

# 生物地球化学的概念与方法<sup>\*</sup>

## ——DNDC 模型的发展

李 长 生

(美国新罕布舍尔大学 地球海洋及空间研究所, Durham; 中国科学院地球环境研究所, 西安 710054)

**摘要** 生物地球化学作为一个学科包含 4 个概念, 即生物地球化学量、流、群和场。这 4 个概念从不同角度描述了生命与其环境的关系, 生物地球化学量探索生命及其无机环境在元素丰度上的相似性, 这种相似性决定了生命体对环境化学状态的依赖性。生物地球化学流描写化学元素在生态系统中的迁移, 此迁移导致了生命体与环境间的物质和能量交换, 生物地球化学群描述化学元素在迁移转化时的复杂组合关系及其生物效应。生物地球化学场是生态系统中控制生物地球化学反应的各种环境营力的总和。生物地球化学模型即是这一综合力场及其对化学元素迁移转化影响的数学描述, DNDC 模型即基于这些概念发展起来。DNDC 模型可用来预测陆地生态系统中碳和氮的生物地球化学行为, 该模型已被一些国家用来预测农业土壤的长期肥力和温室气体排放。

**主题词** 生物地球化学 生物地球化学模型 碳 氮

## 1 引言

自从 Rachel Carson 的《寂静的春天》问世以来, 仅 30 余年, 人类对环境的忧虑已由区域转向全球。人类复杂的社会经济活动叠加在复杂的自然过程上面, 形成了非常复杂的系统。土地衰退, 江河污染, 臭氧层减薄, 全球气候变化, 这一切都在此复杂系统的驱动下悄然发生。人类的智慧又一次面临挑战: 我们是否有能力理解这一复杂现象? 我们是否能够预测未来? 我们是否能采取措施改变这恶化趋势? 在人类重新组织自己的知识来对付这一挑战时, 一个名词越来越频繁地出现在科学讨论会上或学术文章中, 这就是“生物地球化学”(biogeochemistry)。生物地球化学是什么? 如何应用它的概念和方法来研究当前生态环境问题? 本文试图从一个生物地球化学模型的发展来阐述一二。

## 2 生物地球化学的概念

任何一个学科要能自立于科学之林, 它必须具备自己特定的研究对象、基本理论和研究方法。生物地球化学是通过追踪化学元素迁移转化来研究生命与其周围环境关系的科

作者简介: 李长生 男 59 岁 教授 生物地球化学专业 E-mail: changsheng.li@unh.edu

\* 美国国家科学基金会、宇航局和环境保护局联合资助项目

2001-01-19 收稿, 2001-01-29 收修改稿

学。此一学科由 4 个基本概念构成,即生物地球化学的量、流、群和场。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方法论。

#### 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似性: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。原始的脊椎动物文昌鱼选择了铁来构成它血红蛋白的载氧体系,而它的近亲海鞘选择了钒来运载血氧。由于铁在原始海水中的丰度远高于钒,且铁在血液中的载氧效率也高,文昌鱼赢得了进化优势,最后发展成高等脊椎动物,而海鞘却进入了进化的死胡同,至今仍是海鞘。生命与环境在生物地球化学量上的这种制约关系,至今仍是决定生命健康的根本法则。中国有些山区农村的地方性克山病、大骨节病和甲状腺肿即是某些化学元素(如硒、碘等)在水土中含量过低造成;当工业污染将许多本来在地球表面含量甚微的元素(如汞、镉等)带入环境后,人和环境在化学元素丰度上的平行关系就被破坏,癌症和其它恶病也许会随之而来。生物地球化学量研究的目的是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关系,这种关系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。

#### 生物地球化学流 (biogeochemical flow)

生物与环境的联系是以化学元素在生命-无机环境界面的交换为基础的。通过化学元素在生态环境中的不断流动,新鲜物质和能量输入生物体,新陈代谢的废物归还给环境。追踪一个或多个化学元素的迁移,会清楚地看到生物与其环境如何组成一个整体,我们称之为生态系统。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 ( $\text{CH}_4$ ) 和氧化亚氮 ( $\text{N}_2\text{O}$ ) 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。

#### 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与叶绿素生成息息相关;铜在血液中的存在促进机体对铁的吸收,而镉和铅却拮抗铁的生物学作用;有机含硫化物在水体的存在会大大限制许多重金属的运移等等。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组现象,必将是未来生物地球化学的一个重要方面。

#### 生物地球化学场 (biogeochemical field)

生物地球化学流描述元素如何在生态环境系统中迁移转化,而生物地球化学场回答

是什么力量导致了元素的运动<sup>[1]</sup>。在一个特定的时空位置上,任何化学元素都处在物理位移和化学形态转化的多维动向之中;这些动向受几种环境因子控制。主要的环境因子包括重力、辐射、温度、湿度、酸碱度(pH)、氧化还原电位(Eh)及有关化学物质的浓度梯度。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)。

生物地球化学场是环境营力的总和

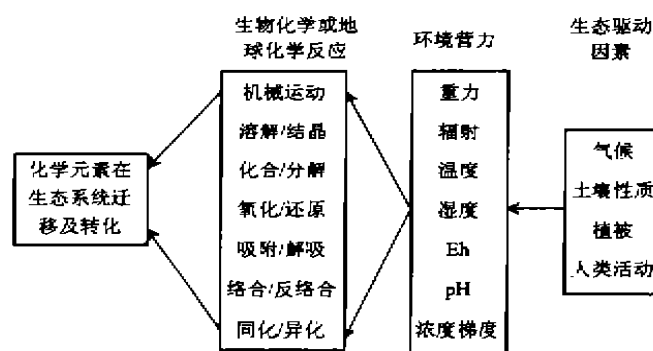


图1 在时空上不断变化的环境营力构成了一个动态的场去驱动化学元素在生态系统中的迁移转化

Fig.1 The environmental factors ever varying in space and time form a force field, which drives chemical elements to transport and transform in ecosystems

上述4个基本概念分别描述了生物地球化学学科研究的主要方面:生物地球化学量研究生物与环境在长期进化过程中形成的特定丰度关系,这种关系决定了当前生命体的元素化学组成及其对环境化学状态的依赖性;生物地球化学流追踪化学元素在生态系统中的迁移转化,描述生命和环境如何通过物质及能量交换而形成一个对立统一的整体;生物地球化学群研究原子结构或化学键如何控制多种元素在生命体的共同存在及相互制约作用,同一化学元素在不同化合状态下,可能对生命体有不同的意义;生物地球化学场是驱动元素在生态系统中迁移转化的各种环境营力的综合表达,预测生物地球化学场的时空变化是预测元素运动的前提条件。简言之,生物地球化学的量、流、群、场4个概念经纬交织构成了生物地球化学的学科主题,并演绎出生物地球化学的方法论。

### 3 生态环境复杂系统的模拟

预测全球气候变化和人类活动对生态环境的影响是当前生物地球化学研究的中心课题。环境因子(即重力、辐射、温度、湿度、pH、Eh及浓度梯度)是控制元素迁移转化的直接营力;这些环境营力的时空变化受制于4种基本生态驱动力,它们是气候、土壤、植被和人类活动。长期以来,用数学方法描述这些环境营力的联合作用一直是生物地球化学家们的梦想,但因涉及太多因素和过程而难以实现。现今计算机技术的高度发展,为模拟这种复杂系统提供了可能。在过去的10年中,我和新罕布舍尔大学地球海洋及空间研究所的同事们,联合包括中国科学家在内的国际合作者,尝试发展一个计算机模拟模型,以整合

与碳、氮循环有关的生物地球化学因素和过程,并用它来预测全球气候变化、人类活动和陆地生态系统间的相互影响。

这一模型名为 DNDC,它代表两个英文词:denitrification(脱氮作用)和 decomposition(分解作用)。脱氮作用和分解作用是分别导致氮和碳脱离土壤进入大气的主要反应。这两个反应不仅改变土壤肥力,而且释放  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  于大气之中,是影响农业持续发展及全球气候变化的重要生物地球化学过程。DNDC 模型由两个部分组成:第 1 部分包含土壤气候、植物生长和有机质分解等 3 个子模型,其作用是根据输入的气象、土壤、植被、土地利用和农田耕作管理数据预测植物-土壤系统中诸环境因子的动态变化;第 2 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上述 3 个微生物参与的化学反应的速率。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、土壤氮量和田间管理(如施肥、浇水、犁地、除草、收割、放牧等)来预测植物的生长和发育。有机质分解子模型追踪农作物收割后留在地里的植物残体(即根和地里秸秆)的命运。根据作物残留物分解的难易程度,这些秸秆首先被分配到 3 个残留物库中,各库的特征分解速率不同;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和死亡,从而计算  $\text{NH}_4^+$  转化为硝态氮( $\text{NO}_3^-$ )的速率。 $\text{NH}_4^+$  易被粘土或有机质吸附,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(NO)、 $\text{N}_2\text{O}$ 、最后到氮气( $\text{N}_2$ )的连锁还原反应。在此序列反应中,各反应步骤间的动力学差异决定了 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。整个模型结构可参阅已发表文章<sup>[2]</sup>。

上述 6 个子模型的函数方程式或由物理学、化学或生物学的基本理论导出,或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。DNDC 包含了陆地生态系统的基本物理、化学及生物过程,虽然每一具体的反应方程都是简单的,但数百个方程式交互作用,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,可查阅文章[1~3] 1)。

DNDC 是一点位模型。当模拟任一地点(如 1ha 农田)上的生物地球化学过程时,需要该点位的气象和土壤等输入参数来支持,这些参数代表着驱动此点生态系统运动的基本要素。具体输入参数内容见表 1。

1) Li C The challenges of modeling nitrous oxide emissions. 1999

表1 DNDC模型所需的输入参数  
Table 1 Input parameters required by the DNDC model

| 项目 | 输入参数  |
|----|---|
| 气象 | 日最高气温,日最低气温,日降水量,日照时数或太阳辐射量   |
| 土壤 | 质地,容重,粘土含量百分比,酸碱度,总有机质含量  |
| 植被 | 农作物类型,复种及轮作,或草地类型,或森林种类   |
| 管理 | 犁地次数,时间及深度,化肥施用次数,时间,深度,种类及数量,有机肥施用次数,时间,深度,种类及数量,灌溉次数,时间及水量,水稻田淹水及晒田次数及时间,除草次数及时间,放牧牲畜种类,头数及放牧时间 |

DNDC 读入所有输入参数后,即开始模拟运转。DNDC 首先计算土壤剖面的温度、湿度、氧化还原电位等物理条件及碳、氮等化学条件;然后将这些条件输入到植物生长子模型中,结合有关植物生理及物候参数,模拟植物生长;当作物收割或植物枯萎后, DNDC 将残留物输入有机质分解子模型,追踪有机碳、氮的逐级降解;由降解作用产生的可给态碳、氮被输入硝化、脱氮及发酵子模型中, DNDC 进而模拟有关微生物的活动及其代谢产物,包括几种温室气体。DNDC 日复一日地运转,并记录每日各项预测结果。当一个模拟年结束时,一个全年总结报告会自动生成。DNDC 的模拟时间尺度可少至几日,多至几百年。每日或每年的输出项目包括土壤物理化学环境条件、植物生长状况、土壤碳及氮库、土壤-大气界面的碳及氮交换通量。表 2 给出输出项目的详细内容。

表2 DNDC模型的输出参数  
Table 2 Output parameters of DNDC

| 项目   | 输出参数   |
|------|--|
| 土壤物理 | 逐日变化的土壤温度剖面、湿度剖面、pH剖面及Eh剖面、水分蒸发量   |
| 土壤化学 | 每日土壤有机碳、氮库量、DOC库量、 $\text{NO}_3^-$ 和 $\text{NH}_4^+$ 含量,有机质矿化速率  |
| 植物生长 | 日植物生长量,生物量在根、茎、叶及籽粒的分配,氮吸收量、水分吸收量  |
| 气体排放 | $\text{CO}_2$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{NO}$ 、 $\text{N}_2$ 及 $\text{NH}_3$ 每日排放通量 |

这些输出数据可用来与野外实地观测结果对比,以验证模型预测的可靠程度。经过充分验证后,模型才可以用于实际问题的研究。

## 4 模型的验证

在理论分析和实验观测的基础上,生物地球化学模型利用现代快速计算机技术将基本的物理、化学及生物过程组织起来,缔造了一个虚拟的生态系统。尽管每一细节过程都是有理论或观测根据的,但整个系统是否具备真实生态系统的特征呢?回答这一问题的惟一途径是进行模型验证。模型验证即是应用真实的驱动参数来运转模型,看模型的预测是否与在真实生态系统中观测的结果一致。DNDC 是一个以预测陆地生态系统碳和氮生物地球化学行为为目标的模型,因此 DNDC 验证的焦点是碳和氮在生态系统中的库和流通量。在 DNDC 发展期间,我们已收集了大量观测数据来验证模型的可靠性;1992 年 DNDC 首次发表后,此模型转入许多国家研究者的手中,受到更广泛的检验。1995 年在英国洛桑 (Rothamsted) 农业实验站举办的“应用长期观测数据评价土壤有机质模型”国际高

级学术讨论会上,9个选自世界各国的模型受到12组世界不同地点土壤碳库动态变化长期观测数据的检验,DNDC被评为较好的四个模型之一<sup>[4]</sup>。1995~1997年间,在美国科罗拉多州举行的美国微量气体网络(TRAGNET)模型比较会议上,DNDC较好地模拟了来自美国、英国的苏格兰和德国农田和草原测试的 $N_2O$ 释放通量<sup>[5]</sup>。在近4~5年中,DNDC在中国、德国、加拿大、英国、澳大利亚、东南亚及中美洲一些国家得到进一步应用和验证。下面提供的几个实例,说明DNDC如何从不同角度得到检验。

### CO<sub>2</sub>释放通量的验证

C. A. Buyanovsky 等在美国密苏里州哥伦比亚一冬小麦田测量了CO<sub>2</sub>排放量<sup>[6]</sup>。该

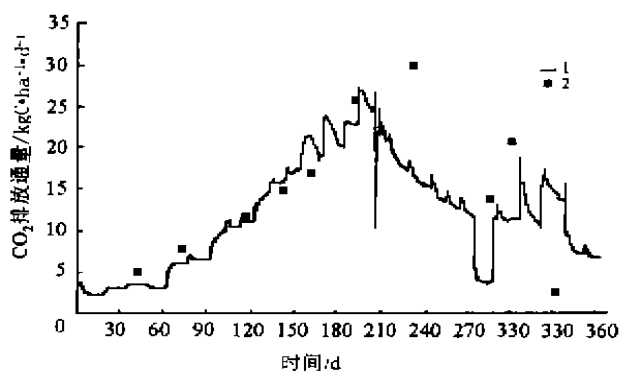


图2 美国密苏里州冬小麦田CO<sub>2</sub>排放量的模拟

1. 模拟 2. 实测<sup>[6]</sup>

Fig.2 Comparison between modeled and measured CO<sub>2</sub> fluxes from a winter wheat field in Missouri, USA

地土质为粉砂壤土,施肥50kgN/ha,传统犁地。模型较好地模拟了春夏小麦生长季节CO<sub>2</sub>排放量,但过高模拟了冬季排放(图2)。

### 土壤有机碳库长期动态的验证

在英国距离伦敦45km的洛桑农业实验站,对一小麦田的3种不同处理进行了150年连续观测,看到施加有机肥的地块土壤有机质含量持续增加,而仅加化肥的地块土壤有机质保持稳定,对照地块土壤有机质略有下降<sup>[7]</sup>。DNDC的150年模拟基本再现了这片农田的土壤有机质长期动态(图3)。

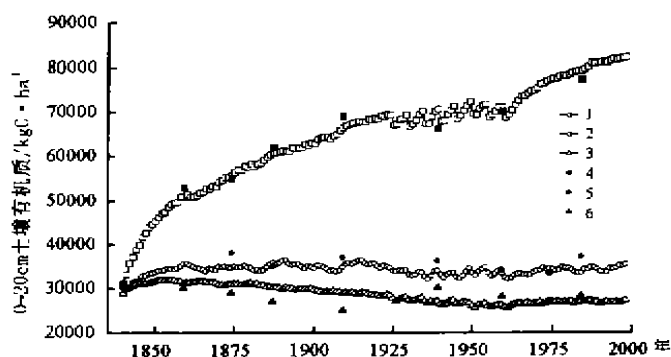


图3 英国洛桑农业实验站冬小麦田土壤有机碳含量150年变化的模拟

1. 模拟有机肥 2. 模拟化肥 3. 模拟对照 4. 实测有机肥 5. 实测化肥 6. 实测对照

Fig.3 Simulation of 150-year soil organic carbon dynamics at a winter wheat field with three different treatments in Rothamsted Agricultural Station in the U.K.

### N<sub>2</sub>O释放通量的验证

1996年,加拿大的研究者在温哥华附近的一玉米田测定了全年N<sub>2</sub>O的排放量,他们观察到两个排放高峰,一个在春天冰雪融化时,一个在夏初播种施肥时(实验数据由加拿大Brian Grant提供)。DNDC再现了这两个高峰(图4),并指出前一峰期与地面封冻后土

壤氧化还原电位降低有关,而后一峰期与施肥有关。

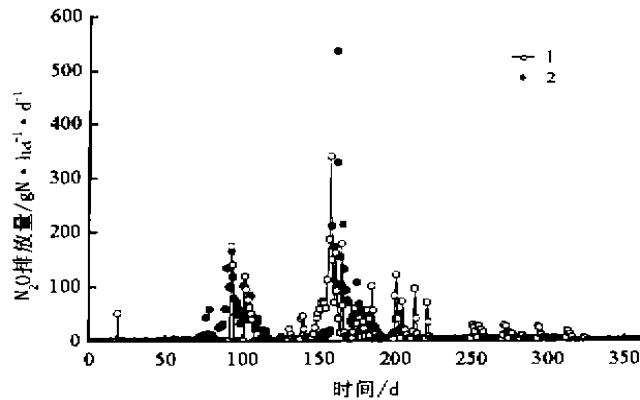


图 4 DNDC 再现了由地面冻融和施肥在加拿大一玉米田造成的两个  $N_2O$  排放高峰期

1. 模拟 2. 实测

Fig.4 DNDC captured two peaks of  $N_2O$  emissions from a corn field near Ottawa, Canada, which were caused by soil thawing and fertilization, respectively

### $CH_4$ 释放通量的验证

1997 年郑循华和她的同事在中国江苏省吴县的一水稻田连续测量了  $CH_4$  的排放<sup>1)</sup>。DNDC 模拟了  $CH_4$  的产生和氧化消耗量,模拟的  $CH_4$  净排放量与观测的结果十分接近(图 5)。

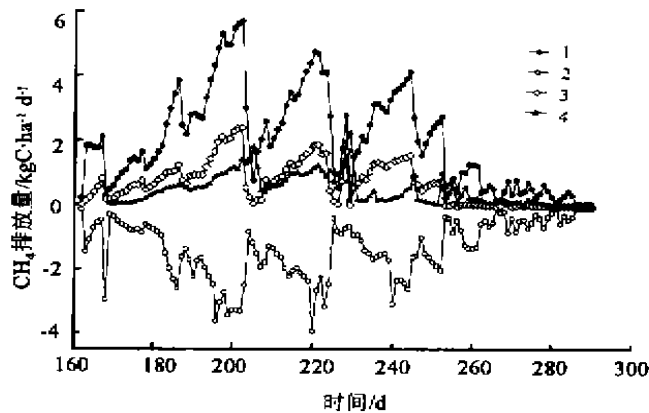


图 5 中国江苏吴县一水稻田  $CH_4$  排放模拟

1. 模拟  $CH_4$  产生量 2. 模拟  $CH_4$  氧化量 3. 模拟  $CH_4$  排放量 4. 实测  $CH_4$  排放量

Fig.5 Comparison between modeled and measured  $CH_4$  fluxes from a paddy rice field at Wu County in Jiangsu, China

### $NH_3$ 释放通量的验证

蔡贵信等在中国河南省封丘的一水稻田测量了施肥后氨气( $NH_3$ )排放的情况<sup>1)</sup>。含氮

1) Zheng X H, Wang Y S, Wang M X *et al.* Automated measurements of  $NO$  emissions from cropland. 1998

90kg 的碳酸氢铵施加入田后,  $\text{NH}_3$  排放量逐日减少。野外观测记录了  $\text{NH}_3$  排放率强烈的昼夜变化, DNDC 只模拟了日平均排放量, 结果与野外数据相合(图 6)。

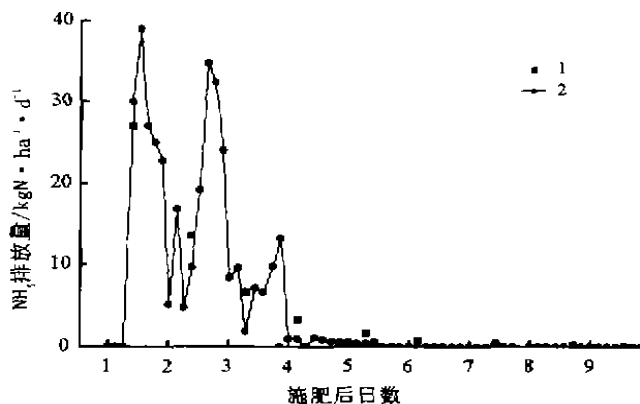


图 6 DNDC 模拟了中国河南封丘一水稻田施碳酸氢铵后  $\text{NH}_3$  排放量逐日降低的趋势  
1. 模拟 2. 实测

Fig.6 DNDC captured the trend of  $\text{NH}_3$  emissions after an application of fertilizer ammonium bicarbonate in a paddy rice field at Fengqiu, Henan, China

除上面引用的例子外,更多的模拟验证结果可在文章[9~12] 1)中看到。在跨越气候带及土地利用类型的情况下, DNDC 不经内部参数调整,可以在数量和动态方面比较接近地模拟多种碳、氮的库量和流量,这说明在 DNDC 的结构中已包含了陆地生态系统生物地球化学过程的主导因素和过程。

## 5 建立数据库及区域预测

如果一个生物地球化学模型仅能在点位的尺度上工作,它的作用将是有限的,因为任何重大的生态环境问题都是在大尺度上发生,并在大尺度上进行管理或治理。实际上,只有在大区域或国家尺度上所获得的科学结论,才能有效推动新的政策或立法。DNDC 在点位的尺度上将生态驱动因素(即气候、土壤、植被及人为活动)与环境营力(即辐射、温度、湿度、pH、Eh 及有关化学物的浓度梯度)联系起来,并进一步计算各种生物地球化学反应的方向和速率,从而达到预测碳、氮这一生物地球化学元素组的量和流。当把 DNDC 的预测由点位扩展到区域时,我们实际上是将此区域划分为许多小单元,并认为每一小单元内部各种条件都是均匀的,使 DNDC 对所有单元进行逐一模拟。在生物地球化学模型建成之后,实现区域预测的关键是数据库。支持生物地球化学模拟预测研究的数据库是储存运转该模型所需全部输入数据的设备。这种数据库一般包括两部分:一部分储存直接与地理坐标有关的数据,如地形、气候、植被类型、土壤类型、人口、牲畜种类和密度等;另一部分储存与地理坐标没有直接关系的数据,如农作物生理特性、耕作制度、化肥种类和土壤理化性质等。前一部分数据一般存为地理信息系统(GIS)格式,以便于通过地理坐标

1) Xiu W B, Hong Y T, Chen X H *et al* Agricultural  $\text{N}_2\text{O}$  emissions at regional scale: A case study in Guzhou, China. 1999

调用;后一部分数据存为普通数据格式,在模型运转过程中根据需要调用。当前 DNDC 的标准 GIS 数据库是以县为基本单元,这主要是因为我们所获得的美国和中国农作物数据都是以县为单位统计的,采用这种 GIS 格网系统可最大程度地保留数据的原始精度。

数据库不仅是储存现实数据的设备,也是进行预测的主要工具。譬如,要预测中国西北地区部分农田转换为草地对整个生态系统碳、氮和水循环的影响,就首先要根据这一“农转草”的规划设想修改现有数据库,使此规划在数据库中得到实现,从而形成一个可供模型模拟的虚拟规划。用这一虚拟规划去运转模型,就会观察到我们所关心的生态系统在新条件下的种种反应,使我们得以甄别哪些自然或人为因素可能是使该生态系统向预想方向发展的主要限制条件,哪些潜力还可以进一步发掘。模型模拟结果会显示出不同地点、不同年份和不同管理方法间的差异等,这些结论无疑会为改进及实施这一规划提供非常有用的科学依据。

应用这一“生物地球化学模型-数据库”研究工具,中、美两国科学家合作,最近完成了一项“美、中两国农业生态系统对比研究”。在此研究中,我们建立了美、中农业数据库,以支持 DNDC 对整个美国和中国农业生态系统的模拟。此数据库包括了当前美、中两国县级的气象、土壤、农作物类型及面积、耕作制度等数据。这一研究产生了一些令人惊异的结果,如发现美、中两国农田在碳循环方面的巨大差异。虽然美、中两国具有相近数量的农田面积,但两国农田肥力状况十分不同。中国农田每年丢失有机碳量为  $5\,700 \times 10^4\text{t}$ ,土壤有机质急剧减少的地区遍布中国的东北、西南和西北诸省。而美国农田每年仅减少有机碳  $1\,000 \times 10^4\text{t}$ 。模型模拟结果表明,在农作物残留物管理上的不同是拉大美、中土壤肥力差距的主要原因。美国农田在收割中几乎将全部秸秆铡碎后就地还田;而中国秸秆 60% 烧掉,2% 用于工业原料,20% 用于饲料,仅 15% 秸秆还田。美国农业每年还田秸秆碳量为  $35\,000 \times 10^4\text{t}$ ,而中国仅为  $8\,000 \times 10^4\text{t}$ 。由于还田秸秆逐渐分解后产生的无机氮可供作物吸收,所以美国农田由秸秆还田所获得的免费氮肥比中国多  $1\,200 \times 10^4\text{t}$ ,而中国全国氮肥年生产量仅为  $1\,600 \times 10^4\text{t}$ 。由于中国农田土地不能经由有机质自然分解提供较多氮,中国农民不得不使用大量化肥去满足作物的需要。美国每公顷农田平均施用化肥 60kg,而中国每公顷农田平均施用化肥 120kg。由于化肥中氮被植物吸收的效率远低于有机质通过缓慢分解而逐渐释放的氮素,高达 1/3 的氮肥会被淋溶向江河湖海,造成水体污染。中国近来广泛发生的河湖富营养化即是过量施用化肥的结果。模型研究结果指出,当前中国广泛发生的土地肥力下降、土壤沙化和水体富营养化皆出一源,即土壤有机质的丢失;恢复土壤有机质是维护中国农业持续发展及环境安全的关键。这一例子说明生物地球化学模型的应用在帮助人类认识和管理复杂生态环境问题中扮演着重要角色。

自俄国科学家 В. И. Вернадский 在他的名著《地球化学》(La Géochimie, 1924 年出版于巴黎)中首次提出生物地球化学的概念以来,将近 80 年过去了。在前 50 多年中,这一学科虽在找矿和人、畜地方病研究上有所应用,但并未得到充分发展。仅仅在近二十几年中,由于对生态环境危机感的急剧增长,人类才静下心来重新思考生命与环境的基本关系,从而为这一学科的发展带来了新的契机。生物地球化学以追踪化学元素迁移变化来探索生命与环境间的复杂关系,为当代人类提供了思路和方法论。DNDC 模型发展是我们长期生物地球化学努力的一部分,我们期待更广泛的合作,使这一学科在保护我们星球

的生态环境过程中得到成长。

**致谢** 感谢中国的合作者庄亚辉、孙建中、戴昭华、王效科、郑循华、黄耀、张宇、秦小光、邱建军、廖柏寒等,他们在模型发展和数据库建立方面做出了许多贡献;同时也借此机会向美国、德国、英国、荷兰、芬兰、加拿大、澳大利亚和泰国的合作者们表示谢意。

### 参 考 文 献

- 1 Li C, Aber J, Stange F *et al*. A process-oriented model of N<sub>2</sub>O and NO emissions from forest soils: 1. Model development. *Journal of Geophysical Research*, 2000, **105**:4 369~4 384
- 2 Li C, Frolking S, Frolking T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: 1. Model structure and sensitivity. *Journal of Geophysical Research*, 1992, **97**:9 759~9 776
- 3 Li C, Frolking S, Harniss R C. Modeling carbon biogeochemistry in agricultural soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 1994, **8**:237~254
- 4 Smith P, Smith J U, Powlson D S *et al*. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments. *Geoderma*, 1997, **81**:153~225
- 5 Frolking S E, Mosier A R, Ojima D S *et al*. Comparison of N<sub>2</sub>O emissions from soils at three temperate agricultural sites: Simulations of year-round measurements by four models. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, **52**:77~105
- 6 Buyanovsky C A, Wagner G H, Gantzer C J. Soil respiration in a winter wheat ecosystem. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, **50**:338~344
- 7 Jenkinson D S. The Rothamsted long-term experiments: Are they still of use? *Agronomy Journal*, 1991, **83**:2~10
- 8 Cai G X, Zhou Z L. Gaseous loss of fertilizer nitrogen from rice fields. *Acta Pedologica Sinica*, 1995, **32**:128~135
- 9 Li C, Frolking S, Frolking T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events. 2. Applications. *Journal of Geophysical Research*, 1992, **97**:9 777~9 783
- 10 Li C, Frolking S, Croker G J *et al*. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the DNDC model. *Geoderma*, 1997, **81**:45~60
- 11 Plant R A J, Veldkamp E, Li C. Modeling nitrous oxide emissions from a Costa Rican banana plantation. In: Plant R A J ed. *Effects of Land Use on Regional Nitrous Oxide Emissions in the Humid Tropics of Costa Rica*. Veenendaal: Universal Press, 1998, 41~50
- 12 Stange F, Butterbach-Bahl K, Papen H *et al*. A process-oriented model of N<sub>2</sub>O and NO emission from forest soils: 2. Sensitivity analysis and validation. *Journal of Geophysical Research*, 2000, **105**:4 385~4 398

## BIOGEOCHEMICAL CONCEPTS AND METHODOLOGIES: DEVELOPMENT OF THE DNDC MODEL

Li Changsheng

*(Institute for the Study of Earth, Oceans and Space, University of New Hampshire, Durham,*

*Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710054)*

### Abstract

Biogeochemistry, as a scientific discipline, consists of four concepts. They are biogeochemical abundance, flow, coupling and field. The four concepts interpret relationships between life and its environment, but from different angles. Biogeochemical abundance explores the correlation between life and its inorganic environment (*e. g.*, earth's crust, soil, sea water etc.) in their elementary abundance, which may originate from life's evolution and determines current life's dependence on the environmental chemical status. Biogeochemical flow describes transport of chemical elements between life and its environment, through which they form an interacting entity by exchanging matter and energy. Sometimes we call the elementary flow as biogeochemical cycle when the flow closes within a meaningful time span. Biogeochemical coupling answers why the chemical elements act in couple or group during their transport and transformation in ecosystems. Biogeochemical field is an assembly of the environmental forces, which determine directions and rates of all relevant biogeochemical reactions. Biogeochemical model is a mathematical expression of the forces and their effects on the elementary abundance, flow and coupling. To predict carbon (C) and nitrogen (N) biogeochemistry in terrestrial ecosystems, we developed a model. DNDC, by integrating the biogeochemical concepts into a computing framework. DNDC consists of two components for predicting effects of basic ecological drivers (*e. g.*, climate, soil, vegetation and anthropogenic activity) on environmental factors (*e. g.*, radiation, temperature, moisture, Eh, pH and substrate concentration gradient), and effects of the environmental factors on nitrification, denitrification and fermentation in the simulated ecosystems, respectively. Trough validations against dozens of data sets measured in cropland, grassland and forests worldwide, DNDC has demonstrated its ability in predicting C and N cycles as well as greenhouse gas emissions in a wide range of terrestrial ecosystems. DNDC has been linked to GIS databases and remote sensing data sets to scale up C and N predictions for large regions such as total croplands in the U. S. and China.

**Key words** biogeochemistry, biogeochemical model, carbon, nitrogen