陆地土壤碳循环研究进展

张治国，胡友彪，郑永红，陈孝杨
（安徽理工大学 地球与环境学院，安徽 淮南 232001）

摘　要：[目的] 对近年来国内外碳循环方面的研究进展进行综述，为退化土地的生态恢复及环境治理和保护提供依据。[方法] 总结了当前土壤有机碳循环研究中的几种主要方法（室内培养法、同位素示踪法、碳循环模型和计算机模拟法等），分析对比了这几种方法的特点和存在的问题，并对土壤有机碳循环机理和影响土壤有机碳循环的主要因素进行分析。[结果] 目前，在土壤有机碳库的估算方法、数据依据、结果以及土壤有机碳循环模型上存在较大差异，给土壤有机碳变化和循环研究带来一定的困难。土地利用方式和土地覆盖变化是影响陆地土壤有机碳变化及循环最直接的人为因子。[结论] 应注重土地利用及覆被变化在土壤碳循环中的作用及地位。并建立适用于中国国情的碳循环模型。未来的土壤碳循环研究应探索标准化、高精度的有机碳库储量估算方法。

关键词：土壤有机碳；碳循环；碳同位素；碳循环模型
文献标识码：A　　**文章编号**：1000-288X(2016)04-0339-07　　**中图分类号**：S153

文献参数：张治国，胡友彪，郑永红，等. 陆地土壤碳循环研究进展[J]. 水土保持通报，2016，36(4)：339-345. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2016.04.058

Advances on Soil Organic Carbon Cycling Research in Terrestrial Ecosystem

ZHANG Zhiguo, HU Youbiao, ZHENG Yonghong, CHEN Xiaoyang
(*School of Earth and Environment, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui* 232001, *China*)

Abstract: [Objective] The research progress of carbon cycling in domestic and abroad was reviewed to provide bases for the ecological restoration of degraded land and the environmental protection. [Methods] The paper summarized the main approaches of soil organic carbon cycling, including laboratory culture method, isotope tracer technique, modeling and computer simulation, etc., and their characteristics and existing problems were elucidated from several aspects. The mechanism of soil organic carbon cycle and the main factors affecting soil organic carbon cycle were analyzed. [Results] There are big differences between the estimation method, data base, results of soil organic carbon pool and model of soil organic carbon cycle, which often bring certain difficulties to study soil organic carbon cycle research. Changes in land use and land cover are the immediate anthropogenic factor, which affect terrestrial soil organic carbon changes and recycling. [Conclusion] In the future, we should pay attention to role of land use and land cover in soil carbon cycle and the status. And we need to set up model of soil carbon cycle for China's national conditions. The future soil carbon cycle research should explore the standard, high precision of organic carbon storage estimation method.

Keywords: **soil oganic carbon; carbon cycle; carbon isotope; model of carbon cycle**

2005 年 2 月 16 日，《京都议定书》开始强制生效，这是人类历史上首次以法规的形式限制温室气体排放。由于国际气候谈判及碳交易中对碳源、碳汇评价的客观需要，碳循环问题日益受到人们的普遍关注。陆地生态系统碳循环研究是预测大气 CO_2 含量及气候变化的重要基础。土壤是陆地生态系统系统中最大的碳库载体（1 500～2 500 Pg）[1]，其碳贮量是全球陆地植被碳库（650 Pg）的近 3 倍，大气碳库（750 Pg）的 2 倍多[2]，在全球碳循环中扮演着重要的角色，是影响全球碳循环重要的流通方式，也是应对全

收稿日期：2016-02-04　　**修回日期**：2016-04-07
资助项目：国家自然科学基金项目“基于黄铁矿氧化的煤矸石充填复垦土壤 CO_2 运移机理研究”（51274013）；安徽省自然科学基金项目（1508085SMD218）；安徽省高校省级优秀人才基金重点项目（2013SQRL028ZD）
第一作者：张治国（1978—），男（汉族），陕西省咸阳市人，博士研究生，实验师，主要从事土壤污染防治与生态修复方面的工作。E-mail：zzgaust@163.com。

球气候变化的重要途径。另一方面,开展陆地土壤碳循环的研究对增加土壤碳截存,提高土壤质量,对退化土地的生态恢复及环境治理和保护等都有重要的意义[3]。

1 土壤有机碳库研究进展

土壤碳是陆地碳库的重要组成部分,包括土壤有机碳与无机碳。土壤有机碳是地球陆地生态系统最重要、最活跃的碳库。国外对土壤有机碳的研究开始较早,在 20 世纪 50 年代就开始进行全球土壤有机碳总库存量研究[4]。Rubey[5]根据美国 9 个土壤剖面的有机碳含量推算出全球土壤有机碳库存量为 710 Pg,Bohn 等[6]利用土壤分布图和其有机碳含量,估计出全球土壤有机碳库存量为 2 946 Pg,这 2 个估计值成为当前对全球土壤有机碳库存量的上下限值。早期对土壤有机碳库存量的估算,大都是根据少数土壤剖面资料进行的,存在一定的局限性。20 世纪 80 年代,为了研究全球碳循环与气候、植被及人类活动等因素之间的相互关系,统计方法开始应用于土壤碳库的估计。如 Post 等[7]据土壤碳密度及其相关面积估计出全球 1 m 厚度的土壤有机碳库为 1 395 Pg,这一数据被广泛引用。20 世纪 90 年代,随着 3S 技术的快速发展,为土壤有机碳研究提供了新的方法和手段。在区域尺度上,不少国家已经开展了土壤碳库的估算。如俄罗斯在 1∶250 万土壤分布图上建立了土壤碳空间数据库,估算土壤有机碳库存总量为 342.1 Pg[8],加拿大建立了 1∶100 万的数字化土壤分布图及土壤碳数据库,并计算出加拿大 0～100 cm 土层土壤有机碳库存量分别为 249 Pg[9]。国内从 20 世纪 80—90 年代后,对土壤有机碳库的研究较多。从 1996 年开始,方精云[10]、潘根兴[11]、王邵强[12-13]、解宪丽[14]、于东升[15]等人陆续根据不同的资源环境数据库和全国第二次土壤普查资料估算出了,中国的土壤有机碳库储量约在 80～120 Pg 之间。受估算资料的来源、样品采集、估算方法的不同及气候、土壤性状变异性等因素的影响,估算结果存在一定的不确定性。

2 土壤有机碳循环机理

土壤有机碳循环是有机碳进入土壤,并在土壤微生物(包括部分动物)参与下分解和转化形成的碳循环过程。进入土壤的有机碳主要包括植物和动植物残体,土壤中的有机碳包括土壤腐殖质、土壤微生物及其各级代谢产物的总和。在土壤有机物降解方面,土壤学家提出了一些有机碳动态变化模型[16],如 Jenkinson 建立的模型把有机碳分成 5 类:可降解植物(DPM),抗分解植物(RPM),生物有机碳(BIO),物理稳定性有机物(POM),化学稳定性有机物(COM)。DPM/RPM 比率随土壤类型而变化,是一个比较重要的参数。根据 Huggins 的双池模型,有机物质进入土壤后的分解过程依据其分解速率的大小可分成两个阶段:第一阶段是易分解物质(主要是可溶性物质如简单的糖类、蛋白质、有机酸等)的快速分解过程,这一过程随土壤条件又有很大的变化,大部分土壤约需 3～6 个月;第二阶段是难分解物质(如木质素、腐殖质等)的缓慢分解过程。土壤碳循环及有机碳的分配转化如图 1 所示。

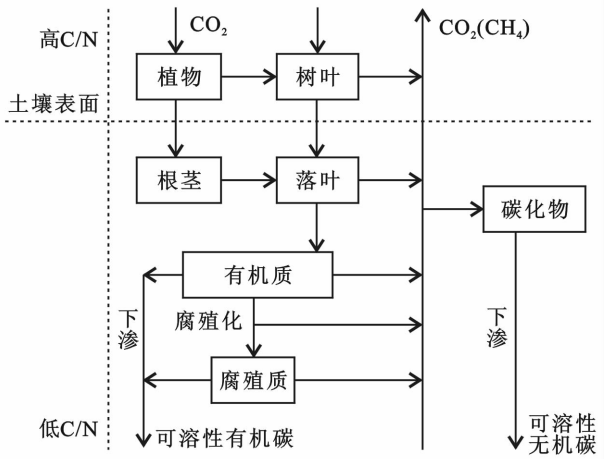


图 1 土壤碳循环及有机碳的分配转化

3 土壤有机碳循环的研究方法

综合国内外文献,有机碳的转化过程及转化速率的方法主要包括:室内培养法、同位素示踪法、模型和计算机模拟。

3.1 室内培养法

人们在室内模拟土壤水热状况,研究有机物质的分解情况即培养法(包括实验室和盆钵培养法)。通常认为土壤有机碳(SOC)及其组分的分解遵循一级热力学方程,通过测定一定温度下各培养时段的 SOC 含量,即可以计算出 SOC 及其组分的周转速率[17]。假设培养初期($t=0$),SOC 含量为 Y_0,那么,培养一段时间(t)后 SOC 组分(Y_t)为

$$Y_t = Y_0 e^{-kt} \quad (1)$$

式中:k——SOC 或其组分的周转速率常数。单位时间内 SOC 及其组分的周转量(R_t)可表示为:

$$R_t = \frac{dY_t}{dt} = k \cdot Y_t \quad (2)$$

在稳定状态下,SOC 的分解和合成速率相等,因此其周转时间(T)可以表示为:

$$T=\frac{Y_t}{R_t} \tag{3}$$

根据方程和方程,周转时间可表示为:

$$T=\frac{1}{k} \tag{4}$$

借助于这种方法,可以阐明植物物质分解的一些规律,了解土壤微生物生物量周转状况及其与土壤有机质周转与积累的关系。但室内的试验条件与田间有差异,不能完全说明其分解转化过程。

3.2 同位素示踪法

3.2.1 *放射性同位素示踪法* 在 20 世纪 50 年代以前,大气中的^{14}C 含量基本上是稳定的。自从 50—60 年代的核试验以来,空气中的^{14}C 含量大大增加。这些空气中高 $\Delta^{14}C$ 值的$^{14}CO_2$ 随光合作用进入植物体内,参与碳循环[18]。因此,放射性同位素成为研究土壤碳短期(如几年到几十年内)周转率的示踪剂[19-20]。目前,土壤有机质(SOM)周转率的计算大多是基于时间模型,通过模拟土壤有机质核试验^{14}C 的摄取来把核试验^{14}C 的信息转化成有机质的周转时间。

Cherkinsky 和 Brovkint[21] 利用测定的 $\Delta^{14}C$ 值将 SOC 分为周转快的组分($\Delta^{14}C>0$)和周转较慢的组分($\Delta^{14}C<0$),两碳库含量计算公式为:

$$SOM_{快}(\%)=\frac{\int_0^{d_1}\rho s S(d)\Delta d}{\int_0^{d_总}\rho s S(d)\Delta d}\times 100 \tag{5}$$

$$SOM_{慢}(\%)=\frac{\int_0^{d_1}\rho s S(d)\Delta d}{\int_0^{d_总}\rho s S(d)\Delta d}\times 100 \tag{6}$$

式中:ρ——土壤容重(g/cm^3);s——单位面积(cm^2);d——土壤层位深度(cm);$S(d)$——SOC 的深度分布函数;$d_{总}$——土壤剖面总深度(cm);快库周转速率可用下式计算:

$$\frac{C^{14}_{(1955)}}{C^{14}_{\text{standard}}}=\frac{k}{k+\lambda} \tag{7}$$

$$C_t^{14}=C_{t-1}^{14}-(k+\lambda)C_{t-1}^{14}+kC'^{14}_t \tag{8}$$

慢库周转速率计算公式为:

$$k=-\lambda\left(\frac{1\,000}{\Delta^{14}C}+1\right) \tag{9}$$

式中:$C^{14}_{(1955)}$——SOM1955 年的 C^{14} 放射性;C'^{14}_t——采样年大气的 C^{14} 放射性;C^{14}_{standard}——现代标准碳的 C^{14} 放射性;C_t^{14},C_{t-1}^{14}——t 年和 $t-1$ a 土壤样品的放射性;k——各个有机碳组分的分解率;λ——C^{14} 的衰变常数(0.000 124 5/a)。

Cherkinsky 模型最大的优点就是不需要核试验前的土壤样品。Wang[22] 等用这种方法研究了美国加利福尼亚中部内华达山脉西坡天然的和被扰动的土壤碳更新速率。Chen 等[23] 利用该方法对中国亚热带地区的鼎湖山保护区的土壤剖面进行研究,分层计算出土壤有机质的周转率。

3.2.2 *稳定同位素示踪法*(^{13}C) 稳定碳同位素法(^{13}C)示踪技术能有效地阐明碳动态变化和土壤碳储量的微小迁移与转换,以及定量化评价新老土壤有机碳对碳储量的相对贡献[24-25],成为研究土壤碳循环最科学有效的方法之一。碳稳定同位素比值($\delta^{13}C$)常被用来研究有机碳来源,以及测定土壤有机质各组分的周转速率。当原先土壤上植被被另一种 $\delta^{13}C$ 值不同的植被代替时,土壤的 $\delta^{13}C$ 值发生改变。在一时间 t 时来源于 C_4 植物和 C_3 植物的有机碳比例[26] 可表示为:

$$C_{4t}/C \text{ 或 } f=(\delta-\delta C_3)/(\delta C_4-\delta C_3)\cdot C \tag{10}$$

$$C_{3t}/C \text{ 或 } 1-f=(\delta C_4-\delta)/(\delta C_4-\delta C_3)\cdot C \tag{11}$$

式中:δ——C_3 和 C_4 植物共同存在时土壤有机质的 $\delta^{13}C$ 值;δC_3——加入 C_4 植物之前土壤有机质的 $\delta^{13}C$值;δC_4——C_4 植物的 $\delta^{13}C$ 值。若土壤的有机碳总量(C)已知,那么来自 C_4 植物和 C_3 植物的有机碳数量可表示为:

$$C_{4t}=f\cdot C,\quad C_{3t}=(1-f)\cdot C \tag{12}$$

窦森[23] 等通过室内培养试验,应用 $\delta^{13}C$ 方法研究了玉米秸秆分解期间,土壤中胡敏酸(HA)和富里酸(FA)数量的动态变化。Katoh 等[27] 研究了^{13}C 标记的水稻秸秆添加对土壤溶液中可溶性有机碳和无机碳的贡献。Liang 等[28] 通过^{13}C 稳定同位素培养试验研究了玉米根际沉积碳在土壤碳库中的分配。An 等[29] 在辽宁沈阳用^{13}C 稳定同位素标记技术证明地膜覆盖下玉米向土壤中的有机碳输入是增加的。徐国良等[30] 通过^{13}C 稳定同位素标记示踪技术,分析了凋落物新 C 在跳虫和微生物作用下的循环过程。放射性同位素示踪法与稳定同位素示踪法区别详见表 1。

3.3 陆地碳循环模型与计算模拟

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,碳循环模型被认为是定量实现土壤碳循环的模拟和预测的必不可少的手段,利用碳循环模型可以模拟碳循环的动态变化,估计土壤和植被的碳存贮现状以及预测未来的碳存贮潜力[31]。从 20 世纪中期开始,国内外研究者建立了各种模型,模拟不同尺度的陆地生态系统碳循环过程[32-35]。陆地碳循环模型的发展分 3 个阶段。最早的阶段是碳平衡模型[36],根据陆地生态系统的分类,模拟各类生态系统的净初 I 级生产力(NPP)来实现碳循环模拟,如根据实测数据获得分析不同生态系统类型的碳密度并计算其分布面积,再用简单相乘的方法来计算全球陆地的碳平衡,属于静态模型。包括最初的 MIAMI,

OBM到TEM模型[37-39]。第二阶段是进入20世纪90年代中期,植被—气候关系模型,该模型是在地理空间数据库基础上,通过植被—气候关系模拟陆地植被分布,陆地生态系统净第一性生产力(NEP)和植被的潜在分布,从而预测气候变化对陆地碳平衡的动态影响。如BIOME3[40]和CAR-AIB[41]模型等。第三阶段是模拟生物地球化学循环的动态和机理过程,并将植被结构与组成变化,土地覆盖和土地利用方式变化等影响引入到模型中,预测全球变化背景下陆地碳循的动态过程,如CEVSA,SIB2,BEPS和DNDC模型等[42-44]。其中DNDC模型[45-48]也是目前应用最广泛的有机碳模型之一,具有模拟结果较精确和简单的参数输入简单的优点,可模拟不同耕作制度下、不同环境因子、不同尺度和管理下土壤碳储量及其变化情况,可信度较高[49-57]。20世纪80年代开始,相继建立了国内陆地生态系统碳循环模型。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,具有一定的地域性和局限性,有影响的模型主要有AVM模型[58]、EALCO模型[59]、SCNC模型[60]、SMPT-SB模型[61-62]、EPPML模型[63]、Agro-C模型[64]等。

表1 放射性同位素示踪法与稳定同位素示踪法区别

方法	优点	缺点
放射性同位素示踪法(^{14}C)	不受植物物质分解时的水热条件、加入量、施肥和耕作措施等的影响,几乎与实际情况完全一致;在采用高放射比强物料的情况下,可用以追踪植物物质在较长时期(10 a或以上)的转变过程	由于技术原因,所标记的植物不是均匀的,也会导致对土壤中实际发生的过程作出错误的解释。在试验过程中,只有相对短的转化时间的有机碳部分能被标记,且^{14}C的低能离子辐射会对人体健康造成潜在危害.另外,研究过程中还需要昂贵的仪器,实际应用上受到了一定的限制。
稳定性同位素示踪法(^{13}C)	除^{14}C示踪法的优点外,还可以提供长期(甚至几千年)的标记,并能使所有的有机碳部分能被均匀标记(包括那些平均存留时间很长的有机碳组分);$\delta^{13}C$示踪法是自然标记,无放射性;此外,能够计算不同植物来源的土壤有机碳的比例和各有机碳组分的周转	但是^{13}C示踪法也有其应用范围,它必须是原来长期生长的植被类型被另一种有显著不同的^{13}C值的植物类型所替代情况下应用。^{13}C方法在同种植物类型下的应用还需要进一步研究。

3.4 其它方法

国内外对土壤有机碳循环的研究中还应用^{13}C核磁共振(^{13}C-NMR)、电子自旋共振(ESR)、红外光谱法、质谱以及气相色谱等方法。

4 影响土壤有机碳循环的主要因素

4.1 自然因素的影响

土壤碳循环的过程受到多种物理因素和生物因素的控制,如气候、植被以及土壤的化学、物理学和生物学属性等,并存在各种因子间的相互作用。

4.1.1 气候因子 气候因子中最主要的因素是温度和降雨量。陆地土壤碳密度一般随降水增加而增加,在相同降雨量时,温度和碳密度成负相关[65];气温高的地区土壤微生物的活动相对较强,土壤温度每升高10 ℃,土壤有机碳的分解速率会快2~3倍。温度在30 ℃时每升高1 ℃对土壤有机碳损失3%。温度每升高1 ℃,全球将分解11~34 PgC的土壤有机碳,产生温室气体排向大气[66]。

4.1.2 植被因子 不同类型植被导致其光合作用强度和有机物进入土壤的方式不同,影响有机碳输入量,使土壤有机碳分布也存在差异。Jobbagy等[67]研究表明,灌木、草原和森林土壤表层20 cm有机碳占1 m深度土层中有机碳百分比33%,42%和50%。

4.1.3 土壤理化因子 土壤含水率对土壤碳循环的影响主要是通过对植物和微生物的生理活动、微生物的活性、土壤氧化电位、通透性以及土壤中温室气体向大气扩散速率等方面的调节和控制来实现的[68]。土壤的Eh与CH_4的排放呈显著相关性。土壤pH值主要是通过影响微生物的活动及根系的生长发育等来影响土壤碳循环的过程。土壤pH值在5.5~8.0范围,土壤有机碳的分解相对缓慢,温室气体的排放也会大幅减少。在强碱条件下,土壤有机质的溶解、分散和水解作用增加,增大了土壤CO_2的排放,反之强酸条件下则减少[68]。

4.1.4 土壤质地 土壤质地越细,有机碳的分解越慢,相反土壤质地越粗,有机碳的分解越快,黏粒能够有效地域有机碳结合,保护有机碳使其免受分解。土壤质地通过改变土壤通透性和有机质的分解速率来影响土壤碳循环的过程。一般情况下,砂质土壤温室气体的排放最大,黏土的排放量最小[68]。

4.2 人为因素的影响

陆地生态圈的碳平衡受到越来越多的人为干扰,

如耕作措施、轮作制度、施肥方式、土壤类型、土壤结构、土地利用方式等过程都对土壤碳循环造成较大的影响。由人类活动引起的土地利用和土地覆盖变化,如草原开垦为农田、森林砍伐后变成农田等等行为,导致土壤有机碳大幅下降,是土壤碳库和碳循环最直接的影响因子。Bouwman[69] 认为,温带地区草地开垦为农田后,土壤有机碳损失 20%～40%。刘纪远等[70]根据陆地卫星 TM 影像分析,1990—2000 年耕地面积增加 4.05×10^6 hm^2,由于土地利用方式变化,表层土壤(30 cm)与 0—100 cm 深度土壤有机碳库分别损失 53.7,99.5 Tg。杨玉盛等[71]对中亚热带山区土地利用变化研究发现,天然林转变为坡耕地后 0—20 cm 土层土壤有机碳降幅高达 74.8%。另外,施肥、灌溉、耕作等人为活动能够改变土壤理化性质,改变土壤的微环境,进而影响土壤温室气体排放量。如翻耕土壤排放的温室气体产生量高于免耕 36%[69]。Yang 等[72]研究表明 10 a 的保护性耕作使北美地区农田耕层土壤有机碳含量增加了 7%～10%。Lal 等[73]试验研究认为免耕、浅耕相对于传统耕作能够提高土壤表层有机碳含量,但对深层土壤碳含量的影响不大。Wang[74],Liu[75] 等研究表明农业生产中地膜覆盖促进土壤有机碳矿化但同时增加作物根系有机碳输入。

5　问题与展望

(1) 国内外在土壤有机碳库的估算方法、数据依据、结果上存在较大差异,给土壤有机碳变化、循环研究,特别是预测其对气候变化的响应带来一定的困难。未来的研究,应探索标准化、高精度的有机碳库储量估算方法。

(2) 陆地土壤有机碳循环模型很多,但是各种模型估算结果的差异却很大,一方面可能是因为受现有土壤有机碳循环的基础数据的参数选择、数据数量、范围等因素的限制,另一方面,土壤有机碳循环模型以国外的为主,国内研发模型能力较弱,不太适合中国国情。因此,随着 3S 技术土壤生态系统研究中广泛应用,结合 3S 技术实现大尺度范围和长时间的检测、定量化的调查,建立适用于中国国情的碳循环模型。这对于模拟大尺度的碳循环过程,实现对陆地生态系统碳汇/碳源的时间和空间分布格局的判断与评估有着重要的意义。

(3) 由人类活动引起的土地利用方式和土地覆盖变化是陆地土壤有机碳变化及循环最直接的影响因子。因此,今后应注重土地利用方式和土地覆盖变化在土壤碳循环中的作用及地位、固碳减排具体措施的提出及在实践中的应用研究,这些问题的不断解决将有助于人们采取合理的土地利用和管理措施进行生态恢复或重建。

[参 考 文 献]

[1] 袁红朝,李春勇,简燕,等. 稳定同位素分析技术在农田生态系统土壤碳循环中的应用[J]. 同位素,2014,27(3):170-178.

[2] Kumar R, Pandey S, Pandey A. Plant roots and carbon sequestration[J]. Current Science, 2006, 91(7): 885-890.

[3] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. Science, 2004, 3(4): 1623-1627.

[4] Sombmek W G, Nachtergeele F O, Hebel A. Amounts, dynanfies and sequestering of calbon in tropical and subtropical soils[J]. AMBIO, 1993, 22(7): 417-426.

[5] Rubey W W. Geological history of sea water: an attempt to state the problem[J]. Geological Society of America Bulletin, 1951, 62(9): 1111-1148.

[6] Bohn H L. Estimate of organic carbon in world soils[J]. Soil Science Society of American Journal, 1975, 40(3): 468-470.

[7] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, et al. Soil carbon pools and world life zones [J]. Nature, 1982, 298 (5870): 156-159.

[8] Rozhkov V, Wagner V, Kogut B, et al. Soil Carbon Estimates and Soil Carbon Map for Russia[C]. Laxenburg: International Institute for Applied Systems Analysis, 1996.

[9] 汪业勖,赵士洞,牛栋. 陆地土壤碳循环的研究动态[J]. 生态学杂志,1999,18(5):29-35.

[10] 方精云,刘国华,徐嵩龄. 中国陆地生态系统碳循环[M]. 北京:中国环境科学出版社,1996:251-276.

[11] 潘根兴. 中国土壤有机碳和无机碳库量研究[J]. 科技通报,1999,15(5):330-332.

[12] 王绍强,周成虎. 中国陆地土壤有机碳库的估算[J]. 地理研究. 1999,18(4):349-354.

[13] 王绍强,周成虎,李克让,等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. 地理学报,2000,55(5):533-544.

[14] 解宪丽,孙波,周慧珍,等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J]. 土壤学报,2004,41(1):35-43.

[15] 于东升,史学正,孙维侠,等. 基于 1∶100 万土壤数据库的中国土壤有机碳密度及储量研究[J]. 应用生态学报,2005,16(12):2279-2283.

[16] 张东辉,施明恩. 土壤有机碳转化与迁移研究概况[J]. 土壤,2000(6):305-308.

[17] 吴金水,肖和艾. 土壤微生物生物量碳的表观周转时间

测定方法[J]. 土壤学报,2004,41(3):401-407.

[18] 王琳,欧阳华,周才平,等. 放射性碳同位素在土壤碳循环中的应用[J]. 地球科学进展,2004,23(4):43-51.

[19] Wang Yang, Amundson R, Trumbore S E. Radiocarbon dating of soil organic matter[J]. Quaternary Research, 1996,45(3):282-288.

[20] Neff J C, Townsend A R, Gleixner G, et a1. Variable effects of nitrogen additions on the stability and turnover of soil carbon[J]. Nature, 2002,419(6910):915-917.

[21] Cherkinsky A E, Brovkin V A. Dynamics of radiocarbon in soils[J]. Radiocarbon, 1993,35(3):363-367.

[22] Trumbore S E, Vogel J S, Southon J R. AMS ^{14}C measurements of fractionated soil organic matter: An approach to deciphering the soil eathort cycle[J]. Radiocarbon, 1989,31(3):644-654.

[23] Chen Qingqiang, Sun Yanmin, Shen Chengde, et al. Organic matter turnover rates and CO_2 flux from organic matter decomposition of mountain soil profiles in tlle subtropical area, south China[J]. Catena, 2002,49(3):217-229.

[24] Paul E A, Clark F E. Soil microbiology and biochemistry [M]. The United States of America: Academic Press, 1996:130-155.

[25] Kuzyakov Y, Domanski G. Carbon input by plants into the soil: Review[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2000,163(4):421-431.

[26] 窦森,张普京. 用 $\delta^{13}C$ 方法研究玉米秸秆分解期间土壤有机质数量动态变化[J]. 土壤学报,2003,40(3):40-45.

[27] Katoh M, Murase J, Sugimoto A, et al. Effect of rice straw amendment on dissolved organic and inorganic carbon and cationic nutrients in percolating water from a flooded paddy soil: A microcosm experimentusing^{13}C-enriched rice straw[J]. Organicgeochemistry, 2005,36(5):803-811.

[28] Liang B C, Wang X L, Ma B L. Maize root-induced change in soil organic carbon pools[J]. Soil Science Society of America Journal, 2002,66(3):845-847.

[29] An Tingting, Schaeffer S, Li Shuangyi, et al. Carbon fluxes from plants to soil and dynamics of microbial immobilization under plastic film mulching and fertilizer application using ^{13}C pulse-labeling[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2015,80(80):53-61.

[30] 徐国良,王敏,张卫信,等. 土壤跳虫在碳循环中的作用:^{13}C 示踪研究[J]. 生态环境学报,2015,24(7):1103-1107.

[31] 耿元波,董云社,孟维奇. 陆地碳循环研究进展[J]. 地理科学进展,2000,19(4):297-306.

[32] Wang Dali, Daniel R, Wilfred P, et al. Terrestrial ecosystem carbon modeling[M]. New York: Springer, 2011:2034-2039.

[33] Batlle A J, Brovelli A, Porporato A, et al. Modelling soil carbon and nitrogen cycles during land use change: A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2011,31(2):251-274.

[34] 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(1):144-171.

[35] Li Ronghua, Li Xiaobing, Li Guoqing, 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(3):155-164.

[36] Leemans R, Zuidema G. Evaluating changes in land cover and their importance for global change[J]. Tree, 1995,10(2):76-81.

[37] Leith H. Whittaker RH. Primary Productivity of the Biosphere[M]. Berlin: Springer-verlag, 1975:237-263.

[38] Esser G. Sensitivity of global carbon pools and fluxes to human and potential climatic impacts[J]. Tellus, 1987,39(3):245-260.

[39] Raich J W, Rastetter E B, Melillo J M, et a1. Potential net primary productivity in, South America: Application of a global model[J]. Ecological Applications, 1991,1(4):399-429.

[40] Haxeltine A, Prentice I. BIOM3: An equilibrium terrestrial biosphere model based on ecophysiological constraints, resource availability and competition among plant functional types[J]. Glob Biogeochem Cycle, 1996,10(4):693-710.

[41] Warnant P, Fran ois L, Strivay D, et al. CARAIB: A global model of terrestrial biolosical productivity[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1994,8(3):255-270.

[42] Woodward F I, Smith T M, Emanuel W R. A global land primary productivity and phytogeography model [J]. Global Biogeochemical Cycles, 1995,9(4):471-490.

[43] Sellers P J, Mintz Z, Sud Y C, et a1. Simple biosphere model(SiB) for use within general circulation models [J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1986,43(6):505-531.

[44] Liu Jiyuan, Chen J M, Cihlar J, et a1. A process-based boreal ecosystem productivity simulator using remote sensing inputs[J]. Re-mote Sensing of Environment, 1997,62(97):158-175.

[45] Li Changsheng, 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(9):9777-9783.

[46] Li Changsheng, Frolking S, Frolking T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events:2. Applications[J]. Journal of Geophysical Research, 1992,97(9):9777-9783.

[47] Li Changsheng, Frolking S, Croker G J, et al. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the DNDC model[J]. Geoderma, 1997,81(1/2):45-60.

[48] 李长生,肖向明,Frocking S,等. 中国农田的温室气体排放[J]. 第四纪研究,2003,23(5):493-503.

[49] 李长生. 土壤碳储量减少:中国农业之隐患:中美农业生态系统碳循环对比研究[J]. 第四纪研究. 2000,20(4):345-350.

[50] Li Hu, Qiu Jianjun, Wang Ligang, et al. Estimates of N_2O emissions and mitigation potential from a spring maize field based on DNDC model[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2012,11(12):2067-2078.

[51] 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,2013,35(1):38-42.

[52] 金琳,李玉娥,高清竹,等. DNDC 模拟中国 20 a 农田管理土壤碳变化[J]. 土壤通报,2010,41(5):1081-1085.

[53] 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,2013,46(13):2695-2708.

[54] 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.

[55] 孙园园,孙永健,王锐婷,等. DNDC 模型对川中丘陵区稻田 CH_4,NO_2 排放的模拟对比分析[J]. 生态环境学报,2011,21(6):1003-1010.

[56] 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.

[57] 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.

[58] Ji Jinjun. A climate-vegetation interaction model: Simulating physical and biological processes at the surface [J]. Journal of Biogeography, 1995,22(2/3):445-451.

[59] Wang Shusen, Grant R F, Verseghy D L, Black T A. Modelling plant carbon and nitrogen dynamics of a boreal aspen forest in CLASS-the Canadian Land Surface Scheme[J]. Ecological Modeling, 2001,142(1):135-155.

[60] 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.

[61] Yu Guirui, Zhuang Jie, Yu Zhenliang. 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.

[62] Yu Guirui, Kobayashi T, Zhuang Jie, 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.

[63] 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.

[64] Huang Yao, Yu Yongqiang, Zhang Wen, et al. Agro-C: A bio-geophysical model for simulating the carbon budget of agroecosystems[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2009,149(1):106-129.

[65] 苏永中,赵哈林. 土壤有机碳储量、影响因素及其环境效应的研究进展[J]. 中国沙漠,2002,22(3):220-228.

[66] 金峰,杨浩,赵其国. 土壤有机碳储量及影响因素研究进展[J]. 土壤,2000,32(1):11-18.

[67] Jobbage E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation [J]. Ecological Applications, 2000, l0(2):423-436.

[68] 张乃明. 环境土壤学[M]. 北京:中国农业大学出版社,2011:172-189.

[69] Bouwman A F. Soils and the Greenhouse Effect[M]. New York: John Wiley and Sons Inc, 1990:61-127.

[70] 刘纪远,王绍强,陈镜明,等. 1990—2000 年中国碳氮蓄积量与地利用变化[J]. 地理学报,2004,59(4):483-496.

[71] 杨玉盛,谢锦升,盛浩,等. 中亚热带山区土地利用变化对土壤有机碳储量和质量的影响[J]. 地理学报,2007,62(11):1123-1131.

[72] Yang Xueming, Kay B D. Rotation and tillage effects on soil organic carbon sequestration in a typic Hapludalf in Southern Ontario[J]. Soil & Tillage Research, 2001,59(3/4):107-114.

[73] Blancoanqui H, Lal R. No-tillage and soil-profile carbon sequestration:an on-farm assessment[J]. Soil Science Society of America Journal, 2008,72(3):693-701.

[74] Wang Yongpeng, Li Xiaogang, Hai Long, et al. Film fully-mulched ridge-furrow cropping affects soil biochemical properties and maize nutrient uptake in a rainfed semi-arid environment[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2014,60(4):486-498.

[75] Liu Xiaoe, Li Xiaogang, Hai Long, et al. Film mulched ridge-furrow management increases maize productivity and sustains soil organic carbon in a dryland cropping system[J]. Soil Science Society of America Journal, 2014,78(4):1434-1441.