

## 陆地生态系统的模型模拟

李长生<sup>1,2</sup>

(1. 美国新罕布什尔大学复杂系统研究中心; 2. 青岛大学环境科学系, 山东 青岛 266071)



**摘要:**世上万物皆由百十种化学元素组成, 追索元素的迁移转化可揭示自然界各客体的内在联系。近代生物地球化学的发展, 为实施这一朴素的哲学思想于科学研究实践提供了理论与方法。基于生物地球化学量、场、群、流的概念, 一个陆地生态系统模型已建立起来。这一名为 DNDC 的模型, 以追踪模拟碳、氮和水分在生态系统的运动为线索, 将植物初始光合生产力, 有机质在土壤的转化, 及大气-生物界面气体交换联结成一个整体, 从而将农田、森林、草原等复杂系统转化为可操作的计算机模拟模型。建立这一模型的目的是为预测在当代人类活动影响下陆地生态系统发展的趋势。中美两国科学家们最近使用此模型计算了中国水稻田甲烷气的

排放总量, 发现 20 世纪 80 和 90 年代中国稻田水管理措施的改变, 减少了中国农业甲烷排放量的 40%, 即 500 万 t。与此同时, 全球温室气体观测系统发现大气甲烷浓度的增长速率在 1980~2000 年间不寻常地降低了。DNDC 模拟的结果表明, 中国稻田甲烷排放减少的时间与数量, 与全球大气甲烷浓度增长速率降低的时间与幅度相一致。这一例证表明生物地球化学过程模型在预测生态系统变动方面的可实施性。

**关键词:**复杂系统; 陆地生态系统; 生物地球化学; 过程模型; DNDC

**中图分类号:**X13

**文献标识码:**A

## Modeling Terrestrial Ecosystems

LI Chang-sheng<sup>1,2</sup>

(1. Complex Systems Research Center, University of New Hampshire, USA;

2. Department of Environmental Sciences, Qingdao University 266071, China)

**Abstract:** The world consists of a little more than a hundred of chemical elements. Tracking transport and transformation of the elements would enable us to reveal the links among the various components existing in nature. The latest development of biogeochemistry has provided theories and methodologies to realize the pristine philosophy. A terrestrial ecosystem model, DNDC, was established based on the concepts of biogeochemical abundance, field, coupling and cycling. In DNDC, plant photosynthesis, soil organic matter decomposition, and gas exchange at the interface between earth and the atmosphere are integrated by tracking the movement of carbon, nitrogen and water in the ecosystems. Through the integration, the complex systems of farmlands, forests and grasslands have been converted into operable computer simulation models. The goal for developing this model was to predict evolution trends of the terrestrial ecosystems under anthropogenic multi-stress. Utilizing DNDC, a joint study carried by the U. S. and Chinese researchers focused on methane emissions from rice paddies in China. The results indicated that methane emission reduced by 40% or 5 Tg/yr due to a change in water management in Chinese paddies from 1980-2000. The magnitude and time span of the reduction are consistent with the observed decrease in growing rate of global atmospheric methane concentration during the last 20 years. This case study proved the applicability of biogeochemical models for predicting dynamics of

收稿日期:2003-09-04

基金项目:美国科学基金会与宇航局有关中国农业生态系统研究课题项目。

作者简介:李长生(1942-),男,陕西西安人,美国新罕布什尔大学自然资源系教授,学术方向为生态环境系统中的复杂性科学及计算机模型。

ecosystems under anthropogenic activities.

**Key words:** complex system; terrestrial ecosystem; biogeochemistry; process-based model; DNDC

## 1 引言

陆地生态系统是人类的栖息地,它提供食物、能源和生存环境。陆地生态系统包括农田、森林和草原,看似庞大而稳定,其实不然。除受大环境(如日地关系、地壳运动等)制约外,陆地生态系统在人类自身活动影响下,正在发生许多变化。不幸的是,大多这些变化是在削弱陆地生态系统的生产力和稳定性,如农田土壤肥力降低、森林覆盖减少、草原退化等。研究陆地生态系统向何处去,已成为当代科学的中心课题之一。

陆地生态系统是一复杂系统,其影响因素众多;这些因素通过物质、能量和信息交流而缔结成一个相互联系、相互制约的整体。为解析这一复杂系统,许多学科的研究者都在作出努力<sup>[1-4]</sup>。从1989年到现在,美国国家科学基金会(NSF)、环境保护局(EPA)、宇航局(NASA)、农业部(USDA)和海洋大气局(NOAA)持续支持一项探索性研究<sup>[1]</sup>,即应用生物地球化学的理论和方法来观察、分析和预测陆地生态系统的运动。DNDC模型是这一研究的具体结果之一。本文旨在通过对此模型的介绍来讨论陆地生态系统研究的一般方法。

## 2 模拟陆地生态系统的科学基础

生态系统研究始于对食物链的观察。生物体依靠与外界环境的物质交换而成为系统的一部分,并对系统作出贡献。这些物质交换过程是通过一系列物理化学反应实现的;这些反应可发生在无机环境中,也可发生在生物体内部。这些反应按其特征可大体归纳为机械位移、溶解-结晶、化合-分解、氧化-还原、吸附-解吸、络合-反络合、同化-异化等。各种各样的化学元素在这些反应的驱动下,或组合,或分离,形成种种不同化合物,发挥不同的效能,从而构造了这大千世界。陆地生态系统的形成也是以此为基础。在陆地生态系统中,化学元素的运动主要受制于7种营力,即重力、辐射、温度、湿度、酸碱度(pH)、氧化还原电位(Eh)和元素浓度梯度。虽然这种营力在自然界组合变化多端,但它们都受控于有限几种生态驱动因素,即气候、土壤、地形、植被及人类活动。近代生物地球化学的发展为分析和归纳这一复杂系统提供了理论基础和方法论。

生物地球化学是通过追踪化学元素在自然界迁移转化来研究生命与其环境关系的科学。此一学科由4个基本概念构成,即生物地球化学的量、场、群、流。这4个概念从不同角度解析生物与环境的关系,并确定了生物地球化学的研究方法。

1) 生物地球化学量(Biogeochemical abundance)。生命是无机元素在宇宙特定条件下演化的结果。生命进化长期以来受制于环境,正是地球的物理、化学条件造就了当前生命的形态和组成。许多学者指出生物和地壳的化学元素组成的相关性:地壳丰度较高的元素大多在生命体中也有较高丰度,并成为生命的必需元素;地壳丰度较低的元素大多在生命体中含量也较低。研究者们将这一丰度上的相似性归功于生物进化的结果。生物地球化学量探索生命及其无机环境(即地壳、土壤、海水等)在元素组成上的丰度效应。这种效应可能源自生命进化过程,并决定了当前生命对环境化学状态的依赖性。

2) 生物地球化学场(Biogeochemical field)。在一个特定的时空位置上,大多化学元素都处在物理位移和化学形态转化的多维运动之中;这些运动受几种环境因子控制,即重力、辐射、温度、湿度、酸碱度(pH)、氧化还原电位(Eh)及有关化学物的浓度梯度。这些环境营力在时间和空间上不断变化,形成一个动态的力场,任何一个置身其中的化学元素都将在这种多维力场的驱动下,或发生物理位移,或发生化学形态转化(图1)。用数学方法表达这一力场,并预测其时空变化,是预测化学元素在生态系统迁移转化的关键。

3) 生物地球化学群(Biogeochemical coupling)。当化学元素在环境或生物体迁移转化时,它们大多以化合物的形式存在,这注定了化学元素在生态环境中很少独来独往,它们只有结伴成群才对生命体有意义。

如碳和氮在所有植物生长中的依存关系就是一个最好的例子。化学元素在生态环境中所呈现的群组行为对于形成生物与环境的特定关系至关重要,这种群组行为可由原子结构和化学键理论进行预测。通过热力学、化学反应动力学、络合物化学及量子化学来研究这种群现象,必将是未来生物地球化学的一个重要方面。

4)生物地球化学流(Biogeochemical flow)。在生物地球化学场的驱动下,通过元素间不间断的组合与分离,元素在生态系统中呈现出一种不断的流动状态。通过这种流动,新鲜物质和能量输入生物体,新陈代谢的废物归还给环境。有时这种元素的流动会在其末端又与起点连接起来,形成一个生物地球化学循环(Biogeochemical cycle)。并不是所有化学元素都会在有意义的时间尺度内实现循环的,因此生物地球化学循环仅是生物地球化学流的一个特例。近年来,全球气候变化成为人们关注的中心,人们关心二氧化碳( $\text{CO}_2$ )、甲烷( $\text{CH}_4$ )、氧化亚氮( $\text{N}_2\text{O}$ )等温室气体的来龙去脉。由于这几种主要温室气体都是碳或氮迁移转化的中间产物,因而碳和氮的生物地球化学循环骤然成为全球生态环境研究的焦点。

在过去的十多年中,依据上述生物地球化学概念,一个模拟陆地生态系统过程的计算机模拟模型逐步建立起来<sup>[1-4]</sup>。此模型以碳(C)、氮(N)和水在陆地生态系统的迁移转化为线索,将陆地生态系统纳入一个可操作的数字化模型中。此模型命名为DNDC,代表两个英文字:denitrification(脱氮作用)和decomposition(分解作用)。这是陆地生态系统中的两个重要过程,分别导致N和C脱离土壤,进入大气。这两个过程不仅改变土壤肥力,而且释放 $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 于大气之中,从而影响陆地生态系统的可持续性 & 全球气候变化。

### 生物地球化学场是环境营力的总和

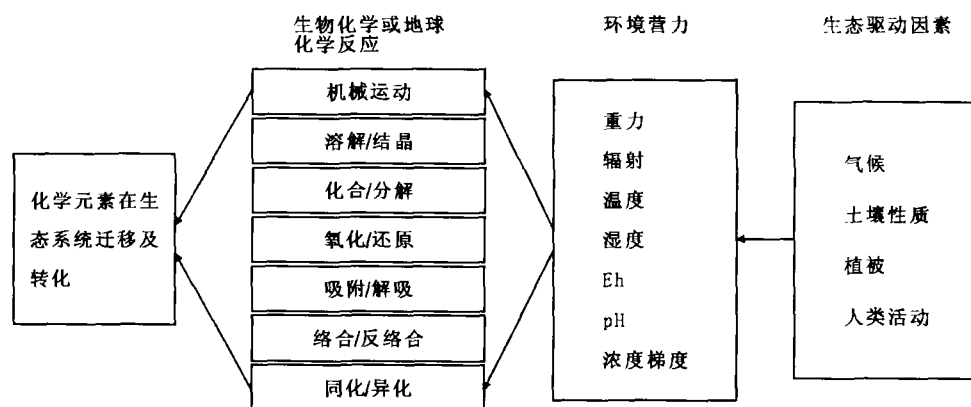


图1 环境营力驱动化学元素在生态系统中的迁移转化

### 3 DNDC模型的构成与功能

DNDC模型由两个部分组成:第一部分包含3个子模型,用于模拟土壤气候、植物生长和土壤有机质分解,其作用是根据输入的气象、土壤、植被、土地利用和管理等数据来预测植物-土壤系统的诸环境因子的动态变化;第二部分包含硝化、脱氮和发酵等3个子模型,这部分的作用是由土壤环境因子来预测微生物对C和N的各种转化速率。土壤气候子模型是由一系列土壤物理函数组成,其职能是由每日气象数据及土壤-植被条件来计算土壤剖面各层的温度、湿度、pH及Eh。植物生长子模型根据植物种类、日辐射、气温、土壤水分、土壤氮量和管理(如农田施肥、浇水、犁地、收割、草地放牧、森林采伐等)来计算光合作用、自养呼吸、光合产物分配、水分及N吸收,从而达到预测植物的生长和发育的目的。植物生长子模型可具体化为各种农作物、森林或草地,以适用于不同陆地生态系统。有机质分解子模型追踪植物残落物(如落叶、根系、秸秆

等)进入土壤后的命运。根据植物残落物分解的难易程度,这些残落物被分配到不同的土壤 C 库中,经历不同速率的分解;被分解的残留物转为土壤微生物;微生物死亡后,遗体变为土壤活性有机质;活性有机质可再次被微生物利用,直至转为惰性有机质。惰性有机质参加土壤结构建造,可在土壤中相对稳定存在数十年或上百年。在这一序列有机质分解过程中,部分有机碳转化为  $\text{CO}_2$  进入大气,部分有机碳转化为溶解态有机碳(DOC),分解的有机氮转化为铵氮( $\text{NH}_4^+$ )。硝化反应子模型根据分解而来的 DOC 和  $\text{NH}_4^+$  模拟硝化细菌的生长与死亡,从而计算  $\text{NH}_4^+$  转化为硝态氮( $\text{NO}_3^-$ )的速率。 $\text{NH}_4^+$  易被黏土或有机质吸附,而  $\text{NO}_3^-$  易被水淋溶,从而造成氮生物地球化学行为的分异。脱氮反应子模型模拟在反硝化菌作用下  $\text{NO}_3^-$  向亚硝酸根( $\text{NO}_2^-$ )、一氧化氮( $\text{NO}$ )、 $\text{N}_2\text{O}$ 、最后到氮气( $\text{N}_2$ )的连锁反应过程。在此序列反应中,各反应步骤间的动力学差异决定了  $\text{NO}$  和  $\text{N}_2\text{O}$  这两个重要微量气体的产出率。发酵反应子模型模拟在土壤淹水条件下甲烷( $\text{CH}_4$ )的产生、氧化及传输。 $\text{CH}_4$  的产生受控于土壤 Eh、温度、可给态碳(即 DOC 和  $\text{CO}_2$ ) 含量及微生物数量; $\text{CH}_4$  的氧化(即消耗)速率受控于土壤 Eh 和  $\text{CH}_4$  浓度;土壤中的  $\text{CH}_4$  可通过植物茎叶孔道传输到大气,也可由气泡形式释出。用于上述 6 个子模型的函数方程式大多由物理学、化学或生物学的基本理论导出,但也引用实验室模拟实验的结果。这 6 个子模型以日或小时为时间步长,互相传递信息,以模拟真实世界中环境条件-植物生长-土壤化学变化间的相互作用(图 2)。DNDC 包含了在陆地生态系统中起主导作用的物理、化学及生物过程,虽然每一具体的反应方程式都是简单的,但数百个方程式交互反馈,使整个模型得以再现生态系统中种种非线性过程。若读者有兴趣于这些具体反应方程式,可查阅已发表的几篇文章<sup>[1-7]</sup>。

DNDC: 一个描述农业生态系统中碳、氮生物地球化学模型

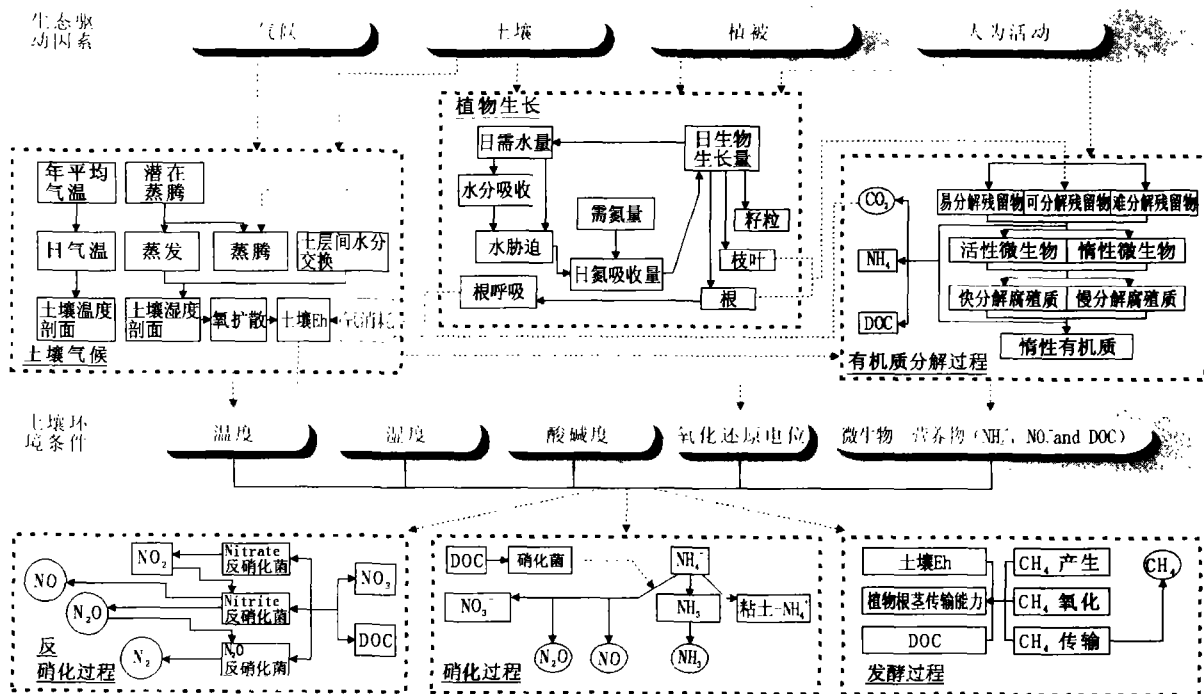


图 2 DNDC 模型示意图

模型使用者只需输入待模拟地点的日气象数据、土壤性质、植被特征及管理措施,即可运转 DNDC 去模拟该地的植物生长情况、土壤水分和碳氮动态、 $\text{CO}_2$  及多种微量气体的排放。下面给出 DNDC 模拟不同生态系统中几个具体过程的实例。

1) 例 1: 日本北海道水稻在不同大气 CO<sub>2</sub> 浓度下的生长<sup>[1]</sup>。

日本国立农业环境研究所的小林纯(Kazuhiko Kobayashi)和他的同事们在北海道的一片稻田监测了大气 CO<sub>2</sub> 浓度变化对水稻生长的影响。他们使用一种称为 FACE(Free-Air CO<sub>2</sub> Elavation) 的田间设备来控制稻田上空的 CO<sub>2</sub> 浓度。实验进行了两年(1998~2000 年),表明空气 CO<sub>2</sub> 浓度的升高促进了水稻的生长。DNDC 模拟了空气中 CO<sub>2</sub> 体积分数为  $3.8 \times 10^{-4}$ 、 $7 \times 10^{-4}$  两个条件下水稻的生长情况。模拟结果表明,高 CO<sub>2</sub> 促进了水稻的光合作用,提供了作物的生物量。模拟结果与观测基本一致(图 3)。

2) 例 2: 芬兰 Vesijika 泥碳地森林土壤的呼吸作用<sup>[2]</sup>。

赫尔辛基大学森林生态系的 Kari Minkkinen 及其同事在芬兰 Vesijako 的泥碳森林土壤上测定了 CO<sub>2</sub> 的排放量。实验进行了两年(2001~2002)。在实验进行期间,该松树林被采伐。因此实验数据可用于比较森林采伐前后 CO<sub>2</sub> 排放的区别。以当地气象、土壤、植被、森林管理等条件为输入参数, DNDC 再现了土壤 CO<sub>2</sub> 排放的数量和季节变化(图 4)。在森林被采伐后,土壤 CO<sub>2</sub> 排放降低了,模型模拟结果指出,这是由于根已死亡,根系呼吸被排除。

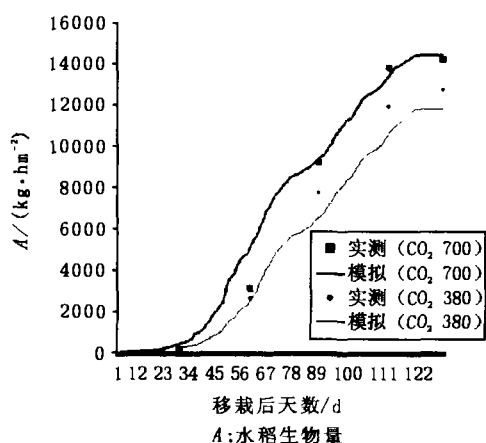


图 3 日本北海道水稻生长情况观测值与模拟值

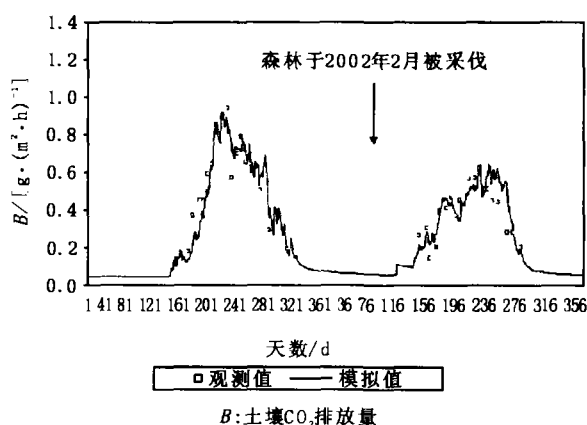


图 4 芬兰 Vesijika 泥碳地森林土壤的呼吸作用观测值与模拟值

3) 例 3: 德国 Tharandt 杉树森林与大气的碳净交换量<sup>[3]</sup>。

微气象方法被用于监测生态系统与大气碳的净交换量。慕尼黑大学森林系在德国 Tharandt 的一个杉树森林进行了 3 年(1997~1999)这样的测定。DNDC 根据当地自然条件,模拟了每日森林光合作用,树木自养呼吸及土壤异养呼吸,从而计算出该森林与大气的碳的净交换量。其结果与观测基本一致(图 5)。

4) 例 4: 英国 Rothamsted 农业实验站农田土壤碳的长期变化动态<sup>[4]</sup>

英国洛桑(Rothamsted)农业实验站以历史悠久闻名。他们对一块冬小麦土壤碳含量进行了 150 年(1840~1990)的连续观测。这块麦田一分为三,分别处理不同。在施加有机肥料的地块中,土壤碳含量逐年增长;施加化肥的土壤碳基本平衡;控制对照土壤的碳有所下降。DNDC 对这三种处理进行了模拟,其结果与观测吻合, DNDC 正确模拟了不同施肥措施对土壤碳储量变化的巨大影响(图 6),说明 DNDC 对农田管理措施的模拟基本合理。

5) 例 5: 中国江苏和美国德克萨斯水稻田甲烷气的排放<sup>[5,6]</sup>。

中国南京农业大学农业环境学院的黄耀(Yao Huang)及其同事,1999 年在江苏省江宁县一片稻田测定了甲烷排放(图 7), DNDC 模拟土壤产生的甲烷 50% 左右在未释放入大气之前已在土壤中被氧化。美国莱斯大学生物进化系 Ronald Sass 的研究组,1994 年在德克萨 Beaumont 一片水稻田进行了同样测定(图 8)。DNDC 对两实验模拟的结果表明,德克萨斯稻田排放甲烷量略高于江苏稻田,其原因是德州稻田土壤含黏土量低于江苏稻田。另外, DNDC 准确模拟了在水稻生长季节的排水晒田中断了甲烷的排放, DNDC 模拟排

水晒田是导致甲烷排放在水稻生长期突然降低的原因。

6) 例6: 美国科罗拉多草原和哥斯达利加农田氧化亚氮气的排放<sup>[7]</sup>。

美国农业部科罗拉多草原实验站的 Arvin Mosier 及其同事在一矮草草原测试氧化亚氮( $N_2O$ )多年,他们始终未测到高排放(图9),该地土壤含有机质少,气候干冷。DNDC 模拟的结果表明,硝化作用和反硝化作用都微弱,不能产生大量  $N_2O$ 。

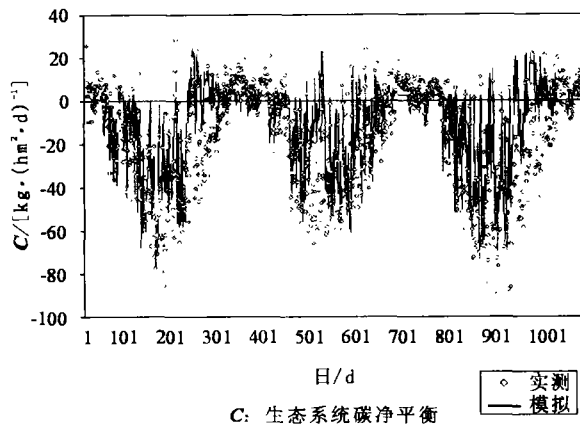


图5 德国 Tharandt 杉树森林与大气的碳净交换量观测值与模拟值

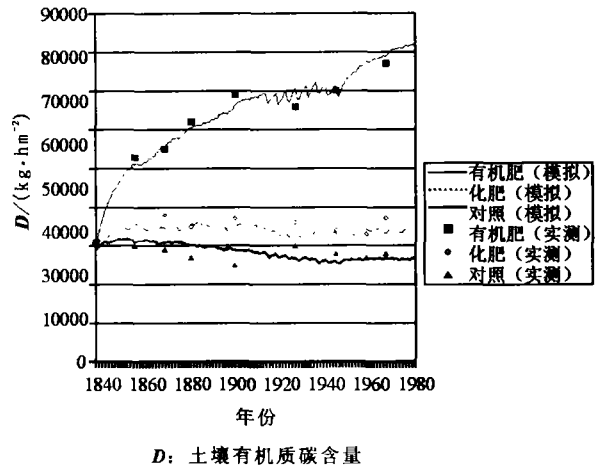


图6 英国 Rothamsted 农业实验站农田 150 年土壤碳的变化动态观测值与模拟值

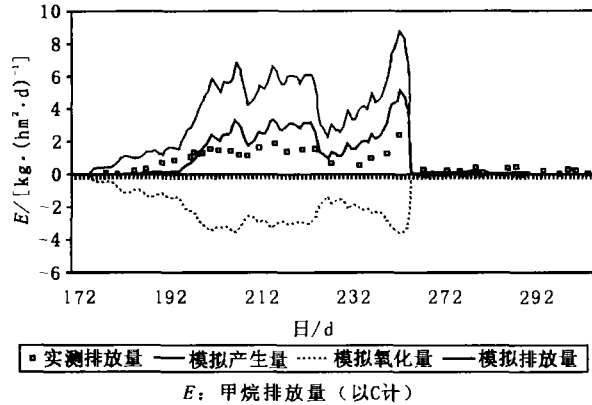


图7 中国江苏稻田甲烷气的排放观测值与模拟值

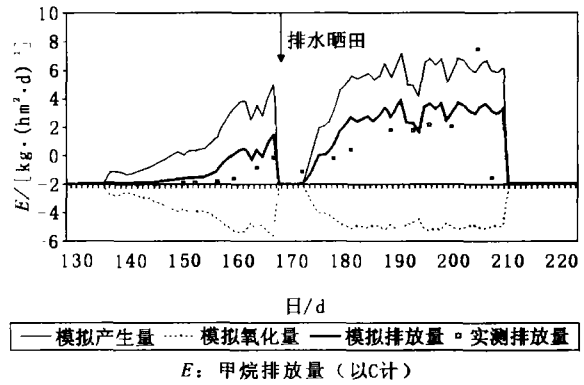


图8 美国德克萨斯稻田甲烷气的排放观测值与模拟值

美国新罕布什尔大学地球、海洋和空间研究所的 Patrick Crill 和 Michael Keller 在哥斯达利加 La Selva 的玉米第一个生长季节就测得很高的  $N_2O$  排放量(图10)。是什么造成这种区别? DNDC 通过模拟回答说,科罗拉多草原缺乏水分和土壤有机质,有机分解作用,硝化反应和脱氮反应都进行缓慢,很难生成  $N_2O$ 。哥斯达利加土壤获得丰沛降水,富含有机质,一旦化肥加下去,立即激发硝化反应和脱氮反应,产生大量  $N_2O$ 。

以上简述了世界各地验证 DNDC 的几个实例。虽然这些例子跨越不同气候地带,土壤种类及管理措施,但 DNDC 基本都再现了碳、氮和水分在各个生态系统的循环特征。其原因就在于该模型包含了影响生态系统运动的最基本的物理学、化学及生物学过程。

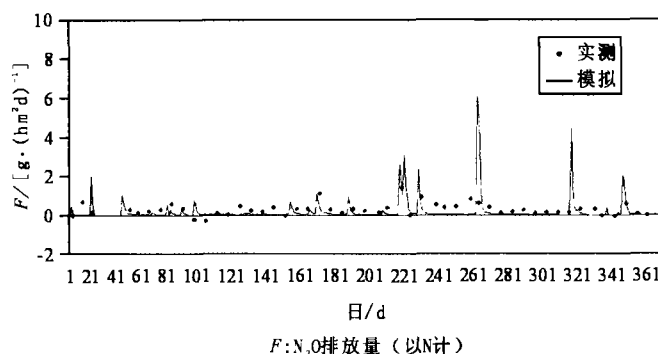


图9 美国科罗拉多草原氧化亚氮气排放观测值与模拟值

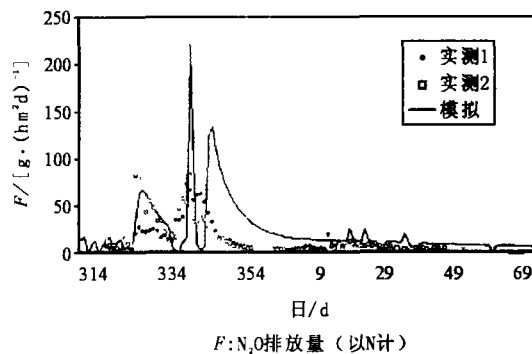


图10 哥斯达利加玉米田氧化亚氮气的排放观测值与模拟值

#### 4 DNDC 模型的应用

DNDC 现已应用在 20 多个国家的农业、草原和森林研究中。大多数国家用 DNDC 计算土壤固碳(carbon sequestration)作用和温室气体排放。作为在中国刊物上发表的一篇文章,此报告 DNDC 最近在中国应用的一个实例可能更有意义。问题的提出与中国水稻农业的水管理制度有关。自 20 世纪 80 年代初起,中国水稻农业的水管理发生了一个逐渐但却巨大的变化。在短短 20 年间,全国的水稻田由传统的持续淹灌转变成晒田间灌。即在水稻生长季,稻田可晒干或排干数次,其目的是为节水增产。由于稻田甲烷主要产生于淹水厌氧环境,晒田必然减少甲烷排放。甲烷是仅次于二氧化碳的第二大温室气体,比二氧化碳的吸热作用高 20 多倍。科学家及政治家们目前正在为如何减少全球温室气体排放忧虑。中国的这一大区域水管理制度的改变为研究者们提供了一个罕有的机会,去判别人类是否可通过改善自己的管理模式来挽救日益恶化的地球环境。在 1998~2001 年间,美国新罕布什尔大学和莱斯大学与中国科学院、中国农业科学院、中国气象科学院、南京农业大学和湖南农业大学合作,使用 DNDC 估计中国水稻田甲烷( $\text{CH}_4$ )在不同水管理模式下的排放总量<sup>[5-6]</sup>。在中美两国科学家们的共同努力下,一个中国农业数据库建立起来;该数据库提供在中国运转 DNDC 所需的输入数据,包括气象、土壤、作物轮作、农田管理等。以 1990 年气象和农田情况为基础,该协作组对全国 3 000 万  $\text{hm}^2$  的水稻田进行了模型模拟<sup>[5-7]</sup>。DNDC 计算的中国稻田  $\text{CH}_4$  的年排放量在 1980 年(持续淹灌时期)为 1200 万 t,到 2000 年(80% 稻田实行晒田)减少到 700 万 t。即由于推行晒田措施,中国稻田  $\text{CH}_4$  的排放量减少了约 40%。计算表明,中国水稻田  $\text{CH}_4$  排放量的逐年减少在时间及量值上与全球大气近 20 年  $\text{CH}_4$  浓度增长速率的降低相一致。这一研究结果表明,实行合理的管理措施,人类有可能逆转陆地生态系统恶化的趋势。

晒田措施虽在全国推行,但其减少  $\text{CH}_4$  排放的效果却各地不同。四川、海南、湖北、广东诸省效益最好,每公顷  $\text{CH}_4$  排放量减少 200~290 kg。河北、天津、宁夏、辽宁、甘肃诸省最差,其减少量小于 25  $\text{kg}/\text{hm}^2$ (表 1)。DNDC 模拟指出,效果差别的原因来自三方面:作物轮作、气候和土质。四川等南方诸省多为两季或三季轮种,气候温热,土壤含较多黏土矿物,其条件有利于在晒田情况下大幅度减少  $\text{CH}_4$  的产生。这一实例表明,生物地球化学模型不仅可用于定量分析管理措施改变对生态系统 C、N 和水分循环的影响,而且有助于判断在何时何地实施新措施会获得最佳效果。这一例证表明生物地球化学过程模型在预测生态系统变动方面的可实施性。

#### 5 结语

陆地生态系统的复杂性是对人类的一个挑战,建立以描述自然基本过程为特征的系统分析模型是人类对这一挑战的回应。目前这类模型还处在发展初始阶段,本文所介绍的 DNDC 模型仅是许多尝试中的一个。未来这一科学领域将属于那些研究者们,他们既具有生态环境方面的广泛知识,又对微观物理-化学-

生物过程有专注的兴趣。我们大学在生态环境方面的教育,应向这一方向努力。

表1 DNDC模拟的在不同水管理条件下中国稻田甲烷的排放

省(市)	稻田面积/hm <sup>2</sup>	各省甲烷排放量,范围/(TgC·a <sup>-1</sup> )		晒田导致的甲烷排放量变化	
		持续淹灌	排水晒田	变化总量/(TgC·a <sup>-1</sup> )	变化率/(kgC·hm <sup>-2</sup> )
北京	22 581	0.004 ~ 0.005	0.002 ~ 0.006	0.000	-13.3
天津	103 407	0.016 ~ 0.017	0.015 ~ 0.016	-0.001	-6.8
河北	151 431	0.026 ~ 0.028	0.026 ~ 0.027	-0.001	-5.6
山西	16 137	0.003 ~ 0.003	0.002 ~ 0.003	-0.001	-49.6
内蒙	192 002	0.021 ~ 0.034	0.005 ~ 0.027	-0.011	-57.6
辽宁	688 734	0.138 ~ 0.180	0.061 ~ 0.228	-0.015	-21.3
吉林	652 121	0.101 ~ 0.151	0.030 ~ 0.124	-0.049	-75.4
黑龙江	1 399 143	0.182 ~ 0.268	0.078 ~ 0.227	-0.072	-51.6
上海	237 261	0.095 ~ 0.150	0.056 ~ 0.125	-0.032	-135.5
江苏	2 530 072	0.771 ~ 1.211	0.480 ~ 1.039	-0.232	-91.6
浙江	1 517 040	0.389 ~ 0.730	0.138 ~ 0.550	-0.215	-142.0
安徽	2 043 957	0.456 ~ 1.129	0.077 ~ 0.865	-0.321	-157.2
福建	966 463	0.170 ~ 0.262	0.029 ~ 0.144	-0.130	-134.5
江西	2 510 899	0.556 ~ 1.092	0.072 ~ 0.711	-0.432	-172.1
山东	178 376	0.050 ~ 0.061	0.034 ~ 0.050	-0.013	-72.6
河南	708 449	0.143 ~ 0.340	0.027 ~ 0.229	-0.113	-160.0
湖北	1 922 875	0.405 ~ 1.138	0.046 ~ 0.653	-0.422	-219.6
湖南	3 207 661	0.550 ~ 1.144	0.113 ~ 0.583	-0.499	-155.6
广东	1 898 437	0.468 ~ 0.859	0.152 ~ 0.399	-0.388	-204.4
广西	1 721 824	0.256 ~ 0.667	0.013 ~ 0.256	-0.327	-190.2
四川	3 708 485	1.264 ~ 1.827	0.195 ~ 1.265	-0.815	-219.8
贵州	1 197 740	0.096 ~ 0.197	0.009 ~ 0.074	-0.105	-87.6
云南	1 521 290	0.081 ~ 0.156	0.003 ~ 0.018	-0.108	-70.8
西藏	376	0.000 ~ 0.000	0.000 ~ 0.000	0.000	0.0
陕西	279 020	0.064 ~ 0.115	0.007 ~ 0.077	-0.047	-169.2
甘肃	37 616	0.002 ~ 0.002	0.001 ~ 0.002	-0.001	-23.9
青海	352	0.000 ~ 0.000	0.000 ~ 0.000	0.000	0.0
宁夏	92 951	0.003 ~ 0.002	0.002 ~ 0.001	-0.001	-10.8
新疆	114 873	0.027 ~ 0.051	0.007 ~ 0.042	-0.014	-123.6
海南	376 099	0.104 ~ 0.204	0.019 ~ 0.073	-0.108	-287.0
中国	29 997 654	6.44 ~ 12.02	1.71 ~ 7.85	-4.454	-148.5

**参考文献:**

- [1] Li C, Frolking S, Frolking T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1992,97: 9759 - 9776.
- [2] Li C, Frolking S, Harriss R C. Modeling carbon biogeochemistry in agricultural soils[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1994, 8:237 - 254.
- [3] Li C. Modeling trace gas emissions from agricultural ecosystems[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2000,58: 259 - 276.
- [4] Li C, Aber J, Stange F, Butterbach-Bahl K, Papen H. A process-oriented model of N<sub>2</sub>O and NO emissions from forest soils: 1. Model development[J]. *J. Geophys. Res.*, 2000,105(4): 4369 - 4384.
- [5] Zhang Y, Li C, Trettin C C, et al. An integrated model of soil, hydrology and vegetation for carbon dynamics in wetland ecosystems[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002,16(4):1061.
- [6] Zhang Y, Li C, Zhou X, et al. A simulation model linking crop growth and soil biogeochemistry for sustainable agriculture[J]. *Ecological Modeling* 2002,151: 75 - 108.
- [7] Li C, Cui J, Sun G, Trettin C. Modeling impacts of management on carbon sequestration and trace gas emissions in forested wetland ecosystems[J]. *Environmental Management* (in press), 2003.