

- sludge. *Chemosphere*, 1995, 31: 3 617 ~ 3 625
- 65 Hilarides R J, Gray K A, Guzzetta J, et al. Feasibility, system design, and economic evaluation of radiolytic degradation of 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin on soil. *Water Environ Res*, 1996, 66: 178 ~ 187
- 66 Oku A, Tomari K, Kamada T, et al. Destruction of PCDDs and PCDFs: a convenient method using alkalimetal hydroxide in 1,3-dimethyl-2-imidazolidinone(DMI). *Chemosphere*, 1995, 31: 3 873 ~ 3 878

(1998-07-01 收稿, 1998-09-11 收修改稿)

全球变化研究十年新进展

张志强 孙成权

(中国科学院资源环境科学信息中心, 兰州 730000)

摘要 在简述国际全球变化研究计划体系的基础上, 从全球气候变化研究、全球生态系统变化(地圈和生物圈变化)研究、全球变化对人类的影响研究、人类减缓全球变化的策略研究等4个方面概括总结了国际全球变化研究的若干重要进展, 并涉及到了我国在有关领域的研究情况。最后特别指出了全球变化科学是可持续发展的科学依据, 全球变化科学研究在人类的发展观从工业文明的发展观向生态文明的发展观的转变中、在环境安全保护与环境外交中都具有重要的作用。

关键词 全球变化研究 全球气候变化 全球生态系统变化 人类生存环境 可持续发展

全球变化研究是从80年代初开始提出、规划, 并从80年代中后期陆续开始实施的。国际科学界现已组织了4个大型全球变化研究计划^[1~4]: (i) 世界气候研究计划(WCRP); (ii) 国际地圈生物圈计划(IGBP); (iii) 全球环境变化的人类因素计划(IHDP); (iv) 生物多样性计划(DIVERSITAS), 分别研究物理气候系统、调节地球系统的物理-化学-生物相互作用过程、环境变化的人类因素(人类社会与环境的相互作用)以及养育人类社会的生物多样性等4个方面。这些大型研究计划既相对独立、又相互补充, 各自又有若干个核心研究计划, 构成了国际全球变化研究的计划体系。

WCRP计划的目标是深化对气候、气候变迁以及引起气候变化的机制的认识, 探索气候的可预报性及人类对气候的影响程度。其重点是研究全球大气、海洋、大陆冰盖、陆面等组成地球的物理气候系统的主要组成部分^[3]。WCRP现包括热带海洋和全球大气(TOGA)计划、世界大洋环流试验(WOCE)、全球能量与水循环试验(GEWEX)、平流层过程及其在气候中的作用(SPARC)、北极气候系统研究(ACSYS)和气候变率及其可预报性(CLIVAR)等核心计划。IGBP是ICSU于1986年制定并逐步完善和发展的, 从90年代初陆续开始实施的重点研究地圈、生物圈相互作用的国际合作研究计划, 其目标是“描述和认识控制整个地球系统的、相互作用着的物理-化学-生物学过程; 描述和了解支持生命的独特环境; 描述和理解发生在该系统中的变化以及人类活动对它们的影响方式。”IGBP现包括国际全球大气化学(IGAC)、全球大洋通量联合研究(JGOFS)、海岸带陆地海洋相互作用(LOICZ)、水循环的生物圈方面(BAHC)、全球变化与陆地生态系统(GCTE)、过去的全球变化(PAGES)、土地利用与土地覆盖变化(LUCC)和全球

海洋生态系统动力学(GLOBEC)计划等一系列专门研究地球系统的重要子系统的核心计划,以及全球分析、解释与建模(GAIM)、数据与信息系统(IGBP-DIS)、全球变化的分析、研究和培训系统(START)等三项框架性的计划^[1-5]。

国际全球变化研究从其组织框架、计划制定到实施已形成了一套有机的完整的框架体系,整体推动着全球变化研究的深入开展^[1]。全球变化研究已经成为迄今国际科学界和政治界极为关注、参与的科研人员多、涉及的学科领域广、国际合作最为密切、跨学科综合研究的要求高、影响广泛的跨世纪重大研究主题^[1-5],国际范围内的全球变化研究方兴未艾。本文概要性地总结并评述了国际全球变化研究实施10余年所取得的若干重要进展,并阐述了全球变化科学研究在人类社会的可持续发展中的重要地位与作用。

1 全球气候变化研究若干进展

1.1 数千年至数万年时间尺度的气候变化

近30余年来,国际上在地球古气候研究方面取得了重大进展。可提取用于重建古气候和古环境的代用资料的信息来源有树木年轮、冰芯、黄土、湖泊沉积、古植被、孢粉、深海沉积岩芯、珊瑚、古土壤、历史记录等,其中冰芯记录具有保真性强(低温环境)、高分辨率、长时间尺度和多种指示环境信息的功能而在过去全球变化研究中占有优势。

(1)1966年美国、丹麦合作在格陵兰西北部世纪营地(Camp Century)首次钻取了一支1388m的长冰芯,估计其底部年龄为100 ka左右^[6]。90年代初,欧共体和美国在格陵兰冰盖中央分别实施了冰芯钻取计划,即欧洲格陵兰冰芯计划(GRIP)和第2次格陵兰冰盖计划(GISP2)。俄、法科学家于80年代开始在南极东方站钻取了160 ka的未受冰流扰动的冰芯记录;后有美国科学家参与,取得了300 ka年的记录^[6]。1989~1990年中国科学家通过国际横穿南极考察,实施了国际南极冰芯研究中的首次大范围浅冰芯研究^[7]。另外,美国科学家1983年在秘鲁安第斯山脉 Quelccaya 冰帽、中美科学家合作于1987和1992年分别在青藏高原的祁连山敦德冰帽及西昆仑山古里雅冰帽等中、低纬度山地钻取了冰芯^[6,8,9]。冰芯研究至今只有30余年的历史,但冰芯研究极大地丰富了气候与环境变化的研究内容,取得了许多重要成果。

冰芯研究结果已经突破了第四纪时期有4次冰期的传统认识,认为第四纪时期出现过多次冰期间冰期交替。关于冰期-间冰期长周期气候变化的主要驱动力的传统认识为天文因素,即地球公转轨道参数的变化(米兰柯维奇理论)。

末次冰期-间冰期的气候呈现极不稳定且多突变(跳变)的现象^[10,11]。气候记录揭示出末次间冰期以来的气候变化很难用天文气候的理论(米兰柯维奇理论)来解释,其特点是气候以短周期跳变,这种跳变被称为间阶段(interstadial),其持续时间一般为数千年,以快速变暖、缓慢变冷和最后极快速变冷为特征。目前已划分出了16个类似期限和型式的跳变旋回,称为Dansgaard-Oeschger(DO)气候快速振荡旋回事件^[10],BOA(Bolling-Allerod)暖期-YD(新仙女木)冷期旋回是DO旋回的最后一次。另外,在大西洋沉积物中还发现了末次冰期中的6次Heinrich事件(北大西洋浮冰沉积层)^[12,13]。

YD事件、DO气候快速振荡事件及Heinrich事件等短周期(相对于天文气候周期)气候快速波动的证据已在格陵兰冰芯、北大西洋沉积物^[12,13]、佛罗里达州湖泊沉积物^[10,14]、智利安第斯冰碛物^[10]、中国古里雅冰芯^[9]、黄土沉积物^[15]中均有发现,表明末次间冰期以来气候的快速振荡变化具有全球性。

末次间冰期以来气候的频繁振荡变化的原因目前尚未弄清楚,对其触发机制的解释有大气-海洋-陆面反馈的自调节作用^[16]、劳伦(Laurentian)冰盖的周期性活动^[10]、北大西洋温盐环流(形成海洋热量的传送带)^[10]等。

气候的不稳定性对于深刻认识短周期的气候变化、预测未来数十年的气候环境变化具有重要意义。

(2)从全新世(约10 ka前)以来,地球的长期气候比较稳定。比较显著的长期气候变化是数百年尺度的小温暖期和现代小冰期。现代小冰期(约1300~1800年)是自全新世温暖期以来最引人注目的一次全球性气候恶化事件,该期间世界各地普遍出现了降温和冰进。Porter^[17]认为,这一冷期从13~14世纪开始一直持续到19世纪,大致延续了五六百年,直到工业革命前。所以,现代小冰期事件是当前全球气候变暖的最直接背景事件。

1.2 数十至数百年尺度的气候变化

为了提供国际公认的和权威性的有关全球气候变化、气候变化对环境的可能影响、气候与社会之间的相互作用的科学信息,国际上于1988年成立了政府间气候变化专门委员会(IPCC)。IPCC于1990和1992年完成了其第1次综合评估报告,1995年完成了其第2次综合评估报告(1996年出版),并将于2001年出版其第3次综合评估报告。

IPCC的评估报告综合了国际上对全球气候变化研究的最新成果。IPCC在其于1995年完成的第2次气候变化评估报告中称,人类活动是导致过去0.1 ka中全球气候变化的最重要因素,人为引起的变化已可与自然变化区分开来,而且人为影响的结果已大于过去1 ka的气候自然变化的结果^[18]。在数十至数百年尺度的气候变化研究方面取得的重要共识与进展是^[18~20]:

(1)人类活动使大气中CO₂, CH₄和N₂O等温室气体的含量大幅度上升,自工业革命前以来的200多年来它们的大气含量分别增加了约30%,145%和15%,其中CO₂约从280×10⁶(体积含量)上升到了现今的约360×10⁶(体积含量),这种增加主要是由人类活动引起的,其结果是对气候产生正的辐射强迫,导致地表增暖和其他气候变化。而在某些地区,气溶胶趋向于使大气变冷。

(2)从19世纪末以来的0.1 ka中,全球平均气温上升了0.3~0.6℃,本世纪的地表气温与至少自1400年以来的其他世纪的地面气温相当或稍高一些;最近的一些年份,是1860年以来最暖的年份。由同期的全球升温引起的全球海平面上升为10~25cm,本世纪内大陆冰川一般都是后退的。

(3)由于南极半岛的地区性升温(自本世纪70年代以来,南极半岛的气温上升了2.5℃,远高于全球平均升温值),南极半岛总面积达1.2×10⁴ km²的冰层接近稳定极限,南极半岛2/3的冰层面临分裂的可能,且一块长约40km、宽约4.8km的冰山正从南极半岛拉尔森B冰架区中分离出来^[21]。

(4)如果没有减少温室气体排放的特殊政策措施,CO₂的排放维持在目前的水平(人类使用化石燃料的人为排放约6Gt/a碳),预计到2100年全球平均气温将上升1~3.5℃(该预测值已经考虑了气溶胶的冷却作用),该变暖速率比过去10 ka中的变暖速率还大,即出现由CO₂等温室气体的温室效应引起的“超级间冰期”^[22]。预计到2100年,由于海洋热膨胀和冰川、极冰区的融化,全球平均海平面将上升15~95cm。

(5) 即使温室气体的浓度可以稳定,在几十年内,气温还将继续上升;在几百年内,海平面还将上升. 因为许多温室气体具有长的大气寿命,加之海洋的热惯性,意味着人为排放的温室气体的变暖效应将长期存在.

1.3 季节至年际的气候波动

科学家在研究季节至年际尺度上发生的气候波动方面已经取得了长足进展. 1992年开始实施的世界气候研究计划(WCRP)的核心计划“气候变率及其可预报性”(CLIVAR)计划的3个组成部分之一就是“季节至年际全球气候变率及其可预报性研究”. 在全球某些地区,大气条件的季节至年际变化已经可以提前2年进行预测. 季节至年际气候的重要变化是检测长期气候变化的关键.

厄尔尼诺/南方涛动(ENSO)事件是全球许多地区年际气候变化的最重要自然现象,现在可以提前一年多预测 ENSO 事件^[18,19,23]. ENSO 事件是大尺度海、气相互作用事件,当厄尔尼诺事件与南方涛动事件相互作用时,将影响整个热带地区的温度和降雨型式,并至少波及到中纬度地区. 近20余年来,厄尔尼诺事件日益成为人们关注的一个焦点,更成为全球变化研究的热点之一. 赤道太平洋洋面水温通常是西部高(29~30℃)而东部低(22~24℃)^[23],当通常发生于圣诞节前后的厄尔尼诺事件爆发时,赤道东太平洋(秘鲁、厄瓜多尔沿海)海水温度在短短的数周内可以升高1~5℃,温度升高主要波及东太平洋20°S~20°N间的最上层100~400m深的水域,并向西传播到日界线附近,形成一个占据整个赤道东太平洋广大洋面范围的异常增温区.

由美国发起、40多个国家与地区和20多个国际组织参与于1995年11月开始成立季节至年际气候预测国际研究所(IRI)^[18,24],开展预测模式的发展和诊断分析研究,并将向那些受与ENSO有关的气候波动严重影响的国家和地区发布实验性季节至年际气候预报结果,以减少短期气候波动对经济和社会的负面影响.

1.4 全球大气化学组成的变化

地质记录表明,过去的气候变化与大气中温室气体的丰度的变化同步发生,这表明大气组成的变化可引起地球系统的其他主要组成部分的变化,反之亦然. 大气化学组成与地球生态系统之间的复杂相互作用是全球变化研究的一个重点.

(1) 臭氧耗减与紫外线(UV-B)辐射. 自70年代以来,全球(无论是中、低纬度地区还是高纬度地区)臭氧总量呈现下降趋势,近十几年来更呈下降之势(尤其是南极地区). 大气臭氧层耗减的机理、气候效应及生物学效应是当前全球变化研究的一个热点. 科学家们早在1974年就提出,工业排放的氯氟烃类(CFCs)会破坏平流层臭氧,并于1985年发现了南极臭氧洞^[25]. 对平流层中氯和氟浓度变化趋势的卫星监测已证明,人类活动排放的CFCs,HCFCs和卤代烃是造成所观测到的平流层中损减O₃的氯浓度比其自然背景值高出5倍的原因^[26].

在臭氧强烈耗减的同时,观测到了地面UV-B辐射的显著增加. 南极上空的臭氧洞(1993年出现了地球自有记录以来的最低臭氧值)使到达南极大陆的UV光达到创记录的水平. 在南极的一个监测站上,1993年记录到比1992年的水平高44%的UV-B(紫外光谱中对生物最有害的部分). 统计研究表明,从纬度40°向极地方向,1979~1992年间的地面UV-B辐射量显著增加,高纬度的冬春季UV-B辐射增加最大. 例如,在过去的20余年中,45°N地区(波兰、俄勒冈、明尼阿波利斯、蒙特利尔、意大利北部、波斯尼亚、法国南部)春季UV-B辐射每0.01 ka各

增加了8.6%和5.1%;而在人口密集的55°N地区(如英国、斯堪的纳维亚、俄罗斯),春季UV-B辐射增加更大,全年平均UV-B辐射每0.01 ka各增加了6.8%和4.3%^[18,19]。

据对1979~1993年香河和昆明Dobson站的臭氧总量数据的分析研究表明,我国臭氧总量有减少的趋势^[27]。依据地面观测与TOMS(美国雨云气象卫星)资料对中国地区大气臭氧总量的变化特征的分析表明,1979年以来我国大气臭氧总量逐年减少,年平均递减率变化范围为0.077%~0.75%,其值随纬度增高而增大;在青藏高原夏季南亚高压的影响下,高原上空形成臭氧总量异常低值中心,维持将近5个月时间^[28]。

平流层臭氧耗减不仅引起紫外线(UV)辐射的增加,而且对全球气候有冷却效应。相反,对流层臭氧的形成不仅污染空气,而且对气候有变暖效应。地面UV辐射的增加及其后果与平流层臭氧耗减相关,也受许多非化学变量(如云)的影响。臭氧耗减与地表气候的这种间接联系使全球气候变化的预测更为复杂。国际上将于1998年对臭氧层研究现状做出最新评估。

(2) 大气化学组成的变化。自工业革命以来,人类活动向大气中排放了大量的温室气体,温室气体浓度的增加增强了地球的温室效应,这些人为辐射强迫作用导致了温度、降雨和其他气候变量的变化。

由于人类使用化石燃料的人为排放及开垦土地破坏植被的自然排放(约1Gt/a碳)等活动每年向大气排放约7Gt碳,使大气CO₂的浓度现在每年约以0.5%的速率增加。

大气中CH₄的主要来源为天然湿地(沼泽、苔原等)、水稻田、反刍动物、煤炭开采、海洋湖泊和其他生物活动场所、CH₄水合物的失稳分解等。大气CH₄浓度的增加是80年代发现的,80年代初世界气象组织(WMO)设在世界各地不同纬度上的23个大气污染本底监测站即开始连续监测不同纬度上大气CH₄浓度的变化^[29]。对大气CH₄浓度的观测研究表明,CH₄的年增加速率表现出波动特征,80年代的增加速率呈减慢趋势,1980年增长量为 16×10^{-9} ,1990年为 10×10^{-9} ,从1993年开始CH₄的增长速率又开始上升,现约以1.0%/a的速率增加^[29~32]。N₂O既是温室气体,又是损耗臭氧的物质,有自然和人为2种来源,80年代其平均增长率为0.25%/a,约以每年0.2%~0.3%的速率增加^[30~32]。由于CO₂,CH₄和N₂O的各种人为和自然源汇以及大气中的各种光化学过程和输运过程的复杂性,它们在大气中的浓度的变化也是很复杂的。

中国是世界上以煤为主要能源的国家之一,是世界上CO₂排放大国之一,国际原子能机构公布的数据表明,1995年中国CO₂排放量位居世界第二。中国是世界上最大的水稻生产国,也是稻田CH₄排放的大国之一。中国稻田的CH₄排放量为 $(10.2 \sim 12.8) \times 10^6 \text{ t/a}$ ^[33],占全球稻田CH₄排放量 $(2 \sim 10) \times 10^7 \text{ t/a}$ ^[32]的1/10左右。

2 全球生态系统变化(地圈、生物圈变化)研究若干进展

2.1 陆地生态系统的变化

陆地生态系统的变化研究主要集中在全球变化对植物的影响(生态系统的生理学)、对生态系统结构与功能的影响以及气候-植被相互作用的微观至宏观范畴^[34,35]。

(1)CO₂浓度升高对生态系统生理学的影响是:CO₂浓度升高的“施肥效应”可使植物光合作用速率提高、生长发育加速、生育期缩短、物候期提前、植物的生物量增加,引起植物蒸腾速率减小,水分利用效率提高,影响植物的碳氮比(C/N)等生物地球化学循环过程和超微结构

等^[19,31,36]。C₃植物对CO₂浓度增加的反映强于C₄植物,C₃植物的光合作用明显随CO₂浓度增加而加强。CO₂浓度增加1倍可使C₃植物的生长和产量增加10%~50%,C₄植物的生长和产量只增加0~10%^[31]。但CO₂浓度增加对植物生长的“施肥效应”却受到土壤养分与水分供应的制约。C₃和C₄植物对CO₂增加的响应不同,还会改变植物种间的竞争关系。CO₂等温室气体的温室效应导致的温度上升也将对植物的施肥量、发育速率等产生直接和间接影响。

(2)全球变化导致的生态系统的结构和功能变化出现在斑块、景观和区域尺度上。随着全球气候变暖,气候带将向两极方向移动,由于物种和群落的自然迁移和适应速率比预测的气候变化速率要缓慢得多,因此动、植物带等将滞后于气候带的移动,残存在它们现今的位置上,但随着物种适应气候而向北方或更高海拔地区的迁移,许多物种的种群大小和生存范围将会缩小,甚至可能导致生态的不稳定、失衡或退化,威胁全球生物多样性^[18,24]。

(3)地球上南、北地区温差减小,经向大气环流减弱,降水地理分布发生变化,但全球气候变暖对不同纬度地区降雨量的影响到底是增加还是减少仍是不确定的。气候变暖总的将是引起水蒸发增加,土壤水分减少。气候变化将导致全球水循环加剧,并会对区域水资源产生重大影响,并进而影响生态系统的平衡。对全球(主要是北半球)36条连续观测物质平衡的冰川累积净平衡的统计分析表明^[37],从50年代至1992年累积净平衡连续为负值的冰川占69%,连续为正值冰川仅为14%,反映全球山地冰川总体处于退缩状态。自50年代以来全球绝大部分冰川的物质平衡为负值、冰川处于退缩状态的事实与全球变暖相对应。山地冰川体积的缩小会影响河流流量的季节分配、改变区域的小气候乃至区域的生态平衡。

(4)以分散的研究站点的观测研究、一定的空间区域综合分析,以及不同时空尺度模式间的耦合与转换相结合的陆地样带研究,开辟了全球变化陆地生态系统研究的有效手段和方法^[35,38]。陆地样带研究在较大的地理范围(1 000 km²或更大),对影响生态系统的结构与功能的全球变化驱动因素开展生物地球化学过程、生态系统的能量与物质交换过程、植被的结构与动态、生物多样性、气候-植被相互作用、土地利用状况等方面的研究,国际上从1993年首批启动了4条陆地样带^[35,38]，“中国东北森林-草原陆地样带”(NECT)跻身于首批启动的4条陆地样带研究之列^[39]。

(5)陆地生态系统与碳循环。全球碳循环研究一直是全球变化研究的一个关键问题。据IPCC(1995)估计^[40],1980~1989年,人类使用化石燃料的人为排放及砍伐森林的自然排放的CO₂约7Gt/a碳(其中化石燃料燃烧和生产水泥排放约5.5±0.5Gt/a碳),热带土地利用变化(主要是森林采伐)释放1.6±1.0Gt/a碳,同一时期CO₂在大气中的累积约为3Gt/a碳。最新研究数据表明,海洋生态系统将碳“泵入”海洋深部的“泵吸”作用的碳净吸收为2Gt/a碳^[18]。因此,尚存在人为排放的另外约2Gt/a碳的碳汇问题。通过测量和分析大气中氧浓度和¹³C/¹²C比率的变化,获得了对现今全球碳循环的新认识,即北半球中纬度陆地生态系统是一个重要的碳汇,可吸收人为排放的CO₂约2Gt/a碳。如果没有这个碳汇,则大气中CO₂的累积速度将会更大。陆地生态系统的该净碳吸收的主要机理是森林砍伐区的森林再生长(如北美东北部)、CO₂浓度升高促使植物的碳储备增加^[18,19]等。

森林是地球上最大的陆地生态系统,是全球碳循环的重要组成部分。全球森林植被和土壤中储存的碳约1 150Gt,其中约37%的碳储存在低纬度森林、14%在中纬度森林、49%在高纬度森林。全球森林生态系统储存的碳的2/3以上在土壤及相关泥炭沉积中。1990年低纬度的

森林砍伐排放了1.6Gt碳,而中、高纬度森林面积扩大和生长所固定的碳只有0.7Gt/a碳,造成向大气的净碳通量为0.9Gt/a碳^[29]. 在全球森林碳平衡研究中仍存在着许多不确定性,这主要是由于对森林年净增长量、森林区的地下生物量、土地利用状况变化时土壤含碳量的变化、森林采伐后木材的利用途径以及其他许多有关参数等估计的不准确性造成的^[41]. 因此,与土地利用变化相关的森林是未来碳的源或汇仍是不确定的. 只有有效地减少森林采伐、增加植树造林并辅之以提高森林生态系统生产力的其他管理措施,才可以固定大量的碳.

绿色植物在进行光合作用时可消耗大量的CO₂,但全球植被和土壤对CO₂的吸收状况及潜能究竟如何,是全球气候变化趋势研究的关键信息. 美国能源部从1998年初在全国17个州内具有典型生态特点的森林地带和加拿大部分林区设立25个CO₂气流循环状况监测塔,对大气和林地间的CO₂气体交换量进行全天实时监测. 该CO₂监测网的建设将有助于了解整个地球生态系统的CO₂循环情况^[42].

(6)生态系统尺度的长期试验提供的证据表明,生物多样性在陆地生态系统的碳和其他养分循环中起着关键作用. 正在获取定期测量结果以改进对年际气候波动对陆地生态系统与大气间碳交换的认识,这方面的结果已被用于发展和检验以过程为基础的生态系统模式,这些模式将是地球系统模式的重要组成部分^[19].

(7)大尺度的生态系统模拟研究取得了重要进展,正在开发的模式将能用来模拟生态系统对气候和大气化学组成变化的一系列响应,其中首先考虑的是响应气候变化陆地植物种群分布随时间的变化^[18].

(8)生态系统的观测和监测研究在生态系统变化研究方面发挥着不可替代的作用. 国际上从1993年开始筹建的全球陆地观测系统(GTOS),于1996年进入实施阶段^[43],GTOS所观测的陆地生态系统包括土地、淡水、生物区系(包括生物多样性)和人口等. 美国长期生态学研究网络(LTER)、英国环境变化研究网络(ECN)、德国陆地生态系统研究网络(TERN)等是重要的国家级生态系统监测与研究网络. 于1988年开始建设的中国生态系统研究网络(CERN)^[44],已经启动了对我国各主要类型生态系统的长期和全面的研究^[44]. 另外,我国将在现有的森林资源、荒漠化、野生动物、湿地资源、森林生态定位监测的基础上,在黄河、长江生态环境林业重点治理区内建立20个左右的林业生态环境监测站,在天然保护工程建设区内建立20个左右的森林生态环境监测站,以构建全国林业生态环境监测网络,科学准确地掌握林业生态工程和森林生态效益^[45].

2.2 土地覆盖与土地利用变化

地面研究及近20余年的卫星数据资料表明,人类活动已经改变了几乎所有的地球景观,改变了植被,改变了景观净化水和空气的能力,影响到动、植物和生态系统的迁移,改变了生物多样性.

(1)自约8000多年以前的农业活动以来,地表被开垦用于农业生产的面积一直在扩大. 据估计,世界森林和林地总面积一度可能超过 6×10^6 km²,随着自然地表系统向耕作系统的转变,导致地球上最大的陆地生态系统——森林和林地的面积持续减少,至今,世界森林和林地的面积减少了1/3以上. 中国在远古时代,估计森林覆盖率曾达49%,到80年代初降至12%以下,损失森林达3/4^[31]. 80年代以来,随着国际社会对全球森林的保护,温带森林和北方森林已不再急剧减少,但热带森林的减少仍是一个重大的环境与发展问题. 森林的损失不仅表

现在覆盖面积的减少上,还表现在质量的变化上,如森林覆盖密度、森林生产力和森林组成等方面的变化. 土地覆盖与土地利用的变化最终导致了生物群落及其控制的能量和养分流的整体重新调整.

(2) 全球及区域土地覆盖制图及土地覆盖分类研究取得了重要进展. 美国 Landsat 和 NOAA/AVHRR 提供了区域及全球土地覆盖的重要数据源,利用这些数据源进行区域及全球土地覆盖研究自 80 年代以来得到了迅速发展,已建立了多种用于全球变化研究的数据库,如 GAC(Global average cover) 数据库、GVI(Global vegetation index) 数据库、PATHFINDER 数据库^[18,19,24,26]等.

EPA/USGS“Landsat 导航北美洲陆地景观特征数据集计划”已经利用 MSS 数据记录了美国和中美洲地区 70,80 和 90 年代 3 个时期的土地覆盖情况;美国正利用 AVHRR 数据,以不同的空间分辨率编制区域和全球土地覆盖图以及记录区域和全球土地覆盖与当前土地利用关系的系列数据产品,国际上正在巴西亚马孙盆地、非洲、南美洲和东南亚等地区开展的监测热带森林消失速率与土地利用关系的研究也已取得了初步成果.

南美洲、东南亚和美国的新的土地覆盖数据已在 WWW 网上发布,该数据是 Landsat 获取的. 关于南美洲和东南亚的土地覆盖的这些新数据将有助于更好地估计森林的砍伐速率、以及与此相关的排向大气中的碳通量. 而分辨率达 1km 的美国的土地覆盖数据是从事区域规划的资源管理者的重要信息库^[18,19].

2.3 海洋生态系统的变化

气候变化以多种方式影响海洋生态系统,海洋也正处于人类活动日益增加的压力之下. 海洋是各种动、植物的家园,它吸收和释放溶解性碳、氢、氧和其他元素,海洋有机物参与这些元素的全球循环,影响着海洋、大气和陆地中它们的浓度. 人类 20% 的食物蛋白来自渔业和其他海洋和淡水产品,渔业产量取决于气候对海洋的多方面影响(如大气和海洋温度及其变化、降水、径流、盐度、原始有机物生产和海冰动力学等). 气候变暖引起海水膨胀、冰川和冰盖融化,加速海平面上升,改变海洋环境生态系统,引起海湾和湿地生物物理特征变化,改变海洋生态并危及许多鱼类资源. 另外还将引起海洋热量收支的变化,造成环境变化、生物多样性减少以及海洋生物体和生产带的迁移.

1995 年全球海洋生态系统动力学计划(GLOBEC)被正式确定为 IGBP 的核心计划之一,国际上全面启动了对全球海洋生态系统动力学的研究,涉及海洋生态系统的结构与功能、海洋生态系统的动力学和生产率等,这方面的研究才刚刚起步. 我国也于 1996 年启动了“中国近海海洋生态系统动力学与生物资源的持续利用”等重大研究项目^[46,47].

(1) 海洋生态系统的动力学. 大尺度洋流(如墨西哥湾流)是由热量、淡水径流循环和风等驱动的. 地球热量收支变化引起的大气环流的变化最终会引起大尺度洋流的变化. 科学家们已经证实,在过去的大的气候变化期间,大尺度洋流的位置与现今的位置完全不同. 未来的气候变化也将引起洋流的迁移,海洋动物群也会迁移,从而形成完全不同的生态系统. 世界大洋的高产区域及世界许多重要经济鱼类的栖息地均位于上升洋流区,如南、北美洲太平洋沿岸、加拿大和非洲大西洋沿岸、索马里和阿拉伯半岛沿岸地区^[19]. 气候驱动的全球洋流变化将极大地影响海洋鱼类种群的动态、并进而影响主要以鱼类为生的人口的生计.

(2) 大海洋生态系统. 1984 年美国 K. Sherman 和 L. Alexander 提出了大海洋生态系统

(LMEs)的概念,这个新的学科概念为发展新的海洋资源管理和研究策略提供了理论依据,使海洋资源的管理与研究从行政区划管理走向以生态学和地理学的边界为依据、研究整体生态系统水平的生态系统管理。大海洋生态系统的概念已得到国际上的认同,已召开了多次大海洋生态系统国际会议。据此定义,全球海洋被划出49个大海洋生态系统,包括了世界95%以上的海洋生物资源量。该概念已在一些区域海洋生态系统研究与管理中被应用^[33,46]。

(3) 海洋生态系统的生产率。海洋温度、盐度和其他物理特征的变化能引起原始有机体生产者和浮游生物种群分布的变化,这些变化将会引起整个食物链的变化,最终改变重要经济鱼类资源的种群稳定性及其生产率。太平洋沙丁鱼和大马哈鱼种群及生产率的变化即是明证。美国沙丁鱼的捕获量1936年高达 7×10^5 t,但50,60和70年代其捕获量却持续下降,在太平洋的其他地区也有类似的变化。70年代后期以来其捕获量又开始增加。太平洋大马哈鱼的捕获量的变化情况与沙丁鱼捕获量的变化情况类似。一些证据表明,太平洋沙丁鱼、大马哈鱼捕获量的近同时周期性上升和下降可能与全球气候的0.01 ka尺度波动有关^[18,19]。气候变化影响海洋生态系统生产率的研究还正在南大洋、太平洋、大西洋等海洋中进行。

在热带太平洋开展的研究表明,铁(在靠近陆地的水中相对丰富)在中太平洋盆地海洋生物的原始有机物生产中是一个比较缺乏的养分。在一系列的野外实验(包括向表层海水中加铁盐的实验)中,科学家们观测到了浮游生物的大量繁殖以及其他过剩养分的相应减少^[18,19],这是促使科学家在其他大洋中进一步研究控制原始有机物产量、碳循环和海洋气候的因素。

3 全球变化对人类的影响研究若干进展

3.1 全球变化对人类生存环境的影响

预测的未来数十年的气候变化,包括温度、降雨和海平面的变化,将与由人口增长、土地利用变化、污染等其他因素引起的强迫作用一道加于自然系统之上,改变陆地和水生生态系统,进而影响人类的生存环境。

全球变化引起的气候带迁移,将威胁某些物种的生存。如气候变化可造成非洲大陆热带森林加速减少,使非洲受影响地区不稳定的生产系统情况更坏。从全球来看,未来0.05 ka的气候变化,将使森林的覆盖面积从自然植被的58%减到49%,沙漠从21%扩大到24%,苔原从3%减为0^[48],自然生态因之而改变。

目前全球约有一半人口生活在沿海地区,按最新预测研究结果,到2100年全球海平面将上升15~95cm^[18,20],海水将淹没生产的土地,盐水入侵将污染淡水资源,海平面上升将使洪泛和风暴潮灾害增多,改变海岸线和海岸生态系统,直接威胁沿海地区以及广大小岛屿国家人民的生存环境及社会经济发展。

预计在未来的0.1 ka中,全球地面气温将上升1~3.5℃。从生态系统对气候变化的响应来看,这种快速增暖将使部分陆地生态系统来不及达到气候条件的平衡状态,一些物种的更新和迁移速率将跟不上气候变化的步伐,土壤的形成将更落后于气候变化。加之现代陆地生态系统的“碎片化”及人为作用的存在,生态系统将处于各种各样的过渡状态类型,它们将是不稳定的和脆弱的,从而人类对生物资源的利用将面临挑战和问题。

3.2 全球变化对人类社会经济的影响

气候格局与人类的适应性决定着支持生命的食物、淡水和其他资源的可利用性。人类社会的社会特征和经济特征,也主要是对温度和降雨的季节和年际格局的适应而形成的。因此,

较短时间尺度的气候异常变化、土地利用与土地覆盖变化、大气化学组成的异常变化等会对全球农业、林业、渔业等人工管理生态系统和人类生命支持系统产生深刻影响。

全球变化导致灾害性气候事件的增加,极端气候事件如干旱和热浪的持续可增加城市居民区和森林区发生火灾的可能性,会破坏粮食生产和水供应,有时会导致大量的人口迁徙。长期持续和过量的降雨会引起洪水、延误农业耕种、污染水资源以及暂时破坏生产和贸易格局。

全球变化对农业的影响可能是严重的,将通过改变农业生产条件而导致农业生产的不稳定性增加,带来农业生产布局 and 结构变动,造成粮食产量的波动,使农业生产成本和投资额外增加。但现在尚不能确定气候变化对农业生产平均是增加还是减少。近年的研究表明^[18,19,24,25,31,49],世界各地的作物产量及生产率都将有较大变化,许多地区的农业生产模式也很可能改变。

全球变化对畜牧业、渔业、林业等也将产生严重影响^[36,55,57],总的是弊大于利,但这方面的研究才刚刚开始,不确定性很大。全球变暖将导致水资源供应更加紧张,特别是干旱和半干旱地区以及水需求或水污染引起水短缺的地区,对气候变化特别脆弱。随着气候变化,气温升高,降水量减少,造成供水短缺。

最新研究表明^[50], ENSO 事件的当年和次年极易爆发生物灾害,从而会对农牧业产生严重影响。如 1982~1983 年的 ENSO 事件之后,我国农牧区发生特大鼠害,南方稻飞虱、红棉铃虫也大发生;1991 年、1993~1994 年 2 个 ENSO 事件之后,我国大范围发生了病虫害;1997~1998 年强 ENSO 事件,使非洲突发蝗虫灾害,我国几个省份病虫害也十分严重。

3.3 全球变化对人类健康的影响

研究认为,气温与人的死亡率之间呈 U 型关系,在过冷和过热条件下死亡率都将增加,最低死亡率处于 16~25℃ 的温度范围内^[51],人类为适应预测的 21 世纪的气候变化将付出重大代价。

预计的热浪强度和长持续时间将导致疾病(主要是心脏和呼吸系统疾病)或死亡。寒冷地区的增温虽会减少与寒冷有关的死亡,但气候变化的间接影响是主要的,包括带菌生物体的地理范围和季节扩展而造成传染病的可能性增加(如疟疾、登革热、黄热病,以及一些病毒性脑炎)。一些非媒介携带传染病,如沙门菌病、霍乱和梨形鞭毛虫病也会因升温和洪水增多而出现^[23]。

一些独特的疾病类型往往伴随着一些全球变化事件(如洪涝等污染水资源和扩大了蚊子等传病媒介的生存范围)而出现。水携带的疾病(肝炎、痢疾、伤寒、霍乱等)与厄尔尼诺事件相伴周期性出现^[23],传病媒介携带的疾病(疟疾、登革热、黄热病,脑炎、瘟疫和血吸虫病等)也与厄尔尼诺事件有关^[23]。

平流层臭氧耗减造成紫外(UV-B)辐射增加,对增高的 UV 辐射的详细野外和实验室实验表明^[24],地面增加的 UV 辐射对人类健康、鱼类种群及许多陆地和海洋生态系统具有十分有害的影响。对人类以及其他动物而言,其影响包括免疫系统抑制;增加严重晒斑、白内障和表皮损害的发病率;减少维生素 D 的合成;致癌。对植物而言,暴露于增强的 UV 辐射下会抑制必要的光合作用过程。增加的 UV 辐射也能影响农业生产率。

人类活动污染大气,造成大气质量下降,空气中 SO₂ 的浓度和总悬浮微粒浓度上升,引起人类呼吸系统发病率上升和治疗时间延长,从而严重影响人类身体健康。

4 人类减缓全球变化的策略研究若干进展

虽然目前对人类活动在当代气候环境变化和全球气候变暖中的作用仍存在争议,但至少自工业革命以来,人类活动已成为全球环境变化的最重要的驱动因素。

随着人类对自身在全球环境变化中的作用的认识的不断加深,也为了人类社会的可持续发展,国际科学界和政治界逐步认识到采取一致行动以防止或减缓全球变化的必要性和重要性,从1972年在斯德哥尔摩召开的联合国人类环境会议至1992年在巴西里约热内卢召开的联合国环境与发展大会,人类社会一致努力,先后制定了《联合国人类环境会议宣言》(1972)、《保护臭氧层维也纳公约》(1985)、《关于损耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》(1987)及其修正案(1989,1990)、《控制危险废物越境转移及其处置巴塞尔公约》(1989)、《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC)(1992)、《21世纪议程》(1992)、《联合国生物多样性公约》(1992)、《关于森林问题的原则声明》(1992)、《国际荒漠化公约》(1994)等国际上一致行动减缓和对付全球变化的国际公约。

全球气候变化是全球变化中最引人注目、对人类可持续发展影响最为深远的变化,国际上先后于1979年和1990年分别召开了第1次和第2次世界气候大会,并于1992年制定了《联合国气候变化框架公约》,为人类减缓全球气候变化奠定了政策基础。在该公约的指导下,人类正在寻求气候变化的综合解决途径^[52]。为限制和减少CO₂等温室气体的排放,《联合国气候变化框架公约》已分别于1995年3~4月在柏林、1996年7月在日内瓦和1997年12月在东京召开了3次缔约国大会。减缓全球气候变化,首要的就是要限制和减少CO₂,CH₄,N₂O和CFCs等温室气体的排放,即要减少人类对化石燃料的依赖和需求。

国际原子能机构公布的1995年世界上CO₂总排放量仅为22×10⁹t,其中美国、中国、俄罗斯和日本的CO₂排放量几乎占全球总量的一半^[53]。美国在1995年排放的CO₂占全球总量的23.7%,年人均排放量仅为20t。中国1995年排放的CO₂占全球总量的13.6%,居第3位,但中国年人均排放量仅为2.51t。1997年12月在日本召开的《联合国气候变化框架公约》缔约国第3次大会通过的《京都议定书》规定^[54],38个工业化国家在2008~2012年间,将温室气体排放量降低到1990年以下的水平,削减幅度分别为欧盟8%、美国7%和日本6%。有些国家削减幅度较小,还有几个国家现在还未给它们定削减目标,平均起来,全体发达国家削减的温室气体只占排放总量的5.2%。《京都议定书》允许澳大利亚增加温室气体排放8%、挪威增加1%、冰岛增加10%,俄罗斯、新西兰、乌克兰可以维持1990年的排放水平^[56]。

减少温室气体排放的可能办法有:①改变能源结构,鼓励电厂改变燃料,用天然气取代煤和石油;②建设核能、太阳能或风能设施,减少对化石燃料的依赖;③鼓励采用更多节能汽车技术,包括目前开始逐步取代内燃发动机的“混合”发动机;④改善公共交通运输系统;⑤取消政府对高废气排放率的能源补贴;⑥征收“碳税”,用经济手段抑制对化石燃料消费的增加;⑦植树造林,加强对森林的保护,增加对CO₂的吸收;⑧开发更多高效节能型家用物品。

但即使如此,人为排放的温室气体的变暖效应将长期存在,在未来的几十年乃至上百年中,气温还将上升,人类防止全球变暖任重道远。

5 全球变化研究与可持续发展

5.1 全球变化科学是可持续发展的科学依据

全球变化研究是一门跨地球科学、环境科学、宏观生物学、天体科学、遥感技术以及有关社

会科学的综合性、交叉性和系统性科学体系,美国将其称为“地球系统科学”。全球变化科学的研究对象是地球系统的各个圈层及其相互作用,其直接研究对象则是地球系统中的物理、化学、生物和人类等子系统过程及其相互作用,总结生物地球化学系统、物理气候系统等的演变规律与机理,破解人类赖以生存的地球环境发展变化之谜;其直接目标是为人类合理开发利用自然资源,控制水、土、气污染,制定有关环境问题的重大决策提供科学依据,从而为人类社会的可持续发展服务。正是全球变化科学研究提出了人类社会可持续发展的重大战略命题,也正是全球变化科学研究的最新成果为人类社会一致行动制定《21世纪议程》、《联合国气候变化框架公约》、《联合国生物多样性公约》、《国际荒漠化公约》等众多涉及人类社会可持续发展的国际公约提供了科学依据。美国一直将全球变化研究作为对其国家未来的科学投资,予以大力支持。在全球变化问题上,国际上虽已取得了一些共同认识,但还存在着很多的不确定性,给人类社会实施可持续发展战略造成很大障碍。全球变化科学研究是解决有关科学问题的根本途径,是可持续发展的科学依据。

5.2 从工业文明到生态文明

人类的发展是从农业文明开始的,农业时代持续了8000多年。自工业革命以来,工业化和工业文明就成了人类梦寐以求的愿望。以“人是自然的主宰”为中轴的工业文明的发展,强调人类社会在工业化和现代化过程中可以对自然进行无限制的索取和征服,以满足自身不断增长的物质需求。这种不计自然成本、只求索取、不求自然资源的代价平衡的反自然的发展观,造成了资源、环境的不可持续性,带来了严重的环境问题。全球变化研究给人们的启示是,“人是自然的一员”,强调人类的经济活动必须遵循生态学原理,在“人-自然”系统整体利益的前提下考虑人类社会自身的发展,以达到自然和人类社会的协调发展,即共同的可持续发展。这种既考虑人的生存发展权,也考虑自然的生存发展权的发展观是人类发展观的嬗变,是生态文明的发展观。正是全球变化科学研究推动了人类发展观的这种根本转变,从发展的指导思想上为人类的可持续发展奠定了基础。

5.3 环境安全与环境外交

全球变化造成了严重的全球环境问题,严重影响到自然生态系统与管理生态系统(农业、林业、渔业等)的可持续性,影响到人类的生存环境。全球变化既涉及环境保护问题又涉及各国的政治利益、经济利益和社会发展。环境安全问题已清楚地摆在了人们的面前。这包括两个方面,一方面,各国国内的人类活动(如砍伐森林、破坏植被、不合理利用自然资源造成的资源紧缺、浪费与环境污染等)造成了本国的许多环境问题,影响到各国自身的环境安全。另一方面,燃用化石燃料排放CO₂等温室气体造成全球性变暖、全球变化导致生态系统的变化和水资源供应的短缺、海平面上升影响到沿海和岛屿国家的生存环境与人居安全、人类活动污染大气造成的酸雨危害等全人类的共同活动造成的环境安全问题是分国界的,影响到全球的环境安全。这两种环境安全问题相互耦合、相互加强,影响到世界各国的资源、经济与环境安全,并可能引发国家间或地区间的矛盾与冲突。

国内的环境安全引出的是国内的环境保护选择,区域与全球的环境安全问题引出的是各国为维护全人类的生存环境、减缓和对付全球变化而承担相应的国际义务。在这方面,开展环境外交已成为各国外交的重要组成部分。从1972年的联合国人类环境会议以来,国际上为规范人类的行为,减轻全球变化对人类的负面影响,开展了广泛的环境外交,各国为承担保护全

球环境的义务而展开了激烈的讨价还价,并达成了一系列有关公约. 全球变化科学研究的成果为各国开展环境外交、保护环境安全、达成有关国际协议和公约,提供了重要的科学依据.

我国是一个发展中的大国,也是一个环境问题大国. 以往粗放式地开发利用资源,已经造成了资源的极大浪费及生态环境严重失衡,环境安全问题形势严峻. 同时,我国是一个 CO₂ 和 CH₄ 排放大国,稻田 CH₄ 排放也占很大比重. 随着我国经济的持续快速发展,排放大国的形象将更加突出,将成为国际社会注目的主要目标之一. 深入开展全球变化科学研究,将为我国保护环境安全的科学决策与制定开展环境外交的策略提供重要的科学依据.

致谢 国家科技部“九五”重点科技攻关专题“全球变化与可持续发展决策咨询研究”(编号:96-920-24-(3))及中国科学院“九五”重点项目“资源环境信息网络与可持续发展问题研究”(编号:KZ 952-J1-Gi2)资助项目.

参 考 文 献

- 1 张志强. 国际科学界跨世纪的重大研究主题——国际全球变化研究实施十年进展与现状. 地学前缘, 1997, (1~2): 255~262.
- 2 张志强. 跟踪国际研究走向, 深入开展全球变化研究. 地球科学进展, 1994, 9(4): 58~62.
- 3 孙成权, 张志强. 国际全球变化研究计划综览. 地球科学进展, 1994, 9(3): 53~70.
- 4 Perry J S. Understanding Our Own Planet: An Overview of Major International Scientific Activities. ICSU Secretariat, 1993.
- 5 IGBP Secretariat. IGBP in Action: Work Plan 1994~1998. IGBP Report No.28. Stockholm: [S.n.], 1994.
- 6 施雅风. 冰芯记录揭示的气候变化. 见: 丁一汇主编, 中国气候变化与气候影响研究. 北京: 气象出版社, 1997. 6~17.
- 7 Qin Dahe, Petit J R, Jouzel J, et al. Distribution of stable isotopes in surfale snow along the route of the 1990 International Trans-Antarctic Expedition. Journal of Glaciology, 1994, 40: 107~118.
- 8 姚檀栋, 王宁练. 冰芯研究的过去、现在和未来. 科学通报, 1997, 42(3): 225~230.
- 9 杨志红, 姚檀栋, 皇翠兰, 等. 古里雅冰芯中的新仙女木期事件记录. 科学通报, 1997, 42(18): 1975~1978.
- 10 张志强编译. 地球气候将平衡于又一次跳跃? 地球科学进展, 1995, 10(3): 296~298.
- 11 鹿化煜, 周杰. Heinrich 事件和末次冰期气候的不稳定性. 地球科学进展, 1996, 11(1): 40~43.
- 12 Heinrich H. Origin and Consequences of Cyclic ice rafting in the northeast Atlantic Ocean during the Past 130000years. Quaternary Research, 1988, 29: 142~152.
- 13 Bond G, Heinrich H, Broecker W, et al. Evidence for massive discharges of icebergs into the north Atlantic Ocean during the last glacial Period. Nature, 1992, 360: 245~249.
- 14 Grimm E G, Jacobson G L, Watts W A, et al. A 50000 record of climate oscillations from Florida and its temporal correlation with the Heinrich events. Science, 1993, 261: 198~200.
- 15 安芷生, 波特 S C, 夏佩尔 J, 等. 最近 15 万年洛川黄土堆积序列与格陵兰冰心记录. 科学通报, 1994, 39: 2 254~2 256.
- 16 Broecker W S, Denton G H. The role of ocean-atmosphere reorganization in glacial cycles. Geochim Cosmochim Acta, 1989, 53: 2 465~2 501.
- 17 Porter S C. Pattern and forcing of northern hemisphere glacier variations during the last millennium. Quat Res, 1986, 26: 27~48.
- 18 Rick Piltz. Our Changing Planet——The FY 1997 US Global Change Program. A Report by SCCR(CENR/NSTC).
- 19 Rick Piltz. Our Changing Planet——The FY 1998 US Global Change Program. A Report by SCCR(CENR/NSTC).
- 20 丁一汇. IPCC 第二次气候变化科学评估报告的主要科学成果和问题. 见: 丁一汇主编, 中国的气候变化与气候影响研究. 北京: 气象出版社, 1997. 21~25.
- 21 毛黎. 南极半岛冰架分裂. 科技日报, 1998-04-22(3).
- 22 张志强译. 瑞典 IGBP 和 WCRP 研究计划. 见: 孙成权等主编, 全球变化研究国家(地区)计划及相关计划. 北京: 气象出版社, 1993. 1~25.
- 23 Webster P J, Palmer T N. The past and the future of El Niño. Nature, 1997, 390(6660): 562~564.

- 24 Edgerton S A. Our Change Planet: The FY 1996 US Global Change Research Program. A Report by SGR (CENR/NSTC)
- 25 张志强译. 平流层变化探测网络(NDSC). 见:孙成权等主编,全球变化研究国家(地区)计划及相关计划. 北京:气象出版社, 1993. 235~266
- 26 Edgerton S A. Our Change Planet: The FY 1995 US Global Change Research Program. A Report by CENR/NSTC
- 27 魏鼎文,赵延亮,秦芳,等. 中国北京和昆明地区大气臭氧层的异常变化. 科学通报,1994,39(16):1 509~1 511
- 28 周秀骥,罗超,李维亮,等. 中国地区臭氧总量变化与青藏高原低值中心. 科学通报,1995,40(15):1 396~1 398
- 29 Steele L P, Rasmussen R A, Khalil M A K, etc. The global distribution of methane in the troposphere. Journal of Atmospheric Chemistry, 1987, 5(1): 125~171
- 30 王庚辰,熊效振,孔琴心,等. 我国大陆主要温室气体大气背景浓度值及其变化. 见:丁一汇主编,中国的气候变化与气候影响研究. 北京:气象出版社,1997. 64~69
- 31 毛文永,文剑平. 全球环境问题与对策. 北京:中国科学技术出版社,1993. 36-56;134~170
- 32 王明星主编. 全球气候变暖. 济南:山东科学技术出版社,1996. 3~13
- 33 沈壬兴,上官行健,王明星,等. 广州地区稻田甲烷排放及中国稻田甲烷排放的空间变化. 地球科学进展,1995,10(4): 389~392
- 34 孙建宏译. 全球变化与陆地生态系统(GCTE)执行计划. 见:陈泮勤等主编,国际全球变化研究核心计划(二). 北京:气象出版社,1994.90~130
- 35 施永辉译. 国际地圈生物圈计划(IGBP)陆地样带研究科学计划. 见:孙成权等主编,国际全球变化研究核心计划(三). 北京:气象出版社,1996.118~142
- 36 张新时,周广胜,高琼,等. 中国全球变化与陆地生态系统的研究. 地学前缘,1997,4(1~2):137~144
- 37 秦大河,康世昌. 现代冰川过程与全球环境气候演变. 地学前缘,1997,4(1-2):85~94
- 38 王权. 全球变化陆地样带研究及其进展. 地球科学进展, 1997,12(1):43~50
- 39 张新时,周广胜,高琼,等. 全球变化研究中的中国东北森林-草原陆地样带(NECT). 地学前缘,1997,4(1~2):145~151
- 40 IPCC. Climate Change 1994: Radiative Forcing of Climate Change and An Evaluation IS92 Emission Scenarios. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 1~339
- 41 石广玉,丁一汇,张鹏,等. 中国森林 CO₂ 释放与吸收的评估. 见:丁一汇主编,中国的气候变化与气候影响研究. 北京:气象出版社,1997. 85~94
- 42 卞晨光. 美将建二氧化碳监测网. 科技日报,1998-04-21(3)
- 43 赵士洞. 全球陆地观测系统开始实施. 地球科学进展,1997,12(3):298~300
- 44 孙鸿烈,赵士洞,江洪,等. 中国生态系统研究网络(CERN). 中国科学报,1995-06-30(2).
- 45 刘勇敏. 全国林业生态环境监测网络将建立. 科技日报,1998-04-21(1)
- 46 唐启升,范元炳,林海. 中国海洋生态系统动力学研究发展战略初探. 地球科学进展,1996,11(2):160~168
- 47 范元炳,蒲书箴. 我国海洋科学领域的全球变化研究进展. 地球科学进展,1998,13(1):62~71
- 48 张庆阳. 气候变化——21世纪人类面临的挑战. 科技日报,1997-12-09(7)
- 49 林而达,王京华. 全球变化对农业的影响及适应对策. 地球科学进展,1995,10(6):597~604
- 50 刘茂胜. “厄尔尼诺”之后应谨防生物灾害. 中国科学报,1998-06-01(8)
- 51 王守荣. 气候变化对我国社会经济影响评价综述. 见:丁一汇主编,中国的气候变化与气候影响研究. 北京:气象出版社,1997. 498~504
- 52 Skodvin Tora, Fuglestedt J S. A comprehensive approach to climate change-Political and scientific consideration. Ambio, 1997, 26(6): 351~358
- 53 路透社东京 11月5日电. 国际能源机构公布世界二氧化碳排放量排行榜. 参考消息,1997-11-20(7)
- 54 United Nations. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. FCCC/CP/1997/L.7/Add. 1. Conference of the Parties, Third Session. Kyoto: 1~10 December, 1997

(1998-05-08 收稿,1998-08-10 收修改稿)