

湿地垦殖对土壤有机碳影响的模拟研究

苏艳华^{1,2}, 黄耀¹

(1. 中国科学院大气物理研究所边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100083; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要:以现有的农田土壤有机碳动态模拟模型(Soil-C)为基础,针对湿地垦殖的特点及土壤有机碳的物理属性,将原模型中土壤有机碳单一分室改进为轻组和重组两分室进行模拟,并利用较大时空差异的土壤有机碳测定数据对模型进行了验证。结果表明,改进后的模型能较好地模拟湿地垦殖对土壤有机碳的影响,模拟值与观测值具有良好的一致性,原模型对垦殖湿地土壤有机碳变化的模拟能力较弱。

关键词:土壤有机碳;模型;土壤有机碳物理分组;湿地垦殖

中图分类号:S153.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2008)04-1643-06

Modeling the Effect of Marshland Conversion to Cropland on Soil Organic Carbon

SU Yan-hua^{1,2}, HUANG Yao¹

(1.LAPC, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China; 2.Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The conversion of wetland to cropland is believed to induce soil organic carbon (SOC) loss. To simulate the changes in SOC due to marshland conversion, an existing model (Soil-C) was modified in this paper. Soil-C was originally developed to simulate SOC dynamics in cropland, in which SOC was simply viewed as a mono-component. Modification to the original model was made by splitting SOC pool into two components of light fraction (LF) and heavy fraction (HF). Decomposition of LF and HF pool was simulated by a first-order kinetics equation, and the first-order decay rate was positively correlated to SOC density. The modified and the original model were validated against independent data sets with temporal and spatial difference. Model validation indicated that the modified model is capable of simulating the changes in LF and HF pool and can well capture the changes in SOC when the marshland was converted into cropland. A further simulation suggested that significant SOC loss occurred in the early several years after marshland conversion was greatly attributed to a rapid decomposition of LF pool with higher first-order decay rates, while the original model could not capture the signal due to a lower first-order decay rate.

Keywords: soil organic carbon; model; physical fraction of SOC; marshland conversion

全球土壤中存储有机碳约 1 500 pg,是大气碳库储量的 3 倍,约为陆地生物量的 2.5 倍^[1]。土壤碳储量发生微小变化也会对大气二氧化碳浓度产生较大的影响,因此研究土壤有机碳的时空动态变化及其驱动因素对全球碳循环具有重要意义。在一定的时空条件下,土壤有机碳储量的变化由其形成量和分解量之差决定,这些过程受土壤性质、气候条件和人类活动等

因素共同影响^[2]。人类活动引起的土地利用方式变化影响土壤的物理、化学和生物过程,决定了土壤有机碳的输入量和分解速率^[3]。大量研究指出,自然生态系统向人工生态系统的转换会破坏原土壤有机碳的收支平衡^[4,5]。

三江平原是我国沼泽湿地面积分布最大的区域。自 1949 年以来,三江平原湿地历经 4 次大规模农业垦殖,其面积已由上世纪 50 年代初的 $534 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 减少到 2000 年的 $91 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ^[6]。研究表明,湿地垦殖为农田后,土壤有机碳输入量和输出速率随之发生显著变化,原有的土壤有机碳平衡方式受到严重影响^[7]。一方面,由于农业收获,进入土壤的外源有机碳大量减少;另一方面,湿地开垦种植旱地作物使土壤由嫌气

收稿日期:2008-03-11

基金项目:国家自然科学基金重点项目“三江平原沼泽湿地垦殖对地—气碳交换和土壤碳库影响的研究”(40431001)

作者简介:苏艳华(1980—),女,博士研究生,主要从事陆地生态系统碳循环研究。E-mail:suyanhu1980@yahoo.com.cn

通讯作者:黄耀 E-mail:huangy@mail.iap.ac.cn

环境转变为好气环境,土壤温度升高^[8],促进土壤有机碳的分解^[9]。

以往关于湿地垦殖对土壤有机碳影响的研究主要基于土壤普查数据^[10]和定点采样分析^[11]。由于土壤的空间异质性,基于上述方法估算垦殖对区域尺度土壤有机碳储量的影响具有极大的不确定性。近 20 a 来,模型方法已被广泛用于估算土壤有机碳的变化^[12-14]。黄耀及其研究组建立了用于模拟农田土壤有机碳变化的 Soil-C 模型^[15-17],并用于估算区域农田土壤有机碳的变化^[18,19]。Soil-C 模型将土壤有机碳视作单一分室(mono-component)进行模拟,但有研究表明,不同的土壤有机碳组分对环境响应的敏感程度不同^[13,14],轻组(light fraction)有机碳分解迅速,重组(heavy fraction)有机碳性质比较稳定,不易分解^[20]。考虑到湿地垦殖的特点和土壤有机碳的物理属性,本研究以 Soil-C 模型为基础,将土壤有机碳分为轻组和重组两个组分导入 Soil-C 模型,形成改进模型,为更准确地评估三江平原湿地垦殖对土壤有机碳库变化的影响提供支持和依据。

1 模型描述

1.1 概念性模型

依据 Soil-C 模型的思路,改进后的 Soil-C 模型将土壤有机碳分为轻组和重组(分离密度为 $1.7 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)两个组分;外源有机碳(如:作物秸秆、根和有机肥等)分组不变,即分为易分解和难分解两组分。外源有机碳进入土壤后,易分解组分的分解产物以 CO_2 形式直接释放到大气中。难分解组分化学组成比较复杂,分解过程也更为丰富,模型假设该组分分解初期仅向大气释放 CO_2 ,当分解 30%以后,每分解释放一个 CO_2 的同时有等量的碳进入土壤轻组碳库。土壤轻组有机碳库的分解产物一部分以 CO_2 形式释放到大气中,另一部分进入重组有机碳库^[21]。参照 ICBM^[22]的研究结果,假设进入重组有机碳库的比例为 0.4。重组有机碳分解缓慢,分解产物为 CO_2 。图 1 为改进后的 Soil-C 模型框架。

1.2 模型的数学表达

各有机碳组分的分解过程遵循一阶动力学反应[方程(1)],相应的一阶动力学反应速率(K_i)通过土壤环境因子进行修正[方程(2)、(4)、(5)、(6)],模型的相关数学表达如下:

$$\frac{dC_i}{dt} = K_i \times f_T \times f_W \times f_S \times f_{\text{pH}} \times C_i \quad (i=1, 2, \text{LF}, \text{HF}) \quad (1)$$

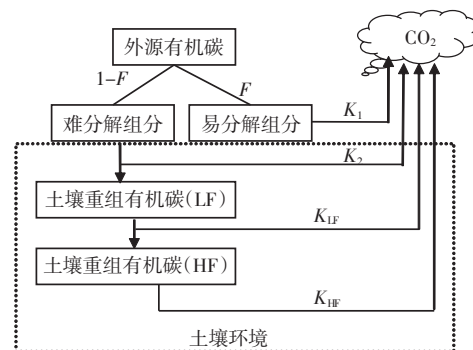


图 1 土壤有机碳周转的概念性模型

Figure 1 Conceptual model of soil organic carbon turnover

$$f_T = Q_{10}^{\frac{T_s - 10}{10}} \quad (2)$$

$$T_s = 4.4 + 0.76 \times T_{\text{air}} \quad (3)$$

$$f_W = 0.49 \times \exp(3.88 \times W - 5.4 \times W^2) \quad (4)$$

$$f_S = 1 - 0.26 \times \text{Clay} \quad (5)$$

$$f_{\text{pH}} = \frac{1}{1 + e^{-2.5(\text{pH} - 5)}} \quad (6)$$

$$F = 150 + 1.496N - 0.572L \quad (7)$$

以上各式来源于 Soil-C 原模型^[15,16]。式中: C_i ($\text{g C} \cdot \text{m}^{-2}$) 为第 i 种有机碳组分在 t 时刻的量, $i=1, 2$, LF 和 HF, 分别表示外源有机碳中易分解、难分解组分, 土壤轻组有机碳和土壤重组有机碳; f_T 为温度影响函数; T_s 和 T_{air} 分别为土壤温度和日平均气温, $^{\circ}\text{C}$; Q_{10} 为温度系数, 取常数 2.5; f_W 为水分影响函数; W 为土壤水分含量 (V/V); f_S 是土壤质地影响函数; Clay 为土壤粘粒(直径 $< 0.005 \text{ mm}$) 含量; F 为外源有机碳易分解组分比例, %; N 和 L 分别为外源有机碳初始全氮含量和木质素含量, $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

K_1 、 K_2 、 K_{LF} 和 K_{HF} 分别为外源有机碳中易分解组分、难分解组分、土壤轻组和重组有机碳分解的一阶动力学反应速率, d^{-1} 。 K_1 和 K_2 的值分别为 2.5×10^{-2} 和 8.0×10^{-4} ^[15]。根据 Yang (2002)^[23] 和 Bellamy 等人 (2005)^[24] 的研究, 土壤有机碳分解速率随其含量的下降而减小, K_{LF} 和 K_{HF} 则分别由方程(8)和(9)确定。

$$K_{\text{LF}} = 1.57 \times 10^{-4} \text{SOC}_{\text{LF}} + 9.81 \times 10^{-5} \quad (8)$$

$$K_{\text{HF}} = 1.24 \times 10^{-4} \text{SOC}_{\text{HF}} - 5.82 \times 10^{-4} \quad (9)$$

式中: SOC_{LF} 和 SOC_{HF} 分别为土壤轻组和重组有机碳密度, $\text{kg C} \cdot \text{m}^{-2}$ 。利用张金波等人 (2005)^[25] 对湿地垦殖土壤重组和轻组有机碳变化的测定数据, 确定上式各参数。由方程(9)可知, 当 SOC_{HF} 为 $4.7 \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2}$, K_{HF} 趋近于零。本研究假定 SOC_{HF} 小于 $4.7 \text{ kg C} \cdot \text{m}^{-2}$ 时, 其一阶动力学速率为 8×10^{-7} , 相应的半衰期约为 2 370 a, 这与 Jenkinson 等人 (1977)^[12] 的研究结果是一致的。

SOC_{LF} 和 SOC_{HF} 分别用下式计算:

$$SOC_{LF} = SOC \times SD \times h \times F_{LF} \quad (10)$$

$$SOC_{HF} = SOC \times SD \times h \times (1 - F_{LF}) \quad (11)$$

式中: SOC 为土壤有机碳含量, $g \cdot kg^{-1}$; h 为土层厚度, m ; SD 为土壤容重, $g \cdot cm^{-3}$, F_{LF} 为土壤轻组有机碳比例。 SD 和 F_{LF} 分别用方程 (12) 和 (13) 计算^[26]。

$$SD = 1.84 - 0.2667 \ln(SOC) \quad (12)$$

$$F_{LF} = 0.0021SOC + 0.0897 \quad (13)$$

2 模型输入与数据来源

模型输入参数包括: 逐日气象数据(最高温度、最低温度、降水、风速、相对湿度和日照时数), 来源于国家气象局; 试验点土壤理化性质(初始有机碳含量、粘粒含量、pH 值), 作物收获期和产量等, 来源于相关文献(表 1)。根据作物产量估算残茬还田量和根生物量^[27]。

模型验证数据来源于文献(表 1)。封丘和海北试验点测定数据用于验证土壤重组和轻组有机碳动态, 三江平原 3 种典型湿地(泥炭沼泽, 沼泽化草甸和腐殖质沼泽)的测定数据用于验证垦殖湿地土壤有机碳的变化动态。

封丘处于半干旱、半湿润暖温带季风气候带, 农作方式为一年两熟冬小麦-玉米轮作。海北处于典型高原大陆性气候带, 植被为高寒草甸和灌丛^[32], 开垦种植一年生燕麦^[29]。抚远和宝清位于三江平原, 属温带湿润半湿润大陆性气候区, 泥炭沼泽、沼泽化草甸和腐殖质沼泽是典型的湿地土壤类型^[33], 未垦殖前有机碳含量高(表 1), 开垦后种植大豆、春小麦或水稻等^[25,30]。

3 结果与讨论

3.1 不同组分土壤有机碳动态模拟

图 2a 为封丘农田表层土壤(0~20 cm, 下同)有机碳动态模拟结果, 不同组分有机碳模拟值与观测值动态变化趋势总体一致。土壤重组、轻组和总有机碳模

拟的平均相对误差分别为 $(5.6 \pm 2.7)\%$ 、 $(13.7 \pm 8.4)\%$ 和 $(4.0 \pm 2.9)\%$ 。图 2b 为海北草地垦殖后土壤有机碳动态模拟结果, 开垦种植燕麦 10 a 后土壤总有机碳和轻组有机碳均呈增加趋势。垦殖 11 a 的重组有机碳模拟值明显高于观测值, 这可能与实测土壤有机碳回收率较低(84.4%)有关。

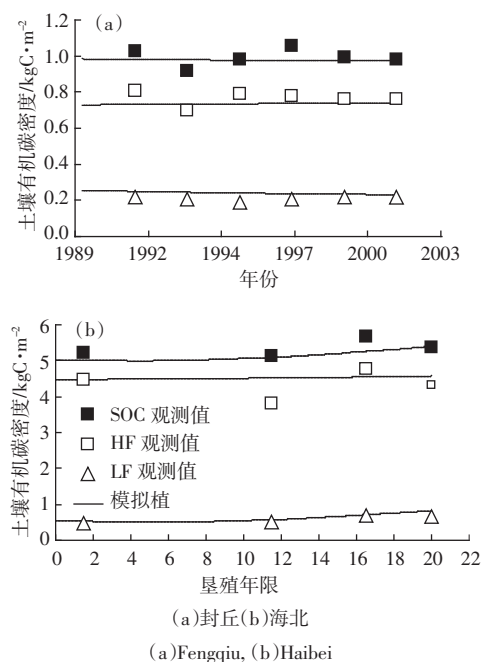


图 2 不同组分土壤有机碳动态模拟与观测值的比较

Figure 2 Comparison of simulated with observed changes in different components of soil organic carbon

3.2 垦殖湿地土壤有机碳动态模拟

图 3 为垦殖湿地土壤有机碳动态模拟结果。与原模型相比, 改进后的模型能较好地模拟垦殖湿地土壤有机碳的变化趋势, 特别是泥炭沼泽和沼泽化草甸垦殖后 10 a 内土壤有机碳迅速下降的趋势(图 3a、图 3b), 但腐殖质沼泽湿地垦殖的模拟结果与观测值间差别较大(图 3c)。可能的原因是垦殖后第 7 a 和第 10 a 土壤有机碳的测定深度为 0~40 cm^[30], 而本研究的模拟深度仅为 0~20 cm。一般而言, 垦殖对有机碳

表 1 试验点概况

Table 1 Description of the experimental sites

地点	经度(E)	纬度(N)	海拔/m	年均温度/℃	年均降水/mm	土壤类型	初始有机碳/ $g \cdot kg^{-1}$	pH	粘粒含量/%	文献
封丘	114°24'	35°00'	72.5	13.9	605	黄潮土	3.7	8.7	19.6	[28]
海北	101°12'	37°45'	3280	-1.7	599	高山草甸土	21.8	8.0	10.0	[29]
抚远	133°56'	47°35'	64.2	3.0	494	泥炭沼泽	175.0	5.3	40.0	[30]
抚远	132°51'	46°39'	64.2	3.0	494	沼泽化草甸	156.7	5.3	17.0	[31]
宝清	132°34'	46°36'	83.0	3.9	498	腐殖质沼泽	352.0	5.7	17.0	[30]

的影响主要集中在表层土壤,对深层土壤的影响相对较小^[34,35]。因此,0~20 cm 土壤有机碳下降的模拟值大于 0~40 cm 土壤层的观测值(图 3c)。

模拟结果(图 3)表明,垦殖初期(3~5 a)土壤有机碳下降极为明显;垦殖后 5~15 a 下降速率趋缓;垦殖后 15~30 a 则逐步趋于稳定。Euliss 等(2005)^[36]研究发现湿地排水垦殖以后,达到平衡状态时土壤有机碳的损失约为 71%~75%,本研究表明湿地垦殖 20~30 a 达到新的平衡状态(图 3),表层土壤有机碳减少 73.5%,二者的研究结果相一致。

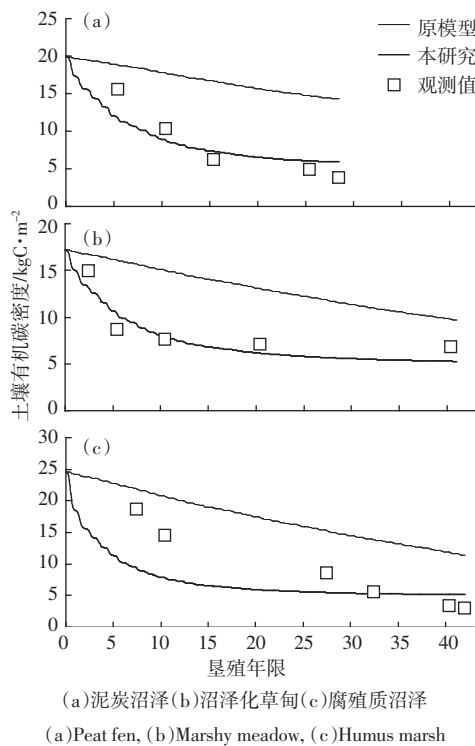


图 3 垦殖湿地土壤有机碳动态模拟值与观测值的比较

Figure 3 Comparison of simulated with observed changes in soil organic carbon due to wetland conversion

原模型将土壤有机碳视作单一分室进行模拟,一阶动力学分解速率为 $6.5 \times 10^{-5} (\text{d}^{-1})$ 。本研究按轻组和重组有机碳两分室进行模拟,并假定其一阶动力学分解速率(K_{LF} , K_{HF})与相应的土壤有机碳密度成正比[方程(8)、(9)]。模拟结果表明, K_{LF} 从垦殖初期的 $(120 \sim 330) \times 10^{-5} (\text{d}^{-1})$ 下降到垦殖后 25 a 的 $(20 \sim 25) \times 10^{-5} (\text{d}^{-1})$, K_{HF} 则从 $(45 \sim 76) \times 10^{-5} (\text{d}^{-1})$ 下降到 $(3.8 \sim 5.5) \times 10^{-5} (\text{d}^{-1})$ 。若将轻组和重组有机碳密度(SOC_{LF} , SOC_{HF})作为权重,对 K_{LF} 和 K_{HF} 进行加权平均($K = \text{SOC}_{\text{LF}} \times K_{\text{LF}} + \text{SOC}_{\text{HF}} \times K_{\text{HF}}$),其一阶动力学分解速率(K)则从垦殖初期的 $(90 \sim 270) \times 10^{-5} (\text{d}^{-1})$ 下降到垦殖后 25

a 的 $4.8 \sim 8.5 \times 10^{-5} (\text{d}^{-1})$, 接近于原模型的分解速率 $6.5 \times 10^{-5} (\text{d}^{-1})$ 。图 4 为沼泽化草甸(抚远)土壤有机碳分解速率随垦殖时间的变化。可以看出,改进后的模型在垦殖初期的 K 值远大于原模型,至垦殖后 20 a 才逐步接近,此时表层土壤有机碳密度约为 $6 \text{ kgC} \cdot \text{m}^{-2}$,与东北地区农田土壤有机碳密度相仿^[37,38],这可以解释为什么原模型虽然能较好地模拟农田土壤有机碳的变化^[15~17],但对垦殖湿地土壤有机碳变化的模拟能力较弱(图 3)的原因。

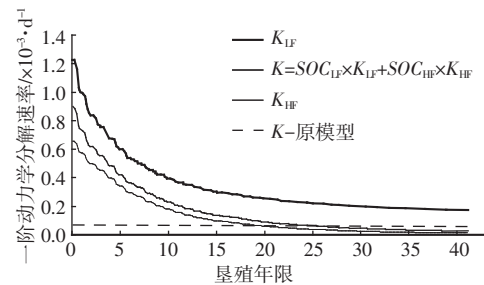


图 4 土壤有机碳一阶动力学分解速率随垦殖时间的变化

Figure 4 Changes in first-order kinetics reaction rate of soil organic carbon

3.3 模拟结果与观测值的比较

对 5 个案例(表 1)土壤有机碳动态模拟值和观测值(图 2、图 3)的验证结果表明,两者之间具有一致性,线性相关系数(R^2)为 0.845(图 5 中实线)。与观测值相比,约 85% 的模拟值落在 95% 置信区间,均方根误差(RMSE)为 90%,这个 RMSE 主要来源于腐殖质沼泽土壤的模拟结果(图 3c,图 5 中用 * 标记)。若不考虑该模拟结果,模拟值和观测值的线性相关系数则为 0.948(图 5 中虚线),均方根误差减小到 24%。

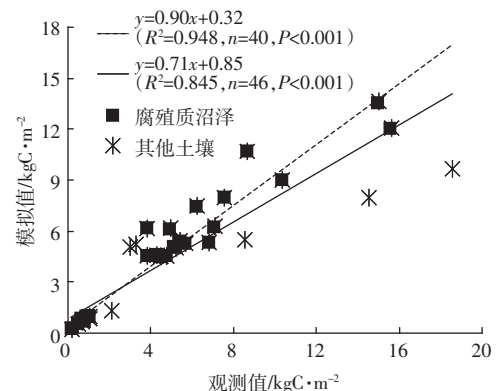


图 5 土壤有机碳变化模拟值和观测值的比较

Figure 5 Comparison of simulated with observed soil organic carbon

用于验证模型的观测数据(图3)采用空间代时间的方法获得,即在给定区域采集不同开垦年限的土壤样品进行分析,以此表征湿地开垦后土壤有机碳的变化。由于土壤的空间异质性,用空间代时间方法获得的数据可能并不来自同一初始土壤类型,这对模型的有效性检验带来了很大的不确定性。为了进一步检验模型的有效性,需进一步获取更多客观而准确的测定数据。

4 结论

以现有 Soil-C 模型为基础,改进了土壤有机碳分室模型,改进后的模型能较好地模拟土壤轻组和重组有机碳的变化动态以及湿地垦殖对表层(0~20 cm)土壤有机碳的影响,但模型的有效性仍需更多观测数据以进行进一步检验和校正。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. USA: Cambridge University Press, 2001. 881.
- [2] 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.
- [3] John B, Yamashita T, Ludwig B, et al. Storage of organic carbon in aggregate and density fractions of silty soils under different types of land use[J]. *Geoderma*, 2005, 128(1/2): 63–79.
- [4] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: a meta analysis[J]. *Global Change Biology*, 2002, 8(4): 345–360.
- [5] Houghton R A, Hobbie J E, Melillo J M, et al. Changes in the carbon content of terrestrial biota and soils between 1860 and 1980: A net release of CO₂ to the atmosphere[J]. *Ecological Monographs*, 1983, 53(3): 235–262.
- [6] 刘兴土, 马学慧. 三江平原自然环境变化与生态保育[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- LIU Xing-tu, MA Xue-hui. Natural Environmental Changes and Ecological Protection in the Sanjiang Plain[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [7] Armentano T V, Menges E S. Patterns of change in the carbon balance of organic soil-wetlands of the temperate zone[J]. *Journal of Ecology*, 1986, 74(3): 755–774.
- [8] 宋长春, 王毅勇, 阎百兴, 等. 沼泽湿地开垦后土壤水热条件变化与碳、氮动态[J]. 环境科学, 2004, 25(3): 150–154.
- SONG Chang-chun, WANG Yi-yong, YAN Bai-xing, et al. The changes of the soil hydrothermal condition and the dynamics of C, N after the mire tillage[J]. *Environmental Science*, 2004, 25(3): 150–154.
- [9] 宋长春, 王毅勇, 阎百兴, 等. 沼泽湿地垦殖前后土壤温度变化及其对土壤热状况的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(1): 88–92.
- SONG Chang-chun, WANG Yi-yong, YAN Bai-xing, et al. Variation of soil temperature before and after cultivation of marsh and its effect on soil thermal regime [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(1): 88–92.
- [10] 潘根兴. 地球表层系统土壤学[M]. 北京: 地质出版社, 2000.
- PAN Gen-xing. Soil Science of Earth Surface System[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000.
- [11] 刘子刚, 张坤民. 黑龙江省三江平原湿地土壤碳储量变化 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(6): 788–791.
- LIU Zi-gang, ZHANG Kun-min. Wetland soils carbon stock in the Sanjiang Plain [J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2005, 45(6): 788–791.
- [12] Jenkinson D S, Rayner J H. The turnover of soil organic matter in some of the classical Rothamsted experiments [J]. *Soil science*, 1977, 123(5): 298–305.
- [13] 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 Biogeochemical Cycles*, 1993, 7(4): 785–810.
- [14] Changsheng Li, Frolking S, Crocker G J, et al. Simulating trends in soil organic carbon in long-term experiments using the DNDC model[J]. *Geoderma*, 1997, 81(1): 45–60.
- [15] 黄耀, 刘世梁, 沈其荣, 等. 农田土壤有机碳动态模拟模型的建立[J]. 中国农业科学, 2001, 34(5): 532–536.
- HUANG Yao, LIU Shi-liang, SHEN Qi-rong, et al. Model establishment for simulating soil organic carbon dynamics [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2001, 34(5): 532–536.
- [16] 于永强, 黄耀, 张稳. 华东地区农田土壤有机碳动态模拟研究——模型的验证与灵敏度分析 [J]. 地理与地理信息科学, 2006, 22(6): 83–88.
- YU Yong-qiang, HUANG Yao, ZHANG Wen. Modeling farmland soil organic carbon dynamics in eastern China: Model validation and sensitivity analysis [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2006, 22(6): 83–88.
- [17] 黄耀, 周广胜, 吴金水, 等. 中国陆地生态系统碳收支模型[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- HUANG Yao, ZHOU Guang-sheng, WU Jin-shui, et al. Modeling Carbon Budgets of Terrestrial Ecosystems of China[M]. Beijing: Science Press, 2008.
- [18] 于永强, 黄耀, 张稳, 等. 华东地区农田土壤有机碳时空格局动态模拟研究[J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(1): 97–100.
- YU Yong-qiang, HUANG Yao, ZHANG Wen, et al. Modeling farmland soil organic carbon dynamics in eastern China: Spatio-temporal pattern [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2007, 23(1): 97–100.
- [19] ZHANG Wen, YU Yongqiang, SUN Wenjuan, et al. Simulation of soil organic carbon dynamics in Chinese rice paddies from 1980 to 2000[J]. *Pedosphere*, 2007, 17(1): 1–10.
- [20] Tan Z, Lal R, Owens L, et al. Distribution of light and heavy fractions of soil organic carbon as related to land use and tillage practice[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 92(1–2): 53–59.
- [21] Römkens P, van der Plicht J, Hassink J. Soil organic matter dynamics after the conversion of arable land to pasture[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 28(3): 277–284.
- [22] Andren O, Katterer T. ICBM: the introductory carbon balance model for exploration of soil carbon balances[J]. *Ecological Applications*, 1997, 7

- (4):1226-1236.
- [23] Yang H S, B H Janssen. Relationship between substrate initial reactivity and residues ageing speed in carbon mineralization [J]. *Plant and Soil*, 2002, 239(2):215-224.
- [24] Bellamy P H, Loveland P J, Bradley R I, et al. Carbon losses from all soils across England and Wales 1978-2003[J]. *Nature*, 2005, 437(7056):245-248.
- [25] 张金波, 宋长春, 杨文燕. 三江平原沼泽湿地开垦对表土有机碳组分的影响[J]. *土壤学报*, 2005, 42(5):857-859.
ZHANG Jin-bo, SONG Chang-chun, YANG Wen-yan. Effect of cultivation on organic carbon composition in a histosol in the Sanjiang Plain, China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42(5):857-859.
- [26] 张文菊. 典型湿地生态系统碳蓄积与碳循环模拟[D]. 武汉:华中农业大学, 2006. 36-47.
ZHANG Wen-ju. Organic Carbon Accumulation and Carbon Cycling Simulating in Typical Wetland Ecosystems [D]. Wuhan:Huazhong Agriculture University, 2006. 36-47.
- [27] Huang Y, Zhang W, Sun W J, et al. Net primary production of Chinese croplands from 1950 to 1999[J]. *Ecological Applications*, 2007, 17(3):692-701.
- [28] 尹云锋, 蔡祖聪, 钦绳武. 长期施肥条件下潮土不同组分有机质的动态研究[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(5):875-878.
YIN Yun-feng, CAI Zu-cong, QIN Sheng-wu. Dynamics of fluvo-aquic soil organic matter fractions under long-term fertilization[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(5):875-878.
- [29] 李月梅, 王跃思, 曹广民, 等. 开垦对高寒草甸土壤有机碳影响的初步研究[J]. *地理科学进展*, 2005, 24(6):59-65.
LI Yue-mei, WANG Yue-si, CAO Guang-min, et al. Preliminary research of effect of cultivation on soil organic carbon in alpine meadow [J]. *Progress in Geography*, 2005, 24(6):59-65.
- [30] 曾希柏, 黄雪夏, 刘子刚, 等. 种植年限对三江平原农田土壤剖面性质及碳、氮含量的影响 [J]. *中国农业科学*, 2006, 39(6):1186-1195.
ZENG Xi-bai, HUANG Xue-xia, LIU Zi-gang, et al. Effects of the period of wetland reclamation on the character of soil profiles, C and N contents in Sanjiang Plain [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(6):1186-1195.
- [31] 栾兆擎, 宋长春, 邓 伟. 三江平原挠力河流域湿地不同开垦年限肥力的变化[J]. *吉林农业大学学报*, 2003, 25(5):544-547.
LUAN Zhao-qing, SONG Chang-chun, DENG Wei. Study on soil fertility variation during wetland reclamation and utilization in the Naoli River Watershed of the Sanjiang Plain [J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2003, 25(5):544-547.
- [32] 陶 贞, 沈承德, 高全洲, 等. 高寒草甸土壤有机碳储量及其垂直分布特征[J]. *地理学报*, 2006, 61(7):720-728.
TAO Zhen, SHEN Cheng-de, GAO Quan-zhou, et al. Soil organic carbon storage and vertical distribution of alpine meadow on the Tibetan Plateau[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2006, 61(7):720-728.
- [33] 张养贞. 三江平原沼泽土壤的发生、性质与分类[M]//黄锡畴. 中国沼泽研究. 北京:科学出版社, 1998. 133-144.
ZHANG Yang-zhen. The genesis, nature and classification of the marshy soil in the Sanjiang Plain[M]//Huang Xichou. Marshy Research in China. Beijing:Science Press, 1998. 135-144.
- [34] 刘汝海, 王起超, 王 艳, 等. 小叶章湿地开垦后汞和有机质的动态变化[J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(6):647-650.
LIU Ru-hai, WANG Qi-chao, WANG Yan, et al. Changes of Hg and organic matter contents after reclamation of *Calamagrostis Angustifolia* Wetland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(6):647-650.
- [35] Collins H P, Collins H P, Elliott E T, et al. Soil carbon pools and fluxes in long-term corn belt agroecosystems [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(2):157-168.
- [36] Euliss Jr N H, Gleason R A, Olness A, et al. North American prairie wetlands are important nonforested land-based carbon storage sites[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 361(1-3):179-188.
- [37] 韩 冰, 王效科, 欧阳志云, 等. 中国东北地区农田生态系统中碳库的分布格局及其变化[J]. *土壤通报*, 2004, 35(4):401-407.
HAN Bing, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, et al. Distribution and change of agro-ecosystem carbon pool in the Northeast of China[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2004, 35(4):401-407.
- [38] 方华军, 杨学明, 张晓平. 东北黑土有机碳储量及其对大气 CO₂ 的贡献[J]. *水土保持学报*, 2003, 7(3):9-12.
FANG Hua-jun, YANG Xue-ming, ZHANG Xiao-ping. Organic soil stock of black soil in Northeast of China and its contribution to atmospheric CO₂[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2003, 7(3):9-12.

致谢:感谢张稳副研究员、于永强博士和覃章才对本研究的帮助。