0~160000 a BP	Chappellaz, et al. ^[29]
			0~350 ka BP	Ruddiman, <i>et al</i> . ^[30]
		Siple	1820—2001 A.D.	Sowers T, <i>et al</i> . ^[27]
			1771—1955 A.D.	Staufer B, et al. ^[31]
		Taylor Dome	0~56.7 ka BP	Brook, <i>et al</i> . ^[32]
	N ₂ O	Law Dome	1520—1966A. D.	Etheridge D M, et al. ^[33]
		Dronning Maud Land	约 1700—2000A. D.	Rock mann T, <i>et a</i> l. ^[34]
		South pole	约1900—1996 A.D	Battle M, $et al.$ ^[28]
			1991—1996 A. D.	Montzka, <i>et al.</i> $[35]$
		Byrd	约 0~32500 a BP	Fluckiger, et al. [36]
			1981—1996 A. D.	Khalil M A K, et al. $[37]$
		Dome C	0~10 ka BP	Fluckiger, <i>et al</i> . ^[16]
		T 7 1	21900~3770 a BP	Zardini D, $et al.$ [38]
		Vostok	131~160 ka BP. ★ µ 0~ 200 aBP	Sowers T, et al. $[19]$
		Taylor Dom e	$0 \sim 10600 \text{ a BP}$	Sowers T, et al. $[40]$
+4 7 =	60	HI5	1/35—1964 A. D.	Machida I, $et al.$ [41]
恰陖二	CO_2	Summit	900—1990 A. D	Barnola J M, et al. $\begin{bmatrix} 22 \\ 4 \end{bmatrix}$
	CH ₄	Camp Century	$1/0 \sim 3140 \text{ a BP}$	Rasmussen, $et al.$ [42]
			0~123000 a BP	Andersen K K, <i>et al.</i> [43]
		Dye 3	0~123000 a BP	Andersen K K, <i>et al.</i> [43]
		Summit	110~140 ka BP	Chappellaz J, et al. ^[44]
			0~210 a BP	Schwander J, et al. ^[45]
	N_2O	Camp Century	1981—1996 A.D.	Khalil MAK, et al. $[37]$
		Dye 3	1781—1941 A.D.	Leuenberger M, et al. ^[46]
		Summit	0~106 ka BP	Sowers T, et al. ^[40]
青藏高原	CH ₄	达索普	0~2000 a BP	徐柏青等 [9];姚檀栋等[47]
		敦德冰川	1280—1965 A.D.	徐柏青等[10]
南美洲℃	O_2, CH_4, N_2O	Saiama 冰川	12~17 ka BP	Campen, et al. $[8]$
1.52000		~ (3.4.1	23050 a BP ~ 1997A . D.	Campen <i>et al.</i> [48]

(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

间 *t* 时逆温层之上的大气温度, 它与其下方冰面上 的气温 *T*₀(*t*)的关系为 *T*(*t*)=0 67*T*₀(*t*)+88.9 ^[55], 式中: *T*₀是现代逆温层的温度(234 K); K 是 常数, 为 22 5145^[54].以上的计算是基于理想状态 的, 但气泡的封闭是一个缓慢的过程, 滞流层的存 在、气泡闭合深度处粒雪密度的不确定性等因素, 都增加了冰-气年龄差估算的复杂性^[52].但近年来, 气体中稳定同位素方法的引进对精确确定冰-气年 龄差有了很大帮助^[53].

在不同研究区域,由于受不同温度、积累量等 环境因素的影响,冰芯中冰-气年龄差相差较大.南 极地区温度低,冰-气年龄差随区域降水量的变化 而变化,变化范围为数十至数千年^[23];格陵兰冰盖 Summit 冰芯气泡封闭深度 65~80 m,冰气年龄差 约为 210 a^[46].青藏高原达索普冰川冰芯气泡封闭 深度 40~47 m,冰-气年龄差约为 59 a^[9].

2 过去 1 000 a 以来冰芯中 CO2记录

南极和格陵兰冰盖是进行冰芯中 CO₂研究最多 的两个地区,南极由于远离其它大陆,周围皆被海 洋包围,且受南极辐合带的环绕,其环境变化主要 与海洋等自然因素影响密切相关.格陵兰冰盖被陆 地和海洋包围,环境变化受陆地植被、海洋等各种 自然因素及人类活动的影响均比较显著,反映了整 个北半球的环境状况.与两极地区冰盖不同,大多 数山地冰川由于温度较高,导致的融化事件对冰芯 气泡中的 CO₂含量有较强的扰动.

图1系南极和格陵兰冰盖冰芯记录的过去 1000 a中 CO2浓度及 CO2中稳定同位素¹³ C 的变 化. 1800 A.D.以前, 南极 Law Dome 冰芯中 CO2 浓度较低,波动也较为平缓.13世纪以前,气泡中 CO2浓度约为 277 mL ° m⁻³, 在随后的近 100 a 里 含量缓慢上升,并在13世纪末期达到一个较高值 (285 mL ° m⁻³); 接下来的一个世纪里, CO2浓度 则持续下降, 14 世纪末期降至 13 世纪前的浓度水 平^[56]. 16-17 世纪是 Law Dome 冰芯中 CO2 浓度 的低值期, 1550 A.D.以后, CO2浓度持续下降了 约6 mL[。]m⁻³,并在 1600 A.D. 左右达到最低值. 这一 CO2 低值阶段和历史时期温度较低的"小冰期 事件 (1300-1850 A.D.)" 在时间上较为一致. 1750-1800 A.D. 冰芯中 CO2的浓度呈现小幅度增 长,可能是由于气候刚从"小冰期事件"中恢复出 来, 植被呼吸作用有所增强的缘故.

在 1800 A.D.以前维持在一较高的含量水平上,且 稍有上升.1600-1800 A.D.为 CO2中 ³³C 含量最 高的时期,此后,其浓度逐渐降低,这一变化在时 间上与"小冰期事件"有很好的同步性^[57].

1800 A. D. 之前格陵兰 Summit 冰芯记录的 CO²浓度与南极冰芯有所不同,前者的平均浓度比 后者高出约 10 mL^{om⁻³},且波动幅度也显著大于 后者. 究其原因,可能是由于两地所处的地理位置 的差异,导致影响二者的环境条件有较大不同. 格 陵兰冰盖温度较高,冰芯中杂质较多,可能是导致 其 CO²的含量高于南极冰盖的主要原因^[2].从 1100 A. D. 的较高值(295 mL^{om⁻³})开始, Summit 冰芯 中 CO²浓度呈现缓慢的波动下降,并在 18 世纪末 降至 280 mL^{om⁻³}左右^[22].

1800 A.D. 以后, 南极和格陵兰冰盖冰芯中 CO₂浓度差值逐渐缩小, 并趋于一致, 且均表现出 强烈的上升趋势. 人类活动对大气中 CO₂含量的显 著影响始于工业革命, 1870 A.D. 之后, 正如两极 冰芯记录所揭示的, 大气中 CO₂含量以越来越高的 增长率在上升. 但 1935—1945 A.D. 间, CO₂含量 增长速率有明显降低, 显示为较稳定的增长趋势, 增长率甚至有所降低. 1945 年后, 冰芯中 CO₂含量 再次开始快速上升^[11], 并呈现线形增长趋势, 到 20 世纪末达到约 335 mL[。]m⁻³, 这一浓度值已是 420 ka BP 以来的最高值^[19].

冰芯记录的最低的大气 CO2含量出现在小冰期 期间,但二者的关系是 CO₂含量的降低导致了全球 气温的下降, 还是 CO₂ 的降低是地球系统的碳循环 对气候变化的反馈结果⁵⁸.大部分科学家们认为, 小冰期的形成是太阳活动、火山活动、温盐环流等 共同影响的结果: 首先, 小冰期处于太阳活动的蒙 德尔极小期,太阳辐射的变化可能对地球气候产生 重大影响⁵⁹;第二,小冰期时地球上经历了几次重 大的火山喷发事件,火山灰可以阻挡太阳辐射.另 外,火山喷发出的硫化物(主要是气态 SO₂)在平流 层中生成的硫酸盐颗粒可以很好的吸收太阳光,从 而降低到达地面的太阳辐射^[60]:第三,小冰期时可 能有大量的淡水注入北大西洋,引起了该地径向大 洋环流的停止,墨西哥暖流北上被阻滞,从而引发 了北半球大尺度区域的降温[61].降温事件引起地 球陆地和海洋系统各种植被呼吸作用的调整,大气 中 CO2浓度随之减少.

植被呼吸作用有所增强的缘故. Vostok 冰芯 CO₂含量与温度的变化关系记录⁶³ 冰芯气体 CO₂ 中稳定同位素¹³ C (δ^{3} C)的含量,与Syktus等⁶³ 的模型模拟结果也均显示,小冰



图 1 两极冰芯记录恢复的过去 1 000 a 大气中 CO₂浓度及 ^{♂3}C 的变化(数据引自文献[11-12, 22, 57] 等) Fig. 1 The concentration variations of the CO₂ and ^{∂3}C in the ice cores from the Antarctica and Greenland ice sheets during the past 1000 years(Data were adapted from the references: [11-12, 22, 57] etc.)

期的发生仅用 CO2含量的降低作为缘由是不充分 的. 模型模拟结果显示, 大气CO2含量降低6 mL。 m⁻³,仅能引起温度下降 0.13 ~ 0 21 ℃. 但小冰期 温度的降幅达 1~2 ℃,因此, CO₂含量的变化不是 引起小冰期降温事件的主要原因. CO2浓度的减 小,可能是大气与海洋及生物圈之间的 CO2交换调 整所致. 第一, 这种调整在时间上具有可能性, 1550-1600 A.D.的 50 a 间 CO2含量下降了 6 mL $^{\circ}m^{-3}$,而从小冰期的最低值恢复到小冰期以前的 水平同样经历了约 50 a 的时间, 在这样或更长的时 间段内,全球大多数海洋混合层与大气交换能够达 到平衡; 第二, 小冰期期间某些过程可以增强海洋 对 CO₂的吸收, 如极区存在的较强的" 溶解度泵" 和 "温盐流",以及较冷的极区海水温度和海冰的扩展 等; 第三, 陆地碳池的变化对小冰期 CO₂的降低也 有所贡献,温度降低引起呼吸作用的衰减,还可以 抵消因光合作用降低引起的陆地生态系统CO2吸收 的减弱^[58].

影响大气中 CO₂的源较多,但工业革命前后不 同来源的贡献量有所不同.工业革命之前,大气中 CO₂受各种自然来源的影响较为显著,如海-陆物质 交换、火山喷发、森林大火、动植物腐烂释放等, 人类活动影响相对较小^[59].工业革命之后,大量化 石燃料的燃烧、水泥等建筑用品的生产排放、地表 植被的破坏、森林的砍伐以及开矿等活动,都直接 或间接的影响了大气中 CO2的含量及 CO2中 d³ C 的变化^[3].

3 过去1000 a 以来冰芯中 CH₄记录

与 CO₂ 不同, CH₄ 在南极、格陵兰冰盖和山地冰 川冰芯中均有良好的记录.图 2 给出了过去1 000 a 以来, 南极、格陵兰冰盖和青藏高原达索普冰芯记录 的大气 CH₄的含量变化. 南极和格陵兰冰盖地区冰 芯记录的 CH₄ 含量差异较小, 而达索普冰芯中 CH₄ 含量较同一时期南极和格陵兰冰芯要高,且浓度波 动范围也较两极地区大,但三者在波动趋势上一致 性较好.从总体趋势上看,18 世纪以前,全球大气中 CH₄气体的平均浓度较低,约为 700 μ L°m⁻³,且浓 度波动小;18 世纪以后,尤其是工业革命以后,伴 随着人类活动对环境影响的加剧,大气中 CH₄ 气体 浓度呈现出一种线性的增长趋势.近一个世纪 以来,大气中 CH₄ 的含量已增加了近1000



(C) 1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights references [9, 26, 64, etc.)

 $\mu L \circ m^{-3[65-66]}$.

工业革命前 1000 A.D.到 1850 A.D., 达索普 冰芯与极地冰芯记录显示大气 CH4 含量在不同地 区出现不同的增长趋势. 格陵兰冰芯记录的北半球 高纬度大气 CH4 含量从1 000 a前约 700 ^µL °m⁻³, 增长到工业革命前的 790 ^μL ° m⁻³, 增幅为 90 $\mu L \circ m^{-3}$. 南极冰芯中 CH4含量表现出同样的趋 势,1 000 a前的含量约为 670 ^μL ° m⁻³,到工业革 命前已增长到 730 ^μL[°] m⁻³, 增幅为 60 ^μL[°] m⁻³. 达索普冰芯 CH4 气体记录则表明, 1000-1850 A. D.中, 虽然大气 CH_4 含量相对于极地冰芯出现较 强烈波动,但仅有轻微的上升趋势,增幅< 50 µL [•] m⁻³. 此现象可能反映出工业革命以前人类活动 对极地大气中 CH4影响较弱⁶⁷,而达索普冰芯记 录的 CH₄含量的变化幅度在工业革命以前 就较两 极地区大,轻微的人类活动的影响叠加并不能左右 其自然变化过程⁶⁸.另外,达索普冰芯与极地冰芯 记录的最显著区别在于增长率的差异。极地冰芯记 录的大气 CH4 含量自 1750 A.D. 左右以越来越高 的增长率上升,而达索普冰芯显示的北半球中低纬 度大气 CH4 含量在 1750-1800 A.D. 期间呈现波 动下降的趋势,1800 A.D.以后又从低值区以较快 的速率上升.

工业革命以后至 19 世纪末期, 南极、格陵兰冰 盖与达索普冰川冰芯中 CH4的浓度差距逐渐缩小, 并趋于一致, 三者均表现出显著的上升趋势. 随后 的100 a 里, 在 20 世纪初期, 达索普冰芯中 CH4浓 度的增长速率明显高于两极地区, 这可能与青藏高 原距离人类活动区更近有关. 此后, 达索普冰芯中 这种高增长率的趋势一直持续到 20 世纪末期, 其 平均浓度比南极冰芯高出 100 //L°m⁻³以上.

大气中 CH₄ 的来源根据稳定碳同位素 (δ^3 CH₄)的浓度可以大致分为 3 大类: 1)生物源,主要 是地壳生物圈中有机物在无氧环境里分解释放,贡 献源主要有湿地(δ^3 CH₄ 含量约为—60‰)反刍动 物和白蚁对食物不完全分解等^[9]; 2)化石燃料的燃 烧.主要是煤、石油和天然气等的燃烧释放,释放 的 δ^3 CH₄的含量约为—40‰; 3)生物质的燃烧,不 同的植物燃烧释放不同含量的 δ^3 CH₄, C₃ 植物燃 烧释放的 δ^3 CH₄ 的含量约为—25‰, C₄ 植物约为 —12 ‰^{64]}.

1000 A.D.至工业革命的时段里,自然源中的 湿地释放是大气中 CH4的主要自然来源(约 75%). 另外,陆地生物不完全分解和煤炭、天然气、火山 等自然气体排放对大气的 CH₄ 含量也有很大贡献, 海洋对大气中 CH₄ 的贡献量比较小(至多 5~10 Tg $^{\circ} a^{-1}$)^[65].冰芯记录显示,工业革命前全新世晚期 (LPIH, Late Preindustrial Holocene,约 0—1700 A.D.), CH₄气体中 33 CH₄在 0—1000 A.D.含量 较高,但在 1000—1700 A.D间 33 CH₄ 含量有显著 的降低趋势,降幅达到约 2[%],但同期大气中 CH₄ 浓度则上升了不少于 55 $^{\mu}$ L $^{\circ}$ m⁻³.最新研究表明, 植物在有氧环境里也可以生产 CH₄,但这种来源对 古大气中 CH₄ 的贡献量还亟待进一步的研究^[12].

工业革命之后,与人类活动有关的各种来源是 大气中甲烷的主要贡献者.生物源主要是水稻田和 食草家畜,非生物源主要为各种生物体的燃烧和石 油、天然气及煤矿的排放.另外,Blunier等^[68]研究 证实,工业革命以后大气中 CH4 的含量波动与世界 人口的数量变化具有很好的一致性.1800 A.D.以 后,大气中 δ^3 CH4 含量也呈现出快速的上升趋势, 至 2000 A.D.大气中 δ^3 CH4 含量已经增至约 -47%、大气中 CH4的清除主要是通过干燥土壤的 吸收和在大气中的氧化,其中与 OH 自由基的反应 损失量可达全部 CH4 的 85% ~90%. CH4和 OH 的反应速率非常慢,反应速率常数与温度有关^[69].

4 过去 1 000 a 以来冰芯中 N₂O 记录

N₂O 是大气中一种重要的温室气体,具有很强的辐射强迫,单个分子的 N₂O 的辐射强迫比单个 CO₂分子强 200~300 倍^[36-37].目前随着全球变暖,提高大气中 N₂O 的地球化学循环的研究有两方面的意义:1)大气 N₂O 含量正以约 0 24 % $^{\circ}a^{-1}$ 的速率快速上升,已经成为仅次于 CO₂、CH₄第三种 重要的温室气体,未来农业生产排放的 N₂O 将会 很大程度上改变地球的辐射;2)N₂O 在平流层的分 解会产生 NO,这种物质对平流层臭氧有很强的破坏作用.

过去的1000 a中,大气中 N₂O 含量的总体变 化趋势与 CH₄相似(图 3),在冷的气候时期浓度的 较低,暖期浓度值较高^[36].但不同时期冰芯的分析 结果相差较大,20世纪 60 年代早期发表的大气中 N₂O 含量值离散度较大,可以粗略的估计浓度的分 布范围约为 260~285 μ L°m⁻³.18 世纪以前格陵兰 Dye3 冰芯中 N₂O 的平均含量为 260 μ L°m⁻³, Summit 的冰芯记录为 270 μ L°m⁻³, 同期来自南极 H15 的冰芯中 N₂O 的平均含量约为 275 μ L°m⁻³⁽⁶⁹,

弓外, 陆地生物不完全分解和煤炭、天然气、火山, **DomeC的平均含量为265**世, [。]m⁻³,考虑到现在



图 3 过去 1000 a 以来两极冰芯中 N 2 O 浓度变化(数据引自文献[16, 41-43, 46] 等)

Fig. 3 The concentration variations of the N₂O in ice cores from the Antarctica and Greenland ice sheets during the past 1000 years (the data was adapted from the references [16, 41-43, 46] etc.)

南、北半球 N₂ O 平均含量梯度仅为约 0.8 μ L。 m⁻³, Fluckiger 等^{36]} 推断在工业革命前1 000 a左 右两半球间的梯度也较小,因此工业革命前南极和 格陵兰冰芯中 N₂ O 含量差异不能仅用半球间梯度 来解释. Leuenberger 等^[70], Khalil 等^{37]} 人认为有 些偏差是由实验分析的系统偏移和冰芯定年的相对 误差造成的. 另外,我们也不能排除格陵兰冰芯杂 质之间进行化学反应产生少量 N₂O 的可能性. 相 关研究已发现格陵兰冰芯中存在杂质之间反应产生 的 CO₂和 CO 气体,且不同层位痕量气体量随杂质 含量的变化而变化.

Khalil 等^[71] 通过对不同时期和不同研究区域 的浓度值进行订正计算,得出一条全球过去1 000 a 大气中 N₂O 平均浓度曲线.曲线显示^[71],工业革 命以前,1000—1750 A.D.间大气中 N₂O 的浓度相 对稳定,平均值为 287.2 μ L^om⁻³,且与该时期的 气候变化相关性较好^[64].与CO₂和 CH₄相似,16— 17 世纪南极 Law Dome 冰芯中 N₂O 的含量也呈现 出明显的低值,1550 A.D.以后,浓度持续降低了 约 5 μ L^om⁻³,并在 1600 A.D.左右达到最低值. 工业革命以后,大气中 N₂O 的含量呈现较为明显 的上升趋势,其中主要影响因素是人类活动.20 世 纪 30—40 年代,第二次世界大战的爆发造成的农 业和工业活动的衰退使大气中 N₂O 含量呈现显著 的下降趋势,这也在极地冰芯中有明显的反映^[71].

工业革命以前大气中 N₂O 的主要来源是热带 地区的土壤、海洋的上涌潮区及温带地区的土壤, 三者的贡献率分别约为 45%、30%和 25%,它们每 年向大气中排放约 11×10^{12} g 的氮(11 Tg N ° a^{-1}).工业革命以后,人类活动包括农业生产、生 物燃料燃烧、工业废气排放等向大气中排放的大量 的 N₂O₁₀2005 年大气中 N₂O 的含量已经达到 319 ${}^{\mu}L^{\circ}m^{-3}$. 另外,冰芯中 N₂O 稳定同位素记录显 示: 1785—1990 A. D. 间,格陵兰 GISP II 冰芯中 N₂O 稳定同位素 δ^5 N 和 δ^8 O 的含量分别为 (-10.1±0.6)%和(-47.4±10)%,这些物质的 含量分别比现代大气高出 19%和2.9%。以上述 冰芯记录作为边界条件,通过简单的两箱大气 N₂O 模型对现代大气 N₂O 含量特征进行模拟,模拟结 果显示在人为释放的N₂O中, δ^5 N 含量介于—7% ~—13%之间, δ^8 O为—17%~—26%。另外,结 果显示人类活动释放的N₂O造成 1995 A.D. 的氮排 放量为 4.2~5.7 Tg N^[34].

大气中N₂O主要的汇是平流层光分解作用、大 气化学反应损失、土壤及沙地表面吸附等^{34,36-37}.

5 结论和未来研究展望

南北两极及高海拔山地冰芯中各种环境记录是 研究过去环境的最有效的手段之一,冰芯记录虽然 不能提供对未来气候变化的精确预测,但可以提供 在过去不同气候条件下地球系统的反应及地球与环 境之间的耦合的信息^[4].对包裹于冰川(冰盖)中气 体的提取分析是恢复过去大气组成历史的最直接、 最连续的方法,且恢复的环境信息具有时间序列 长,分辨率高等特点.这些信息对研究历史时期的 环境变化,尤其是1000 A.D.以来人类活动对环境 扰动增强而导致的气候剧烈波动有重要意义.因 此,加强冰芯中温室气体与历史时期气候变化的相 互关系的研究.对分析现代环境与温室气体含量的 关系、模拟未来气候环境变化的走向等方面均具有 重要意义.

冰芯气泡中气体稳定同位素的含量及变化的研 究可以对古大气中各种温室气体的源和汇进行确 定,同时可以对监测现代大气中各种温室气体的源 和汇提供依据. 冰芯记录的过去1 000 a气体稳定同 位素含量结果显示: 工业革命之前, 人类活动对大 气中温室气体 CO², CH⁴和N²O等含量的贡献相对 自然源要小, 各种自然过程如海一陆物质交换、森 林大火、湿地排放等的贡献占主要部分. 但工业革 命以后, 大气中各种温室气体的含量迅速升高, 其 中的增长很大程度上是由人类活动的影响造成的, 各种化石燃料的燃烧释放、土地利用的改变等的贡 献占相当大的比例.

目前国际上冰芯中温室气体的研究多集中于两 极地区,南极和格陵兰冰盖是研究较为深入,也是 研究成果最多的地区.美国和西方各国在这一方面 的研究起步较早,已经奠定了较为坚实的基础.中 国虽然在此方面起步较晚,研究水平较国外同行还 有较大差距,但随着中国在两极及青藏高原的一系 列研究计划的实施,相信中国在冰芯中温室气体方 面的研究实力会有较大的加强,并很快跻身研究诸 强之列.另外,中国有青藏高原广大冰川分布的优 势,积极探索山地冰芯中温室气体的研究方法,对 加强我国在此方面的研究实力具有重要意义.

随着目前全球气温的升高,全球大部分的冰川 都存在消融的迹象,冷的气候条件下保存在冰芯中 的各种环境指标正受到雪层融水等沉积后过程越来 越强烈的影响^[72-73].因此,抢救尚未有显著消融迹 象的冰盖和冰川上的冰芯资料,是冰川学研究者所 面临的一项挑战.另外,开展有效获取暖气候条件 下极地与山地冰芯中的环境信息的研究,如在受渗 浸影响的冰芯中提取与分析温室气体等各种环境指 标,可以为冰芯中温室气体研究开辟更多道路.

致谢:在本文整个撰写过程中得到了效存德研 究员、侯书贵研究员、段克勤研究员的悉心指导和 斧正;另外还得到秦翔研究员、谢爱红博士、徐建 中博士、 明虎硕士和张宁宁硕士等人的帮助与支 持,在此一并致谢.

参考文献(References):

- Qin Dahe, Ding Yihui, Su Jilan, et al. Climate and Environment Change in China [M]. Beijing: Science Press, 2005: 457-461. [秦大河,丁一汇,苏纪兰,等.中国气候与环境演变 [M].北京:科学出版社, 2005: 457-461.]
- [2] Fluckiger J, Monnin E, Stauffer B, *et al.*, High-resolution Holocene N₂O ice core record and its relationship with CH_4 and CO_2 [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2002, 16(1); 10 -17.

[3] IPCC. Summary for Policymakers of the Synthesis Report of Core Antarctica [J]. Nature 1999, 399: 429-436.
 (c) Core Antarctica [J]. Nature 1999, 399: 429-436.
 (c) 1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Cambridge University Press, 2007: 3-5.

- [4] Ray naud D, Barnola J M, Chappelaz J, et al. The ice record of greenhouse gases: a review in the context of future changes
 [J]. Quaternary Science Reviews, 2000, 19: 9–17.
- [5] Patenaude R W. Deep Core Drilling in Ice, Bad Station, Antarctica [R]. US A my IPRE (CRREL), Technical Report 60 1959.
- [6] Thompson L G, Yao Tandong, Mosley-Thompson E, et al. A high-resolution millennial record of the south Asian monsoon from Himalayan ice cores[J]. Science, 2002, 289: 1916 -1919.
- [7] EPICA Community Members. Eight glacial cycles from an Antarctic ice core[J]. Nature, 2004, 429: 623-628.
- [8] Campen R K, Sowers T, Alley R B. Evidence of microbial consortia metabolizing within a low-latitude mountain glacier
 [J]. Geology, 2003, 31 (3): 231-234.
- [9] Xu Baiqing, Yao Tandong. The variation of the concentration of the atmospheric methane during the past 2000 years recorded by the Dasuopu ice core[J]. Science in China(Series D), 2001, 31(1): 54-58. [徐柏青,姚檀栋.达索普冰芯记录的 过去 2000 年来大气中甲烷浓度的变化[J]. 中国科学(D辑), 2001, 31(1): 54-58.]
- [10] Xu Baiqing Yao Tandong, Tian Lide *et al*. The variation of the methane recorded by the Dunde ice core[J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(23): 2572-2573. [徐柏青,姚檀 栋,田立德,等. 敦德冰芯气泡中记录的甲烷浓度变化[J]. 科学通报, 1998, 43(23): 2572-2573.]
- [11] Etheridge D M, Steele L P, Langenfelds R L, et al. Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO₂ over the last 1000years from air in Antarctic ice and firn[J]. Journal of Geophy sical Research, 1996, 101(D2): 4115-4128.
- [12] Siegenthaler U R S, Monnin E, Kawamura K, et al. Supporting evidence from the EPICA Dronning Maud Land ice core for atmospheric CO₂ changes during the past millennium
 [J]. Tellus, 2005, 57B, 51-57.
- [13] Siegenthaler U, Friedli H, Loetscher H, et al. Stable-isotope ratios and concentration of CO₂ in air from polar ice cores[J]. Annals of Glaciology, 1988, 10: 151-156.
- [14] Blunier T, Chappellaz J, Schwander J, et al. Asynchrony of Antarctic and G reenland climate change during the last glacial period[J]. Nature 1998, 394: 739-743.
- [15] Monnin E, Indermuhle A, Dallenbach A, et al. Atmospheric CO₂ concentrations over the last glacial term ination [J]. Science, 2001, 291: 112-114.
- [16] Fluckiger J, Monnin E, Stauffer B *et al.* High-resolution Holocene N₂O ice core record and its relationship with CH_4 and CO_2 [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2002, 16(1): 10 -1-7.
- [17] Barnola J M, Raynaud D, Korotk evich Y S, et al. Vostok ice core provides 160000-y ear record of atmospheric CO₂[J]. Nature, 1987, 329: 408–414.
- [18] Fischer H, Wahlen M, Smith J, et al. Ice core records of atmospheric CO₂ around the last three glacial terminations[J]. Science, 1999, 283: 1712-1714.
- [19] Petit J R, Jouzel J, Raynaud D, et al. Climate and atmospheric history of the past 420, 000 years from the Vostok Ice Core Antarctica [J]. Nature 1999, 399: 429-436.

the $^{13}\text{C}/\,^{12}\text{C}$ ratio of the atmospheric CO_2in the past two centuries[J] . Nature, 1986, 324; 237–238.

- [21] Neftel A, Moor E, Oeschger H and Stauffer B. Evidence from polar ice cores for the increase in atmospheric CO₂ in the past two centuries [J]. Nature 1985, 315: 45-47.
- [22] Barnola J M, Anklin M, and Porcheron J, et al. CO₂ evolution during the last millennium as recorded by the Antarctic and Greeland ice[J]. Tellus, 1995, 47 B, 264-272.
- [23] Indermuhle A, Stocker T F, Joos F, et al. Holocene carboncycle dynamics based on CO₂ trapped in ice at Taylor Dom & Antarctica[J]. Nature, 1999, **398**: 121-126.
- [24] Indermuhle A, Monnin E, Stauffer B, et al. Atmospheric CO₂ concentration from 60 to 20 kyr BP from the Taylor Dome ice core, Antarctica[J]. Geophysical Research Letters, 2000, 27: 735-738.
- [25] Etheridge D M, Steele L P, Francey R J, et al. Atmospheric methane between 1000 A. D. and present: evidence of anthropogenic emissions and climatic variability[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(D 13): 15979-15993.
- [26] Braunlich M, Aballain O, Thomas M, et al. Changes in the global atmospheric methane budget over the last decades inferred from ¹³C and D isotopic analysis of Antarctic firm air
 [J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106 (D17): 20465-20481.
- [27] Sowers T. Carbon-13 Isotopic Composition of Atmospheric Methanein Firn Air, Siple Dome, Antarctica[R]. Boulder, Colorado USA: National Snow and Ice Data Center, 2007, Digital media.
- [28] Battle M, Bender M, Sowers T, et al. A tmospheric gas concentrations over the past century measured in air from firm at the south pole[J]. Nature, 1996, 383(19): 231-235.
- [29] Chappellaz J, Barnola J M, Raynaud D, et al. Ice-core record of atmospheric methane over the past 160, 000 years[J]. Nature 1990, 345: 127-131.
- [30] Ruddiman W F, and Raymo M E. A methane-based time scale for Vostok ice[J]. Quaternary Science Reviews 2003, 22(2-4): 141-155.
- [31] Stanffer B, Fischer G, Neftel A, et al. Increase of atmospheric methane recorded in Antarctic ice core [J]. Science 1985, 229: 1386-1388.
- [32] Brook E J, Harder S, Severing haus J, et al. On the origin and timing of rapid changes in atmospheric methane during the last glacial period[J]. Global Biogeochemical Cycles 2000, 14 (2): 559-572.
- [33] Etheridge D M, Pearman G I, Desilva F. Atmospheric tracegas variations as revealed by air trapped in an ice core from Law Dome Antarctica[J]. Annals of Glaciology, 1988, 10: 28-33.
- [34] Rockmann T, Kaiser J, Brenninkmeijer C A M. The isotopic fingerprint of the pre-industrial and the anthropogenic N₂O source [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2002, 2: 2021-2043.
- [35] Montzka S A, Bulter J H, Meyers R C, et al. Decline in the tropospheric abundance of halogen from halocarbons: Implications for stratospheric ozone depletion [J]. Science 1996. 272: 1318-1322.
- [36] Fluckiger J, Dallenbach A, Blunier T, *et al.* Variations in at-(C)1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.nd

[J]. Science, 1999, 285, 227-230.

- [37] Khalil M A K, Rasmussen R A and Shearer M J. A tmospheric nitrous oxide: patterns of global change during recent decades and centuries [J]. Chemosphere 2002. 47: 807-821.
- [38] Zardini D, Raynaud D, Schaffe D. N₂O measurements of air extracted from Antarctic ice cores: implications on atmospheric N₂O back to the Last Glacial-Interglacial transition[J]. Journal of Atmospheric Chemistry, 1989, 8: 189-201.
- [39] Sowers T A. The N₂O record spanning the penultimate deglaciation from the Vostok ice core[J]. Journal of Geophysical Research, 2001, 106(D23): 31903-31915.
- [40] Sowers T, Alley R B, Jubenville J. Ice core records of atmospheric N₂O covering the last 106 000 Years [J]. Science, 2003, 301(5635): 945-948.
- [41] Machida T, Nakazawa T, Fuji Y, et al. Increase in the atmospheric nitrous oxide concentration during the last 250 y ears[J]. Geophysical Research Letters, 1995, 22(21): 2921 -2924.
- [42] Rasmussen R A, Khalil M A K. Historical CH₄ record from ice cores at Crete Camp Century, and Byrd Station[C]// Boden T A, Kaiser D P, Sepanski R J, et al. 'Trends '93: A Compendium of Data on Global Change ORNL/CDIAC-65. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, USA, 1994; 239-243.
- [43] Andersen K K, Azuma N, Barnola J M. High-resolution record of Northern Hemisphere climate extending into the last interglacial period[J]. Nature 2004, 431: 147-151.
- [44] Chappellaz J, Brook E, Thomas B, et al. CH₄ and δ¹⁸O of O₂ records from Antarctic and Greenland ice; A clue for stratigraphic disturbance in the bottom part of the Greenland ice core project and the Greenland Ice Sheet Project 2 ice cores
 [J]. Journal of Geophysical Research, 1997, 102 (C12); 26547-26557.
- [45] Schwander J, Barnola J M, Andrie C, et al. The age of the air in the firn and the ice at summit, Greenland[J]. Journal of Geophysical Research, 1993, 98(D2): 2831-2838.
- [46] Leuenberger M, Siegenthaler U. Historical N₂O record from ice cores at Byrd Station and Dye 3[C]//Boden TA, Kaiser DP, Sepanski RJ, et al. Trends '93: A Compendium of Data on Global Change ORNL/CDIAC-65. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN, USA, 1994; 380-384.
- [47] Yao Tandong, Xu Baiqing, Duan Keqin, et al. The record of the temperature and the concentration of the methane recorded by the Dasuopu ice core during the past 2000years[J]. Science in China(Series D), 2002, 32(4): 346-352.[姚檀 栋, 徐柏青, 段克勤,等.青藏高原达索普冰芯 2000 年来温 度与甲烷浓度变化记录[J].中国科学(D辑), 2002, 32(4): 346-352.]
- [48] Campen R K. Measurements of Gases Trapped in a South American Ice Core: Paleoatm ospheric Composition and Inferred Microbial Activity[D]. Master's Thesis, Pennsylvania State University, 2000: 1-146.
- [49] Xu Baiqing, Yao Tandong, Chappellaz J. Extraction and an alysis of the methane trapped in ice core by melting-refreezing method[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2002, 24(2): 116—120. [徐柏青,姚檀栋, Chappellaz J. 融化-再)

24(2): 116-120)]

- [50] Barnola J M, Raynaud D, Neftel A, et al. Comparison of CO₂ measurements by two laboratories on air from bubbles in polar ice[J]. Nature 1983, 303: 410-413.
- [51] Zumbrunn R. Neftel A, Oeschger H. CO_2 measurements on $1 \sim 3$ cm ice samples with an IR laser spectrometer combined with a new dry extraction device [J]. Earth and Planetary Science Letters, 1982, 60: 318–324.
- [52] Qin Dahe. The Physical Processes of the Upper Snow Layer and the Record of the Climate and the Environment on the Antarctica Ice Cap[M]. Beijing: Science Press, 1995; 43-49. [秦大河. 南极冰盖表层雪内的物理过程和现代气候及环境记录[M].北京:科学出版社, 1995; 43-49.].
- [53] Kawamura K, Jeffrey P, Severinghaus S I, et al. Convective mixing of air at four polar sites [J]. Earth and Planetary Science Letters, 2006 (244): 672-682.
- [54] Banolar J M, Pimienta P, Raynaud D, et al. CO₂-climate relationship as deduced from the Vostok ice core: a reexamination based on new measurements and on a reevaluation of the air dating[J]. Tellus, 1991, 19(11): 1125-1127.
- [55] Jouzel J. Merlivat L. Deuterium and oxygen-18 in precipitation: modeling of the isotopic effects during snow formation
 [J]. Journal of Geophysical Research, 1984, 89: 11749-11757.
- [56] Stauffer B. CO₂ Studies[R]. Paper Collection of the Fourth International Seminar on Climate System And Climate Change, E3, 2007, Beijing.
- [57] Francey R J, Allison C E, Etheridge D M, et al. A 1000-year high precision record of δ¹³ C in atmospheric CO₂[J]. Tellus, 1999, **51** B, 170–193.
- [58] Xu Baiqing. M ethane Record in the Dasuopu Ice Core and Its Relationship with Climate Change[D]. Beijing: the Doctoral Thesis of the Graduate University of Chinese Academy of Science 2003. [徐柏青. 青藏高原达索普冰芯甲烷记录及其与 气候变化的关系[D]. 北京:中国科学院研究生院博士论文, 2003.]
- [59] Thomas J C. Causes of Climate Change over the Past 1000 Years [J]. Science, 2000, 289: 270-277.
- [60] Robock A. The "Little Ice Age": Northern Hemisphere average observations and model calculations [J]. Science, 1979, 206(4425): 1402-1404.
- [61] Articles available on line, the website, http://science.nasa. gov/headlines/y2004/05mar_arctic.htm.
- [62] Goreau T J. Balancing atmospheric carbon dioxide[J]. Ambio, 1990, 19: 230-236.

- [63] Skytus J H, Gordon H, Chappellaz J. Sensitivity of a coupled atmosphere-dynamic upper ocean GCM to variations of CO₂, solar constant and orbital forcing[J]. Geophysical Research Letters, 1994, 21: 1599-1602.
- [64] Ferretti D F, Miller J B, White J W C, et al. Unexpected changes to the global methane budget over the past 2000 years
 [J]. Science 2005, 309, 1714-1717.
- [65] Chappellaz J. Methane Studies [R]. Paper Collection of the Fourth International Seminar on Climate System And Climate Change E3, 2007, Beijing.
- [66] Keppler F, Hamilton J T F, Brab M, et al. Methane emissions from terrestrial plants under aerobic conditions[J]. Nature, 2006, 439: 187–191.
- [67] Xu Baiqing, YaoTandong, Liu Xianqin, et al. The record of the atmospheric methane from the ice cores [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, 27(3): 360-366. [徐柏 青 姚檀栋,刘先勤,等. 大气甲烷的冰芯记录[J]. 冰川冻 ± 2005, 27(3): 360-366.]
- [68] Blunier T, Chappellaz J, Schwander J, et al. Atmospheric methane record from a Greenland ice core over the last 1000 y ear[J]. Geophysical Research Letters, 1993, 20 (20): 2219 -2222.
- [69] Machida T, Nakazama T, Fujii Y, et al. Increase in the atmospheric nitrous oxide concentration during the last 250years
 [J]. Geophysical Research Letters, 22(21): 2921-2924.
- [70] Leuenberger M, Siegenthaler U. Ice-age atmospheric concentration of nitrous oxide from an Antarctic ice core[J]. Nature, 1992, 360: 449-451.
- [71] Khalil M A K, Rasmussen R A. Nitrous oxide: trends and global mass balance over the last 3000 years [J]. Annals of Glaciology, 1988, 10: 73-79.
- [72] Li Chuanjin, Li Zhongqin, Wang Feiteng, et al. The comparison of the snow stratigraphic profiles and zones of the Glacier No. 1 in different times[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2007, 29(2): 169-175. [李传金,李忠勤,王飞腾,等. 乌鲁木齐河源1号冰川不同时期雪层剖面及成冰带对比研究[J].冰川冻土,2007, 29(2): 169-175].
- [73] Wang Feieng, Li Zhongqin, You Xiaoni, et al. The observational research of the surface snow turning into ice in the accumulation area of the Glacier No. 1 in the head of the Ürüm qi River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28 (1): 45-53. [王飞腾,李忠勤,尤晓妮,等. 乌鲁木齐河源1号冰川积累区表面雪层演化成冰过程的观测研究[J].冰川冻土, 2006, 28(1): 45-53.]

905

A Review of the Ice Records of the Three Main Greenhouse Gases during the Past 1 000 Years

LI Chuan-jin, REN Jia-wen

(State K ey Laboratory of Cryospheric Sciences, Cold and Arid Regions Environment and Engineering Institute Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract : Extracting and analyzing the greenhouse gases from the ice cores is the most direct and consecutive way to reconstruct the constituent of former atmosphere and the information provided by the gases, which have long time series and high resolution. The variations of the three main greenhouse gases-CO₂, CH₄, N₂O and the main influencing factors can be got by analyzing the records of the three gases in the ice cores from Antarctica, Greenland and the glaciers in the mid-low latitudes areas. During the pre-industrial period, the concentrations of the three gases were mainly controlled by the natural factors, and the average concentrations were low and their fluctuations were small. After the industrial revolution, the concentrations show sharp increasing, accompanied with the increase of the human activities such as the industry, agriculture and etc. In 2006, the IPCC re-

port IV showed that the average concentrations of the three gases in the present atmosphere are 379 ppmv, 1 774 ppbv and 319 ppbv for CO₂, CH₄, N₂O, respectively. Influenced by different temperatures and the concentrations of impurities in the ice cores, the concentrations of the gases varied from place to place. Before 1800 A.D. the average concentration of CO₂ from the Antarctic ice cores was 9 ppmv higher than that from the Greenland, the concentration of CH4 in the ice cores from the Dasuopu glacier in Tibetan Plateau was 15% ~ 20% higher than that from the Greenland and the Antarctica, and the concentration of N2O from the Greenland was also higher than that from the Antarctica. After 1800 A.D., the three gases showed a sharp increasing and reached the maximum during the past 1 000 years.

Key words: Greenhouse gases; stable isotopes; the past 1 000 years; ice core records; industrial revolution; human activities