



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

用计算机模型验证土壤有机碳周转负反馈作用现象与机理

王瑞琪, 蔡媛媛, 王丽丽, 杨殿林, 刘惠芬, 谭炳昌

引用本文:

王瑞琪, 蔡媛媛, 王丽丽, 等. 用计算机模型验证土壤有机碳周转负反馈作用现象与机理[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(3): 389–397.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0258>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

茶园多植物覆盖种植对土壤酶活性和有机碳矿化特征的影响

汪洋, 杨殿林, 王丽丽, 沈晓琳, 赵建宁, 王慧, 黄进, 张小福

农业资源与环境学报. 2020, 37(3): 371–380 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0605>

猪粪有机肥施用对潮土速效养分含量及团聚体分布的影响

石纹磬, 刘世亮, 赵颖, 高焕平, 王洋洋, 李慧, 刘芳

农业资源与环境学报. 2017, 34(5): 431–438 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0070>

农田管理措施对土壤有机碳周转及微生物的影响

汪洋, 杨殿林, 王丽丽, 赵建宁, 刘红梅, 谭炳昌, 王慧, 王明亮, 黄进, 张小福

农业资源与环境学报. 2020, 37(3): 340–352 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0329>

不同经营年限柑橘果园土壤稳定性有机碳比较

王义祥, 叶菁, 王成己, 翁伯琦, 黄毅斌

农业资源与环境学报. 2015(4): 332–337 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2014.0362>

长期定位施肥和地膜覆盖对棕壤团聚体稳定性及其有机碳含量的影响

吕欣欣, 丁雪丽, 张彬, 孙海岩, 汪景宽

农业资源与环境学报. 2018, 35(1): 1–10 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0199>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王瑞琪, 蔡媛媛, 王丽丽, 等. 用计算机模型验证土壤有机碳周转负反馈作用现象与机理[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(3): 389–397.

WANG Rui-qi, CAI Yuan-yuan, WANG li-li, et al. Validation of negative feedback in soil organic carbon dynamics and its underlying mechanisms using computer models[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(3): 389–397.



开放科学 OSID

用计算机模型验证土壤有机碳周转负反馈作用现象与机理

王瑞琪^{1,2}, 蔡媛媛^{1,2}, 王丽丽², 杨殿林^{2*}, 刘惠芬¹, 谭炳昌^{2*}

(1. 天津农学院农学与资源环境学院, 天津 300384; 2. 农业农村部环境保护科研监测所, 天津 300191)

摘要: 有机物料腐殖化系数(h)与有机碳降解系数(k)是控制土壤有机碳周过程的两个关键参数, 为研究有机碳含量对该两参数的影响, 应用计算机模型探讨有机碳含量对自身周转作用的影响以及相应的机理。结果显示, 有机碳含量的动态变化不能反映有机碳含量是否对自身周转造成影响, 但有机碳含量与碳输入水平的关系可以反映有机碳含量的作用: 即不管该两参数是否与有机碳含量有关, 有机碳含量均随着时间延长而渐近线增加或降低至平衡值; 当假设两参数与有机碳含量无关, 则有机碳含量随碳输入水平增加呈直线增加; 但当假设有机碳含量通过有机碳周转负反馈作用影响该两参数, 即 h 随有机碳含量增加而降低, 且 k 同时增加, 则有机碳含量随碳输入水平增加而渐近线增加。进一步验证该负反馈作用机理分析也发现, 当考虑负反馈作用的机理时, 有机碳含量随着碳输入水平增加而渐近线增加。因此有机碳周转负反馈作用合理, 在计算机模型构建中考虑该影响因素是必要的, 也是可行的。

关键词: 有机碳; 饱和值; 腐殖化; 降解; 周转; 负反馈; 模型

中图分类号: S153.6

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2020)03-0389-09

doi: 10.13254/j.jare.2018.0258

Validation of negative feedback in soil organic carbon dynamics and its underlying mechanisms using computer models

WANG Rui-qi^{1,2}, CAI Yuan-yuan^{1,2}, WANG li-li², YANG Dian-lin^{2*}, LIU Hui-fen¹, TAN Bing-chang^{2*}

(1. College of Agronomy & Resources and Environment, Tianjin Agricultural University, Tianjin 300384, China; 2. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Tianjin 300191, China)

Abstract: The humification coefficient of input organic material(h) and decomposition rate(k) of soil organic carbon(SOC) are two key parameters that control the SOC turnover processes. Many previous studies have investigated how elements such as water and temperature can affect these processes, but how the SOC content can affect its own turnover processes is seldom concerned. We developed computer models to test the effect of the SOC content on the SOC turnover processes and its underlying mechanisms. The results showed that however h and k changed the SOC content, it also changed asymptotically with time, and eventually reached equilibrium; When assuming that these two parameters were constant with the SOC content, the SOC content would linearly increase without being limited by the C input level; The SOC content would increase asymptotically with the C input level when assuming that h decreased with the SOC content and k increased simultaneously; An asymptotic relationship between the SOC content and C input level would occur. The changes in h and k with the SOC content were termed as negative feedback to SOC turnover. Further study on the mechanisms underlying the negative feedback supported the asymptotic relationship between the SOC content and C input level. We suggest that the negative feedback of SOC turnover is reasonable, and it is necessary and possible to consider this effect in model development.

Keywords: SOC; saturation; humification; decomposition; turnover process; negative feedback; computer model

收稿日期: 2018-09-29 录用日期: 2018-11-12

作者简介: 王瑞琪(1994—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为农业生态学。E-mail: wangruiqi_wrq@126.com

*通信作者: 杨殿林 E-mail: yangdianlin@caas.cn; 谭炳昌 E-mail: tanbch@163.com

基金项目: 中国农业科学院科技创新工程协同创新任务(CAAS-XTCX2016015)

Project supported: Cooperative Innovation Project of Agricultural Science and Technology Innovation Program of CAAS(CAAS-XTCX2016015)

土壤有机碳在提高土壤肥力、缓解温室效应中具有重要的作用^[1-2],国际土壤学界也围绕土壤固碳问题逐渐形成固碳土壤学这一新兴学科^[3]。有机碳动态是有机物料腐殖化与有机碳降解两过程平衡的结果(本文未考虑通过径流与淋溶等造成的有机碳损失)。在相对稳定的水热条件、管理措施下,有机碳含量随着时间延长而增加或降低,并最终达到平衡状态,同时,有机碳平衡值随着碳输入水平增加而增加。Jenny^[4]及 Henin 等^[5]提出的一级动力学方程显示有机碳动态与有机物料腐殖化系数(h)以及有机碳降解系数(k)有关,了解该两参数有利于认识有机碳周转过程并为构建计算机模型提供理论依据。

$$dC/dt = I_m h - Ck \quad (1)$$

式中: C 表示有机碳含量, $g \cdot kg^{-1}$; t 表示时间, a ; I_m 表示单位土壤质量碳输入水平, $g \cdot kg^{-1} \cdot a^{-1}$; h 表示有机物料腐殖化系数(无量纲); k 表示有机碳降解系数, a^{-1} 。

以往的研究表明, h 与 k 受以下因素的影响:①环境因素,如土壤温度、土壤含水量等;②有机物料性质,如C/N、木质素含量等;③土壤性质,如土壤pH值,土壤质地等^[6]。此外,管理措施也会通过改变以上的因素间接影响土壤碳周转过程。因此,目前多数有机碳计算机模型,如 RothC、CENTURY、DNDC、Agro-C 等均考虑以上的全部或部分因素^[7-9]。然而,除以上因素外,有机碳含量往往处于动态变化中,关于有机碳含量的变化影响有机物料腐殖化过程以及有机碳降解过程的研究鲜有报道。

以往多数的研究只关注环境因素、有机物料性质与土壤性质对有机碳周转过程的影响,因此在长期定位试验研究中,假设这三因素相对稳定的条件下, h 与 k 将是定量参数。根据有机碳周转一级动力学方程,当有机碳达到平衡状态时,则 $dC/dt = I_m h - Ck = 0$,则 $C = E$, $E = (h/k) \times I_m$ (E 表示有机碳平衡值, $g \cdot kg^{-1}$),有机碳平衡值将随碳输入水平增加而成比例无限制增加。这是现在多数有机碳模型预测的有机碳平衡值与碳输入水平呈直线关系的原因^[10-11]。但也有观点认为,有机碳存在饱和值,不能无限增加^[12-14]。为此,Stewart 等^[10]提出有机碳动态模式,认为一方面有机碳含量随时间延长而渐近线增加或降低并最终达到平衡状态,另一方面有机碳平衡值也随着碳输入水平增加而渐近线增加,在碳输入水平足够大的条件下达到的最大平衡值被认为是有机碳饱和值(图1)。

Tan 等^[15]基于饱和值理论的有机碳动态模式,运用数学推算初步发现: h 随着有机碳含量增加而指数

降低,同时, k 指数增加,反之亦然;最终有机碳含量变化通过改变 h 与 k 进一步抑制自身随后的变化过程,因此将该有机碳含量作用现象定义为有机碳周转负反馈作用。Tan 等^[15]进一步提出负反馈作用是三方面机理形成的:①生物机理,随着有机碳含量增加,以微生物为主的有机碳降解驱动力更强;②化学机理,土壤对有机碳保护能力有限,有更高比例的有机碳处于未保护的活性状态;③物理机理,有机碳含量的增加使有机碳周转的物理环境得到改善,促进有机碳的周转。

究竟 h 与 k 是否与有机碳含量有关?造成有机碳周转负反馈作用的机理是什么?计算机模型可以验证一些用实验手段难以取得理想效果的情景与假设,从而更好理解物质循环动态过程^[7,16]。本研究将有机碳视为单库或双库,通过构建有机碳模型,分别验证有机碳周转负反馈作用现象与机理,以期为更好理解有机碳周转过程以及优化计算机模型提供理论依据。

1 材料与方法

一级动力学方程显示有机碳含量变化是有机物料腐殖化过程的有机碳形成与有机碳降解两者平衡的结果。腐殖化过程形成有机碳量是碳输入水平与腐殖化系数的乘积,有机碳降解造成的有机碳损失量是有机碳含量与降解系数的乘积。本研究根据该方程构建常规模型(不考虑负反馈作用)与负反馈模型(考虑负反馈作用与机理)。需要说明的是本研究只是定性验证有机碳负反馈作用以及相关机理,因此模型未涉及常见的温度、水分等影响因素,因为这些因素不会影响负反馈作用现象与机理的验证过程。

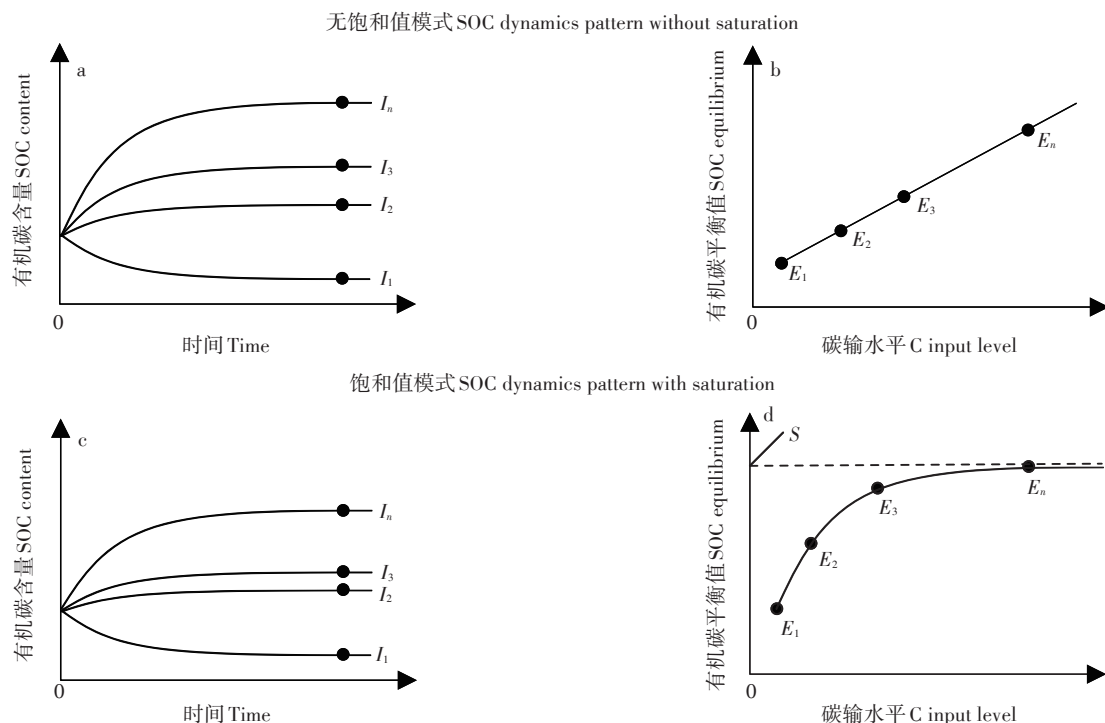
1.1 单库模型验证负反馈作用现象

1.1.1 常规模型

在常规模型中, h 与 k 均与有机碳含量无关(图2a)。根据已有的研究^[17],设 h 为0.34, k 为0.177 a^{-1} ,则 $dC/dt = 0.34I_m - 0.177C$ 。在模拟过程中,设土壤容重(B)为1.36 $g \cdot cm^{-3}$ ^[18],在0~20 cm深度(D)土层的初始有机碳含量为4.00 $g \cdot kg^{-1}$ 。单位面积碳输入水平 I ($kg \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)与单位土壤质量碳输入水平(I_m)的关系是 $I_m = I / (100DB)$ 。

1.1.2 负反馈模型

负反馈模型与常规模型区别是: h 与 k 均与有机碳含量有关(图2b)。根据Tan 等^[15]研究,将两参数与土壤有机碳含量的关系表示为: $h = \ln(1.39 - 0.0265C)$,

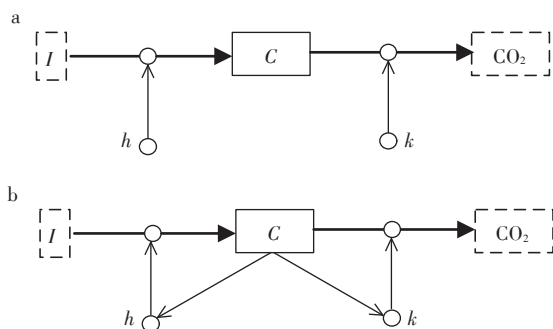


无饱和值模型显示,有机碳含量随时间增加而渐近线变化(a),平衡值与碳输入水平呈直线关系(b);饱和值模型显示,有机碳含量也随时间增加而渐近线变化(c),但平衡值随碳输入水平增加而渐近线增加,碳输入水平足够大时的平衡值被认为是饱和值(d)

SOC dynamics pattern without saturation shows that SOC will change over time (a) and SOC equilibrium level will increase linearly as C input level increase (b); While SOC dynamics pattern with saturation shows that SOC will also change over time (c), but SOC equilibrium will increase asymptotically with increasing C input level (d)

图1 有机碳饱和值与有机碳动态变化

Figure 1 Illustration of SOC saturation and SOC dynamics pattern



I 表示碳输入水平($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); h 表示有机物料腐殖化系数; C 表示有机碳含量; k 表示有机碳降解系数。大箭头表示有机碳形成与降解过程,小箭头表示两变量存在关系。腐殖化形成有机碳量是 I 与 h 的乘积,有机碳降解量是 C 与 k 的乘积。在常规模型中, h 与 k 均与有机碳含量无关(a);在负反馈模型中, h 与 k 均与有机碳含量有关(b)

I : C input level($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$); h : Organic material humification coefficient; C : SOC content; k : SOC decomposition coefficient. Big arrows mean inflow or outflow of SOC, and small arrows mean connections between certain variables. The amount of organic carbon formed by humification is the product of the carbon input level and the humification coefficient. Inflow of SOC= Ih ; loss of SOC= Ck . Both h and k are assumed independent from SOC content in linear model(a), but they are affected by SOC content in negative feedback model(b)

图2 常规模型与负反馈模型结构

Figure 2 Model structure for normal and negative feedback model

$k=0.002 \ 23 \ln(C-3.27)$,土壤容重和0~20 cm土层有机碳初始含量与常规模型一致。

1.2 双库模型验证负反馈作用机理

上述模型假设有机碳为一个整体,但是有机碳具有很高的异质性,目前大多数的计算机模型都设定有机碳为双库或多库,部分模型也考虑不同有机碳库间的相互转换。模型对不同有机碳库设定相应的降解系数与转换系数。为简化,本研究假设有机碳为双库(即活性有机碳与惰性有机碳),不考虑不同有机碳库间的转换,以验证有机碳含量作用机理。模型表达如下:

$$\begin{cases} C = C_1 + C_2 \\ \frac{dC_1}{dt} = I_m h p - C_1 k_1 \\ \frac{dC_2}{dt} = I_m h (1-p) - C_2 k_2 \end{cases} \quad (2)$$

式中: C_1 与 C_2 分别表示活性有机碳含量与惰性有机碳含量;两有机碳库的周转均符合一级动力学模型,其中 k_1 与 k_2 分别是该两组分的降解系数; p 表示新形成的有机碳分配于活性有机碳库的比例。不同模型结

构如图3所示。

当不考虑有机碳含量作用机理时, h 、 p 与 k_1 、 k_2 为固定常数,可以分别设为 $0.34^{[17]}$ 、 0.46 与 0.66 、 0.02 a^{-1} ^[18]。但考虑有机碳含量作用机理时,根据Tan等^[15]提出的负反馈作用机理,可以根据上述四值调整参数,如图4所示。即随着有机碳含量增加, h 降低, p 值增加, k_1 与 k_2 均增加。理论上,所有的参数值均 <1 。必须说明的是,本研究中设定的 h 与 C 、 p 与 C 以及 k 与 C 的数学关系并非反映准确定量关系,而是被简化的定性变化趋势。一方面因为本研究目的是定性验证有机碳含量作用的机理,另一方面目前欠缺这些关系的定量研究。尽管如此,这些简化的关系不影响本研究定性验证有机碳含量作用机理。

研究考察两个关系:①有机碳含量与时间的关系(C - t 关系);②有机碳含量与碳输入水平的关系(C - I 关系)。

研究用SELLA软件构建计算机模型,用Origin 8.5作图。

2 结果与分析

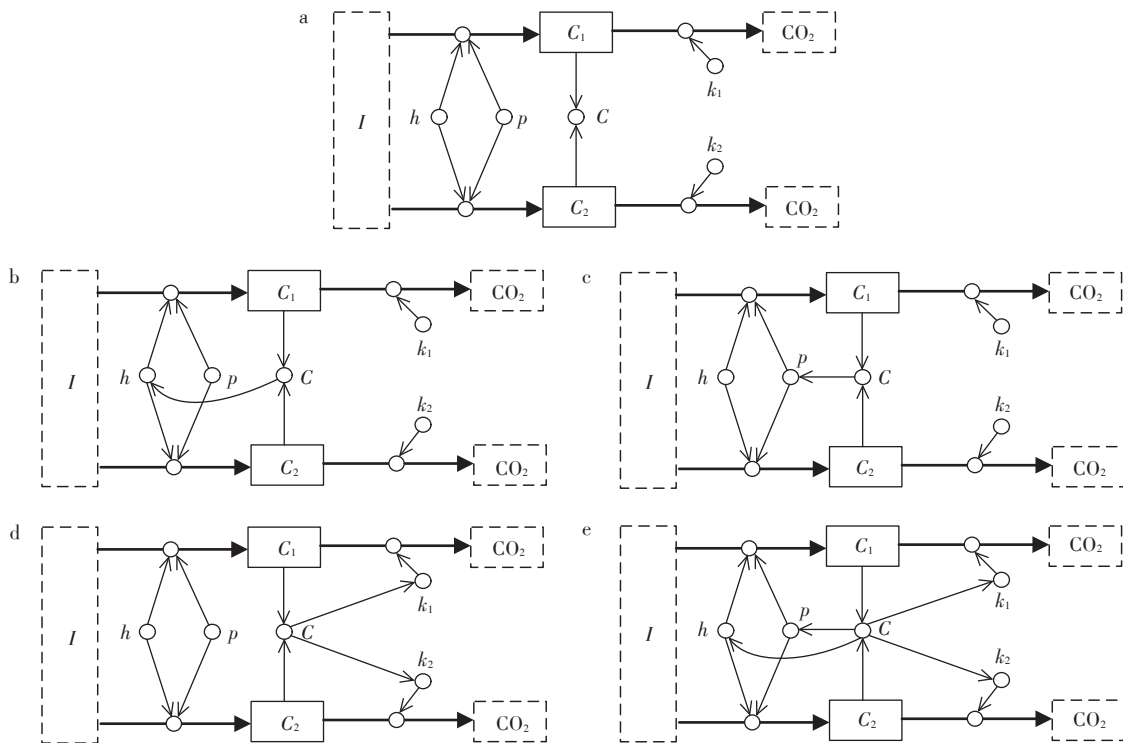
2.1 负反馈作用现象验证

2.1.1 有机碳随时间的动态变化

随着时间延长,在不同常量碳输入水平下,常规模型与负反馈模型模拟得到的有机碳含量均随时间延长而渐近线增加或降低至平衡状态。在相同时间下,碳输入水平越高,有机碳含量越高,模型运行50年后有机碳接近或达到平衡状态(图5)。

2.1.2 有机碳平衡值与碳输入水平的关系

由于两模型运行200年后有机碳含量充分达到平衡状态,因此保持模型运行200年时间条件下,将碳输入水平从常量水平增至高量水平,如 $100\ 000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,拟进一步了解在高量不同碳输入水平下有机碳平衡值与碳输入水平的关系。结果显示,随着碳输入水平的增加,有机碳平衡值增加(图6)。常规模型显示平衡值随碳输入水平增加而成比例直线增加,因此不会出现有机碳饱和现象;负反馈模型显示

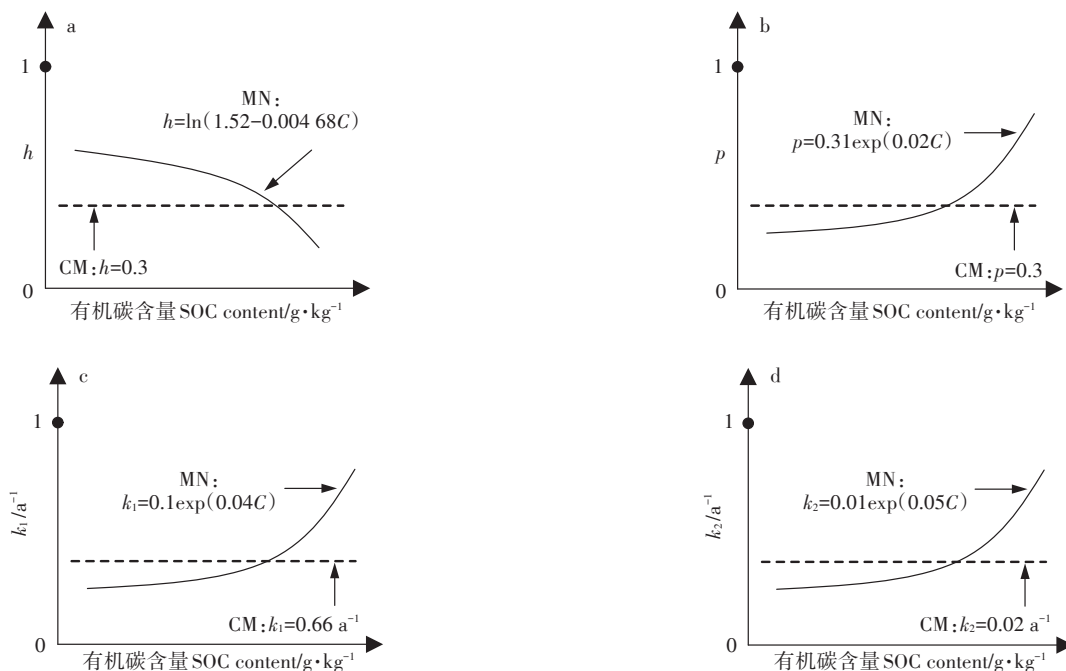


a: 常规模型,没有考虑有机碳含量作用的机理;b: 腐殖化系数随有机碳积累而降低;c: 新形成的有机碳中有更高的比例分配至活性有机碳库;
d: 两有机碳组分降解系数增加;e: 综合考虑有机碳含量作用的三个机理(即b、c和d)

a: The regular model does not consider the mechanism of negative feedback; b: The humification coefficient decreases with the accumulation of organic carbon; c: A higher proportion of newly formed organic carbon is allocated to the active organic carbon pool; d: The degradation coefficient of the two organic carbon components increases; e: Comprehensively consider the three mechanisms of the action of organic carbon content (ie, b, c and d)

图3 双库模型结构

Figure 3 Description of two-compartment model

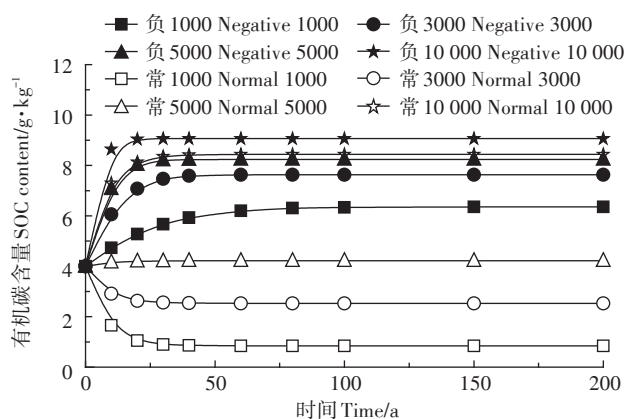


CM模型表示没有考虑有机碳含量的作用;MN表示模型考虑有机碳含量的作用

The CM model indicates that the effect of organic carbon content is not considered; MN model indicates the effect of the organic carbon content

图4 模型参数设定

Figure 4 Model parameter assignment



“负”表示负反馈模型;“常”表示常规模型;1000~10 000表示不同的碳输入水平($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)。下同
“Negative” means negative feedback model; “Normal” means regular model; 1000~10 000 means different carbon input levels ($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$). The same below

图5 不同模型碳输入水平下有机碳随时间的变化趋势

Figure 5 SOC dynamics for different models and C input levels

平衡值随碳输入水平增加而渐近线增加,在 $50\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $100\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 两个碳输入水平下有机碳平衡值基本相同,显示有机碳饱和值的存在(图6)。另外,常规模型的土壤固碳效率($E/I, \text{g}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}\cdot\text{kg}^{-2}$)不随碳输入水平增加而改变,负反馈模型的固碳效率随着碳输入水平增加而降低,显示明显的报酬

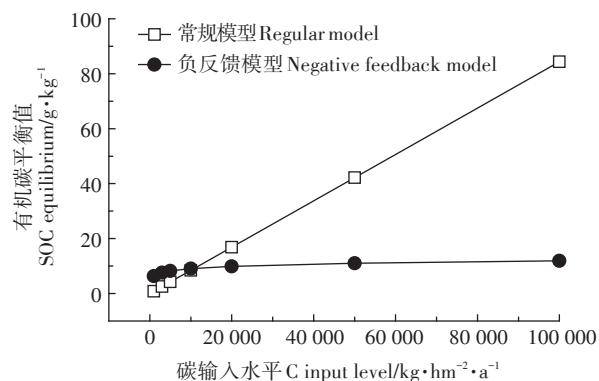


图6 有机碳平衡值与碳输入水平的关系

Figure 6 Relationship between SOC equilibrium and C input level

递减效应规律(图7)。

2.1.3 非平衡状态有机碳含量与碳输入水平的关系

理论上,在时间足够条件下,有机碳含量最终能达到平衡状态,但实际上有机碳含量往往处于趋向平衡状态的动态变化过程中。因此本研究进一步分析在不同碳输入水平下模型运行10、20年及40年后,即非平衡状态下,有机碳含量与碳输入水平的关系。结果显示,在常规模型中,模型运行不同年份后,有机碳含量均随着碳输入水平增加而直线增加(图8a),负反馈模型中有机碳含量均随着碳输入水平增加而渐

近线增加(图8b)。

2.2 负反馈作用机理验证

2.2.1 有机碳随时间的动态变化

以碳输入水平 $3000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 为例考察形成负反馈作用的机理。模型运行200年后,不论是否考虑有机碳含量作用的机理,有机碳含量都随着时间推移而渐近线变化至平衡状态(图9)。

2.2.2 有机碳含量与碳输入水平的关系

模型运行200年后,当考虑有机碳含量作用机理时,有机碳平衡值 E 与碳输入水平 I 均呈渐近线关系;相反,不考虑有机碳含量作用机理下,两者呈直线关系(图10)。进一步探讨两类模型模拟得到的非平衡状态有机碳含量与碳输入水平关系发现,模型运行20年后,有机碳含量 C 与碳输入水平 I 的关系呈现与 $E-I$ 关系类似的现象:只要考虑有机碳含量作用机理,均呈现渐近线 $C-I$ 关系;相反,不考虑有机碳含量作用机理时,呈现直线 $C-I$ 关系(图11)。

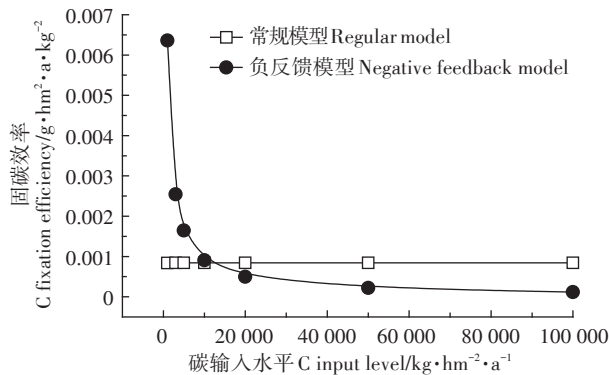
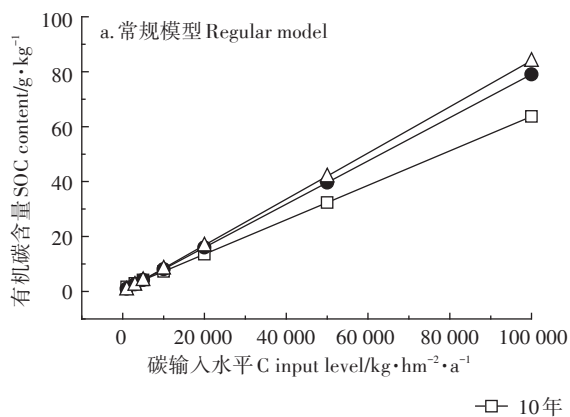


图7 固碳效率与碳输入水平的关系

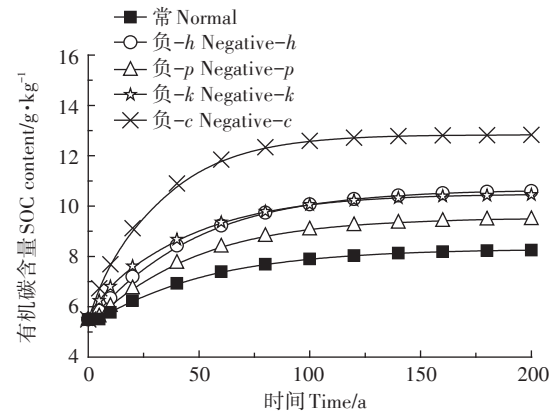
Figure 7 Relationship between C fixation efficiency and C input level



3 讨论

3.1 有机碳周转负反馈作用的合理性

有机碳含量随时间的变化($C-t$ 关系)以及有机碳含量与碳输入水平的关系($C-I$ 关系),包括平衡值与碳输入水平的关系($E-I$ 关系),是表达有机碳动态的重要内容^[10]。以往计算机模型主要关注对有机碳



“常”表示不考虑负反馈作用的常规模型,“负- h ”、“负- p ”与“负- k ”分别表示单独融合负反馈机理的模型, h 表示有机物料腐殖化系数随着有机碳含量增加而降低, p 表示新形成有机碳分配至活性有机碳组分比例随着有机碳含量增加而增加, k 表示两有机碳组分降解系数随着有机碳含量增加而增加,“负- c ”表示同时考虑三种机理的模型。下同
“Normal” means a regular model that does not consider the negative feedback effect. “Negative- h ”, “Negative- p ” and “Negative- k ” respectively represent a model of the fusion negative feedback mechanism. h represents humification coefficient of organic material decreases with the increase of organic carbon. p indicates that the proportion of newly formed organic carbon to the active organic carbon component increases as the organic carbon content increases. k indicates that the degradation coefficient of the two organic carbon components increases as the organic carbon content increases. “Negative- c ” means a model that considers three mechanisms simultaneously. The same below

图9 双库模型有机碳含量动态

Figure 9 SOC dynamics for the two-compartment models

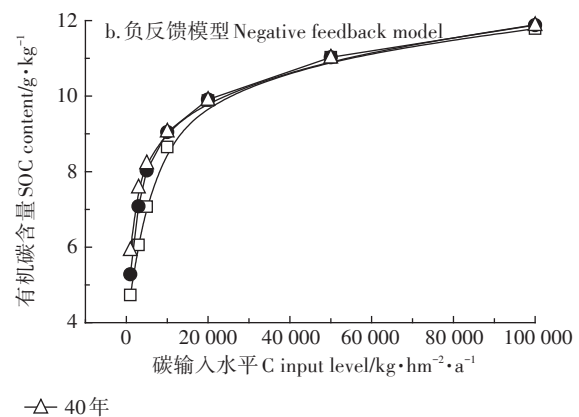


图8 不同年份下有机碳含量与碳输入水平的关系

Figure 8 Relationship between SOC content and C input level for different years

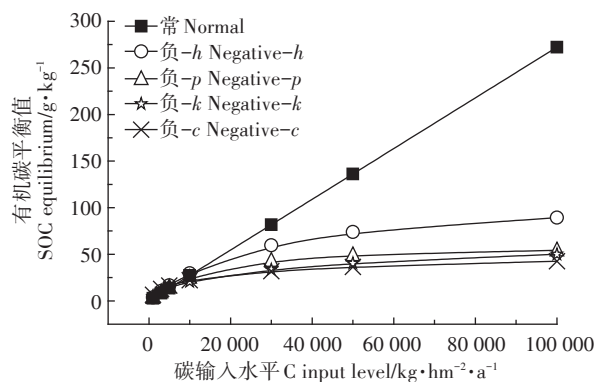


图10 双库模型有机碳平衡值与碳输入水平的关系

Figure 10 Relationship between SOC equilibrium and C input level for two-compartment models

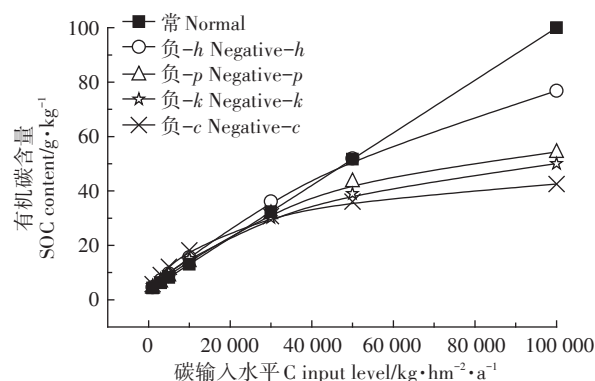


图11 双库模型有机碳含量与碳输入水平的关系

Figure 11 Relationship between SOC content and C input level for two-compartment models

含量动态变化的模拟过程,但对于 $C-I$ 关系的模拟结果缺乏足够的重视,而该关系恰恰能反映有机碳含量是否对自身周转过程产生影响,并且能直观反映指定碳输入水平对应的土壤固碳能力,因此考察计算机模型对 $C-I$ 关系的模拟结果应在模型研究中得到更多的重视。Paustian等^[11]指出,无论将有机碳以多组分处理或单组分处理,目前大部分计算机模型均预测得到直线型 $E-I$ 关系,并认为这种直线关系是基于一级动力学方程以及 k 参数值固定的结果。Bayer等^[9]通过数学推算也证明,当假设 h 与 k 固定时,有机碳含量与碳输入水平呈直线关系。本研究的常规模型模拟结果显示,有机碳含量与时间的关系不能反映有机碳含量是否影响有机碳的周转过程,而有机碳含量与碳输入水平的关系能反映有机碳含量的作用:当不考虑负反馈作用与机理时,常规模型模拟得到直线型 $C-I$ 关系(包括 $E-I$ 关系),与上述研究结果一致(图6、图8a、图10和图11)。但由于土壤对有机碳保护作用有限,有机碳含量不会随碳输入水平的增加而无限增加,最终只会增至饱和状态^[12]。虽然一些长期试验显示有机碳含量与碳输入水平呈直线关系,但是这种关系是碳输入水平较低且输入水平范围较小所致,从而没能显示显著的渐近线关系^[10]。本研究的结果也显示,当考虑负反馈作用时,呈渐近线型 $C-I$ 关系,但这种渐近线关系的显著性与碳输入水平范围有关,范围较小,越不显著;另外,即使输入水平范围大,但若含量已接近饱和值,则也不明显(图8b)。

由此可见,若不考虑负反馈作用与机理,计算机模型将模拟得到直线型 $C-I$ 关系(包括 $E-I$ 关系),若考虑负反馈作用与机理,计算机模型将模拟得到渐近线型 $C-I$ 关系。此外笔者利用数学推导也发现负反

馈作用也呈现了渐近线型 $C-I$ 关系;对国内多个长期试验数据分析也发现,渐近线型 $C-I$ 关系比直线型关系更加普遍(数据未发表)。由此可见,有机碳周转负反馈作用既合理也可被模拟,而Kemanian等^[20]已将负反馈作用融入C-farm模型中,并成功模拟了美国俄勒冈州与英格兰洛桑两个长期试验的有机碳动态过程。

3.2 有机碳周转负反馈作用的机理

有机碳负反馈作用可能由以下生化与物理原因造成:

(1)更高的有机碳可降解性。由于土壤对有机碳的保护能力有限,随着有机碳含量的增加,更高比例的有机碳处于未受保护的活性状态。有研究表明轻组有机碳(Light fraction of SOC)与重组有机碳(Heavy fraction of SOC)比值随着轻组有机碳含量增加而增加^[21]。由于轻组有机碳更容易被降解^[22],因此整体上造成总有机碳的可降解性随着含量增加而提高。

(2)更强的降解驱动力。土壤微生物是有机碳周转的主要驱动力,而控制微生物量最重要的因素是底物可获得性^[23]。随着有机碳含量的增加,土壤微生物量及其活性增强,直接促进有机碳的降解过程,无论有机碳属于活性状态还是惰性状态^[24]。

(3)良好的降解环境。土壤容重随着有机碳含量增加而降低^[22,25],从而改善土壤通风条件,增强氧气的可获得性以及土壤二氧化碳的扩散,为有机碳周转过程提供更好的外部环境。

上述三个原因造成有机碳在高含量下具有更高的降解系数,同时后两个原因也直接促进有机物料的降解,因此只有更少量碳转化为有机碳,导致有机物料腐殖化系数降低。

在此三个机理基础上,本研究将其量化为三种方法:随着有机碳含量的增加,①新输入的碳中形成有机碳的比例降低,②新形成的有机碳中有更高比例的有机碳进入易降解活性碳库,处于非保护状态,③不同有机碳库的降解率均增加。结果显示,三种表达方式均呈渐近线型C-I关系(图10、图11)。说明该三种机理是可能的。另外一个现象是关于易降解的活性有机碳库与总有机碳的比例。除“新形成的有机碳中有更高比例的有机碳进入易降解库”机理外,“不同有机碳库的降解率增加”也会导致易降解有机碳库比例的增加(图12);而不考虑有机碳周转负反馈作用机理以及“新输入的碳中形成有机碳的比例降低”不会改变活性有机碳库的占比。可见,不同有机碳库比例的变化是化学机制(如吸附-解吸平衡)、生物学机制(微生物降解驱动力增强)与物理机制(更好的外部环境)综合作用的结果。因此,除了有机碳含量与碳输入水平的关系外,不同有机碳库与总有机碳含量的比例也可以反映有机碳含量在自身周转中的作用。

3.3 有机碳周转负反馈作用的应用

从有机碳保护机制角度看,有限的保护能力是造成有机碳饱和的原因^[12];从有机碳周转影响因素的角度看,负反馈作用导致有机碳饱和现象,而土壤有限的保护能力正是负反馈作用的根本原因之一。计算机模型若不考虑负反馈作用,则模型可能在高碳输入水平下(如高有机肥使用量,或大气CO₂浓度升高导致更高的陆地植物净初级生产力)高估土壤的固碳能力,或者在低碳输入水平下(森林砍伐或者没有秸秆等有机肥投入等)低估土壤固碳量。因此,在计算机模型中考虑有机碳周转负反馈作用是必要的。有别于成熟的DNDC、RothC、CENTURY等模型将有机碳

作多组分处理并考虑微生物量的变化,本研究只模拟有机碳周转的负反馈作用现象,在模拟该现象背后的三个机理时仅反映机理的趋势,因此有必要在未来的有机碳周转研究中量化形成负反馈作用的三个机理。然而模型参数增多,且一些参数难以获得,会造成参数误差叠加,反而降低模型的可使用性以及精度,因此需要在模型复杂度与准确度中获得平衡^[20]。有机碳饱和的模拟或对负反馈作用的模拟将是未来模型研究的方向之一^[26]。

4 结论

(1)有机物料腐殖化系数随着有机碳含量增加而降低,有机碳降解系数随着有机碳含量增加而增加。该负反馈作用进一步抑制有机碳后续的变化过程,即当有机碳含量降低,负反馈作用抑制有机碳含量降低的速度与过程;同理,当有机碳含量增加,则负反馈作用抑制含量增加的速度与过程。该负反馈作用不仅使有机碳含量随着时间呈渐近线变化,而且使有机碳含量(包括平衡状态与非平衡状态)随着碳输入水平增加而渐近线增加。

(2)有机碳与碳输入水平的关系以及不同有机碳库与总有机碳含量的比例能反映有机碳周转负反馈作用,应当在未来有机碳周转研究中得到更多的重视。

(3)在有机碳计算机模型构建中考虑有机碳周转负反馈作用不仅合理可行,也是必要的。

参考文献:

- [1] Wilhelm W W, Johnson J M F, Hatfield J L, et al. Crop and soil productivity response to corn residue removal: A literature review[J]. *Agronomy Journal*, 2004, 96(1):1-17.
- [2] Lal R. World crop residues production and implications of its use as a biofuel[J]. *Environment International*, 2005, 31(4):575-584.
- [3] 潘根兴, 周萍, 李恋卿, 等. 固碳土壤学的核心科学问题与研究进展[J]. *土壤学报*, 2007, 44(2):327-337.
PAN Gen-xing, ZHOU Ping, LI Lian-qing, et al. Core scientific issues and research progress in carbon sequestration soil science[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(2):327-337.
- [4] Jenny H. Factors of soil formation[M]. New York: McGraw-Hill, 1941: 191.
- [5] Henin S, Dupuis M. Essai de bilan de la matière organique du sol[J]. *Annales Agronomiques*, 1945, 15:17-29.
- [6] Zhang D Q, Hui D F, Luo Y Q, et al. Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: Global patterns and controlling factors[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 1(2):85-93.
- [7] Falloon P, Smith P. Modelling soil carbon dynamics[M]//Kutsch W L,

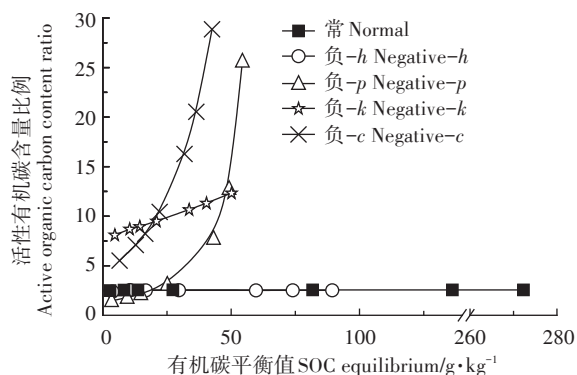


图12 活性有机碳比例与总有机碳含量的关系

Figure 12 Relationship between active organic carbon ratio and total organic carbon content

- Bahn M, Heinemeyer A. Soil carbon dynamics: An integrated methodology. England: Cambridge University Press, 2009: 221–244.
- [8] Li C S, Frolking S, Frolking T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: I Model structure and sensitivity[J]. *Journal of Geographical Research*, 1992, 97(D9): 9759–9776.
- [9] Huang Y, Yu Y Q, Zhang W, et al. Agro-C: A biogeophysical model for simulating the carbon budget of agroecosystems[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(1): 106–129.
- [10] Stewart C E, Paustian K, Conant R T, et al. Soil carbon saturation: Concept, evidence and evaluation[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 86(1): 19–31.
- [11] Paustian K H, Collins H P, Paul E A. Management controls on soil carbon[M]//Paul E A, Paustian K H, Elliott E T, et al. Soil organic matter in temperate agroecosystems: Long-term experiments in North America. New York: CRC Press, 1997: 15–49.
- [12] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils[J]. *Plant and Soil*, 2002, 241(2): 155–176.
- [13] West T O, Six J. Considering the influence of sequestration duration and carbon saturation on estimates of soil carbon capacity[J]. *Climatic Change*, 2007, 80(1/2): 25–41.
- [14] Chung H, Ngo K J, Plante A F, et al. Evidence for carbon saturation in a highly structured and organic-matter-rich soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(1): 130–138.
- [15] Tan B, Fan J, He Y, et al. Possible effect of soil organic carbon on its own turnover: A negative feedback[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 69(2): 313–319.
- [16] Jørgensen S E, Bendricchio G. Fundamentals of ecological modelling [M]. 3th Edition. Amsterdam: Elsevier Science B V, 2001.
- [17] Cai Z C, Qin S W. Dynamics of crop yields and soil organic carbon in a long-term fertilization experiment in the Huang-Huai-Hai Plain of China[J]. *Geoderma*, 2006, 136(3/4): 708–715.
- [18] 黄 耀, 孙文娟. 近20年来中国大陆农田表土有机碳含量的变化趋势[J]. *科学通报*, 2006, 51(7): 750–763.
- HUANG Yao, SUN Wen-juan. Trends of topsoil organic carbon content in farmland in mainland China in the past 20 years[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(7): 750–763.
- [19] Bayer C, Lovato T, Dieckow J, et al. A method for estimating coefficients of soil organic matter dynamics based on long-term experiments [J]. *Soil & Tillage Research*, 2006, 91(1/2): 217–226.
- [20] Kemanian A R, Stockle 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.
- [21] Yin Y F, Cai Z C. Equilibrium of organic matter in heavy fraction for three long-term experimental field soils in China[J]. *Pedosphere*, 2006, 16(2): 177–184.
- [22] Post W M, Kwon K C. Soil carbon sequestration and land-use change: Processes and potential[J]. *Global Change Biology*, 2000, 6(3): 317–327.
- [23] Kutsch W L, Schimel J, Denef K. Measuring soil microbial parameters relevant for soil carbon fluxes[M]//Kutsch W L, Bahn M, Heinemeyer A. Soil carbon dynamics: An integrated methodology. England: Cambridge University Press, 2010: 169–186.
- [24] Van Groenigen K J, Qi X, Osenberg C W, et al. Faster decomposition under increased atmospheric CO₂ limits soil carbon storage[J]. *Science*, 2014, 344(6183): 508–509.
- [25] Pan G X, Li L Q, Wu L S, et al. Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China's paddy soils[J]. *Global Change Biology*, 2003, 10(1): 79–92.
- [26] Campbell E E, Paustian K. Current developments in soil organic matter modeling and the expansion of model applications: A review[J]. *Environmental Research Letters*, 2015, 10(12): 123004.