

农田生态系统碳循环模型研究进展和展望

刘 昱¹, 陈敏鹏^{2*}, 陈吉宁¹

(1. 清华大学环境学院, 北京 100084; 2. 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081)

摘 要: 农田生态系统是陆地生态系统碳循环过程中最活跃的碳库。研究农田生态系统碳循环, 对温室气体减排及研究全球气候的变化都具有极其重要的意义。农田生态系统碳循环研究是一个非常复杂的过程, 碳循环模型是研究农田生态系统碳循环最有效的手段。该文综述了农田生态系统碳循环的最新研究进展, 总结了农田生态系统碳循环的流动过程, 介绍了碳素在不同碳库以及碳库不同组分之间迁移转化的规律, 梳理了从 1960 年至今的农田生态系统碳循环模型并进行了分类, 阐述了国际主要模型以及中国自主开发的碳循环模型的应用情况。未来农田生态系统碳循环的研究方向为: 1) 探索农田生态系统碳循环机制; 2) 从空间时间上完善对碳循环过程的研究; 3) 考察氮循环、水循环、微生物与碳循环的关系; 4) 利用碳循环模型来估算不同的管理实践下碳在不同农田的再分配; 5) 开发利用碳循环模型, 为政府制定相关政策提供相关数据参考。

关键词: 生态系统; 模型; 土壤; 碳库; 碳循环; 农田

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2015.03.001

中图分类号: S181

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-03-0001-09

刘 昱, 陈敏鹏, 陈吉宁. 农田生态系统碳循环模型研究进展和展望[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 1-9.

Liu Yu, Chen Minpeng, Chen Jining. Progress and perspectives in studies on agro-ecosystem carbon cycle model[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(3): 1-9. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

大气中二氧化碳(CO₂)浓度逐年升高, 其体积分数在工业革命前为 280×10⁶, 到 2011 年上升为 430×10⁶, 从 1750 年到 2010 年累积的 CO₂ 总排放量为 1300±110 Gt, 其中 2010 年的 CO₂ 排放量为 49±4.5 Gt^[1-2]。由此导致的气候变化已经对全球的社会经济系统和自然系统造成了广泛而深入的影响^[3-7]。全球碳循环, 尤其是陆地生态系统碳循环, 也因此倍受科学界的关注^[8-11]。

农田生态系统是陆地生态系统重要的组成部分, 既是重要的 CO₂ 排放源, 也是重要的碳汇。全球耕地面积占陆地面积的 38.5%^[12], 农田生态系统提供着全世界 66% 的粮食供给^[13], 农田生态系统的持续性是人类社会持续发展的前提和重要保障。相关研究表明, 农林、林业和土地利用直接排放的 CO₂ 占人为温室气体排放量的 24%, 其中农业的贡献达到 10%~12%^[14-16]。虽然只占陆地碳储量的 10% 左右, 农田生态系统作为最活跃的碳库^[17], 可以在最短时间内通过人为活动加以调节。因此, 开展农田生态系统碳循环研究, 促进农田生态系统固碳减排, 对于确保全球粮

食安全与气候变化减缓和适应都具有积极意义^[18]。

由于碳循环过程及各碳库之间的碳通量和反馈机制的复杂性, 模型被认为是研究农田生态系统碳循环最有效的手段, 本文基于农田生态系统碳循环研究的最新进展, 分析了农田生态系统碳循环的主要碳库以及碳在不同库之间的迁移转化规律和机理, 综述了农田生态系统不同碳循环模型的特征和应用, 尤其是中国自主开发的碳循环模型在国内外应用前景, 展望了农田生态系统碳模型研究发展方向。

1 农田生态系统碳循环的主要过程

与自然生态系统不同, 农田生态系统是集约化的生产系统具有固碳周期短、蓄积量大、强度大等特点^[19]。农田生态系统主要碳库包括植被碳库和土壤碳库^[20]。植被碳库一般是指植物体部分, 包括植物地上部分和地下的活根。植物体每天进行光合作用固定大量的 CO₂ 以维持生态系统的正常运转, 因此植被碳库的活性非常高, 它与大气碳库间的交换也是碳循环的主要过程之一。基于净初级生产力(net primary productivity, NPP)的评估表明, 全球植被的碳储量大约为 550~950 Pg。土壤碳库是土壤及农田生态系统碳循环的核心, 不仅在维持土壤质量方面起着关键作用, 也对全球气候有重要控制作用。土壤碳库包括土壤有机碳库和无机碳库两大部分。由于无机碳以碳酸盐形态存在, 活性很低, 对环境因子不敏感, 所以研究中的土壤碳库主要指土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)库^[21-22]。据统计, 全球 1 m 深度表层土壤的总碳量为 2100 Pg, 是大气碳库的 3 倍, 是植被碳库的 2~4 倍^[3], 其中有机碳库储量大约为 1550 Pg。土壤

收稿日期: 2015-01-02 修订日期: 2015-01-26

基金项目: 国家科技支撑计划(2013BAD11B03); 国家自然科学基金项目(71103186); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(BSRF201311)项目资助

作者简介: 刘 昱, 女, 安徽蚌埠人, 博士生, 主要从事物质流分析研究。北京 清华大学环境学院, 100084。Email: l-yu10@mails.tsinghua.edu.cn

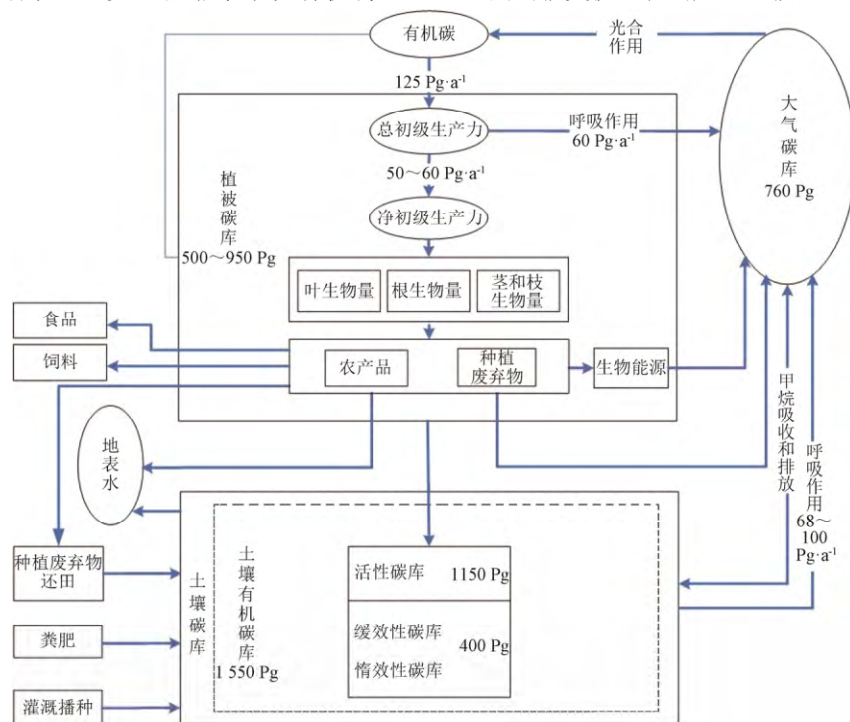
*通信作者: 陈敏鹏, 女, 江西鄱阳人, 副研究员, 博士, 研究方向为农业系统物质循环模拟和农业环境政策分析。北京 中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 100081。Email: chenmp@ami.ac.cn

有机碳库又可进一步划分为活性有机碳库和非活性有机碳库, 其中非活性碳约占土壤总有机碳库的 25% 以上^[23]。也有学者把土壤有机碳库分为活跃碳库 (active SOC pool), 缓效性碳库 (intermediate SOC pool) 和惰性碳库 (passive SOC pool) 3 部分^[24]。其中, 活跃碳库指在一定的时空条件下, 易受植物与微生物的影响、溶解性较好、且在土壤中移动速度较快、易氧化分解的土壤碳素, 包括糖类、氨基酸和大部分未分解有机碎屑等。缓效性碳库是难分解的植物和较稳定的微生物包括半分解有机物、有机团聚体和少部分未分解有机碎屑等, 它们对土壤微生物降解具有一定抵抗力, 但在干扰情况下易发生结构性变化, 降低其抵抗微生物降解作用的能力。惰性碳库物理和化学性质都相对稳定, 对土壤微生物降解具有较强抵抗力, 能长时间地存在域土壤中, 主要包括非亲水性有机物、

与黏粒粉粒矿物结合的有机酸复合体等^[25-27]。

农田生态系统碳循环过程简单而言就是围绕植被和土壤两大碳库与环境 (大气和水体) 之间的输入和输出过程, 以及碳库不同组分之间的迁移转化过程 (见图 1)。对碳植被库而言, 光合作用是最重要的输入过程, 植物的呼吸作用、作物收获、生物能源利用则是最重要的输出过程。另外, 植被碳库还通过种植废弃物还田进入土壤碳库。对土壤碳库而言, 输入的碳包括作物秸秆、畜禽粪便、绿肥等各种有机肥以及旱地对甲烷的吸收, 输出则主要包括土壤的呼吸作用。

农田生态系统碳循环是一个非常复杂的过程, 受到气候、种植制度、土壤性质、农田管理等多种因子的影响和制约^[28-30]。任何一个因子的变化都会改变生态系统内各碳库之间的碳交换, 从而产生“碳汇”和“碳源”的连锁效应。



注: 引自参考文献[31-35]。

Note: From references [31-35].

图 1 农田生态系统碳循环过程示意图

Fig.1 Carbon flows in farmland ecosystem

2 农田生态系统碳循环模型的发展

从 20 世纪中期开始, 国内外研究者建立了各种模型模拟不同尺度的生态系统碳循环过程^[36-39], 其发展经历了碳平衡模型、植被-气候关系模型、生物地球化学循环模型 3 个阶段。

2.1 碳平衡模型

碳平衡模型一般为静态模型, 它们根据陆地生态系统的分类和相应实测数据, 利用不同生态系统的碳密度和分布面积计算各类生态系统的净初级生产力, 分析区域乃至全球尺度上的碳平衡^[40-41]。1968 年开发的 PSIAC (Pacific Southwest Inter-Agency Committee) 模型是最早的碳平衡模型^[42], 但大部分碳平衡模型开发应用于 20 世纪 80 年代, 包括 OBM (osnabriick biosphere model) 模型、

SPAC (soil-plant-atmosphere continuum) 模型、CANDY (carbon and nitrogen dynamics) 模型。20 世纪 90 年代以后开发的碳平衡模型较少, 代表性的模型有 ICBM (introductory carbon balance model) 模型和 C-Farm 模型^[43]。这类模型仅考虑土壤中有机碳的变化, 无法综合考虑土壤-植物-大气中碳联系, 也无法分析生态系统对全球变化的反馈效应^[41]。

2.2 植被-气候关系模型

20 世纪 80 年代开始兴起的植被-气候关系是简单的动态模型, 它以地理空间数据库为基础, 通过模拟生态系统潜在的植被分布, 预测气候变化对生态系统碳平衡的影响。主要包括 EPIC (erosion-productivity impact calculator) 模型, CERES-EGC 模型和 CARAIB (carbon assimilation in the biosphere) 模型。这类模型无法对不同

生态系统的碳密度进行机理性解释，也无法考虑土地利用和土地覆盖变化对潜在碳存贮密度的影响^[40]。

2.3 生物地球化学循环模型

生物地球化学循环模型是比较全面的碳收支模型，其结构框架和内部过程比较统一，可以描述植被与环境之间的动态过程。代表性模型包括 RothC (rothamsted carbon model)模型、CENTURY 模型、DAISY 模型(danish simulation model)、CLASS (canadian land surface Scheme)模型、DNDC(denitrification-decomposition)模型和 APSIM (agricultural production system simulator) 模型。这类模型都描述了碳在植物、大气、土壤 3 个碳库及植物-大气、植物-土壤和土壤-大气 3 个界面之间的动态过程，可以描述陆地生态系统对气候变化的响应与反馈过程、植被的变化速率、植被的组成结构变化以及土地利用和土地覆盖变化 (LUCC) 的影响，但不能模拟长期气候变化导致的植被组成和结构的变化。

3 农田生态系统碳循环模型的应用和开发

3.1 国际主流模型的应用概况

目前，国际主流模型包括 RothC、CENTURY、DNDC、

EPIC 和 APSIM 模型，在中国都有应用。大多数研究认为，上述模型可以模拟中国特定气候条件下特定土壤类型碳动态，但是对某些特殊地域极端土壤类型的农田生态系统的碳库演变趋势的分析，不同模型之间的差异比较大 (表 1)。此外，主流碳循环模型在应用实践中，不断创新完善，有一些子模型正在相继被开发出来，例如 DNDC 模型作为比较成熟的生态地球化学模型，在其上加入新的子模块，开发研制的 Manure-DNDC 模型，模拟了畜禽养殖中氮素的迁移转化^[85]；而在模拟范围方面，DNDC 模型也有了扩大化应用，例如除了对温室气体、土壤水分、氮素淋失等进行模拟外，在土壤有机碳的模拟方面也有广泛的应用。在国家尺度上，探索了中国农田土壤有机碳的变化和储量^[86]，分析了各省的有机碳饱和水平，比较了旱地和水田之间固碳能力的差异^[87]，研究了中国 6 个典型区域东北、华北、西北、中南、华东和西南地区的作物产量和土壤有机碳之间的变化关系^[88]。在区域尺度上，分析了黄土丘陵沟壑区坡地土壤有机碳储量及变化^[89]，估算了东北三省 0~30 cm 耕地土壤的碳储量和碳平衡状况^[90]。未来模型的研究，应将其与 3S 技术相结合，进一步扩大应用范围，提高其适用性。

表 1 国际主流模型在中国应用概况

Table 1 Application of mainstream models in China

模型名 Models	开发者 Designer	模型特点 Property	研究问题 Description	应用区域 Application areas	模型评述 Assessment
RothC	英国洛桑实验室 Jenkinson (1977)	结构简单，所需参数比较容易获得	模拟耕层土壤 SOC 的动态	北方旱地区 ^[44] ，东北黑土和潮土区 ^[45] ，黄土高原 ^[46-47] 和中南地区 ^[48]	可以较好地模拟中国北方 (华北、东北、西北) 旱地、东北黑土和潮土区不施肥、化肥及化肥配施有机肥处理 SOC 的动态 ^[44-45] 。有学者评估了黄土高原地区冬小麦种植土壤在不同氮肥施用条件下 SOC 的动态变化 ^[46] ，但对黄土高原等区域特殊气候和土壤类型条件下 SOC 的预测精确度较低 ^[47] ，也不适合稻作土壤 SOC 周转的预测 ^[48]
CENTURY	美国科罗拉多州立大学 Parton 等 (1987)	通用的生态系统模型，把土壤有机碳库分为活性碳库、慢性碳库和惰性碳库几部分	模拟森林、草地、农田等不同土壤植物生态系统中碳、氮、磷和硫的动态。模拟时间尺度可以为数百年、上百年甚至上千年，是最全面的生态系统模型	东部旱作农田 ^[49] ，西北部干旱区 ^[50,53] ，东北黑土 ^[51] 和冻融层 ^[52] ，华北和中南地区 ^[53]	能很好的模拟不同气候区域不同施肥处理土壤 SOC 的变化，以及不同的耕作制度下中国黑土 SOC 的演变 ^[49-53]
DNDC	美国 New Hampshire 大学李长生 (1992)	以日为时间步长，是最成功的生物地球化学循环模型之一，也是目前应用最广泛的有机碳模型之一	模拟现实环境条件下作物生长和土壤化学变化	东北地区 ^[54,56] ，西南地区 ^[55-56,60] ，华北地区 ^[56-58] ，黄土高原旱作农业区 ^[59] 和华东地区 ^[56,61-62]	可信度较高 ^[54,62] ，可模拟不同耕作制度下，不同环境因子和管理下温室气体的排放情况；可较好地模拟农田土壤水分运动的模拟效果。对麦季 CH ₄ 排放的模拟偏差较大 ^[61] ；对氮素淋失量的模拟结果存在一定偏差 ^[62] ；对于旱期和非农业活动期农田的 N ₂ O 排放反应灵敏度不够；当施氮量较少或者不施时，模拟效果较差 ^[63]
APSIM	隶属澳大利亚联邦科工组织和昆士兰州政府的农业生产系统组 (APARU) 开发 (1996)	以日为时间步长，具有模块化结构，模拟农业系统中各主要组分运转的一种机理模型	模拟不同耕作制度下，农田土壤中水、C、N 和 P 的动态变化及相互间的影响机制	黄土高原 ^[65-66,68] ，东北地区 ^[67] 和华北平原地区 ^[69]	灵活描述不同气候带和多种土壤条件下农业系统中各组分变化 ^[64-65] ，可模拟不同区域不同耕作方式和不同轮作序列的小麦、玉米和豌豆的产量、生物量及土壤水分的动态变化，从而为不同年份的动态决策和气候应变管理提供可靠依据 ^[66-68] 。但对叶面积指数则误差较大 ^[69] ，由于模型的参数众多、结构复杂，相关参数要严格根据所选作物品种特性及土壤理化性质进行设置改进
DAISY	丹麦皇家农业大学 Hansen 等 (1990)	一维模型，包含土壤水平衡、土壤热平衡、溶质平衡、氮平衡、作物和农业生态系统管理 5 个相互作用的模块	基于耕作管理措施和气象数据模拟农田作物生长、水热平衡、CO ₂ 呼吸量、有机质平衡和氮的动态变化	华北平原地区 ^[70-71]	可分析不同水氮条件下冬小麦/夏玉米的产量变化及土壤水、氮资源利用效率 ^[70] ，预测不同秸秆还田模式和施氮量对农田作物吸氮量及田间 N ₂ O 和 CO ₂ 的排放状况 ^[71] 。输入数据的可获得性成为最大障碍，土壤氮氧化物释放过程空间或时间分辨率较低 ^[72]
EPIC	美国德克萨斯农工大学黑土地研究中心和美国农业部草地、土壤和水分研究所共同研发 (1983)	作物生产力和水土流失综合应用分析模型。包括作物生长、水文、土壤温度、土壤侵蚀和养分循环 5 个模块 ^[68]	同时模拟作物产量、水土流失和养分损失，估算田间管理和水土保持措施的影响，还可用于气候变化影响评价和农业优化布局	华东地区 ^[74-75,81] ，中南地区，西北地区 ^[74-75] ，东北地区，华北平原，西南地区 ^[75] ，黄土高原 ^[76-79,84] ，黄淮海平原 ^[80]	可分析全国耕地中 C 和 N 的生物地球化学循环以及土壤有机碳储量的年变化 ^[74-75] ，也能较准确地模拟不同地区不同作物长势、土壤水分动态变化、产量和潜在产量 ^[76-81] 。模型复杂、参数繁多，加上模型结构的缺陷、参数的可变性和测量数据的错误等 ^[82] ，模拟结果存在较大不确定性 ^[83] ，尤其对极端气候条件的敏感性较差 ^[84]

3.2 国际主流模型的应用概况

国内陆地生态系统碳循环模型的研究始于 20 世纪 80 年代，目前开发的模型以静态模型为主，动态模型多是根据中国生态系统的特点对国外主流模型的改进。国

内开发的碳循环模型经验性参数较多（表 2），具有一定的地域性和局限性，有影响的模型主要有 SCNC 模型、Agro-C 模型、EPPML 模型、AVM 模型、SMPT-SB 模型、EALCO 模型等^[48,92]。

表 2 中国碳循环模型的开发和应用
Table 2 Development of Chinese carbon cycling model

模型名称 Models	开发者 Developer	模型特征 Model property	应用领域 Application area	主要问题 Problem
Agro-C	黄耀	包括 Crop-C 和 Soil-C 2 个子模型。Crop-C 子模型模拟作物净初级生产力，Soil-C 子模型评估碳库变化 ^[91]	模拟中国农业土壤有机碳年均增加量以及中国农田土壤有机碳密度增加速率 ^[92]	不适当简化碳库之间的流动导致模拟在应用时出现错误 ^[93] 。
EPPML	张娜	在 CENTURY ^[94] 、Forest-BGC ^[95] 、BIOMBG ^[96] 和 BEPS ^[97-98] 等模型基础上建立基于过程的生物地球化学循环模型，主要包括能量传输、生理调节、水循环和碳循环 4 个子模块，可以输出碳循环和水循环变量的空间分布图，包括从 1 d 到 1 a 的不同时间阶段的平均值或总量值 ^[99]	模拟土壤-植物-大气系统中的碳循环和水循环，主要应用于林业生态系统。碳循环模块可模拟生态系统总初级生产力、自养呼吸量、净初级生产力、土壤异养呼吸量、生态系统净生产力、生态系统总呼吸量、植物碳分配及光能利用率。	模拟过程不复杂，容易理解和实现，然而模拟结果与实际值有误差，需要进一步改进，所需初始值数据要求精确
AVIM	季劲钧	利用大气-植被相互作用模式研究地表物理过程与生物地球化学过程耦合的机理和实现方法，包含了大气、植被和土壤之间的主要物理和生物学过程。从上向下有大气、植被冠层和土壤表层 3 个部分 ^[100]	模拟气候与生态系统之间季节和年际变化尺度地表生物物理与植物生理生态过程的相互作用过程，与气候模式直接耦合，可计算初级生产力和地气 CO ₂ 通量。特别适用于草原生态系统对气候年际变化的响应	模型中植被的变化由植物生长模式决定，因而随气候变化而改变
SMPT-SB	于贵瑞	基于气孔行为的气孔导度-光合-蒸腾耦合模型 ^[101-102]	模型应用于长白山林区冠层尺度光合速率和蒸腾速率 ^[103] ，华北地区大田作物冬小麦和玉米叶片的光合-蒸腾耦合关系 ^[104]	模型所需要的参数很少，便于应用，然而应用领域需要进一步扩大
EALCO	王树森	模型以常规气象数据（入射长波及短波辐射、降水、空气温度、风速、大气压和比湿）作为驱动变量，模拟生态系统下垫面与大气之间水、热和碳通量交换。模型主要包括 4 个模块，包括辐射传输模块、水传输模块、植物模块、土壤模块 ^[105]	主要应用于林业生态系统碳通量的模拟以及季节性气候变化对碳通量的影响。模型能较好地从中小时、日及年尺度上反映 2 年内土壤-植被-大气之间的碳交换状况	需要进一步改善模型对凋落物的模拟以及进一步对氮素的变化进行模拟验证
SCNC	童成立	包括平衡模式和预测模式。平衡模式利用投入的有机碳量模拟土壤有机碳达到平衡时土壤有机碳各组分含量；预测模式在平衡模式的基础上利用实际投入的有机碳量进行模拟预测 ^[106]	模拟旱地和水田中不同管理措施条件下土壤有机碳的动态	较好地模拟了中国黄土高原旱地土壤不同施肥处理 SOC 的变化，且模拟效果优于 RothC-26.3 模型 ^[42] 。适合于通气状况较好的稻田土壤，但对于排水能力差和地下水位高的稻田 SOC 的模拟需进一步验证 ^[107]

4 农田生态系统碳循环的研究展望

农田生态系统碳循环研究是一个非常复杂的过程，尽管已经有了大量的模型研究，但是农田生态系统的碳循环仍然是一个“灰箱”，有的部分甚至是“黑箱”，过程和机理并不清楚。未来对其研究应着手从以下几个方面进行：

- 1) 积极探索农田生态系统碳循环机制，摸清整个循环涉及的物理、化学、生物过程以及影响碳吸收、转移和支出的因素。
- 2) 进一步细致和完善对碳循环过程的研究。从不同的空间尺度上分析各个区域不同种植模式的农田的固碳现状与潜力，变定性描述为定量测量。从不同时间尺度上研究影响各个农田生态系统固碳能力的气候、土壤、农作制度等综合因素，阐释各因素对碳循环的影响。
- 3) 重点考察农田生态系统中碳循环与氮循环、水循环的关系，分析不同氮、水条件下碳的固定情况，以及土壤微生物在碳循环过程中的作用。
- 4) 利用碳循环模型来估算不同的管理实践下碳在不同农田的再分配。

5) 进一步开发和利用碳循环模型，掌握农田生态系统碳的动态变化，实现对农田土壤肥力变化的预测及最大化利用，为减少温室气体排放，减缓农业非点源污染提供可靠依据，为政府制定相关政策提供相关数据参考。

由于中国气候格局、土壤特征、管理方式与北美和欧洲有着巨大的差异，不能像西方国家那样单季种植或休耕，必须着力于发展具有中国特色的农田固碳模式。今后中国农田生态系统碳循环模型研究的主要方向应该借鉴国际主流碳循环模型的相关经验，结合中国农田生态系统的特点，在相关机理性试验研究的基础上，开发和改善中国的农田生态系统碳循环模型，从不同的时空尺度上，分析不同区域、不同种植模式农田的固碳现状与潜力，分析碳循环与其他重要元素循环机理的结合点和耦合机制。

[参 考 文 献]

[1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis[M]. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

- Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [2] IPCC. Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability[M]. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2014.
- [3] Luo Z, Wang E L, Sun J X. Soil carbon change and its responses to agricultural practices in Australian agro-ecosystems: A review and synthesis[J]. *Geoderma*, 2010, 155(3/4): 211—223.
- [4] Piao S, Fang J, Ciais P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J]. *Nature*, 2009, 458(23): 1009—1013.
- [5] Reichstein M, Bahn M, Ciais P, et al. Climate extremes and the carbon cycle[J]. *Nature*, 2013, 500(7462): 287—295.
- [6] Xia J Y, Chen J Q, Piao S L, et al. Terrestrial carbon cycle affected by non-uniform climate warming[J]. *Nature Geoscience*, 2014, 7: 173—180.
- [7] Rumpel C, Kögel-Knabner I. Deep soil organic matter—a key but poorly understood component of terrestrial C cycle[J]. *Plant and Soil*, 2011, 338(1/2): 143—158.
- [8] Poulter B, Frank D, Ciais P, et al. Contribution of semiarid ecosystems to interannual variability of the global carbon cycle[J]. *Nature*, 2014, 509(7502): 600—603.
- [9] Carvalhais N, Forkel M, Khomik M, et al. Global covariation of carbon turnover times with climate in terrestrial ecosystems[J]. *Nature*, 2014, 514(7521): 213—217.
- [10] Gislason S R and Oelkers E H. Carbon storage in basalt[J]. *Science*, 2014, 344(6182): 373—374.
- [11] Tranvik L. Carbon cycling in the Arctic[J]. *Science*, 2014, 345(6199): 870.
- [12] FAO. Agri-environmental statistics[EB/OL]. 2012-12-30 [2014-07-07]. <http://www.fao.org/economic/ess/ess-agri/en/>
- [13] 尹飞, 毛任钊, 傅伯杰, 等. 农田生态系统服务功能及其形成机制[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(5): 929—934. Yin Fei, Mao Renzhao, Fu Bojie, et al. Farmland ecosystem service and its formation mechanism. *Chinese Journal of Applied Ecology*[J]. 2006, 17(5): 929—934. (in Chinese with English abstract)
- [14] Davis S J, Caldeira K. Consumption-based accounting of CO₂ emissions[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, 107(12): 5687—5692.
- [15] FAO. FAO Statistical Yearbook 2013: World Food and Agriculture[M]. Rome: Fao Inter-Departmental Working Group, 2013.
- [16] IPCC. Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change[M]. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2014.
- [17] 赵荣钦, 刘英, 丁明磊, 等. 河南省农田生态系统碳源/汇研究[J]. *河南农业科学*, 2010, (7): 40—44. Zhao Rongqin, Liu Ying, Ding Minglei, et al. Research on carbon source and sink of farmland ecosystem in Henan Province[J]. *Journal of Henan Agriculture Sciences*, 2010, (7): 40—44. (in Chinese with English abstract)
- [18] Smith P. Delivering food security without increasing pressure on land[J]. *Global Food Security*, 2013, 2(1): 18—23.
- [19] 张启霞. 甘肃省定西市作物秸秆资源利用与低碳农业发展研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2014. Zhang Qixia. Study on utilization of crop straws and development of low-carbon agriculture in Dingxi City, Gansu Province[D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [20] 张赛, 王龙昌. 全球变化背景下农田生态系统碳循环研究[J]. *农机化研究*, 2013, (1): 5—9. Zhang Sai, Wang Longchang. Review on carbon cycling of farmland ecosystem under the context of global changes[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2013, (1): 5—9. (in Chinese with English abstract)
- [21] Stockmann U, Adams M A, Crawford J W, et al. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2013, 164: 80—99.
- [22] 徐小锋, 田汉勤, 万师强. 气候变暖对陆地生态系统碳循环的影响[J]. *植物生态学报*, 2007, 31(2): 175—188. Xu Xiaofeng, Tian Hanqin, Wan Shiqiang. Climate warming impacts on carbon cycling in terrestrial ecosystems[J]. *Plant Ecology*, 2007, 31(2): 175—188. (in Chinese with English abstract)
- [23] Hartemink A E and McSweeney K. Soil Carbon[M]. Switzerland: Springer, 2014.
- [24] Wiesmeiera M, Schada P, Lützowa M v, et al. Quantification of functional soil organic carbon pools for major soil units and land uses in Southeast Germany (bavaria)[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 185: 208—220.
- [25] 沈宏, 曹志洪, 胡义正. 土壤活性有机碳的表征及其生态效应[J]. *生态学杂志*, 1999, 18(3): 32—38. Shen Hong, Cao Zhihong, Hu Yizheng. Characteristics and ecological effects of the active organic carbon in soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1999, 18(3): 32—38. (in Chinese with English abstract)
- [26] Paul E A, Harris D, Collins H P, et al. Evolution of CO₂ and soil carbon dynamics in biologically managed, row-crop agro-ecosystems[J]. *Applied Soil Ecology*, 1999, 11(1): 53—65.
- [27] Leite L F C, Sá Mendonça E, Almeida Machado P L O, et al. Simulation trends in soil organic of an Acrisol under no-tillage and disc-plow systems using the CENTURY model[J]. *Geoderma*, 2004, 120(3/4): 283—295.
- [28] Chery P, Humberto B C, Fabrice D C, et al. Conservation agriculture and ecosystem services: An overview[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 187: 87—105.
- [29] Dendooven L, Patiño-Zúñiga L, Verhulst N, et al. Global warming potential of agricultural systems with contrasting tillage and residue management in the central highlands of Mexico[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 152: 50—58.
- [30] Gathala M K, Kumara V, Sharmac P C, et al. Optimizing intensive cereal-based cropping systems addressing current and future drivers of agricultural change in the Northwestern Indo-Gangetic Plains of India[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2013, 177: 85—97.
- [31] 袁文平, 陈曙光. 基于遥感资料估算全球植被总初级生产力[C]// 遥感定量反演算法研讨会组织委员. 遥感定量反演算法研讨会摘要. 北京: 北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院, 2010: 133.
- [32] 李玉宁, 王关玉, 李伟. 土壤呼吸作用和全球碳循环. 地学前缘[J], 2002, 9(2): 351—157. Li Yuning, Wang Guanyu, Li Wei. Soil respiration and carbon cycle[J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(2): 351—157. (in Chinese with English abstract)
- [33] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration ion and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus*, 1992, 44(2): 81—89.
- [34] Musselman R C, Fox D G. A review of the role of temperate forests in the global CO₂ balance[J]. *Journal of the Air & Waste Manage Association*, 1991, 41: 798—807.

- [35] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis[M]. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007.
- [36] Wang D L, Daniel R, Wilfred P, et al. Terrestrial ecosystem carbon modeling[M]. New York: Springer US, 2011.
- [37] Batlle-Aguilar J, Brovelli A, Porporato A, et al. Modelling soil carbon and nitrogen cycles during land use change[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2011, 31(2): 251–274.
- [38] Roberto P, Giacomo G, Werner A K, et al. Application of the CBM-CFS3 model to estimate Italy's forest carbon budget, 1995–2020[J]. *Ecological Modelling*, 2013, 266: 144–171.
- [39] Li R H, Li X B, Li G Q, et al. Simulation of soil nitrogen storage of the typical steppe with the DNDC model: A case study in Inner Mongolia, China[J]. *Ecological Indicators*, 2014, 41: 155–164.
- [40] Zhang L, Yu D, Shi X, et al. Simulation of global warming potential (GWP) from rice fields in the Tai-lake region, China by coupling 1:50,000 soil database with DNDC model[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(17).
- [41] 王百群. 黄土区侵蚀与干旱环境中土壤有机碳氮的变化与迁移[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2004.
- Wang Baiqun. The dynamics and transfer of soil organic carbon and nitrogen in the scenario of erosion and aridity in the loessial region[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2004. (in Chinese with English abstract)
- [42] Tangestani M H. Comparison of EPM and PSIAC models in GIS for erosion and sediment yield assessment in a semi-arid environment: Afzar Catchment, Fars Province, Iran[J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2006, 27(5): 585–597.
- [43] Kemanian A R, Stöckle C O. C-farm: A simple model to evaluate the carbon balance of soil profiles[J]. *European Journal of Agronomy*, 2010, 32(1): 22–29.
- [44] Guo L, Falloon P, Coleman K, et al. Application of the RothC model to the results of long term experiments on typical upland soils in Northern China[J]. *Soil Use and Management*, 2007, 23(1): 63–70.
- [45] Yang X M, Zhang X P, Fang H J, et al. Long-term effects of fertilization on soil organic carbon changes in continuous corn of Northeast China: RothC model simulations[J]. *Environmental Management*, 2003, 32(4): 459–465.
- [46] Guo S L, Wu J S, Kevin Coleman, et al. Soil organic carbon dynamics in a dryland cereal cropping system of the Loess Plateau under long-term nitrogen fertilizer applications[J]. *Plant Soil*, 2012, 353(1–2): 321–332.
- [47] 郭胜利. 黄土旱塬农田土壤有机碳、氮的演变与模拟[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2001.
- Guo Shengli. Evolution and simulation of soil organic C, N of dry farmland in gully area of the Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest Agriculture and Forestry University, 2001. (in Chinese with English abstract)
- [48] 董成立, 吴金水, 向万胜, 等. 长江中游稻田土壤有机碳计算机模拟[J]. *长江流域资源与环境*, 2002(3): 229–233.
- Tong Chengli, Wu Jinshui, Xiang Wansheng, et al. Simulating of organic carbon changes in paddy soils in the middle basin of Yangtze River[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2002(3): 229–233. (in Chinese with English abstract)
- [49] Wang S H, Shi X Z, Zhao Y C, et al. Regional simulation of soil organic carbon dynamics for dry farmland in East China by coupling a 1:500 000 soil database with the CENTURY model[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(3): 277–287.
- [50] Xu W, Chen X, Luo G, et al. Using the CENTURY model to assess the impact of land reclamation and management practices in oasis agriculture on the dynamics of soil organic carbon in the arid region of North-western China[J]. *Ecological Complexity*, 2011, 8(1): 30–37.
- [51] 高鲁鹏, 梁文举, 姜勇, 等. 利用 CENTURY 模型研究东北黑土有机碳的动态变化 I. 自然状态下土壤有机碳的积累[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(5): 772–776.
- Gao Lupeng, Liang Wenju, Jiang Yong, et al. Dynamics of organic c in black soil of Northeast China, simulated by century model I. Accumulation of soil organic carbon under natural condition[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*. 2004, 15(5): 772–776. (in Chinese with English abstract)
- [52] Gao C S, Wang J G, Zhang X Y, et al. The evolution of organic carbon in Chinese mollisol under different farming systems: Validation and prediction by using CENTURY model[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2008, 7(12): 1490–1496.
- [53] 丛日环. 小麦—玉米轮作体系长期施肥下农田土壤碳氮相互作用关系研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2012.
- Cong R H. Soil Carbon and nitrogen interaction in typical cropland under long-term fertilizations in the wheat-corn cropping systems[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [54] Li H, Qiu J J, Wang L G, et al. Estimates of N₂O emissions and mitigation potential from a spring maize field based on DNDC model[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2012, 11(12): 2067–2078.
- [55] 陈杰华, 慈恩, 谢德体, 等. 不同耕作制度下紫色水稻土有机碳变化的 DNDC 模型预测[J]. *农机化研究*, 2013(1): 38–42.
- Chen Jiehua, Ci En, Xie Deti, et al. Simulating trends in soil organic carbon of in purple paddy soil under different tillage system using the DNDC mode[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2013(1): 38–42. (in Chinese with English abstract)
- [56] 金琳, 李玉娥, 高清竹, 等. DNDC 模拟中国 20 年农田管理土壤碳变化[J]. *土壤通报*, 2010, 41(5): 1081–1085.
- Jin Lin, Li Yu'e, Gao Qingzhu, et al. Analysis of the change of soil carbon under cropland management in China between 1981 and 2000 by DNDC[J]. *Chinese Journal of Soil Science*. 2010, 41(5): 1081–1085. (in Chinese with English abstract)
- [57] 薛静, 毛萌, 任理. DNDC 模型在曲周试验站的参数灵敏度分析及率定[J]. *中国农业科学*, 2013(13): 2695–2708.
- Xue Jing, Mao Meng, Ren Li. The parameter sensitivity analysis and calibration of DNDC model in Quzhou agricultural experiment station[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013(13): 2695–2708. (in Chinese with English abstract)
- [58] Han J, Jia Z K, Wu W, et al. Modeling impacts of film mulching on rainfed crop yield in Northern China with DNDC[J]. *Field Crops Research*, 2014, 155: 202–212.
- [59] 马玉芳, 蔡立群, 张仁陟. 不同耕作措施下土壤有机碳含量的模拟研究[J]. *自然资源学报*, 2011, 26(9): 1546–1554.
- Ma Yufang, Cai Liqun, Zhang Renshe. Study on the simulation of soil organic carbon content under different tillage modes[J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(9): 1546–1554. (in Chinese with English abstract)
- [60] 孙园园, 孙永健, 王锐婷, 等. DNDC 模型对川中丘陵区稻田 CH₄、NO₂ 排放的模拟对比分析[J]. *生态环境学报*, 2011, 21(6/7): 1003–1010.
- Sun Yuanyuan, Sun Yongjian, Wang Ruiing, et al. Research of tillage-cropping systems on CH₄ and N₂O emission from

- permanently flooded rice fields in a central Sichuan hilly area of Southwest China[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 21(6/7): 1003—1010. (in Chinese with English abstract)
- [61] 张啸林, 潘晓健, 熊正琴, 等. 应用 DNDC 模型分析管理措施对稻麦轮作系统 CH_4 和 N_2O 综合温室效应的影响[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(3): 690—696.
Zhang Xiaolin, Pan Xiaojian, Xiong Zhengqin, et al. Effects of farming managements on the global warming potentials of CH_4 and N_2O from a rice-wheat rotation system based on the analysis of DNDC modeling[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(3): 690—696. (in Chinese with English abstract)
- [62] 李虎, 王立刚, 邱建军. DNDC 模型在农田氮素渗漏淋失估算中的应用[J]. *应用生态学报*, 2009, 20(7): 1591—1596.
Li Hu, Wang Ligang, Qiu Jianjun. Application of DNDC model in estimating cropland nitrate leaching[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(7): 1591—1596. (in Chinese with English abstract)
- [63] 龙军, 毛艳玲, 张黎明, 等. 农田土壤有机碳演变模型的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(5): 232—239.
Long Jun, Mao Yanling, Zhang Liming, et al. Advances of soil organic carbon model in farmland ecosystem[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2012, 28(5): 232—239. (in Chinese with English abstract)
- [64] 沈禹颖, 南志标, Bill Bellott, 等. APSIM 模型的发展与应用[J]. *应用生态学报*, 2002, 3(8): 1027—1032.
Shen Yuying, Nan Zhibiao, Bil Belott, et al. Development of APSIM (agricultural production systems simulator) and its application[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(8): 1027—1032. (in Chinese with English abstract)
- [65] 周少平. 基于 APSIM 模型的黄土高原玉米-小麦-大豆轮作系统产量、土壤水分动态[D]. 兰州: 兰州大学, 2008.
Zhou Shaoping. Simulated crop yield and soil water within a maize-winter wheat-soybean rotation in the Loess Plateau by APSIM[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [66] 李广, 黄高宝, Bellotti W, 等. APSIM 模型在黄土丘陵沟壑区不同耕作措施中的适用性[J]. *生态学报*, 2009, 29(5): 2655—2663.
Li Guang, Huang Gaobao, Bellotti W, et al. Adaptation research of APSIM model under different tillage systems in the Loess hill-gullied region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(5): 2655—2663. (in Chinese with English abstract)
- [67] 刘志娟, 杨晓光, 王静, 等. APSIM 玉米模型在东北地区的适应性[J]. *作物学报*, 2012, 38(4): 740—746.
Liu Zhijuan, Yang Xiaoguang, Wang Jing, et al. Adaptability of APSIM maize model in Northeast China[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(4): 740—746. (in Chinese with English abstract)
- [68] 杨轩, 谭广洋, 沈禹颖. 秸秆还田对旱作冬小麦后茬土壤水分的影响及其 APSIM 模拟[J]. *干旱区研究*, 2013, 30(4): 609—614.
Yang Xuan, Tan Guangyang, Shen Yuying. Soil moisture content under stubble retention after dry-framing winter wheat harvest based on APSIM model[J]. *Arid Zone Research*, 2013, 30(4): 609—614. (in Chinese with English abstract)
- [69] 王琳, 郑有飞, 于强, 等. APSM 模型对华北平原小麦-玉米连作系统的适用性[J]. *应用生态学报*, 2007, 18(11): 2480—2486.
Wang Lin, Zheng Youfei, Yu Qiang, et al. Applicability of agricultural production systems simulator (APSM) in simulating the production and water use of wheat-maize continuous cropping system in North China Plain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(11): 2480—2486. (in Chinese with English abstract)
- [70] 王晓凤. DAISY 模型在高产农田水、氮优化管理中的应用[D]. 北京: 中国农业大学, 2007.
Wang Xiaofeng. Application of DAISY Model on optimizing water and nitrogen management in high yielding farmland[D]. Beijing: China Agricultural University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [71] 潘志勇. 基于试验与模型的 C、N 循环研究-以华北高产粮区桓台县为例[D]. 北京: 中国农业大学, 2005.
Pan Zhiyong. Experimentation and simulation on carbon and nitrogen Cycle-a case study on high-yielding vounty, Huantai, North China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2005. (in Chinese with English abstract)
- [72] 邱建军, 秦小光. 农业生态系统碳氮循环模拟模型研究[J]. *世界农业*, 2002(9): 39—41.
Qiu Jianjun, Qin Xiaoguang. Study on the situation and perspective of simulation model on carbon and nitrogen circulations in agro-ecosystem[J]. *World Agriculture*, 2002(9): 39—41. (in Chinese with English abstract)
- [73] Fan L, Lü C H, Chen Z. A review of EPIC model and its applications[J]. *Progress in Geography*, 2012, 31(5): 584—592.
- [74] Li C S, Zhuang Y H, Froking S, et al. Modeling soil organic carbon change in croplands of China[J]. *Ecological Applications*, 2003, 13(2): 327—336.
- [75] Liu J. Modeling the role of irrigation in winter wheat yield, crop water productivity, and production in China[J]. *Irrigation Science*, 2007, 26(1): 21—33.
- [76] 李军, 邵明安, 张兴昌. 黄土高原旱塬地冬小麦水分生产潜力与土壤水分动态的模拟研究[J]. *自然资源学报*, 2004, 19(6): 738—746.
Li Jun, Shao Ming'an, Zhang Xingchang. Simulation of water potential productivity of winter wheat and soil water dynamics on rainfed highland of the Loess Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2004, 19(6): 738—746. (in Chinese with English abstract)
- [77] Wang X C, Li J. Evaluation of crop yield and soil water estimates using the EPIC model for the Loess Plateau of China[J]. *Mathematical and Computer Modelling*, 2009, 124(1): 24—32.
- [78] 王学春, 李军, 郝明德. 施肥水平对长武旱塬地冬小麦产量影响的模拟[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(8): 45—50.
Wang Xuechun, Li Jun, Hao Mingde. Simulation of fertilization effect on winter wheat yield in Changwu dry highland[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2008, 24(8): 45—50. (in Chinese with English abstract)
- [79] 胡伟, 李军, 孙剑, 等. 黄土高原半干旱区春小麦和春玉米产量动态与土壤干燥化效应模拟研究[J]. *水土保持研究*, 2009, 16(1): 149—161.
Hu Wei, Li Jun, Sun Jian, et al. Simulation of grain yield and soil desiccation of spring wheat and corn fields in semi-arid area of Loess Plateau[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2009, 16(1): 149—161. (in Chinese with English abstract)
- [80] 余福水. EPIC 模型应用于黄淮海平原冬小麦估产的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2007.
Yu Fushui. Yield estimation of winter wheat with EPIC Model in Huang-Huai-Hai Plain-a case study in Luancheng, Hebei[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2007. (in Chinese with English abstract)

- [81] Chavas D R, Izaurralde R C, Thomson A M, et al. Long-term climate change impacts on agricultural productivity in Eastern China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 95(1): 203–215.
- [82] Niu X Z, Easterling W, Hays C J, et al. Reliability and input data induced uncertainty of the EPIC model to estimate climate change impact on sorghum yields in the US Great Plains[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2009, 129(1/3): 268–276.
- [83] 范兰, 吕昌河, 陈朝. EPIC 模型及其应用[J]. *地理科学进展*, 2012, 31(5): 584–592.
Fan Lan, Lü Changhe, Chen Zhao. A review of EPIC model and its applications[J]. *Progress in Geography*, 2012, 31(5): 584–592. (in Chinese with English abstract)
- [84] Wang X C, Li J, Tahir M N, et al. Validation of the EPIC model using a long-term experimental data on the semi-arid Loess Plateau of China[J]. *Mathematical and Computer Modeling in Agriculture*, 2011, 54(3/4): 976–986.
- [85] 高懋芳, 邱建军, 李长生, 等. 应用 Manure-DNDC 模型模拟畜禽养殖氮素污染[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(9): 183–189.
Gao Maofang, Qiu Jianjun, Li Changsheng, et al. Modelling nitrogen pollution from livestock breeding using Manure-DNDC model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 28(9): 183–189. (in Chinese with English abstract)
- [86] Tang H J, Qiu J J, Ranst E V, et al. Estimations of soil organic carbon storage in cropland of China based on DNDC model[J]. *Geoderma*, 2006, 134(1–2): 200–206.
- [87] 韩冰, 王效科, 欧阳志云. 中国农田生态系统土壤碳库的饱和水平及其固碳潜力[J]. *农村生态环境*, 2005, 21(4): 6–11.
Han Bing, Wang Xiaoke, Ouyang Zhiyun. Saturation levels and carbon sequestration potentials of soil carbon pools in farmland ecosystems of China[J]. *Rural Eco-Environment*, 2005, 21(4): 6–11. (in Chinese with English abstract)
- [88] 邱建军, 王立刚, 李虎, 等. 农田土壤有机碳含量对作物产量影响的模拟研究[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(1): 154–161.
Qiu Jianjun, Wang Ligang, Li Hu, et al. Modeling the Impacts of soil organic carbon content of croplands on crop yields in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(1): 154–161. (in Chinese with English abstract)
- [89] 陈晨, 梁银丽, 吴瑞俊, 等. 黄土丘陵沟壑区坡地土壤有机碳变化及碳循环初步研究[J]. *自然资源学报*, 2010, 25(4): 668–676.
Chen chen, Liang Yinli, Wu Ruijun, et al. A preliminary study on the change of soil organic carbon and carbon cycling of the slope land in the loess hilly-gully areas[J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, 25(4): 668–676. (in Chinese with English abstract)
- [90] 邱建军, 王立刚, 唐华俊, 等. 东北三省耕地土壤有机碳储量变化的模拟研究[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(8): 1166–1171.
Qiu Jianjun, Wang Ligang, Tang Huajun, et al. Study on the situation of soil organic carbon storage in arable lands in Northeast China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(8): 1166–1171. (in Chinese with English abstract)
- [91] Huang Y, Yu Y Q, Zhang W, et al. Agro-C: A bio-geophysical model for simulating the carbon budget of agro-ecosystems[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(1): 106–129.
- [92] 黄耀, 孙文娟, 张稳, 等. 中国陆地生态系统土壤有机碳变化研究进展[J]. *中国科学*, 2010, 40(7): 577–586.
Huang Yao, Sun Wenjuan, Zhang Wen, et al. Land ecosystem soil carbon changes in China[J]. *Scientia Sinica Vitae*, 2010, 40(7): 577–586. (in Chinese with English abstract)
- [93] Yu Y, Huang Y, Zhang W. Modeling soil organic carbon change in croplands of China, 1980–2009[J]. *Global and Planetary Change*, 2012, 82–83: 115–128.
- [94] Parton W J, Scurlock J M O, Ojima D S, et al. Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide[J]. *Global Biogeochem Cycles*, 1993, 7(4): 785–809.
- [95] Running S W, Coughlan J C. A general model of forest ecosystem processes for regional applications I. Hydrologic balance, canopy gas exchange and primary product ion processes[J]. *Ecological Modelling*, 1988, 42: 125–154.
- [96] Ehleringer J R, Field C B. *Scaling Physiological processes: leaf to globe*[M]. New York: Academic Press, 1993.
- [97] Liu J, Chen J M, Cihlar J, et al. A process-based boreal ecosystem productivity simulation or using remote sensing inputs[J]. *Remote Sensing Environ*, 1997, 62(2): 162.
- [98] Liu J, Chen J M, Cihlar J, et al. Net primary productivity distribution in the BOREAS region from a process model using satellite and surface data[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 1999, 104(D22): 27735–27754.
- [99] 张娜, 于贵瑞, 赵士洞, 等. 基于遥感和地面数据的景观尺度生态系统生产力的模拟[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(5): 643–652.
Zhang Na, Yu Guirui, Zhao Shidong, et al. Ecosystem productivity process model for landscape based on remote sensing and surface data[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(5): 643–652. (in Chinese with English abstract)
- [100] Ji J J. A climate vegetation interaction model: Simulating physical and biological processes at the surface[J]. *Journal of Biogeography*, 1995, 22: 445–451.
- [101] Yu G R, Zhuang J, Yu Z L. An attempt to establish a synthetic model of photosynthesis-transpiration based on stomatal behavior for maize and soybean plants grown in field[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2001, 158(7): 861–874.
- [102] Yu G R, Kobayashi T, Zhuang J, et al. A coupled model of photosynthesis-transpiration based on the stomatal behavior for maize (*Zea mays* L.) grown in the field[J]. *Plant and Soil*, 2003, 249(2): 401–416.
- [103] 任传友, 于贵瑞, 王秋凤, 等. 冠层尺度的生态系统光合-蒸腾耦合模型研究[J]. *地球科学*, 2004, 34(增刊 II): 141–151.
Ren Chuanyou, Yu Guirui, Wang Qiufeng, et al. Study on coupling model of ecological system photosynthesis and transpiration on the canopy scale[J]. *Earth Science*, 2004, 34(Suppl II): 141–151. (in Chinese with English abstract)
- [104] 赵风华, 王秋凤, 王建林, 等. 小麦和玉米叶片光合-蒸腾日变化耦合机理[J]. *生态学报*, 2011, 31(24): 7526–7532.
Zhao Fenghua, Wang Qiufeng, Wang Jianlin, et al. Photosynthesis-transpiration coupling mechanism of wheat and maize during daily variation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(24): 7526–7532. (in Chinese with English abstract)
- [105] Wang S, Grant R F, Versegny D L, Black T A. Modeling plant carbon and nitrogen dynamics of a boreal aspen forest

- in CLASS — the Canadian Land Surface Scheme[J]. Ecological Modeling, 2001, 142(1/2): 135—155.
- [106] 童成立, 吴金水, 郭胜利, 等. 土壤有机碳周转 SCNC 模型的研究与开发[J]. 计算机与农业, 2001(12): 10—12.
- Tong Chengli, Wu Jinshui, Guo Shengli, et al. Developing of SCNC model for soil organic carbon turnover[J]. Computer and Agriculture, 2001(12): 10—12. (in Chinese with English abstract)
- [107] 刘守龙, 童成立, 吴金水, 等. 稻田土壤有机碳变化的模拟: SCNC 模型检验[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(5): 1228—1233.
- Liu Shilong, Tong Chengli, Wu Jinshui, et al. Simulation of changes of soil organic carbon in paddy soils: SCNC model validation[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(5): 1228—1233. (in Chinese with English abstract)

Progress and perspectives in studies on agro-ecosystem carbon cycle model

Liu Yu¹, Chen Minpeng^{2*}, Chen Jining¹

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Agro-ecosystem, as the most active and controllable carbon pool in terrestrial ecosystem carbon cycle, can lead to substantial changes in the atmospheric CO₂ concentration, thus affecting remarkably the global climate. The carbon cycle in agro-ecosystem is a complex process, which is influenced by factors such as climate, plants, soil properties and farm management. It is recognized that a model approach has an advantage in estimating spatiotemporal changes in carbon storage. Carbon cycle models are considered to be the most effective means to study carbon cycle. This paper emphasized on the carbon cycle process of agro-ecosystem, introduced the transference and the mechanism of carbon cycle between different carbon pools, identified characteristics of different models in association with carbon cycle of agro-ecosystem from 1960s, summarized and analyzed the application of international carbon models and others invented and developed in China in the agro-ecosystem. During these years, several models, such as RothC, CENTURY, DNDC, EPIC and APSIM have been widely used to estimate carbon changes at national or global scales. These models provide understanding of carbon flow through food webs and explore the role of carbon storage in the whole agro-ecosystem. They also allow analysis of environmental risks and provide a guide to know more about the relationship among carbon, nitrogen and water cycle. More recently, some new carbon models have been developed in China for simulating the carbon budget of agro-ecosystems. For example, the Agro-C can simulate crop net primary production via Crop-C sub model and changes in soil organic carbon via Soil-C sub model under various conditions of climate, soil, and agricultural practices, which makes it possible to extrapolate the model to a wider domain. Validation of the Soil-C sub model suggested that an inappropriate simplification of the carbon flow between various C pools may introduce errors into the estimates. Carbon loss in croplands was a very important issue for Chinese agro-ecosystems, and there was still a great potential for substantially improving carbon status by adopting proper farming practices and land-use pattern. This review has drawn together various perspectives on some of the key issues that should be addressed in order to keep more carbon and enhance soil productivity of croplands. In particular: 1) the mechanism of carbon cycle should be explored to model changes in carbon for the whole agro-ecosystem; 2) the study spatiotemporal changes of the carbon cycle should be investigated further; 3) the relationship among the nitrogen cycle, the water cycle, microbial and the carbon cycle should be made clear; 4) to use carbon cycle model to account for a range of different management practices and the redistribution of carbon; and 5) to investigate potential effects of different management practices on the carbon distribution for the government to formulate relevant policies.

Key words: ecosystem; model; soils; carbon pool; carbon cycle; agricultural field