

© 闵九康 陶天申 田 波 主编

绿色低碳生态工程学

——精准防治全球气候变暖的创新工程

GREEN NATURE and CARBON SINKS ECO-PHYTOTECHNOLOGY—The State-of-Art

 中国农业科学技术出版社

© 闵九康 陶天申 田 波 主编

绿色低碳生态工程学

——精准防治全球气候变暖的创新工程

GREEN NATURE and CARBON SINKS ECO-PHYTOTECHNOLOGY—The State-of-Art

 中国农业科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

绿色低碳生态工程学:精准防治全球气候变暖的创新工程 / 闵九康,
陶天申, 田波主编. —北京: 中国农业科学技术出版社, 2018.1

ISBN 978-7-5116-3239-5

I. ①绿… II. ①闵… ②陶… ③田… III. ①全球气候变暖—研究

IV. ①P461

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 219836 号

责任编辑 张志花
责任校对 贾海霞

出版者 中国农业科学技术出版社
北京市中关村南大街12号 邮编: 100081
电 话 (010) 82106636 (编辑室) (010) 82109702 (发行部)
(010) 82109709 (读者服务部)
传 真 (010) 82106631
网 址 <http://www.castp.cn>
经销者 全国各地新华书店
印刷者 北京富泰印刷有限责任公司
开 本 889mm×1194mm 1/16
印 张 32.5
字 数 915千字
版 次 2018年1月第1版 2018年1月第1次印刷
定 价 298.00元

— 版权所有·翻印必究 —

《绿色低碳生态工程学 ——精准防治全球气候变暖的创新工程》

(GREEN NATURE and CARBON SINKS ECO-
PHYTOTECHNOLOGY——The State-of-Art)

编 委 会

主 编	闵九康	陶天申	田 波			
副主编	张淑香	贺焕亮	张树清	屈凡河	沈育芝	
编 委	王玉珍	王华声	史有存	田 波	孙连圻	冉 峰
	李 莉	李文达	李志江	李美琼	杨 林	张宗文
	张桂兰	张树清	张淑香	沈育芝	沈敖华	陈 松
	陈通权	闵九康	吴玉卫	吴永铁	吴燕飞	吴德耀
	林荣新	屈凡河	屈庆涛	屈宝良	邬奇洋	洪顺山
	席小平	罗 勇	贺焕亮	赵广武	赵艳青	俞国平
	胡喜娜	徐巧娣	徐福祥	夏 兰	夏学峰	莫文英
	莫克明	莫慧明	符国栋	钱敏仁	钱爱荣	黄志纯
	黄名清	韩江深	臧锡璐	储祥云	陶天申	蒋式洪
	詹长庚	魏 刚	魏文华			

献 词

土壤是一位慈祥的母亲，她为其所有的孩子们提供了舒适的环境和丰富多彩的食物。

—Bourke Cockran

在举国上下为实现中国梦而努力奋斗的大潮中，将《绿色低碳生态工程学——精准防治全球气候变暖的创新工程》一书奉献给伟大的土壤科学家朱祖祥教授百年诞辰是最适宜和最富有历史意义的盛事。

朱祖祥教授，1916年10月5日出生于浙江省宁波市。1938年毕业于浙江大学，留校任教。1945—1948年，就读于美国密执安州立大学研究生院，前后获硕士和博士学位。

朱祖祥教授是我国农业科技与教育领域的一代大师，是我国土壤化学的奠基人。他历任浙江大学农业化学系主任，浙江农学院土壤农业化学系主任、浙江农业大学校长、名誉校长、中国水稻研究所首任所长、名誉所长、浙江省科协副主席、名誉主席、浙江省人大副主任、中国土壤学会副理事长、浙江省农学会理事长、名誉理事长等职。1980年当选为中国科学院学部委员（相当于现在的中国科学院院士）。他一生致力于教育、科技事业，为我国土壤学、农业和环境科学的发展作出了重大贡献。

朱祖祥教授创立的土壤多介质离子交换和陪补离子等理论、绿肥起爆效应和有机质激发效应、土壤水分和养分能量位以及磷位等概念、土壤pH值指示剂、土壤分析方法和速测诊断技术（现称测土施肥技术），以及土壤与温室效应等，都是土壤科学领域中具有里程碑意义的重大成果，对提高我国农业科技水平、发展农业生产起到了极其重要的作用。

1952年全国院系调整，浙江大学农学院从浙江大学独立出来，创建浙江农学院（1960年改名浙江农业大学，1998年合并成浙江大学）。1956年朱祖祥教授筹建的浙江农学院土壤农业化学系（简称土壤农化系）招生。从恢复招生至今，凭着朱祖祥教授对事业的执着追求，在他的精心培育下，土壤农化系早已成为全国农学院中的一流系科。本书正副主编和许多编委都是首批被招收的56级学生，他们在求学及以后的工作期间，深受朱先生谆谆教诲的影响，也与朱先生结下了深厚的师生情谊。

1962年朱祖祥教授和我国著名农业化学家、农业教育家、中国农业化学的奠基者孙羲教授在全国率先招收土壤化学和农业化学研究生。本书编委洪顺山、副主编沈育芝和主编闵九康就是二位教授精心指导和培养出的我国第一届研究生。后来，他们都在各自的工作岗位上取得了较大的成就。

朱祖祥教授还高瞻远瞩，将土壤-环境-人类健康紧密地、有机地联系在一起，积极组建了全国高等农业院校中第一个环境保护系，并成为新的浙江大学“211”工程的主要学科之一。

朱祖祥教授学识渊博，才思敏捷，严谨治学，勇于创新，桃李满天下。他对待学生既满腔热情，又严格要求，更是真诚关怀和爱护，这始终激励着他的每一名学生。作为浙江农学院土壤农化系首届的56级学生，分布在全国各地的教学、科研、基层等岗位，都取得了很大成就，为国家 and 人民作出了贡献。

朱祖祥教授是我们尊敬的师长，他永远活在我们的心中。

《绿色低碳生态工程学——精准防治全球气候变暖的创新工程》编委会

浙江大学土壤和农业化学系56级全体同学

敬 献

2017年8月

内容简介

本书主要论述了地球复原百年战略目标和地球恢复原生态百年计划，讨论了温室气体和温室效应在全球气候变暖中的重要作用以及对人类生存和发展的影响。

全书共26章，主要讨论了碳的起源、进化和归宿，土壤和生物质（C）生产，发展低碳农业、阻遏全球气候变暖，土壤与温室效应，土壤发射温室气体（ CO_2 、 CH_4 和 N_2O ）的数量和全球平衡账，土壤与大气之间温室气体的交换通量，植物光合作用和呼吸作用在全球 CO_2 平衡账中的战略意义，土壤对温室气体（ CO_2 等）的吸收和缓冲作用以及全球关注的无碳（C）能源生物氢（ H_2 ）的生产应用。同时，还讨论了生物多样性和湿地土壤的环境效应。

全书引用了世界各国科学家研究的新成果和相关信息及科学数据，其中大部分为独家拥有，因此十分弥足珍贵。

本书可供有关领导和专家、大专院校师生以及企业负责人和工程技术人员等阅读和参考。

序 一

土壤是构成人类生存和发展的重要环境，更是生灵赖以生存的、不可替代的、有限的重要自然资源。因此，古希腊哲学家亚里士多德（Aristotle）曾说：“土壤是无限生命之源。”我国劳动人民则有“有土斯有粮”和“万物土中生”的格言。闵九康教授将其英译为“The soil is the mother of all things”（土壤是万物之母），从而流传于世界各国。

闵九康教授是我的朋友和同事，他与我同届研究生毕业，后赴法国、加拿大和美国等留学和考察。他一生勤奋好学、努力钻研、坚持不懈、学识广博、学业勤耕、著作等身，已出版了30多部科技著作，文字总量超过1300万字，是我国农业、环境学界的杰出科学家。特别是较长时期以来，他潜心研究气候变化、资源环境与人类健康之间的关系，并提出了很多新的见解。他是我国低碳农业的倡导者，被学界誉为“中国低碳农业之父”，并受到了社会各界的认同和赞誉。过去几十年，全球气候变化已成为科学家和社会各界的关注热点，其中最紧迫最重要的是大气中温室气体（ CO_2 、 CH_4 和 N_2O 等）含量的增加，从而导致了全球气候变暖，危及人类生存和发展。

19世纪60年代至20世纪90年代，根据科学家的测定，地球最暖的10年是20世纪90年代（以平均值计算），也就是过去1000年中气候最暖的一个世纪（20世纪）。在20世纪中，除温度升高，降水增加外，一些难以预料的因子，如极端气候，干旱、洪水、降雨和降雪无常等状况也不断增加。

全球气候变化，特别是气候变暖会对人类生存和发展以及健康带来各种威胁。所以，在全世界范围内引起了极大的关注。同时，科学家们也在寻求防止全球气候变暖所产生的负面影响而不断提出新的战略。全球气候变暖将大大影响粮食生产和供应，因为它直接或间接地影响作物生产、土壤肥力、畜牧业和渔业以及病虫害防治等。

联合国政府间气候变化委员会（IPCC）和最近由400多位科学家作出的报告再次确证，全球气候变暖对人类的威胁明显增加，报告指出，地球表面平均温度在今后100年内将增加 $1.4 \sim 5.8^\circ\text{C}$ 。这些科学论据进一步证明了全球变暖的范围和程度。因此，需要人们迅速而有效地作出防止全球气候变暖的决策和战略措施。

通过减少矿物燃料燃烧和其他资源的保护以减少温室气体的发射便可明显降低全球气候变暖的速度。同时，发展低碳农业和无碳（ CO_2 ）能源生物氢（ H_2 ），大力增加土壤碳汇，其不仅能减少 CO_2 等温室气体的排放，而且还能通过 CO_2 肥料效应而大量吸收 CO_2 和增加生物质产量，从而有效降低大气中温室气体的浓度。因此，研究土壤与温室效应等项目就成为防止全球气候变暖的重要战略措施。在UN组织保护伞（Umbrella of UN organization）内的许多国家都在讨论有关防治全球气候变暖的措施、方法和技术。许多国家（包括发达国家和发展中国家）都已开始着手在不同地区和不同资源类型区域组织全球气候变暖及调控的相关组织和机构，以大力研究温室气体源与汇的全球平衡账，以及调节措施和技术。研究全球气候变暖的国际机构和组织有8个，国家和地区机构组织有175个。

2010年5月7日，包括11位诺贝尔奖得主在内的255名美国科学院院士（Gloick P.H.和Adams R.M.et al.）发表公开信（附录I），公开捍卫气候变暖研究的严密性和客观性。现在，许多国家都将温室气体的源与汇，发射过程和对人类生存与发展的影响列入了中学和大学环境学科的教程之内。农业，特

别是土壤发射温室气体的内容已成为不可或缺的教程。

近年来，闵九康教授又专题研究了全球气候变化、土壤与温室效应、土壤与人类健康的关系等。新作《绿色低碳生态工程学——精准防治全球气候变暖的创新工程》详细论述了土壤与温室效应及其对全球气候变暖的影响，并提出了发展低碳农业，研发无碳（ CO_2 ）新能源生物氢（ H_2 ），以阻遏全球气候变暖的有关技术和方法。因此，该新作是一部融理论性、资料性和生产性于一体的，很有特色的国际水平的科技著作。该新作能及时出版将对广大从事土壤、农业化学以及环境科学和生产管理等方面的读者有所裨益，并起到积极的推动作用。

我真诚希望新作《绿色低碳生态工程学——精准防治全球气候变暖的创新工程》一书能为应对全球气候变暖以及人类生存和发展创造一个健康的生态环境作出有益的贡献。

斯为序，谨表对闵九康教授深深的敬重之情。

陶天申（武汉大学教授）

2017年9月

序 二

《绿色低碳生态工程学——精准防治全球气候变暖的创新工程》一书即将由中国农业科学技术出版社出版。该书是当代一部重要的科学著作。它对全球气候变化的因果关系以及防治气候变暖等因子都作了充分而详尽的表述。同时全书收集了许多极为重要的科学数据、资料和有关研究成果。因此，该书堪称为一部有关气候变化的参考指南，值得一读。

科学研究证明，全球气候变化与土壤生态系统关系极为密切。因此，全球气候变化，特别是气候变暖是由各种生态系统，特别是土壤生态系统的影响所造成。陆地生态系统主要由气候系统（climate system）、化学大气系统（chemical atmosphere system）、土壤生态系统（soil ecosystems）和人类系统（human system）所组成。

全球气候变化主要是指上述系统变化的整合作用（表1），其中特别受到关注的是“温室”气体急剧增长。它对全球气候变化，特别是全球气候变暖造成了巨大影响，但其也是由地球系统（Earth system）中的各种组分所造成的（图1）。

表1 地球变化的各种相关系统

“全球变化”
物理-气候系统
降水
温度
辐射能
湿度
光照
大气-化学系统
H ₂ O、CO ₂ 、N ₂ O、CH ₄ 、O ₃ 等
生态系统
生产系统
结构系统
过程速率
人类系统
土壤和土地利用系统
城市产业系统

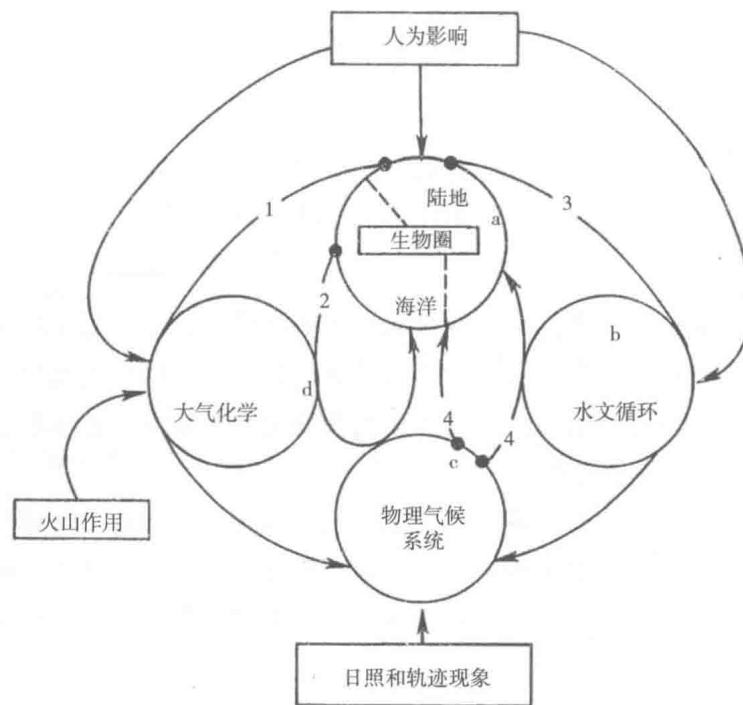


图1 地球系统中各种组分之间的相互作用

过去几十年，土壤一直处于总碳和大气 CO_2 的一个碳通量稳定状态。大范围的研究表明，土壤有机碳（SOC）和无机碳（SIC）已有明显的变化。但土壤仍然可以稳定大气中温室气体的浓度。在干旱区域，这种作用特别明显。因为干旱区域的土壤-气体反应受到植被的影响甚少。土壤具有巨大的表面积、活跃的微生物群落、适宜的水分含量和pH值的缓冲能力，所以土壤能吸收和缓冲大气中的C、N和S。虽然土壤能发射大量的 CO_2 和少量的其他含C、N和S气体，但土壤仍然起到了稳定C、N和S汇的重要作用。

土壤有机碳（C）是地球表层最大的碳库（largest carbon reservoir），其量约为 $15 \times 10^{14} \text{ kgC}$ （1500PgC）。实际上，根据闵九康等2014年的计算和统计，其值约为1676PgC。研究表明，这样大的碳库（汇）可大大增强绿色植物的光合作用，促进农业生产，同时，也能提高土壤的保水能力，或者，还能通过降低SOC的分解速率而间接地降低大气中 CO_2 浓度。通气土壤都能有效地降低CO、烃类化合物和大气中的挥发性有机化合物。研究表明，温室气体的移动速率会受到物理因子而不是化学因子的限制。

土壤无机碳可能是一个很大的碳库，其量约为 10^{15} kg ，但其仅能缓慢地增加大气中的 CO_2 浓度和大气温度，因此，对光合作用的影响不大，而且对保持土壤水分的作用也甚小。因此，灌溉既能增加又能减少大气中 CO_2 的数量。

土壤有机氮（N）含量比大气 N_2 要小，其值约为 $15 \times 10^{13} \text{ kgN}$ 。但生物质和海洋表面有较大的含N化合物。土壤是大气 NH_3 、 N_2O 、NO和 $\text{NO}_2\text{-N}_2\text{O}_4$ 的一个活跃的N汇（an active N sink）。土壤中有有机N库的作用系与土壤有机C汇相类似。N库中的 N_2O 是温室气体，因此，受到了人们的特别关注。

土壤碳平衡账（carbon budgets）通常是用精准的模拟模型而获得。许多碳模型（carbon models）几乎都忽视了土壤碳模型。因此，十分有必要建立土壤C平衡账的精准模型。

迄今为止，土壤碳仍然是碳循环过程中最大而活跃的C库（largest active C reservoir, Bohn, 1986, Holser, 1989, 闵九康等, 2012）。研究表明，土壤碳库的数据均来自对热带土壤中有机碳（SOC）的研究。SOC的氧化作用或腐解作用是输入大气中 CO_2 的最大碳源。长期试验测定的结果表明，土壤释放出的碳量为 $(6 \sim 8) \times 10^{13} \text{ kg}$ （Houghton, 1985）。模型研究指出，SOC及其产出的 CO_2 是净初级生产

率 (NPP) 和有机体腐解的唯一稳态条件。因此, SOC 的积累和降低氧化作用速率都与 NPP 有关。每年 $4 \times 10^{12} \text{ kg}$ 矿物燃料燃烧放出碳量的一半会进入大气或从大气中消失, 但其约占 SOC 变化率的 0.2%。然而, 建模者可能常会忽略 SOC, 因为 SOC 和死亡生物质的定义不明, 所以, 建模者认为 SOC 都直接取决于活体生物质的数量或取决于 NPP 的大小。因此, 当建立碳模型时, 他们也忽略了下列因子:

A. 通过新垦土地、增加温度、热带森林转化为草地和降水减少等都能增加 SOC 的氧化作用而释出 CO_2 。

B. SOC 的积累超过了能接受 NPP 的增量。

C. 无机碳亦能释出 CO_2 。

《绿色低碳生态工程学——精准防治全球气候变暖的创新工程》一书全面论述了地球碳的起源与归宿, 碳 (CO_2 和 CH_4) 的全球平衡账、 C_3 、 C_4 植物光合作用的 CO_2 饱和度、防治气候变暖的技术和科学方法, 以及地球恢复原生态的战略目标和有效措施。因此, 本书的出版将会对全球气候变化, 特别是气候变暖的防治起到极为重要的推动作用。

席小平

2017年1月

前言

《巴黎协定》是关于气候变化的协定，这是21世纪拯救人类生存和发展，造福子孙万代的伟大里程碑。气候变化的中心是气候变暖，其主要原因是温室气体（CO₂等）和温室效应。因此，为了防治气候变暖对人类的威胁和地球环境的危害，世界各国政要和科学家已召开了各种国际会议，制定战略计划以应对气候变暖。联合国环境和发展署于1992年召开的“里约地球峰会”（The Rio Earth Summit, 1992）和国际科学联合委员会（ICSU）于1990年在荷兰召开的“土壤和温室效应系统工程学”（Soils and the Greenhouse Effect, 1990）以及联合国召开的“第二次气候大会”（The second world climate conference, 1990）等都提出和制定了多种“地球复原百年战略计划”（100 year plan for the Earth's Recovery, 1990）。这一伟大的战略目标旨在将大气中的温室气体CO₂浓度（406μmol/mol）恢复至工业革命前（1860年）的CO₂浓度（290μmol/mol）水平，从而确保人类健康发展。为了达到这一战略目标，我和同事们将10年前的研究成果和最新收集到的世界各国科学家的相关研究成果以及会议论文和资料汇集成《绿色低碳生态工程学——精准防治全球气候变暖的创新工程》一书，以飨读者。

2011—2014年，我和同事们编著出版了《全球气候变化与低碳农业研究》《低碳农业——全球环境安全和人类健康必由之路》《土壤与人类健康》等5部著作。这些著作全面论述了土壤和温室效应系统工程学，温室效应和气候变暖及其对人类生存和发展的影响。

众所周知，土壤是地球最重要的自然资源。全球90%以上的粮食、纤维、糖料和建筑材料等都源自土壤。这充分印证了古希腊哲学家亚里士多德（Aristotle）的格言。他赋予了“土壤是无限生命之源”的美誉。勤劳和智慧的中国人民则有“有土斯有粮”和“万物土中生”的格言。我将其英译成“The soil is the mother of all things”（土壤是万物之母），从而被世界各国所引用，以表达土壤在人类生存和发展中不可取代的重要作用。但是在人类发展过程中，土壤又成为人类抛弃大量废弃物的容库，从而掩饰了人类的一些错误和疏忽。因此，人类应当正确地管理土壤和保护土壤，以确保人类生存发展和健康长寿。因此，全球现已充分认识到绿色低碳是环境安全和人类健康的必由之路。“绿色低碳”一词可科学地诠释为绿色植物进行光合作用而大量吸收CO₂，并将其转为有机碳化合物（统称碳汇），从而明显地降低了大气中CO₂等温室气体的浓度（即低碳），有效地阻遏全球气候变暖，确保了实现地球恢复原生态的战略计划。所以，“绿色低碳”一词现已成为公众认同和约定俗成的有代表性的广泛用语。作者将其英译为Green nature and carbon sinks，以供参考。

全书共26章，主要论述了碳（C）的起源、进化和归宿，发展低碳农业、阻遏全球气候变暖，土壤和温室效应系统工程学，土壤发射温室气体（CO₂、CH₄和N₂O）的数量和全球平衡账，土壤与大气间温室气体的交换通量，全球有机碳（C）循环及其平衡账以及发展低碳农业和无碳（C）生物氢（H₂）能源等以阻遏全球气候变暖的速率，并特别强调了光合作用酶（Rubisco酶）在吸收CO₂过程中的重要作用。

本书能及时出版，完全得益于中国农业科学技术出版社编辑及其领导的关心和支持，得益于浙江大学、武汉大学、北京林业大学和中国农业科学院、江西珀尔农作物工程有限公司和北京盛达华泰农业科技有限公司的教授、学者和专家们的撰稿及审阅。在此，对他们的辛勤劳动和巨大的付出表示衷

心的感谢。

最后，十分感谢我国著名微生物学家陶天申教授不顾八秩高龄为这部新作《绿色低碳生态工程学——精准防治全球气候变暖的创新工程》一书作序。掩卷长思、感慨万千，但愿这部新作能为地球恢复原生态作出一点有益的贡献，以早日实现人类的美梦（Distant Beautiful Dream）。

谢谢！

罗九康

于中国农业科学院

2016年9月

卷首图表

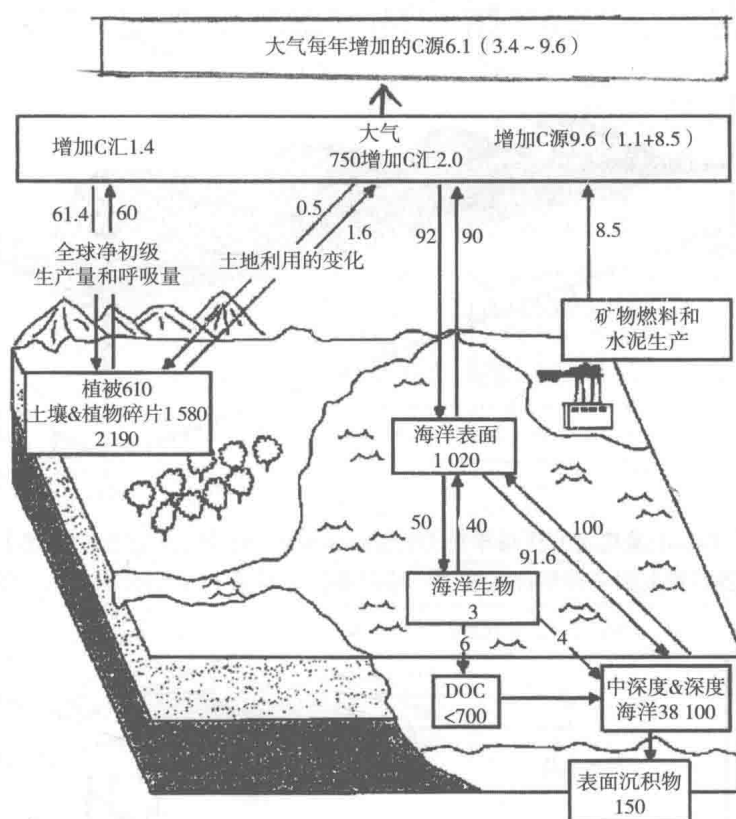


图1 全球碳储库和通量（以每年 10^{15} g碳量，即PgC或 $Gt\ C = 10^9t$ 来表达）。大气从矿物燃料的燃烧获得了碳，并将其损失于海洋。植物物质中的碳和土壤中的碳通过土地利用状况的变化而损失，但由于OOC“ CO_2 的肥料效应”（ CO_2 fertilization），所以，植物物质碳和土壤碳会有局部的升高（D.S.Schimel, 1995和闵九康等, 2016）

注：DOC——溶解的有机碳；OOC——溶于海水的有机碳

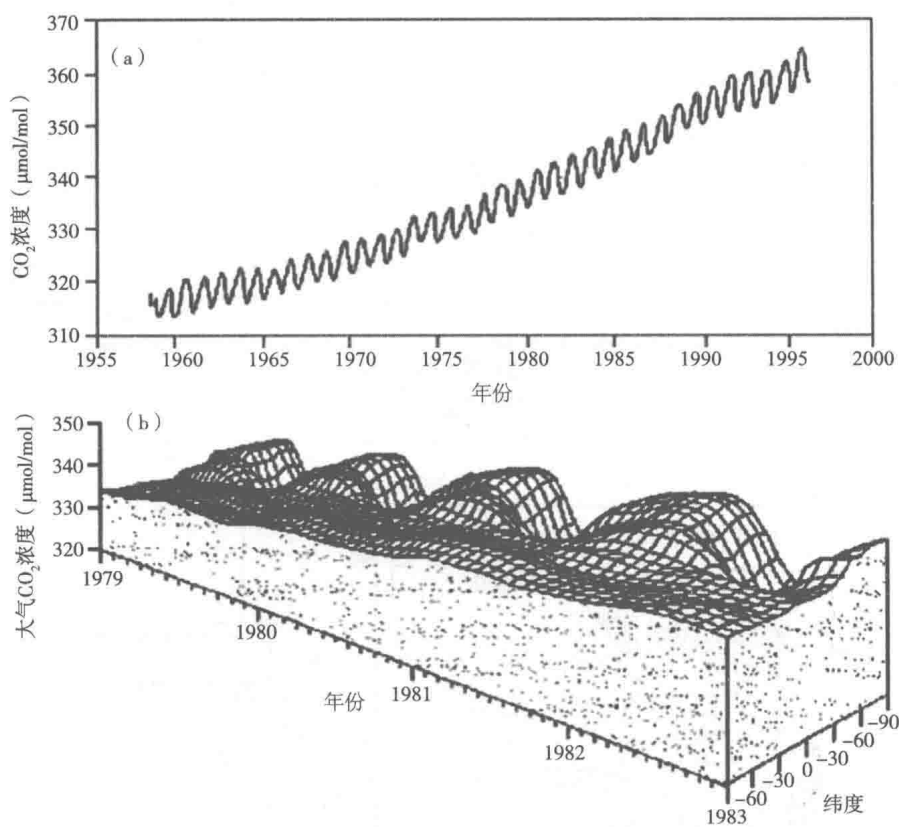


图2 CO₂浓度稳定升值每年约为1.5μmol/mol (a: Keeling等, 1996), 稳定升值的重要因子每年都有波动, 特别是在北半球 (b: Goudriaan, 1987)

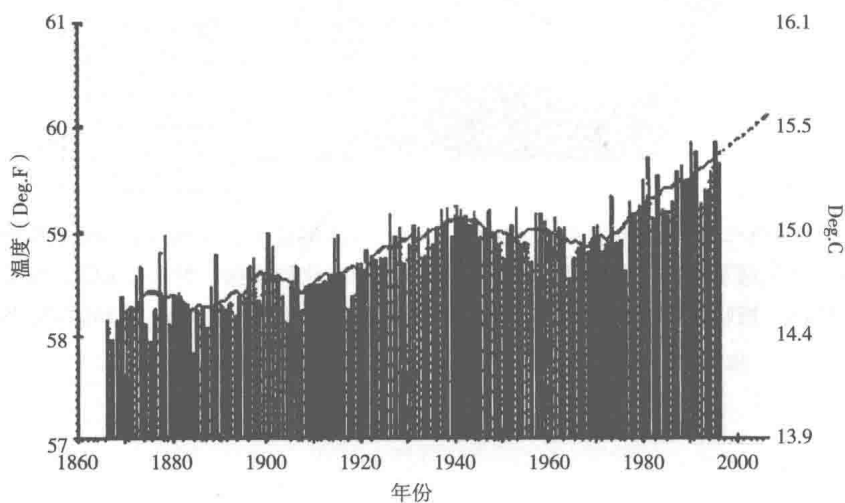


图3 随着时间推移而发生的温度升高 (IPCC, 1996)

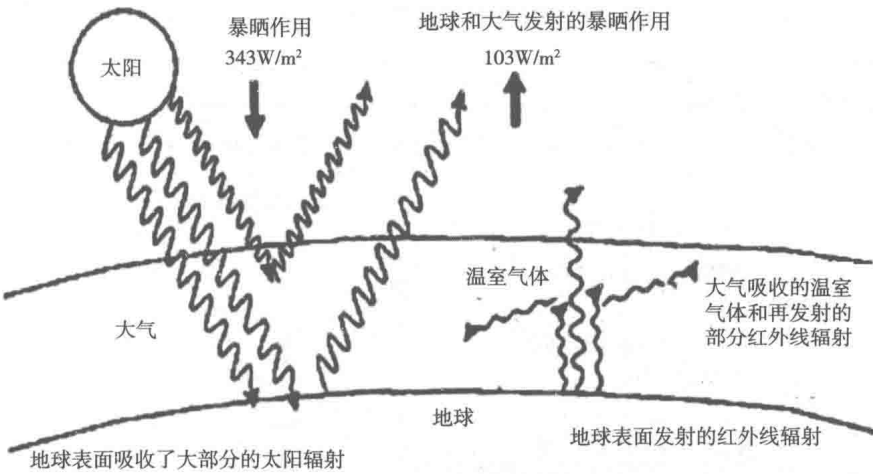


图4 温室气体使全球变暖的代表性图式

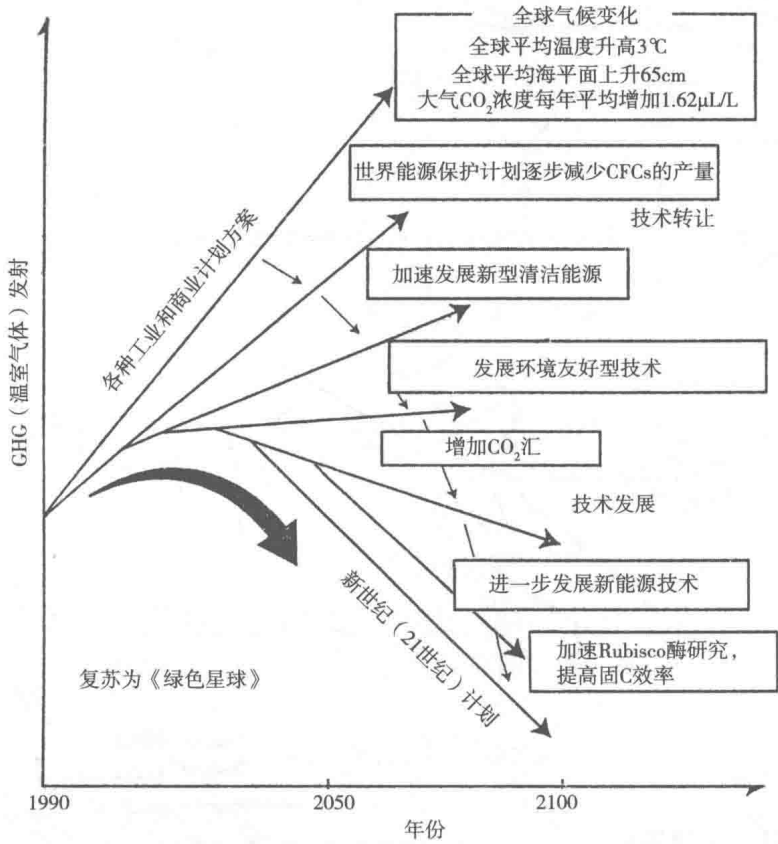
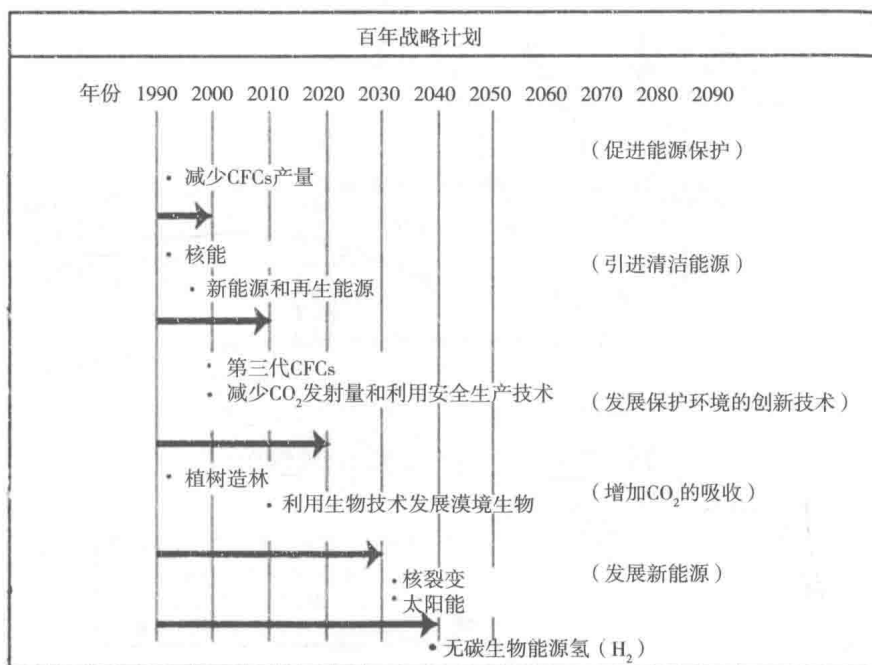


图5 地球复原百年战略计划 (国际技术创新研究院RITE, 1992和闵九康等, 2016)

- 注：1. 加速能源保护，逐步减少CFC（氯代碳氟化合物）的产量
2. 安全核电厂，新型和再生能源以及无碳能源生物氢（H₂）等
3. CO₂固定及其再利用技术，环境友好型产品的生产和开发第三代（FCs）技术
4. 植树造林，用生物技术防治沙漠化
5. 核裂变，空间太阳能的发展
6. 研发新型Rubisco酶的植物和藻类，其可将固定C的效率提高20%~80%

“地球复原百年战略计划”续



来源：MiTi全球环境办公室

MiTi = 国际贸易和工业部 (The ministry of international trade and industries)

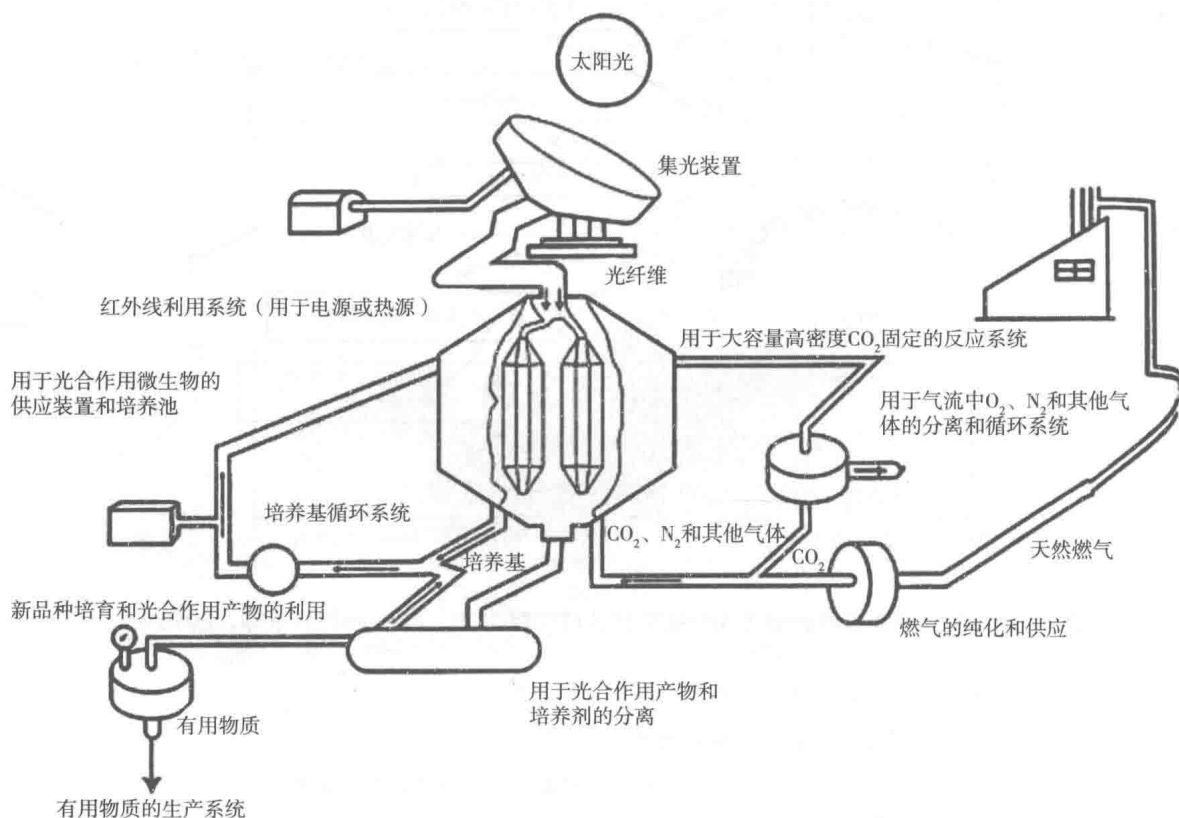


图6 生物固定CO₂及其利用系统

来源：Jiro kondo, 1992和陶天申等, 2014