

中国区域碳循环研究进展

刘娜, 顾凯平 (1. 北京林业大学经济管理学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学经济管理学院, 北京 100083)

摘要 简要回顾了我国碳循环的现状。对国内外碳循环的主要研究方法做了综述。并提出建立基于复杂适应性理论的动态碳循环模型。简要介绍了CAS 的主要特点以及利用CAS 进行建模仿真的一般思路。试图为我国区域碳循环提供一条捷径。

关键词 碳循环; 研究方法; CAS

中图分类号 X511 **文献标识码** A **文章编号** 0517 - 6611(2009) 17 - 08081 - 04

1 中国区域碳循环的现状

进入20 世纪之后, 尤其是20 世纪中叶工业革命以来, 人类活动及现代化工业的迅速发展, 特别是化石燃料的燃烧、森林的大量砍伐、草原开垦与过度放牧等, 已引起了地球大气中气体组成的变化, 特别是以CO₂ 为代表的温室气体的迅速增加, 对区域甚至全球的气候产生了明显的影响。根据国际政府间气候变化专门委员会(IPCC) 于2000 年报告的研究结果表明, 自从工业革命前以来的近200 年内(1750 ~ 1998 年), 大约有406 ± 60 GtC (1 Gt = 10⁹ t = 10 亿t = 1 Pg = 10¹⁵ g), 以CO₂ 的形式排放进入大气, 其中, 以化石燃料燃烧和水泥生产导致的CO₂ 排放约为270 ± 30 GtC, 占总排放量的33%。在此期间, 大约占总排放量43%的CO₂ 滞留在大气中, 其余则被海洋和陆地生态系统吸收。其结果是, 大气中CO₂ 浓度从1950 年的280 ± 5 ppmv 上升至1998 年的365 ppmv, 即200 年内上升了85 ppmv, 约30%。目前的CO₂ 浓度增加量约1.5 ppmv/年, 年增加率大约为0.4%。由此造成的辐射强度约为1.46 W m²。大气中以CO₂ 形式存在的碳元素量约为750 GtC, 由陆地生态系统和海洋表层水吸收和释放的速度约为190 GtC/年, 因此大约要4 年左右交替1 次。但是, 被排放到大气中的CO₂ 要取得与海洋, 特别是深层海洋的平衡, 则需要50 ~ 200 年^[1]。

目前, 虽然各国都在研究新型洁净能源, 但当前, 我国能源的消费结构还是以化石类能源为主, 具体包括煤炭、石油和天然气等, 三者合计在我国能源消费结构中所占比例超过了90%, 同时化石类能源燃烧也是人类活动中二氧化碳排放的主要来源。由此可见, 煤炭、石油和天然气是排放CO₂ 的主要贡献者。

陆地生态系统碳循环过程是指, 植物通过光合作用吸收CO₂, 将碳储存在植物体内, 固定为有机化合物, 形成总初级生产量, 同时, 又通过在不同时间尺度上进行的各种呼吸途径或扰动将CO₂ 返回大气。其中, 一部分有机物通过植物自身的呼吸作用(自养呼吸) 和土壤及枯枝落叶层中有机质的腐烂(异氧呼吸) 返回大气, 另一部分则通过各种扰动释放CO₂, 形成大气- 植被- 土壤- 大气的碳库之间的往复循环过程。

海洋是一个非常巨大的碳库, 海洋中生物群的碳储量约3 Gt, 溶解有机碳约1 000 Gt, 溶解无机碳为37 400 Gt, 海洋生态系统在全球碳循环中起着决定性作用^[2]。

对我国的近海、大气、陆地之间的碳循环过程开展综合研究, 探索我国区域碳排放量的计量方法, 准确掌握碳排放量, 不仅可为我国社会经济的可持续发展提供科学依据, 而且还可为我国政府的外交谈判提供必要的知识、技术和数据储备, 对我国不同区域各个行业全面落实科学发展观, 实现五个统筹、全面建设小康社会的目标具有至关重要的影响作用, 并将会对全球变化研究做出贡献。

2 国内外碳循环研究方法及其进展

为研究中国区域碳循环与全球变化之间复杂的相互作用以及实现碳循环的定量模拟和预测, 模型方法已经成为碳循环研究中不可替代的手段。利用碳循环模型可以模拟碳循环的动态变化。相关的研究通常有3 类方法: 实验室模拟或现场观测试验方法、模式方法以及复杂系统仿真法。陆地碳循环模型是指用数学方法定量描述陆地碳循环过程及其与全球变化之间的相互关系^[3]。陆地碳循环模型根据目的和预期的应用不同, 一般可以分为生物地理模型和生物地球化学模型。其中, 生物地球化学模型又可以根据其植被基础的不同分为基于静态植被的生物地球化学模型和基于动态植被的生物地球化学模型。生物地理模型以描述陆地生态系统结构为主, 反映了物理环境对植物功能类型的有效性、资源的竞争及达到平衡时植被覆盖的影响, 可用于模拟全球植被分布及其气候变化的反应, 其代表性模型有BIOME 模型、DOLY 模型和MAPSS 模型。而生物地球化学模型通常模拟植被的光合、呼吸合土壤分解过程以及不同生态系统层次上碳循环之间的关系, 预测气候变化对陆地碳循环的影响, 其代表性模型包括CENTURY 模型、TEM 模型和BIOME BGC 模型等。

在当前以复杂性研究为主流的新的发展阶段中, 可以看到, 系统科学的发展经历了从元素数量较少、关系比较单纯的系统的过程, 到元素个数较多、研究系统自身演化与发展的过程, 到目前元素具有主动性、能与外界交流并会根据经验改变自身的动态系统的过程。此时研究的重点就在于复杂性上的一个侧面- 适应性上。这一领域现在被称为复杂适应系统(Complex Adaptive System, 简称CAS), 是由遗传算法(GA) 的创始人Holland 于1994 年正式提出的。有关CAS 理论的最基本的思想可以概述如下: CAS 理论把系统的成员看作是自身目的与主动性的积极的主体。主体能够与环境以及其他主体进行交流, 在这种交流的过程中“学习”或“积累经验”, 并根据学到的经验改变自身的结构和行为方式。整个系统因此而产生演变或进化, 包括新层次的产生、分化和多样性的出现或新的、聚合而成的、更大的主体的出现等等。更重要的是, CAS 理论认为,

正是这种主动性以及它与环境的反复的、相互的作用,才是系统发展和进化的基本动因。Holland 把个体与环境之间这种主动的、反复的交互作用用“适应”一词加以概括。这就是CAS理论的基本思想-适应产生复杂性。关于这个基本思想,有以下4点需要强调说明。

首先,主体是主动的、活的实体。这点是CAS和其他建模方法的关键性的区别。正是这个特点,使得它能够用于经济、社会和生态等其他方法难于应用的复杂系统。其次,在这个模型中,个体与环境(包括个体之间)的相互影响和相互作用,是系统演变和进化的主要动力。以往的建模方法往往把个体本身的内部属性放在主要位置,而没有对于个体之间以及个体与环境之间的相互作用给予足够的重视。这个特点使得CAS方法能够运用于个体本身属性极不相同,但相互关系却有许多共同点的不同领域。第三,这种建模方法不象许多其他的方法那样,把宏观和微观截然分开,而是把它们有机地联系起来。它通过主体和环境的相互作用,使得个体的变化成为整个系统变化的基础,统一加以考察。第四,这种建模方法还引进了随机因素的作用,使它具有更强的描述和表达能力。考虑随机因素并不是CAS理论所独有的特征,然而CAS理论处理随机因素的方法是很特别的。简单地说,它从生物界的许多现象中吸取了有益的启示,其集中表现为遗传算法。鉴于以上这些特点,CAS理论具有了与其他方法不同的,新的功能和特点^[4-5]。

碳循环是一个复杂的动态变化过程,应用复杂适应系统方法研究碳循环过程。为我国研究碳循环过程提供了新的途径。

3 国内外碳循环研究进展

3.1 碳排放测算方面的研究进展 为了更好地理解温室气体的排放行为,人们对二氧化碳排放量的影响因素进行了分析,这些因素主要包括经济、人口和知识(技术进步)。通过对经济、人口和知识与二氧化碳排放关系方面的研究,有利于从微观角度制定一些政策以减少二氧化碳排放^[6]。

国外Shafik and Bandyopadhyay的研究发现,1960~1990年149个国家的二氧化碳排放量和人均收入之间呈正向线性关系^[7]。Friedl and Getzner研究认为,对于1960~1990年的数据而言,人均实现GDP和二氧化碳排放量之间存在立方关系(N-shaped)^[8]。Birdsall通过研究认为,人口增长对温室气体排放产生影响存在两种方式:一是较多的人口对资源需求会越来越多,因此能源消费产生的温室气体排放也会越来越多;二是快速的人口增长导致了森林破坏,改变了土地利用方式等,这些都导致了温室气体排放量的增加^[9]。Malthusian的研究认为,由于人口对资源产生了压力,才导致环境恶化,并且语言和人口对污染气体的影响是多比例影响^[10]。Boserupian认为,人口增长会促进技术改革,从而减轻对环境的负面影响。Boserupian学派还认为“人口对污染气体的影响是多比例影响”这种关系不存在,或者即使存在也是负弹性关系^[11]。Haros等利用两阶段translog成本函数分析了碳税对希腊生产部门的影响^[12]。

国内张德英采用系统拟真的方法对我国工业部门排碳量进行了估算,分析工业部门碳源排碳系统要素间的反馈互

动机制,并利用复杂系统综合集成的建模手段建立工业部门碳模型,采用系统仿真的方法,达到对排碳量估算及预测的目的^[13]。王雪娜总结了目前能源类碳源排碳量的研究现状,通过引入系统动力学概念,分析了系统动力学、系统思考及系统仿真的机制及其先进性,指出了其在能源类碳源排碳量测算问题中应用的必要性和可行性,并且针对社会能源类碳源排碳和交通运输部门的能源类排碳进行了分析和建模^[14]。马忠海估算了我国煤电能源链、核电能源链和水电能源链的温室气体排放系数,并对水电站水库水体在不同季节的温室气体排放进行了实际测量^[15]。徐国泉等基于碳排放量的基本等式,采用对数平均权重Dvisia分解法,建立我国人均碳排放的因素分解模型,定量分析了1995~2004年间,能源结构、能源效率和经济发展等因素变化对我国人均碳排放的影响^[16]。

宋涛等基于EKC假设,对我国1960~2000年人均CO₂排放量与人均GDP之间的关系进行了实证研究,发现人均CO₂排放量与人均GDP之间存在长期协整关系,呈现倒U型环境库兹涅茨曲线关系^[17]。王中英等探讨了我国国内生产总值的增长与碳排放量的关系,其结果表明,我国过分依赖投资的经济增长方式和以第二产业为主的经济结构在很大程度上是导致温室气体排放增加的主要原因^[18]。杜婷婷等的研究表明,三次曲线方程较之标准型的环境库兹涅茨曲线方程更能显示我国数十年来经济发展与CO₂排放之间的相依关系^[19]。谭丹等运用灰色关联方法分析了我国工业行业碳排放量与产业发展之间的关系,其结果表明,产业产值与碳排放之间存在着密切联系。他还通过测算工业各行业单位GDP碳排放量的变化,分析了工业行业产业结构与碳排放的关系^[20]。徐玉高等用计量经济学的方法探讨了人均GDP与人均CO₂排放的关系,研究认为,人均GDP的增加是人均碳排放增加的主要来源^[21]。张雷用多元化指数的方法分析了经济发展对碳排放的影响,认为经济结构的多元化和能源消费结构的多元化会导致国家从高碳燃料为主向低碳为主的转变^[22]。

3.2 海洋碳循环方面的研究进展 海洋具有储存和吸收大气CO₂的能力,影响着大气CO₂的收支平衡^[23]。近10多年来,作为IGBP核心计划的JGOFS、GLOBEC和SOLAS等的实施,使海洋碳循环研究得到了深入和发展。

Keeling等通过研究完善了海洋p(CO₂)的分布图,其研究认为,海洋碳的吸收和释放有明显的纬度特征,即赤道海域(10°N~10°S)为大气CO₂的主要源区,仅赤道太平洋的C释放量就有1.0 Gt/年,占海洋释放总量的60%;而北大西洋和南大洋则为大气的主要汇区,南大洋主要是指53°S以南到南极附近海域,吸引的CO₂约为1.2 GtC/年,占海洋吸收净通量35%;40°N以北的北大西洋和挪威格陵兰海域也是CO₂的强汇区;北太平洋则呈季节特征,冬季为强汇,夏季为弱源,就整体而言,仍为大气CO₂的净汇区^[24]。Keeling的计算还认为,15°S~50°S的吸收值为1.1 GtC/年,而50°S以南海域则为吸收与释放平衡,主要汇区在15°N以北地区,达2.3 GtC/年。Mrata等^[25]研究认为,高纬度大陆边缘在夏季是大气CO₂中等甚至强的汇区。Bostrom的研究也计算得到

30°N 以北的大西洋海域的入海通量为 0.4 GtC/年^[26]。另外, Thomas 等通过对一些典型陆架区的研究推算得到全球海岸陆架区为净汇 0.4 GtC/年^[27]。Sharp 等的估算表明, 赤道太平洋域的 DOC 值, 近表面水约为 60~70 $\mu\text{mol/LC}$, 深水值为 35~40 $\mu\text{mol/LC}$; 赤道大西洋 DOC 浓度, 在 400 m 以下基本稳定为 (46 \pm 7) $\mu\text{mol/LC}$, 暖季赤道上升流的外部浓度高, 表层高达 97 $\mu\text{mol/LC}$, 冷季上升流水中的值则略低, 平均约为 66 $\mu\text{mol/LC}$ ^[28-29]。南大洋印度区的研究显示, 其混合层中 DOC 浓度在 52~63 $\mu\text{mol/LC}$, 混合层下 DOC 浓度随深度轻微下降, 到 2 000 m 处约为 42 $\mu\text{mol/LC}$ ^[30]。Ogawa 等研究发现, 南大洋表层 DOC 浓度 (45~55 $\mu\text{mol/LC}$) 要低于其他海域获得值 (60~90 $\mu\text{mol/LC}$)^[31]。Sardesai 等研究印度盘地中心深海环境试验站的 DOC 浓度时则发现, 其次表面 (25~200 m) 有较高的变化分布 (52~191 $\mu\text{mol/LC}$), 500~800 m 显示最小值 (41~57 $\mu\text{mol/LC}$), 底层水 (3 500~5 300 m) 中 DOC 浓度下降, 但变化很小 (41~64 $\mu\text{mol/LC}$)^[32]。Ogrim 等在使用稳定的碳同位素测定近岸海洋沉积物中有机碳再矿化的研究中显示, DIC 海底通量主要源于沉积有机物的降解, 夏季当硫化物为强硫酸时, 碳酸盐溶解对 DIC 海底通量的贡献也是很重要的, 约占总量的 1/4, 依据 DIC 通量和 OC 埋藏通量所估计的再循环效率大于 90%^[33]。Accornero 等在研究狮子湾大陆边缘沉积物-水界面的有机碳预算时认为, 在斜坡区沉淀的 POC 有 50% 累计在沉积物中, 50% 发生再矿化; 在大陆架地区则只有 31% 的 POC 能够积累在表层沉积物中, 而余者 69% 的都在沉积物-水界面再矿化了^[34]。

国内浦一芬等通过研究大气和海洋之间的碳交换、光合作用和有机物氧化分解、碳酸钙的产生和溶解、悬浮颗粒物的下沉等过程建立了二维碳循环模式, 该模式包括 6 个状态变量。通过模拟发现, 在稳定状态下, 大气和海洋中总碳含量的分布依赖于发生在海洋中的各种物理化学过程及边界条件, 水平扩散系数和光合作用常熟对各个化学量的分布有很大的影响。浦一芬等还将建立的碳循环模式应用到印度洋, 模拟结果显示, 南印度洋中纬度地区 10~30°S 是 ¹⁴C 的重要向下渗透区, 并指出, CO₂ 可通过这片渗透区从海洋的表层进入海洋的深层^[35-36]。刑如楠通过研究生物泵过程和江河流入而增加的碳建立了三维全球海洋碳循环模式^[37]。环流模式是一个原始方程模式, 模式水平分辨率 5°~2°, 垂直分为 8 层, 物理场是在海表年平均气候强迫下得到的。在对海洋生物泵的计算时, 考虑了颗粒有机碳、无机碳、海水碱度和溶解氧的相互关系。计算得知, 每年从陆地江河流入海洋的碳约为 0.8 GtC。模拟结果表明, 热带海洋无疑是大气 CO₂ 的一个巨大的汇, 海洋作为一个整体对大气 CO₂ 基本上是一个最大汇。海洋生物泵过程极大地提高了海洋吸收 CO₂ 的能力, 显示了生物泵在全球碳循环和调节气候变化中的重要作用。

刑如楠等利用该模式, 采用不同的异常气候风应力场作为强迫场, 进一步模拟了热带太平洋表层水中 CO₂ 总量在 EL Niño 和 La Niña 期间的变化^[38]。模拟结果显示, 西北太平洋 (0~20°N, 120~150°E) 和赤道中东太平洋 (10°S~10°N, 150°E~90°W) 两个海区在 EL Niño 和 La Niña 期间表层水的

总 CO₂ 和海气 CO₂ 分压差的变化都十分显著。观测表明, 在 EL Niño 期间, 赤道中东太平洋二者随 SST 的增度而减少, 而西北太平洋二者都是高值; 在 La Niña 期间, 它们的变化和与 EL Niño 期间的结果相反。模拟结果与观测事实吻合得较好, 表明这种变化与上升流的减弱和加强有关。

3.3 陆地碳循环方面的研究进展 陆地生态系统是人类居住环境最直接依赖的要素之一, 它与气候条件密切相关, 气候变化将严重影响陆地生态环境, 陆地生态系统变化又反作用于气候系统。气候系统和大气 CO₂ 浓度变化将改变陆地土壤和植被的生产率, 改变生态系统的生理功能、结构和生物地球化学循环, 改变植被分布结构。为了研究陆地碳循环与全球变化之间复杂的相互作用以及实现碳循环的定量模拟和预测, 模型方法已经成为陆地碳循环研究中不可替代的手段。

Potter 等提出的 CASA 则是一个基于过程的模型, 它耦合了生态系统生产力和土壤碳及氮通量, 由格网化的全球气候、辐射、土壤和遥感植被指数数据集所驱动^[39]。由 Millo 等发展的 TEM 模型也是一个基于过程的生态系统模型。该模型模拟了不同陆地生态系统中碳、氮通量和库。将 TEM 与二维气候模型耦合, 可以研究生物地球化学循环在气候、生物和经济相互作用条件下的响应。由 OBM 模型到 CASA 和 TEM 模型, 均是以陆地表层碳循环过程为研究重点, 研究陆地表层和大气圈之间的相互作用, 用一些状态变量来描述其中的变化和反馈关系, 并通过建立全球数据库来实现模拟。它们揭示了陆地生态系统和大气圈之间一定的响应关系, 对陆地表层碳循环过程的变化趋势进行了预测。

Warnant 等设计的 CARAIB 模型是一个描述陆地生物圈碳吸收的机理性模型, 以 1×1 的经纬度为格点来估计全球陆地生态系统生产力。该模型包括每日和每年的物质循环, 基于叶面吸收子模型、冠层子模型、木质呼吸子模型的耦合, 可用来估计由于人类活动对大气和生物圈之间碳交换可能的影响作用^[7]。

King 等于 1995 年建立的陆地表层生物圈碳循环模型包括生态系统对土地利用干扰的响应和植被对大气 CO₂ 的响应^[8]。该模型将陆地表层碳库分为 3 部分: 活植被、凋落物、土壤, 模拟了 1700~2000 年间全球净初生产力 (NPP) 的变化, 并且考虑土地利用的变化以及植被的响应。模拟结果显示, CO₂ 的增肥效应不能解释缺失的碳库。该模型仅仅考虑陆地表层碳循环过程、CO₂ 的增肥效应和土地利用变化, 却不包括温度、降水的变化及其影响, 这与实际全球气候变化是不相符合的。

Denning 等使用一个新的简化生物圈模型 SiB2 与科罗拉多州立大学 (CSU) 的 GCM 模型耦合, 研究大气和陆地表层生态系统之间的 CO₂ 交换, 与植被的范围和季节性相联系的参数是从卫星观测数据中推导的^[9]。该研究采用一个气候和陆地表层生理学及生物物理学的耦合模型来模拟陆地表层碳的新陈代谢, 使用生物圈模型 SiB2 模拟陆地表面过程 (包括碳通量)。SiB2 模型在 GCM 中运行, 以 6 min 的步长计算了碳通量, 以解决可能影响每年 CO₂ 平均分布的重要非线性相互作用。

国内陆地生态系统碳循环模型的研究始于20世纪80年代,主要是静态模型的研究。关于动态模型的研究国内进展缓慢,目前国内用于全球变化研究的动态模型大多是根据生态系统的特点对国外有关模型进行改进。

康德梦等通过建立碳循环的微分方程组,解算碳循环生态动态模式,核算了碳存储量的变化^[40]。虽然利用该模式计算了1986年中国大陆碳的存储量及年通量,并对模型进行了敏感性分析,但是该模型没有考虑陆地表层碳循环过程中的反馈机制,仅仅考虑碳循环中的流通率,没有研究大气和陆地间的各种相互关系和作用。

陈育峰等利用所开发的林窗模型FOREC在气候森林响应过程敏感性研究的基础上,将全球气候变化作为扰动加入到模型之中,模拟森林群落在组成结构以及生物量等方面的可能变化^[41]。结果表明,模拟与实际状况基本吻合。

方精云等根据文献,估算了我国陆地生态系统的碳库和碳通量,对我国陆地生态系统碳循环的各个构成要素进行了研究,在此基础上,建立了我国陆地生态系统碳循环模式,而这仅是一个碳库和碳通量的模式流程图,并不是一个真正意义上的碳循环模型^[42]。方精云等还利用材积源生物量方法推算我国森林植被碳库,采用土壤有机质含量估算我国土壤碳库,计算结果表明,我国陆地植被的总碳量为 6.1×10^9 tC,其中,森林 4.1×10^9 tC,疏林及灌丛 0.35×10^9 tC,草地 0.02×10^9 tC,作物 0.4×10^9 tC,荒漠 0.02×10^9 tC,沼泽 0.18×10^9 tC,其他 0.03×10^9 tC。

徐德应研制了用于我国森林碳储量计算以及土地利用方式改变后碳排放的计算机模型CARBON,该模型可分区、分林种计算我国森林碳存储的分布和变化。李忠佩和王效举采用双组分模型模拟土地利用方式变更后土壤有机碳储量的变化,并用一些调查和监测数据进行了初步验证。此双组分模型将土壤有机碳分为新形成有机碳和原有有机碳2个组分,每个组分有机碳的形式转化为用一级动力学方程描述,此方法适用于模拟不同土壤类型下土地利用系统变更初期的土壤有机碳动态变化过程。李文华和李飞等根据林业部“七五”期间森林资源清查的统计结果,用系统动力学模型对我国森林生态系统碳循环进行了简单模拟和预测,模型划分了林地、已采伐林地、林栖动物及凋落物层等主要分室,并假设1990~2010年森林资源年消耗量递增5%,则1990年我国森林碳的库存量为597 376万t,凋落物层碳存量为10 365万t,碳的排放量为2 475万t。

4 结语

综上所述,在今后的研究中应当继续发展和推进对于各类有关过程的模拟研究,牢牢抓住地球系统某些关键特征的理论模式,特别注重创新模拟方法^[44]。并且要从碳循环过程模型入手,将地球作为一个动力系统来研究,重点发展几十年至几百年的数值模型,把中国区域的碳吸收和排放量计算准确,把研究结果应用在国家层面解决具体问题,最终为研究人类社会在全球变化中的作用以及研究变化着的环境对人类的影响提供一个重要的途径。

参考文献

- [1] 李克让. 土地利用变化和温室气体排放与陆地生态系统碳循环[M]. 北京: 气象出版社, 2002.
- [2] 秦大河. 全球碳循环[M]. 北京: 气象出版社, 2003.
- [3] 宋燕燕, 王敬国, 齐鑫, 等. 陆地碳循环模型比较分析[J]. 甘肃农业, 2006(5): 291 - 292.
- [4] 约翰·H·霍兰. 隐秩序: 适应性造就复杂性[M]. 上海: 上海科技教育出版社, 2000.
- [5] 弗兰西斯·路纳, 本尼迪克特·史蒂芬森. SWARM中的经济仿真: 基于智能体建模与面向对象设计[M]. 北京: 社会科学文献出版社, 2004.
- [6] 魏一鸣, 吴刚, 刘兰翠, 等. 能源-经济-环境复杂系统建模与应用进展[J]. 管理学报, 2005, 2(2): 159 - 170.
- [7] SHAH K N, BANDYOPADHYAY S. Economic growth and environmental quality: time series and cross-country evidence[R]. Background paper for the world Development Report, 1992.
- [8] FRIEDL B, RAYNER A J, BATES J M. The Environmental Kuznets Curve: an empirical analysis[J]. Environment and Development Economics, 1997(2): 401 - 416.
- [9] HRDSSL N. Another look at population and global warming. Population, health, and nutrition policy research[R]. Washington, DC: World Bank, WPS 1020: 1992.
- [10] MALTHUS T R. Essay on the principle of population[M]. 7th ed. Dert, London, UK, 1798.
- [11] BOSERUP E. Population and technological change: a study of long-term trends[M]. Chicago, IL: University of Chicago Press, 1981.
- [12] FLOROS N, VLACHOU A. Energy demand and energy related CO₂ emissions in Greek manufacturing: Assessing the impact of a carbon tax[J]. Energy Economics, 2005, 27: 387 - 413.
- [13] 张德英. 我国工业部门碳源排碳量估算方法研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2005: 18 - 30.
- [14] 王雪娜. 我国能源类碳源排碳量估算办法研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2006: 4 - 20.
- [15] 马忠海. 中国几种主要能源温室气体排放系数的比较评价研究[D]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2002.
- [16] 徐国泉, 刘则渊, 姜照华. 中国碳排放的因素分解模型及实证分析: 1995 - 2004[J]. 中国人口·资源与环境, 2006, 16(6): 158 - 161.
- [17] 宋涛, 郑挺国, 佟连军. 环境污染与经济增长之间关联性的理论分析和计量检验[J]. 地理科学, 2007, 27(2): 156 - 162.
- [18] 王中英, 王礼茂. 中国经济增长对碳排放的影响分析[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(5): 88 - 91.
- [19] 杜婷婷, 毛锋, 罗锐. 中国经济增长与CO₂排放演化探析[J]. 中国人口·资源与环境, 2007, 17(2): 94 - 99.
- [20] 谭丹, 黄贤金, 胡初枝. 我国工业行业的产业升级与碳排放关系分析[J]. 四川环境, 2008, 27(2): 74 - 78, 84.
- [21] 徐玉高, 郭元, 吴宗鑫. 经济发展, 碳排放和经济演化[J]. 环境科学进展, 1999, 7(2): 54 - 64.
- [22] 张雷. 经济发掌对碳排放的影响[J]. 地理学报, 2003, 7(4): 629 - 637.
- [23] 殷建平, 王友绍, 徐继荣, 等. 海洋碳循环研究进展[J]. 生态学报, 2006, 26(2): 566 - 575.
- [24] SEGENITHALER U, SARMENTO J I. Atmospheric carbon dioxide and the ocean[J]. Nature, 1993, 365: 119 - 125.
- [25] 曲建升, 孙成权, 张志强, 等. 全球变化科学中的碳循环研究进展与趋向[J]. 地球科学进展, 2003, 18(6): 980 - 987.
- [26] MRATA A, TAKIZAWA T. Summertime CO₂ sinks in shelf and slope waters of the western Arctic Ocean[J]. Continental Shelf Research, 2003, 23: 753 - 776.
- [27] BROSTROM G. The role of the annual cycles for the air-sea exchange of CO₂[J]. Marine Chemistry, 2000, 72: 151 - 169.
- [28] THOMAS H. Response to Comment on "Enhanced Open Ocean Storage of CO₂ from Shelf Sea Pumping"[J]. Science, 2004, 306: 1477.
- [29] THOMAS C, CAUWET G, MINSTER J F. Dissolved organic carbon in the equatorial Atlantic Ocean[J]. Marine Chemistry, 1995, 48: 155 - 169.
- [30] WEBINGA C J, de BEAR H J W. Determination of the distribution of dissolved organic carbon in the Indian sector of the Southern Ocean[J]. Marine Chemistry, 1998, 61: 185 - 201.
- [31] OGAWA H, FUKUDA R, KOIKE I. Vertical distributions of dissolved organic carbon and nitrogen in the Southern Ocean[J]. Deep-Sea Research I, 1999, 46: 1809 - 1826.
- [32] SANDESSAI S, de SOUSA S N. Dissolved organic carbon in the INDEX area of the Central Indian Basin[J]. Deep-Sea Research, 2001, 48: 3353 - 3361.
- [33] ORGNC N, FAGANELI J, PEZDIC J. Determination of organic carbon remineralization in marine sediments (Gulf of Trieste, Northern Adriatic) using stable carbon isotopes[J]. Organic Geochemistry, 2003, 34: 681 - 692.
- [34] ACCORNERO A, HCONP, de BOME F, et al. Organic carbon budget at the sediment-water interface on the Gulf of Lions continental margin[J]. Continental Shelf Research, 2003, 23: 79 - 92.

油松、辽东栎、槲栎林区^[8]。保护区的森林群落类型主要有油松林、华北落叶松林、侧柏林、辽东栎(*Quercus liaotungensis*)林、山杨(*Populus davidiana*)；灌丛植被类型主要有连翘(*Forsythia suspensa*)灌丛、黄刺玫灌丛、三裂绣线菊(*Spiraea trilobata*)灌丛、荆条(*Vitex negundo* var. *heterophylla*)灌丛、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)灌丛、蚂蚱腿子灌丛和虎榛子灌丛等；草本植物群落主要有白羊草(*Botriochloa ischaemum*)草丛、铁杆蒿(*Atenisia sacrorum*)草丛和茭蒿(*Atenisia graldi*)草丛等。

3 动物多样性

凌井沟自然保护区野生动物在动物地理区划上属于古北界东北亚界华北区黄土高原亚区,生态地理动物群为温带森林、森林草原、农田动物群中的暖温带森林-森林草原、农田动物群^[9]。据调查,凌井沟自然保护区现有野生动物19目52科148种,其中两栖类动物1目2科3种,爬行类动物2目4科7种,鸟类10目34科107种,哺乳类动物6目12科31种。野生动物中金钱豹、褐马鸡、原麝和金雕(*Aquila chrysaetos*)为国家重点保护动物。国家重点保护动物有14种,其中鸟类12种,分别为苍鹰(*Accipiter gentilis*)、雀鹰(*A. nisus*)、大鵟(*Buteo hemilasius*)、白尾鹞(*Circus cyaneus*)、白头鹞(*C. aeruginosus*)、鵟鹞(*Circus melanoleucos*)、游隼(*Falco peregrinus*)、燕隼(*F. subbuteo*)、红脚隼(*F. vespertinus*)、红隼(*F. tinnunculus*)、纵纹腹小鹰(*Athene noctua*)、长耳鸮(*Asio otus*)等;哺乳类动物2种,分别为石貂(*Martes foina*)和兔狲(*Felis manul*)。野生动物中属于山西省重点保护动物的有7种,其中鸟类6种,分别为四声杜鹃(*Circus micropterus*)、普通夜鹰(*Caprimugus indicus*)、星头啄木鸟(*Picus caricapillus*)、牛头伯劳(*Lanius tigrinus*)、灰伯劳(*L. excubitor*)和黑枕黄鹂(*Oriolus chinensis*)等;哺乳动物1种,为刺猬(*Eumeces europaeus*)。

4 凌井沟自然保护区面临的主要问题和对策

2008年山西省林业厅批准实施了《山西凌井沟省级自然保护区总体规划》(简称“总体规划”),为全面提高凌井沟自然保护区的保护、科研监测、宣教能力和管理水平,真正发挥自然保护区在生物多样性保护方面的重要作用奠定了基础。但由于该保护区建立时间较短,保护区的基础设施、规章制度和管理措施不够完善,专业技术人员较缺乏,再加上保护区内居民人为活动的干扰,自然保护区的生态功能受到了严重影响。因此,凌井沟自然保护区生物多样性的保护工作亟

待加强。

4.1 建立健全各项规章制度,促进自然保护区的有序进行 首先,健全保护区的管理机构,将保护工作层层分解,明确各部门的保护责任;其次,按照国家和山西省的法律、法规和有关政策,建立健全保护区的各项管理制度,使保护区的管理工作有法可依、有章可循。

4.2 加强保护区的基础设施建设,提高保护区的保护能力 自2002年凌井沟自然保护区批准建立后,保护区一直与阳曲县西山林场合署办公(2块牌子1套人马),基本没有进行任何基础设施建设,大大制约了保护区管理工作的正常进行,限制了保护区对生物多样性的保护能力。因此,应按照《总体规划》内容,加快保护区的基础设施建设(科研综合办公楼、保护站、防火巡护道路、防火微波监控塔等),购置保护设备(防火巡护车等)、科研监测设备(气象观测设备、调查监测设备、环境监测设备等)和宣教设备(标本采集制作设备、宣教设备等)。提升保护区的保护、科研监测、宣教能力,最大限度地实现保护区保护生物多样性的目标。

4.3 积极开展科学研究,为生物多样性保护提供科学依据 开展有关凌井沟自然保护区的科学研究工作,掌握保护区的内生物多样性,特别是主要保护对象的具体分布、种群数量和生物学特性,对于保护区内生物多样性的保护具有极其重要的意义。因此,应组织动物学、植物学、生态学专家和技术人员,对凌井沟保护区的生物多样性进行科学考察,建立动物、植物和微生物等类群的数据库(包括分布范围、环境因子、种群数量、种群动态及人类活动的干扰程度等),为生物多样性的保护和管理奠定基础。

参考文献

(上接第8084页)

[35] 浦一芬,王明星.海洋碳循环模式——一个包括海洋动力学环流、化学过程和生物过程的二维碳循环模式的建立[J].气候与环境研究,2000,5(2):129-140.
[36] 浦一芬,王明星.海洋碳循环模式——对印度洋的模拟结果分析[J].气候与环境研究,2001,6(1):67-76.
[37] 刑如楠.带生物泵三维全球海洋碳循环模式[J].大气科学,2000,24(3):333-340.
[38] 刑如楠,王彰贵.热带太平洋表面水中CO₂对EL Niño事件响应的数值模拟[J].气象学报,2001,59(3):308-317.
[39] DINA S. Environmental Kuznets Curve hypothesis: A survey[J]. Ecological Economics, 2004, 49: 431-455.

[1] 适星亮.山西省农业自然资源丛书:八太原市卷[M].北京:中国地图出版社,1992.
[2] 李英明,潘军峰.山西河流[M].北京:科学出版社,2004:69.
[3] 王荷生,吴志芬,张镜铨,等.华北植物区系地理[M].北京:科学出版社,1997:120-121.
[4] 吴征镒.论中国植物区系的分区问题[J].云南植物研究,1979,1(1):1-22.
[5] 王荷生,张镜铨,黄劲松,等.华北地区种子植物区系研究[J].云南植物研究,1995(57):32-54.
[6] 茹文明,张峰.山西中条山东部种子植物区系分析[J].山西大学学报:自然科学版,2000,23(1):82-87.
[7] 高昆,张峰.晋城野生药用种子植物区系分析[J].山西大学学报:自然科学版,2007,30(4):538-543.
[8] 吴征镒.中国植被[M].北京:科学出版社,1980:930-945.
[9] 张荣祖.中国动物地理[M].北京:科学出版社,1999:496.
[40] 康德梦,张孟威,陈利顶.中国环境中碳、氮元素变化与大气温室效应的系统分析[M]//叶笃正,陈泮勤.中国的全球变化预研究第二部分:分报告.北京:地震出版社,1992:211-269.
[41] 陈育峰,李克让.应用林窗模型研究全球气候变化对森林群落的可能影响——以四川西部紫果云杉群落为例[J].地理学报,1996(51):73-80.
[42] 方精云,刘国华,徐嵩龄.中国陆地生态系统的碳循环及其全球意义.温室气体浓度和排放监测及相关过程[M].北京:中国环境科学出版社,1996:129-139.
[43] 李文华,李飞.中国森林资源研究[M].北京:人民教育出版社,1996.
[44] 朱学群,刘音,顾凯平.陆地生态系统碳循环研究回顾与展望[J].安徽农业科学,2008,36(24):10640-10642,10662.