

# 土壤有机碳转化与迁移研究概况

张东辉 施明恒 金峰 杨浩

(东南大学动力工程系 南京 210096) (中国科学院南京土壤研究所)

**摘要** 本文论述了土壤有机碳的转化迁移模型,介绍了国内外有关这方面的进展,阐明了有机碳模型与温室效应的预估之间的联系。

**关键词** 有机碳;温室效应

近 200 年来,人类对土壤的干扰包括毁林、改变土地利用方式、排干湿地等,这些活动加剧了温室气体的排放。陆地生态系统中的有机碳是大气中的 2~3 倍,对于调控大气 CO<sub>2</sub> 浓度有重要作用<sup>[1]</sup>。土壤也是全球碳循环系统的重要组成部分,只有比较了解碳循环的各过程,才能有把握地预测有机碳的贮量在气候、土地利用、大气 CO<sub>2</sub> 浓度改变时的变化,这些都涉及对土壤中有有机碳转化、迁移规律有更深入的了解。本文将主要对有关方面的国内外进展作一介绍。

## 1 土壤中有有机碳的降解

植物通过光合作用固定大气中 CO<sub>2</sub>,进入土壤中的有机碳是植物残体在受到微生物作用降解后剩余的部分,这部分有机碳在土壤中扩散迁移,形成一定的分布规律。文献<sup>[2]</sup>分析了有机碳在大气和土壤系统中的流动和转化情况,并给出了不同年龄的有机碳在土壤内部的分布。

## 2 土壤中有有机碳的转化分类模型

土壤中有有机碳的降解受到温度、水分、酸度、有机物质组成和状态、土壤粘粒含量、质地等很多因素的影响,在这方面已有了大量的研究。经过许多土壤学家的工作,提出了一些描述土壤有机碳动态变化的模型。土壤碳循环如图 1。

D. S. Jenkinson<sup>[4]</sup>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),物理稳定有机碳(POM),化学稳定有机碳(COM)。DPM/RPM 比率是一个比较重要的参数,随土壤类型而变。Parton<sup>[5]</sup>也把有机质分成 5 类,详细研究了影响有机质分解的各种因素,降解系统将随土壤温度、湿度和深度而变。但上述分类显得很复杂,很难实际应用。Abbas Elzein<sup>[6]</sup>提出了三池模型[快速降解有机碳(RAPID),慢速降解有机碳(SLOW),稳定有机碳(STABLE)],如图 2。

D. R. Huggins<sup>[7]</sup>把有机碳分成 2 类,即双池模型:快速降解的有机碳和慢速降解的有机碳。该模型中降解快的有机碳称为活性有机碳,降解速度比较慢的称为非活性有机碳。活性有机碳是指受植物、微生物影响强烈,有一定的溶解性,在土壤中移动比较快、不稳定、易氧化、分解的部分。有机碳的活性程度随深度、土壤质地、气候和有机质的化学性质而变。

越接近土壤表层的有机碳, 被转化的可能性越大。

土壤有机碳模型多种多样, 复杂程度各异。应根据具体情况, 采用切合实际的模型。

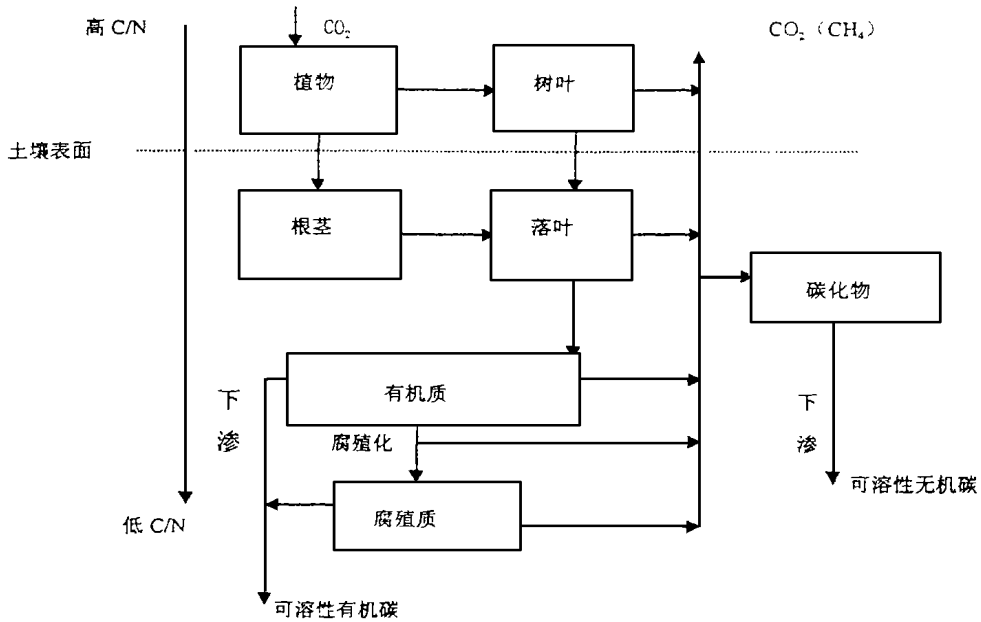


图 1 土壤碳循环图<sup>[3]</sup>

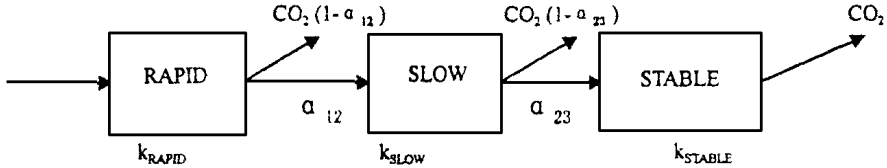


图 2 三池模型<sup>[6]</sup>

### 3 土壤有机碳的迁移扩散数学模型

目前, 有机碳在土壤的迁移过程存在不同的形式。我们主要关心的是有机碳在土壤中的扩散和对流作用, 有机碳在土壤中的扩散过程比较复杂, 包括 3 个方面的影响: (1) 生物作用, 包括土壤中动物的输送作用和微生物的流通作用而导致有机碳的迁移; (2) 化学作用, 即土壤有机碳的吸附、交换、降解; (3) 物理作用, 一部分可溶性有机碳随溶液迁移。因为表层土的微生物作用很强而且相对疏松, 扩散率相对高一些, 随土层深度的增加, 扩散率降低。

土壤中碳的迁移包括无机碳和有机碳的迁移 2 部分, 大部分研究都集中在有机碳问题, 英国 B. J. O' Brien<sup>[8]</sup> 等 (1977) 在描述土壤中有机碳的迁移时, 仅考虑扩散的作用, 给出扩散方程模型:

$$\frac{\partial C(z, t)}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C(z, t)}{\partial z^2} - KC(z, t)$$

$C(z, t)$  代表土层深度  $z(\text{cm})$ 、 $t$  时刻的有机碳浓度,  $D$  代表扩散率,  $k$  代表降解系数, 他们用放射性碳同位素测试技术得到了土壤有机质的精确年龄, 由此可以更清楚地了解土壤中

不同年龄的有机碳的分布情况以及百分比。

法国的 Abbas Elzein 等进一步考虑对流的作用, 建立了对流—扩散—吸附方程模型:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial z^2} - v \frac{\partial C}{\partial t} - kC + \sum_{i=1}^N \alpha_{ij} K_i C_i$$

边界条件为:

$$D \frac{\partial C}{\partial z} - vC = f_s \quad \frac{\partial C}{\partial z} = 0$$

$f_s$  代表输入到土壤表面的有机碳量,  $i$  代表不同降解速度的有机碳。扩散系数体现了微生物和物理扩散综合作用。论文中也假设扩散率、降解系数不随土壤深度而变。

对流—扩散方程首先是建立在合适的有机碳转化模型基础上。上述模型实际上都是未知有机碳在土壤剖面分布, 然后根据边界条件和物性参数求解数学物理方程, 从而达到预测的目的, 称此类模型为预测型模型。在具体实践时, 溶液对有机碳的传递的影响? 怎样比较准确地得到当地土壤的植被输入量、扩散率、降解系数等参数? 在建模前, 需仔细考虑这些因素的影响。在这方面国内所做的工作很少。在有机碳转化迁移模型的基础上, 很容易由此推算出土壤中  $CO_2$  的释放量<sup>[9]</sup>。

目前, 在有机碳分布模型的研究中, 还存在另一种思路: 方法的提出是基于这样的背景, 在建立土壤有机碳数据库时, 需要输入大量的数据。为减少数据的输入工作量, 那么, 根据当地有机碳剖面的测试数据, 对其进行回归拟合, 得到恰当有机碳分布曲线, 这种有机碳模型称之为诊断型模型<sup>[10-11]</sup>。

#### 4 土壤中有有机碳的分布

国内外在这方面已作了很多实验工作。现在主要对中国土壤情况作一简介: 文启孝、林心雄<sup>[12, 13, 14]</sup> 等的研究表明: 植被不同, 有机物进入土壤的量不同, 进入的方式也各异, 从而有机碳的剖面分布状况也有很大差异。森林植被下, 进入土壤的有机物质主要为地表的凋落物, 因此其表土层很薄, 一般仅 2~7cm, 此层中有机碳含量可达到 368mg/kg, 其下虽有一深厚的腐殖质层(约 40~70cm), 但其含量已较上层急剧减少; 草本植被下, 除由土表进入土壤的植物残体外, 发达的根系也是土壤有机物质的主要来源, 因此有机碳的剖面变化较平缓; 灰钙土、漠钙土因植物生物量很少, 分解又很强烈, 因而全剖面各土层的碳含量均极低。我国土壤有机碳浓度随深度的变化情况可大致分为两种: (a) 下降型, 即有机碳浓度随深度的增加而下降, 绝大多数情况都是如此; (b) 不变型, 即有机碳在土壤剖面中均匀分布, 不随深度而变, 如滨海砂土和滨海盐土, 这与其成土过程有关。

文献<sup>[6]</sup> 在计算中, 得到了不同降解系数有机碳的分布规律如图 3, 降解得比较快的有机碳在土壤中随深度呈指数下降; 而比较稳定的有机碳在剖面上均匀分布。RAPID 代表快速降解有机碳, SLOW 代表慢速降解有机碳, STABLE 代表稳定有机碳, Z 代表土层深度。

#### 5 土壤有机碳模型与温室效应的预估

土壤有机碳模型是全球碳循环模型的重要组成部分。Holland<sup>[14]</sup> (1978) 用地球化学循环动力学的原理分析碳循环, Emanuel<sup>[15]</sup> (1989) 开发了一个高度集合化的计算模型, 用之预估全球温室效应。该模型由大气层、海洋表层、海洋深层、树林的木质部分、地表植被、枯落

物/分解者以及土壤八个系统组成,对每个系统分别建立微分方程,他们控制着不同蓄积库之间的碳流动。其主要思想是把各个系统看成是黑箱,对系统内部的过程并不关心。对土壤这个子模块来说,并没有讨论有机碳在内部的传输过程,这是该模型很大的缺陷。

D.S. Jenkinson<sup>[16]</sup>的模型是建立在 Rothamste 农场实验数据的基础之上,并推广到全球尺度。模型考虑了温度、湿度、地面植被、土壤粘土组合的作用。他们的工作分析了全球温度的变化对土壤有机质分解的影响,从而导致 CO<sub>2</sub> 的排放的变化。但 Jenkinson 的模型在计算时所作假设都比较粗糙,这方面工作仍很不完善;芬兰 J. Liski<sup>[17]</sup>等针对芬兰南部的北方针叶林开发土壤碳模型,该模型很好地预测了土壤碳的数量、土壤碳的年龄

以及随土壤年龄的增加和土壤碳的积累。在计算中假设分解系数与温度呈线性关系。这样就可预测土壤有机质的分解对全球气候变暖的响应。新鲜的较小年龄的土壤有机质,其分解依赖于温度,而年龄较大的土壤有机质的分解对温度的敏感性要低,而以前的预测假设所有土壤有机质的分解对温度的敏感性相同。计算结果证明气候变暖的响应下, D.S. Jenkinson 过高地估计了碳从土壤到大气的释放。

合理的土地利用方式,应根据不同的土壤,分别采取不同的措施。土壤在受到外界干扰后,有机碳的损失和累积模型是很多人关心的<sup>[18]</sup>。比较有代表性的工作是 Johnson 和 Kern<sup>[3]</sup>提出的。如图 4,土壤在外界干扰后,有机碳受到很大损失;但经过合适的土壤管理办法,有机碳得到新的积累,达到新的稳定状态。人类活动会使土壤中有有机碳的贮量变化,据估计,若林地完全被破坏,则地面 1 米深度内有机碳损失 25~30%。

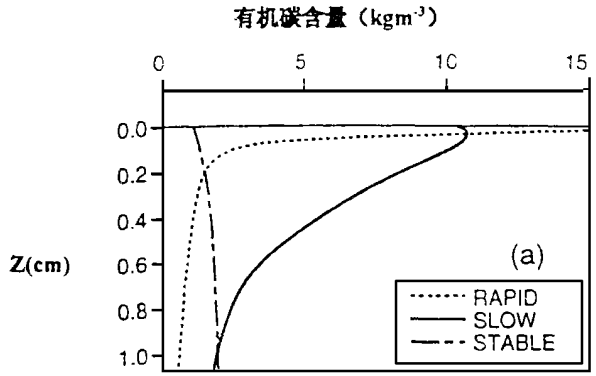


图 3 不同降解系数有机碳的分布规律

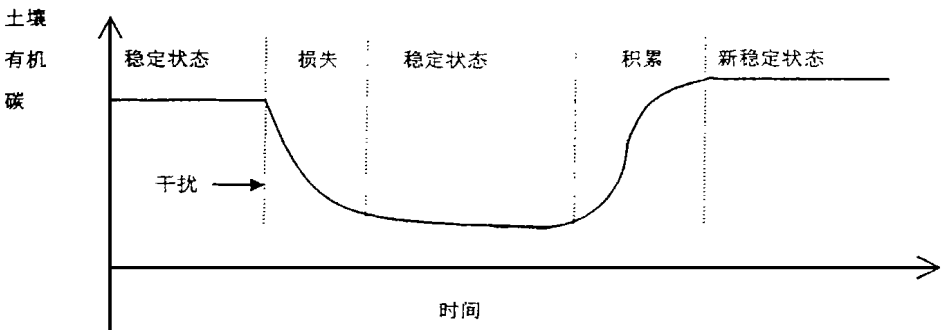


图 4 有机碳损失和积累模型

在此模型基础之上,提出了合理的管理方法,减少土壤有机碳的损失,更重要的还可能提高有机碳的累积,缓冲日益加剧的温室效应的影响。

由上所述,土壤有机模型可以使人们清楚地了解有机碳在土壤中的转化及迁移规律。

