

目 录

1 为什么研究全球环境问题	(1)
1.1 人类的生存环境	(1)
1.2 人类面临的全球环境问题	(2)
1.3 全球环境问题的特点和本质	(24)
1.4 应对、缓解和解决全球环境问题的 国际努力	(25)
2 地球系统	(27)
2.1 地球系统研究的发展历程	(28)
2.2 地球环境各部分的相互作用	(34)
2.3 地球环境的物质组成	(36)
2.4 地球系统的科学思想	(47)
3 全球变化	(50)
3.1 什么是全球变化	(50)
3.2 十年至百年时间尺度上的全球变 化主要过程和问题	(56)
3.3 全球变化的概念模型	(74)

3.4	气候系统和生物地球化学循环	(76)
4	能量循环和水循环	(88)
4.1	能量循环和水循环在全球变化中的 地位和作用	(89)
4.2	能量循环中的主要过程	(93)
4.3	水循环	(107)
5	全球变化历史点滴	(113)
5.1	地球历史的档案	(114)
5.2	自然环境两个极端: 冰期和间冰 期	(119)
5.3	从全新世暖期到小冰期	(127)
5.4	人类影响强烈的今日世界	(136)
6	气候跃变、混沌和过渡带	(145)
6.1	气候跃变	(145)
6.2	混沌	(150)
6.3	气候和环境变化的敏感带	(155)
7	中国在全球变化中的位置	(160)
7.1	中国生存环境的主要特点	(160)
7.2	中国的全球变化研究面临的特殊科 学问题	(166)
8	未来的全球变化情景推测	(171)
8.1	预测方法	(172)
8.2	未来全球是否变暖	(174)
8.3	其他自然环境变化情景	(185)
8.4	社会经济将受到的影响	(189)

8.5 预测研究中的不确切性	(192)
9 今后全球变化研究重点	(195)
9.1 生物地球化学过程	(196)
9.2 陆地生态与气候的相互作用	(199)
9.3 重温历史	(200)
9.4 地球系统的综合分析和模拟	(203)
9.5 社会、经济影响评估	(207)
9.6 当前全球变化研究中我国面临的 挑战	(209)
主要参考文献	(212)
小词典	(214)

1 为什么研究全球环境问题

1.1 人类的生存环境

人类的生存离不开空气、水、食品和土地。人类希望拥有更美好的生活。

科学研究认为，地球的诞生是四十五亿年前的事情。在形成初期，地球被氢气层包裹着，随后氢气消散，气层中充满氮气和二氧化碳等气体，非常类似于今天观测到的金星大气和火星大气。直到大约 38 亿年前，地球环境才逐渐变得适合生命的产生和生存。根据化石记录推断，最低等的生命形式——单细胞的水生藻类植物，已经在地球上生存了 35 亿年。藻类及以后进化出现的各种植物，通过光合作用，逐渐改变了大气成分，使大气中的二氧化碳气体降低到目前的浓度，约占大气总含量的 0.03% 左右，而氧气则增加到 20% 左右。在漫长

的岁月中，地球环境* 历经了翻天覆地的变化。各种生物在进化过程中自然竞争，保留下来的生物适应了地球环境及其变化，也对地球环境产生影响。

对地球环境最为深远的影响，一是自然界内部各种驱动地球环境演变的因素（即自然驱动力），二是人类出现之后的人类活动。前者是一直存在的，对于后者，仅在近百万年中，人类才出现并不断进化，人类活动开始能够比较显著地改变局地环境也不过在几千年到万年之内。二百多年前的工业革命吹响了人类文明飞跃发展的号角，人类学习、研究和掌握了各种技能，人类的活动才最终成为驱动人类自身生存环境，使其产生变化的一个新动力源。

人类的生存是由生存环境，即地球环境支持的。从系统科学的观点看，人类的生存环境是由大气圈、水圈、冰冻圈、岩石圈和生物圈组成的地球系统，是一个各部分相互作用着的、受到人类活动影响的和处于变化之中的整体。地球系统经历着全球变化过程。这些，是本书将要介绍的内容。

自然的扰动和人类活动带来的扰动，引发了一系列全球环境问题。人类无法回避，也不可能回避。

1.2 人类面临的全球环境问题

当前，全球出现了几个比较重大的环境问题，如全球增暖问题、臭氧洞问题和地表状态变化（如土地荒漠化、大规模毁林

* 这里的“环境”，其含义包括了气候以及一般所说的环境。

等) 引发的土地利用问题等。这几个问题是经常见诸于报端的(至少是科技报纸), 已为人们所注意。还有一个不大见报的问题, 就是大气中的某些成分或温室气体(如二氧化碳、甲烷等)的含量近百年来有了急剧的增加。这些重大问题是彼此相关的, 也都和人类经济建设和生存发展息息相关, 这些问题的出现在一定程度上都和人类活动有关系。

1.2.1 全球增暖问题

80 年代中期, 一批英、美科学家基于大量现代气象台站的观测资料指出了全球变暖趋势。图 1-1 显示出自 1861 年到 1993

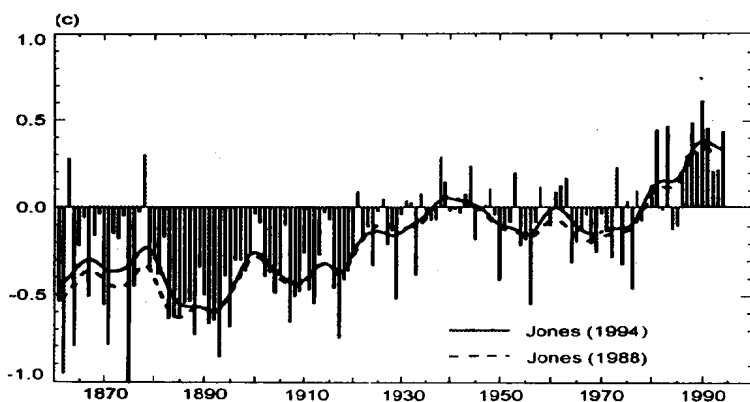


图1-1 1861~1993年全球陆地表面气温和海表温度合成平均的逐年变化

其中直方图给出逐年的全球平均温度, 曲线是其经过滑动平均的结果。实线和虚线分别取自 Jones 在 1994 和 1988 年的文章。图中横坐标为年, 纵坐标为温度距平 (单位 $^{\circ}\text{C}$)。

(引自: IPCC 1995: Climate Change, The Science of Climate Change, Intergovernmental Panel on Climate Change, World Meteorological Organization / United Nations Environment Programme.)

年全球陆地表面气温和海表温度的合成平均的逐年变化，其中直方图给出逐年的全球平均温度，曲线是其经过滑动平均后的结果。显然，温度在上下振荡的过程中逐步升高。图 1-1 是一幅距平图。所谓距平，就是相对于平均状况的偏差。

关于近百年中国温度变化的总趋势见图 1-2。图 1-2 也是一幅距平图，在图 1-2 中我们可以看到，中国大陆的年温度曲线和北半球的年温度曲线的变化趋势是相同的。资料分析表明，中国大陆年平均和季节平均温度自上世纪（19 世纪）末以来总体呈现上升趋势，其中本世纪 40 年代前的上升趋势非常明显，20 年代突然增暖，但自 40 年代起进入一个相对冷期，到了 70 年代

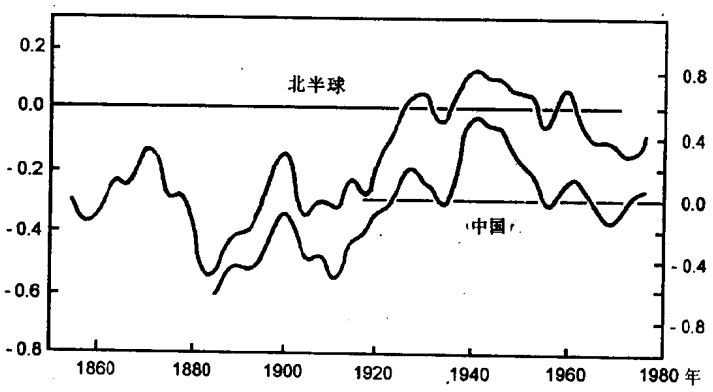


图 1-2 由北半球地面气候温度资料求得的北半球和中国大陆年温度距平曲线

图中横坐标为年，纵坐标为温度距平（单位：℃），其中左侧为北半球气温累积距平，右侧为中国气温累积距平。

（引自：叶笃正、陈泮勤主编，中国的全球变化预研究，第二部分，地震出版社，1992.）

温度又开始回升。

“全球增暖”，是指地球表面平均温度和地表平均气温的升高。全球增暖是就地球环境总体而言的，并不是指全球每个地区都会增暖或每个季节都会增暖。在全球增暖过程中，有些地区的增暖幅度可能大些，有些地区可能小些，有些地区可能不变或者降温。例如，如果用 1960~1990 年的 30 年平均与 1930~1960 年的 30 年平均进行对比，亚洲大部分地区的增暖幅度小于 $0.5\sim 1^{\circ}\text{C}$ 。西伯利亚地区温度升高最为剧烈，超过 1°C ，而中国南部的副热带地区温度却降低了 $0.5\sim 1^{\circ}\text{C}$ 。增暖存在季节特征，表现为冬季增温高，夏季增温低；增暖也有区域特征，表现为北方增温大，南方增温小。

全球增暖既可能带来对人类有利的影响，也可能带来不利的后果。例如，全球增暖将带来气候变迁，原来适宜人类居住的地方，可能会因气候条件的恶化变得不适宜人类居住；同时，原来不适宜人类居住的地方，可能会因气候条件的改善变得适宜人类居住。农牧业生产是人类生存所必需的食物的来源，全球增暖可能会使一部分地区的农牧业产量增加，也可能使另一部分地区的农牧业产量下降。目前，人们还无法确定出定量的全球增暖的前景及其影响，更无法确定确切的区域表现。

全球增暖的原因来自两个方面，即自然原因和人为原因。在自然过程控制下，大气温度是变化的，有的时间段温度高，有的时间段温度低。冷暖变化的时间尺度（或时间段的长短）变化很大，可以从几年到千年万年以上。至于人类活动对于全球范围的环境造成的显著影响，则是近一百多年的事。从图 1-1 可以看出，全球年平均温度变化曲线有两个趋势。其一是短时期的冷暖

摆动，主要是由于自然界过程的影响；其二是近一百多年来的温度上升趋势，人们多归结于人类活动影响（当然不能排除自然因素的作用），特别是近一百多年来人类活动向大气排放了大量的温室气体。

因为温室气体可以影响大气温度，所以大气中温室气体的骤然增加也成为人类极为关心的重大环境问题之一。

1.2.2 大气中温室气体的增加

温室效应一词，形象地借用了人们利用花房温室繁殖花卉、种植农作物的经验。在温室顶棚，覆盖着透明的玻璃或薄膜。太阳光可以透入温室，升高温室内部温度。

后面章节将会谈到，太阳通过短波辐射为地球提供热量，而地球环境以长波辐射向外层空间放出热量，这两个过程使地球表面保持基本常定的平均温度。大气具有类似温室的作用。大气是由许多气体组成的，其中一些气体，如水汽、二氧化碳、甲烷、一氧化二氮等，具有对辐射的选择吸收特征。这种特征表现为能够近似透明或无阻挡地让太阳短波辐射通过大气；但是，对地球向外发射的长波辐射却是半透明的，产生部分吸收。吸收的热量用于再加热大气和地表面。这些气体被称为温室气体。在温室气体中，还有一些大气中本来不存在而是近几十年来人类制造出的新气体，如氟氯烃（CFC-11，CFC-12等）。除水汽外，其他温室气体在大气中占有的比例是非常低的，前面曾经提到二氧化碳只占大气总量的0.03%左右，其他温室气体成分的含量更低。温室气体的大气含量虽然低，但作用却十分显著。温室效应的结果可以使地面温度升高。

在大气温室效应的作用下，地表面具有适于各种生物生存的温度。现在的全球地表年平均温度是 15°C 。经典的辐射研究表明，在假定全球平均反射率 30% 的情况下，如果没有大气，地表温度将比现在低 33°C 左右，只有 -18°C 。由此可见温室气体对于全球温度的重要性。

如果温室效应被加强的话，就可能引发我们十分关心的全球增暖过程。表 1-1 的前四行列出了大气中一些主要的（不是所有的）温室气体在工业革命前和现在（以 1990 年为例）的平均浓度和年平均增长率，这是根据 1990 年政府间气候工作委员会（IPCC）公布的数值作出的。因为缺少准确资料，臭氧未包含在内。虽然在表中工业革命前的温室气体含量用 1750~1800 年的平均浓度表达，但来自各种手段的研究表明，温室气体的大气浓度在工业革命前的很长时间内变化很小，在围绕上述平均浓度的不大范围内变动。但在工业革命之后，数值却急剧增长，甚至是从无到有，这是惊人的。这个事实表明，这些气体的大气浓度的增加，主要来自工业革命后的人类活动（如大量燃煤等）。

表 1-1 中第五行还提供了这些气体的平均寿命，也就是它们的分子在产生后的大气存留时间。这个数字显然很重要，因为气体分子产生之后，如不能在大气中存留很长时间，它们就不会对大气温度有多大影响，而寿命越长，影响也越大。任何一种温室气体的分子在产生之后，其寿命的长短是由多种因素决定的。首先，看它是不是容易和其他化学成分产生化学反应，变成另一种化学物质。再有，它是不是容易被海洋、土壤或植物从大气中吸收（这些地方称为它的汇）；或者，海洋、土壤或植物是不是可以产生它并把它释放到大气中（这些地方称为它的源）；还

有，它在某地产生之后，是否容易被风和海流等带到其他地区或扩散到四周，等等。所以它的寿命是和它所在的全球空间中的循环过程联系在一起的，非常复杂。从表中可以看到，二氧化碳 (CO_2) 的寿命可能最长，达 200 年左右，一氧化二氮 (N_2O) 可达 150 年左右。一旦它们因任何原因（自然原因或人为原因）大量产生并进入大气后，可以影响的时间非常之长。

表 1-1 中还列出增暖潜值。所谓增暖潜值是比照二氧化碳的增暖效果计算的。例如，如果一个二氧化碳分子在 20 年内形成一个单位的增温效果，则一个甲烷 (CH_4) 分子将会造成 63 个单位的增暖效果，一氧化二氮为 270，氟氯烃 (CFCs) 更大，其中 CFC-11 为 4500，CFC-12 为 7100。

表 1-1 人类活动影响下的温室气体

	CO_2	CH_4	CFC-11	CFC-12	N_2O
大气含量单位	ppmv	ppbv	pptv	pptv	ppbv
工业革命前(1750~1800)	280	800	0	0	288
现在(1990)	353	1720	280	484	310
现存的每年变化率	1.8 (0.5%)	0.015 (0.9%)	9.5 (4%)	17 (4%)	0.8 (0.25%)
平均寿命(年)	50~200	10	65	130	150
20 年增暖潜值	1	63	4500	7100	270

CO_2 为二氧化碳， CH_4 为甲烷， N_2O 为一氧化二氮，CFCs 为氟氯烃。气体浓度单位 ppmv、ppbv、pptv 指单位体积内含有 10^6 、 10^9 、 10^{12} 分之一的气体。

(引自: Climate Change, The IPCC Scientific Assessment, Intergovernmental Panel on Climate Change, World Meteorological Organization/ United Nations Environment Programme, 1990.)

从表 1-1 中可以看到，这些温室气体都具有令人警觉的年增长率，而且一氧化二氮、甲烷和氟氯烃的增温潜值极大地高于二氧化碳。虽然现在它们的大气含量是很低的，但因其快速增长率和非常大的增暖效率，应受到人们加倍的重视。

1. 二氧化碳 (CO_2)

度量 CO_2 在大气中的浓度的单位是 ppmv。1ppmv 的全球大气 CO_2 相当于 2.12GtC ($1\text{Gt}=10^9$ 吨， $1\text{GtC}=1\text{Gt}$ 的碳) 或 7.8GtCO_2 ($1\text{GtCO}_2=1\text{Gt}$ 的 CO_2)，工业革命以前的 280ppmv 全球大气 CO_2 含量就对应着 594Gt 的碳，1991 年的 355ppmv 对应着 752.6Gt 的碳。大气中 CO_2 含量在这一段时间内以指数增长的方式增加了 25%。原因主要有两个方面。最主要的是人类社会出于加快工业化进程和发展经济的目的，大量使用各种化石燃料（主要指石油、煤和天然气）。 CO_2 是使用化石燃料工业过程的副产品，这些工业主要包括交通、电力、冷热处理和制造等。其次，毁林和生物物质（如柴草、秸秆等）的燃烧也在人类活动排放的 CO_2 中占有相当大的份额。

从过去的和现在的社会发展看，特别是参照发达国家的发展经历，化石燃料的使用量与工业化程度紧密联系在一起。当前，发达国家对化石燃料的消耗和因此排放的 CO_2 仍然居高不下，一些发展中国家的经济又在高速发展，必然会提高这些国家使用化石燃料和排放 CO_2 的数量。所以从长期来看，全球大气 CO_2 含量仍然会随世界经济的增长而持续增加。

根据 1994 年美国能源部的报告，近 42 年来，全球 CO_2 排放总量（指含碳量）从 1638 百万吨上升到 6188 百万吨，年平均增长率达 6.5%。其中，北美占四分之一。但是，北美地区增长

最快的时期是 70 年代中期之前，以后相对保持稳定。亚洲国家的情形则完全不同。自 70 年代以来，除日本外，排放量都显著增加。至 1990 年，亚洲的 CO_2 总排放量占全球的 25.8%，与北美相当。日本在二战后的 1950~1973 年间，年平均排放增长率是 9.9%，往后，除了在 1990 和 1991 年排放量有增长外，排放总量基本保持不变。人均（按各国的人口平均） CO_2 排放的情形与排放总量则大不相同。人均排放率北美最高，每年 5.2 吨。亚洲相对较低，每年 0.4 吨，是全球平均（每年 1.1 吨）的 $1/4$ ，北美的 $1/13$ 。然而，亚洲的年增长率却最高（4.9%），是全球平均值的两倍（2.2%）、北美的 7 倍（0.7%）。在亚洲国家中，日本的人均排放率最高（每年 2.2 吨），而印度尼西亚有最高的年增长率（8.3%）。国际能源组织（IEA）在 1995 年指出，到 2010 年，全球 CO_2 的排放将比现在增加 30%~42%，增加的大部分将来自发展中国家。

中国的 CO_2 排放，根据估计，以原煤燃烧、原油燃烧、天然气燃烧、工业排放和生物燃烧的方式，在 1988 年分别达到 486.075、109.223、13.413、28.68 和 189.63 百万吨碳，在 2000 年将可能达到 644.286~694.274、168.709~198.562、27.771、63.75 和 224.10 百万吨碳。

2. 一氧化二氮（ N_2O ）

有关研究表明，在 150 年前的过去 3000 年中，大气 N_2O 含量一直稳定在 285ppbv，直到 150 年前才出现了每年 0.2%~0.3% 的增长趋势，1990 年的 N_2O 大气含量达到 310ppbv，比工业革命前期状况的数字高出 8%。目前的全球大气 N_2O 相当于一个 1500Tg N（1Tg = 10^{12} 克 = 10^6 吨，1Tg N = 1Tg 的氮）的

氮库。然而，对 N_2O 的源汇，无论是自然源汇还是人类活动形成的源汇，都缺乏可靠的认识，目前认为人类活动中的 N_2O 释放源主要有化肥使用、毁林（特别是森林变成牧场、农田）、化石燃料和生物物质的燃烧，以及其他农业活动（可加速土壤中 N_2O 的释放）。氮肥的使用是农业丰收的重要保证条件。为了养活全球人口，农业耕作中的氮肥使用量难于降低。另外，通过燃料燃烧和化肥的使用，原来化学性质不活跃的氮化合物可以转变成化学性质活跃的氮氧化物，特别是 N_2O 。

中国的 N_2O 排放，根据估计，以化石燃料燃烧、生物燃烧、化肥生产和土壤排放的方式，在 1988 年达到 0.059~0.132、0.02、0.011 和 0.15 百万吨氮，在 2000 年将可能达到 0.089~0.2、0.035、0.011 和 0.13 百万吨氮。

3. 甲烷 (CH_4)

大气中 CH_4 的含量在以每年 0.8% ~ 1.0% 的速度增加，1990 年 CH_4 的全球大气平均含量是 1720ppbv，比 1978 年的 1520ppbv 增长了 12%，比工业革命前期的 800ppbv 翻了一番。

目前，甲烷的自然源（如沼泽等天然湿地）排放量不到其总排放量的 25%。甲烷排放的三个主要的人为源是：稻田、家畜和燃煤。根据美国环境保护署 1990 年的报告，甲烷的人为排放中居世界前三位的是：稻田排放——印度、中国和孟加拉国；家畜排放——印度、前苏联和巴西；燃煤排放——美国、前苏联和中国。可见亚洲在甲烷的人为排放中占很重要的位置。八个亚洲国家（印度、中国、孟加拉国、印度尼西亚、泰国、越南、缅甸和日本）的水稻面积占全世界的 87%，亚洲是稻田甲烷最主要的排放源。

中国的 CH_4 排放, 根据估计, 以水稻田、工业排放和反刍动物反刍的方式, 在 1988 年达到 23.00、1.22 和 1.9 百万吨, 在 2000 年将可能达到 23.00、1.6 和 6.1 百万吨。

4. 氟氯烃 (CFCs)

自然界中原本不存在 CFCs, CFCs 完全属于人工合成物质。CFCs 是一个家族, 其中应用最多的是 CFC-11 和 CFC-12。在本世纪 20 年代, CFCs 被合成成功, 广泛使用于清洁溶剂、发泡剂、制冷剂 and 灭火剂等的制造。

在 50 年代以前, CFCs 尚未被投入广泛的商业使用, 因此大气中的 CFCs 含量是很低的。但自从商业使用开始后, CFCs 的制造和使用的增长极快。全世界大约 85% 的 CFCs 在使用后被排放到大气中。1990 年以前的 15 年中, CFC-11 的年全球排放量约为 25 万到 40 万吨, CFC-12 的年全球排放量在 35 万到 50 万吨。另外, 1975 年至 1990 年的 CFC-113 年生产量达到 30 万吨。据估计, 从 70 年代中期开始, 每年大约有 100 万吨的各类 CFCs 产品被排放进入大气。到 80 年代中期, CFCs 的制造量显著增加。

中国的 CFCs 排放, 根据估计, 以 CFC-11、CFC-12 和 CFC-113 的方式, 在 1989 年达到 5.5、14.0 和 1.5 千吨。

CFCs 的大气温室效应的能力是非常高的。在表 1-1 中可以看到, 增加一个 CFC-11 分子产生的增温效果, 相当于增加 4500 个 CO_2 分子; 增加一个 CFC-12 分子产生的增温效果, 相当于增加 7100 个 CO_2 分子。所以虽然 CFCs 绝对排放量比 CO_2 的排放量小得多, 对大气温室效应的贡献依然是不容忽视的。

5. 硫化物

除上述温室气体外，大气中还有气溶胶对大气的温室效应产生影响。气溶胶是悬浮在大气中的微小粒子，由许多物质组成，并有不同的粒子大小。有些气溶胶可起增暖作用，但总的来说，气溶胶是起降温作用。气溶胶的来源是多种多样的，例如，火山爆发就可以向大气喷放大量的气溶胶。硫化物是构成大气气溶胶的重要物质之一，人类以各种燃烧过程向大气中排放了大量的硫化物。

本世纪内硫化物的排放增加极为显著。全球每年的二氧化硫(SO_2)的人为排放已从1860年的不足 3Tg S ($1\text{Tg S}=10^6$ 吨的硫)、1900年的 15Tg S 、1940年的 40Tg S 增长到1980年的 80Tg S 。在欧洲和北美这些高度工业化地区，人为 SO_2 排放比自然排放高出10倍甚至更多。

硫化物气溶胶的大气存留时间很短，多集中在产地，因此难于形成比较均匀的全球分布。但硫化物气溶胶的局地影响非常显著，主要集中在工业化程度高和化石燃料消耗大的地区。

从上面的介绍可以看到，温室气体的作用可使大气增暖，而气溶胶的作用是使大气降温，二者作用相反。根据理论分析，二者作用的总和是使大气增温。近一百多年来，大气温室气体的大量增加是否已造成全球增暖了呢？从图1-1看，观测表明，1880年以来整个北半球的平均气温升高了约 $0.3\sim 0.6^\circ\text{C}$ 。分析表明，北半球大陆地区平均气温每百年增温约 0.45°C ，海洋上的平均气温每百年增温约 0.3°C 。但是，这仍然不能说明大幅度的全球增暖过程就是温室气体增加的结果。前面我们已指出，自然界在长时期的历史演变中，大气温度是存在冷暖变化的。一百年中增加的 $0.3\sim 0.6^\circ\text{C}$ 仍然处在近万年来地球表面温度变化的幅