

不同利用方式下中国农田土壤有机碳密度特征及区域差异

许 泉, 芮雯奕, 何 航, 吴 峰, 罗 鸿, 卞新民, 张卫建

(南京农业大学农学院, 南京 210095)

摘要: 【目的】研究农田土壤有机碳密度特征及区域差异, 为区域性土壤生产力培育提供技术参考; 为区域性农田土壤碳收集技术选择和配套政策制定提供决策依据。【方法】采用我国第二次土壤普查数据, 研究不同用地方式下农田耕层土壤有机碳密度状况。【结果】农田耕层土壤有机碳密度介于 $0.81 \sim 12.68 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 平均为 $3.15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, 其中西南区最高, 平均达 $3.63 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$; 华北区最低, 平均为 $3.00 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。农田土壤有机碳密度的变异系数为 57%, 显著比非农业土壤的变异系数低 35 个百分点。不同用地方式下, 水田耕层有机碳密度比旱地的平均高 13 个百分点, 但水田有机碳密度的区域变异显著低于旱地。另外, 农田土壤有机碳密度与降水和气温的相关性显著低于非农业土壤, 农田中水田土壤有机碳密度与降水和气温的相关性又显著小于旱地。【结论】农田尤其是水田土壤有机碳密度可能更多的是受人为因素影响, 人为调控潜力大。

关键词: 土地利用方式; 有机碳密度; 土壤碳收集; 区域差异; 全球变化

Characteristics and Regional Differences of Soil Organic Carbon Density in Farmland Under Different Land Use Patterns in China

XU Quan, RUI Wen-yi, HE Hang, WU Feng, LUO Hong, BIAN Xin-min, ZHANG Wei-jian

(College of Agronomy, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095)

Abstract: 【Objective】Study on regional characteristics of soil organic carbon (SOC) density in farmland will not only greatly contribute to technique researches for soil productivity improvement, but also give evidences of technique selection and policy making for carbon sequestration in soils. 【Method】Based on the second national soil survey of China, the situation of SOC density in the plow layer of farmland was analyzed under different land use patterns. 【Result】SOC density in the plow layer was about $3.15 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ in average which ranged from $0.81 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ to $12.68 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. The highest density was found in the southeast region with an average of $3.63 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$, while the lowest occurred in the northwest region with an average of $3.00 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$. The variation coefficient of SOC density in the plow layer of farmland was 57%, which was 35 percentages lower than that of non-farmland soils. Compared to SOC density in the dry land, SOC density in paddy soils was 13 percentages higher with a lower variation coefficient between different regions. In addition, the relationships between the climatic factors (annual average temperature and annual precipitation) and SOC density were lower in farmland than those in non-farmland soils, as well as in paddy soils than those in dry land of farmland. 【Conclusion】These results suggest that anthropogenic disturbances have great impacts on SOC density in farmland soils, especially in paddy soils, indicating a high control potential of SOC density.

Key words: Land use pattern; Organic carbon density; Carbon sequestration; Regional difference; Global change

0 引言

【本研究的重要意义】农田土壤有机碳密度水平不仅影响到土壤生产潜力的高低, 而且其动态变化和

区域差异也直接关系到土壤有机碳与大气 CO_2 交换的生态环境效应, 不同土地利用模式下农田土壤有机碳既可能是大气碳库也可能是碳源^[1]。随着全球环境问题的日益突出, 温室气体排放所导致的气候变化越来越

收稿日期: 2006-06-13; 接受日期: 2006-09-29

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30571094), 国家科技攻关项目 (2004BA520A14), 教育部 NCET-050492 项目和南京农业大学 SRT 项目资助

作者简介: 许泉 (1966-), 男, 江苏南通人, 博士研究生, 研究方向为农田生态与区域农业研究。通讯作者张卫建 (1966-), 江西分宜人, 教授, 研究方向为农业生态与耕作制度。Tel: 025-84399003; E-mail: zwj@njau.edu.cn

越受到国际社会重视^[2]。一般情况下, 农业利用会使土壤有机碳密度降低, 农业生态系统对大气温室气体的贡献率已经达到 20%左右^[3]。但若采用保护性农作技术, 却可以提高农田土壤有机碳密度, 从而通过作物光合作用来截获更多的大气 CO₂^[4,5], 即实现土壤碳收集或固碳。现有研究证明, 传统耕作转向保护性耕作, 十年内可提高土壤有机碳 56 个百分点^[6], 因此, 寻求通过农田土壤来固定更多的大气 CO₂ 已经得到各国科学家的认可^[7]。【前人研究进展】然而由于农业生产和农田土壤的区域特性, 农业土壤碳收集也存在显著的区域差异。比如, 在相同免耕条件下, 巴西热带土壤有机碳收集速率和温带地区相近但却明显小于南部的亚热带土壤^[8], 甚至在同一区域相同的作物种类和土壤类型条件下这种差异也普遍存在^[9]。【本研究的切入点】近年来国内外许多研究已经对中国自然土壤有机碳密度的区域差异进行了研究^[10,11], 但基于农业土壤特别是不同利用方式下的农田土壤有机碳密度的区域差异研究的报道则不多^[12]。中国农业土壤分布广泛, 利用方式和种植制度复杂多样, 土壤的区域异质性高。因此, 掌握农田土壤有机碳的区域特征, 在中国尤其重要。【拟解决的关键问题】探讨不同利用方式下中国农田耕层土壤有机碳密度的区域特征, 拟为中国农田土壤碳收集的区域潜力估算、碳收集技术选择和配套政策制定提供参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

至今中国最详尽土壤状况数据是第二次普查资料, 因此, 本研究利用这套资料作为土壤剖面数据库所需要的基础数据。包括《中国土种志》(1~6 册)^[13]的典型土种剖面资料, 主要指标有土壤类型、地理位置、生产性能、土层划分、土层厚度、有机质含量、年平均温度等自然环境特征数据。一般情况下, 农业管理活动主要影响耕层土壤有机碳^[14], 研究耕层土壤有机碳密度特征更能反映其对管理活动的响应。因此, 本研究主要依据土壤剖面所记录的水田和旱地耕层土壤信息, 从中提取 942 个旱地土壤及 525 个水田土壤数据。

1.2 有机碳密度计算

一般认为土壤有机碳密度是由土壤有机碳含量、砾石(粒径>2 mm)含量和容重共同决定的, 土壤剖面内土层的每平方米面积内土壤有机碳密度计算公式如下^[15,16]:

$$C=C_f B_d(1-\delta_{2mm})V_m \quad (1)$$

其中, C 是碳密度, δ_{2mm} 是粒径>2 mm 的砾石体积含量, B_d 是容重 ($t \cdot m^{-3}$), C_f 是有机碳含量, V_m 是土层厚度。

由于土壤有机碳含量大致是有机质含量的 55%~65%, 因而国际上采用 58% 作为碳含量转换系数^[17], 本文在有机质数据转化为有机碳含量时也采用这个转化系数。另外, 第二次土壤普查资料中缺乏>2 mm 的砾石体积分量的数据, 但考虑到中国农业土壤经过长期人为的耕作熟化, 耕层中粒径>2 mm 的砾石体积分量可能不是很大, 因此本文忽略不计。结合公式(1), 本研究中不同土种耕层土壤有机碳密度的计算公式如下:

$$C_{di}=0.58H_i B_i O_i \times 0.1 \quad (2)$$

其中, C_{di} 是第 i 土种土壤有机碳密度 ($kg \cdot m^{-2}$), H_i 是第 i 土种土壤厚度 (cm), B_i 是第 i 土种土壤容重 ($g \cdot cm^{-3}$), O_i 是第 i 土种土壤有机质含量 (%)。

在第二次土壤普查数据中, 由于大部分容重数据缺乏, 因此, 本文采用 Wu H B^[18]提供的计算方法来计算相应的土壤容重, 容重的表达式如下:

$$B_i = -0.1229 \ln O_i + 1.2091 \quad O_i < 6\%$$

$$B_i = 1.3774 e^{0.0413 O_i} \quad O_i \geq 6\%$$

按照土壤亚类聚合土种剖面数据时一般以土种面积作为权重估算土壤亚类平均有机碳密度, 当没有确切的土种面积时也可用土种厚度作为权重估算^[19]。因此综合公式(2)可得本研究下土壤亚类 k 平均有机碳密度 C_{dk} ($kg \cdot m^{-2}$) 的估算公式:

$$C_{dk} = \frac{\sum_{i=1}^n H_i C_{di}}{\sum_{i=1}^n H_i} \quad (3)$$

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳密度特征

中国农业土壤主要分布于 45 个土类和相应的 133 个土壤亚类, 由于篇幅关系, 亚类土壤耕层的有机碳密度未列出(表 1)。对土壤亚类聚合下的土壤有机碳密度频度分析显示, 中国农田耕层土壤有机碳密度介于 0.81~12.68 $kg \cdot m^{-2}$, 平均为 3.15 $kg \cdot m^{-2}$, 变异系数为 57%, 其中约 80% 的土壤亚类耕层有机碳密度低于 4.31 $kg \cdot m^{-2}$, 呈正偏态分布。而对非农业土壤亚类聚合下的耕层土壤有机碳密度的计算发现, 非农业利用情况下耕层土壤有机碳密度平均为 4.62 $kg \cdot m^{-2}$, 变

化范围为 0.05~24.86 kg·m⁻²，变异系数达到 92%。有机碳密度较低的农田土壤多为盐化或者碱化的土壤亚类以及水土流失严重的土类如黄绵土等。一些初育土壤如火山灰土、粗骨土、风沙土等作为农田使用后也表现为较低的有机碳密度。而有机碳密度较高的土壤类型则主要集中于东北地区高有机质含量的黑土、白

浆土，地上及地下生物归还量都较多的草甸土以及分布于高寒地区的或常年处于淹水状态下的泥炭土和沼泽土等。南方地区的黄壤也表现出较高的有机碳密度，这可能与该土类的高生物富集过程以及较低的有机质矿化水平相关。

2.2 土壤有机碳密度的区域差异

表 1 中国农田耕层土壤有机碳密度

Table 1 Soil organic carbon (SOC) density in the plow layer of farmland in China

土类 Soil type	有机碳密度 SOC density (kg·m ⁻²)	土类 Soil type	有机碳密度 SOC density (kg·m ⁻²)
暗棕壤 Dark brown soil	4.01	灰褐土 Grey-cinnamon soil	4.85
白浆土 Baijing soil	5.20	灰漠土 Grey desert soil	1.86
草甸土 Meadow soil	3.74	灰棕漠土 Grey-brown desert soil	3.34
草毡土 Felty soil	4.29	火山灰土 Volcanic soil	1.30
潮土 Fluvo-aquic soil	1.75	冷钙土 Cold calcic soil	3.42
赤红壤 Latosolic red soil	4.79	冷棕钙土 Cold brown calcic soil	2.96
粗骨土 Skeletal soil	1.58	栗钙土 Castanozem	3.43
风沙土 Aeolian sandy soil	1.42	栗褐土 Castano-cinnamon soil	1.98
灌漠土 Irrigation-desert soil	3.73	林灌草甸土 Shrubby meadow soil	1.78
灌淤土 Irrigation-silting soil	2.20	泥炭土 Peat soil	6.73
寒漠土 Frigid desert soil	3.71	砂姜黑土 Shajiang black soil	1.70
褐土 Cinnamon soil	2.09	山地草甸土 Mountain meadow soil	7.13
黑钙土 Chernozem	5.24	石灰土 Limestone soil	4.01
黑垆土 Heilu soil	1.92	水稻土 Paddy soil	3.21
黑土 Black soil	5.14	新积土 Alluvial soil	2.41
黑毡土 Dark felty soil	5.55	燥红土 Dry red soil	2.07
红壤 Red soil	3.19	沼泽土 Bog soil	5.64
红粘土 Red clay soil	1.52	砖红壤 Latosol	3.19
黄褐土 Yellow-cinnamon soil	1.85	紫色土 Purple soil	2.38
黄绵土 Loessal soil	1.25	棕钙土 Brown calcic soil	2.56
黄壤 Yellow soil	7.21	棕漠土 Brown desert soil	2.44
黄棕壤 Yellow-brown soil	4.54	棕壤 Brown soil	2.53
灰钙土 Sierozem	1.76		

按照《中国土种志》6 册的记录将中国分为东北、华北、华南、西北、西南、华东六大区域。耕层有机碳密度分析表明，各区域间土壤耕层有机碳密度存在显著差异（图 1）。其中西南地区的土壤耕层有机碳密度最高，达到 3.63 kg·m⁻²。东北与华南次之，平均为 3.00 kg·m⁻²。西北、华东、华北最低，其中最低的为华北地区，仅为 2.15 kg·m⁻²。

图 2 显示了不同土地利用方式下耕层土壤有机碳密度的差异。结果显示，全国水田耕层土壤有机碳密度为 3.21 kg·m⁻²，比旱地的 2.84 kg·m⁻²高 13.0%。除华北外其余各区域内水田耕层土壤有机碳密度均较早地高，其中华东地区的相差近 0.8 倍。华南和西北地区相差则相对较小些，仅约 0.2 倍，而西南、东北和

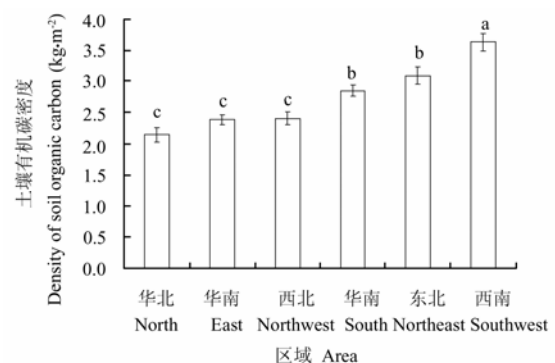


图 1 不同区域农田耕层土壤有机碳密度（平均值±SE）

Fig. 1 Soil organic carbon density in the plow layer of farmland under different areas (means±SE)

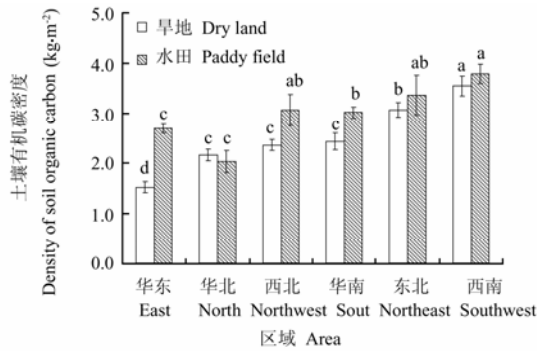


图2 不同土地利用方式下农田耕层土壤有机碳密度(平均值±SE)

Fig. 2 Soil organic carbon density in the plow layer of farmland under different land use (means±SE)

华北则不超过 10%。旱地利用方式下, 华东地区耕层有机碳密度平均仅为 $1.52 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 西南地区则达到 $3.54 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 为前者的 2.3 倍。水田利用方式下, 西南地区达 $3.78 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}$, 是有机碳密度最低的华北地区的 1.9 倍。有机碳密度的区域变异分析表明, 除西南地区外其余各区域旱地土壤有机碳密度的变异系数均高于水田。

2.3 有机碳密度与水热因子的相关关系

影响土壤有机碳密度的因素很多, 自然因素中

降水量 (mm) 和年平均温度 ($^{\circ}\text{C}$) 是两个重要的因素。一般认为温度越低, 年降水量越高, 土壤有机碳越趋向于积累。表 2 是土壤有机碳密度与年平均温度和年降水量的偏相关系数, 农田土壤有机碳密度与年平均温度和年降水量的偏相关系数分别为 -0.29 和 0.27 ($P < 0.01$), 非农业土壤表层有机碳密度与两因素的偏相关系数分别为 -0.47 和 0.39 ($P < 0.01$), 显著高于农业土壤。不同土地利用方式下, 旱地耕层土壤有机碳与两者的相关系数分别为 -0.36 和 0.26 ($P < 0.01$), 而水田耕层土壤有机碳与两者的偏相关系数分别为 -0.18 ($P < 0.01$) 和 0.11 ($P < 0.05$)。这表明, 农业土壤特别是水田土壤, 有机碳密度受到更多其它因素如农业管理活动的影响。另外, 不同区域不同土地利用方式下, 耕层土壤有机碳密度与水热因子的偏相关系数存在较大的区域差异 (表 2), 区域有机碳密度越高, 如东北和西南地区, 其与水热因子的相关关系相对而言就越显著。不同区域中水田与年降水量的相关系数较早地也有下降的趋势 (表 3)。

3 讨论

由于目前中国没有最新的普查资料, 所以本文利用中国第二次土壤普查资料来计算土壤耕层有机碳密度, 尽管这不能全面反映当前中国农田耕层土壤有机碳的实际水平, 但由于农业耕作制度演变的同步性且

表 2 不同区域农田和非农田表层土壤 (20 cm) 有机碳密度与水热因子的偏相关系数

Table 2 Partial correlation coefficients between precipitation, temperature and soil organic carbon density in topsoil (20 cm) of farmland and non-farmland in different areas

因子 Factor	土地利用方式 Land use pattern	东北 Northeast	华北 North	西北 Northwest	西南 Southwest	华南 South	华东 East
年均温 Annual average temperature	农田 Farmland	-0.62**	-0.48**	-0.30**	-0.30**	-0.21**	-0.07
	非农田 Non-farmland	-0.33**	-0.61**	-0.44**	-0.58**	-0.36**	-0.34**
年降水 Annual precipitation	农田 Farmland	0.27**	0.01	0.07	0.26**	0.09	0.33**
	非农田 Non-farmland	0.01	0.39**	0.45**	0.34**	0.32**	0.50**

**表示在 0.01 水平下显著 ** significant at 0.01 level

表 3 不同区域旱地和水田耕层土壤有机碳密度与水热因子的偏相关系数

Table 3 Partial correlation coefficients between precipitation, temperature and soil organic carbon density in paddy field and dry land in different areas

因子 Factor	土地用途 Land use pattern	东北 Northeast	华北 North	西北 Northwest	西南 Southwest	华南 South	华东 East
年均温 Annual average temperature	旱地 Dry land	-0.62**	-0.49**	-0.38**	-0.30**	-0.25	-0.14
	水田 Paddy field	-0.54*	0.24	-0.60**	-0.36**	-0.25**	-0.12
年降水 Annual precipitation	旱地 Dry land	0.27**	-0.01	0.02	0.26**	0.28*	0.42**
	水田 Paddy field	0.25	-0.10	0.17	0.25*	0.03	0.21**

**表示在 0.01 水平下显著, *表示在 0.05 水平下显著 ** significant at 0.01 level; * significant at 0.05 level

土壤有机碳密度表现出稳定的显著变化趋势一般需要较长时间，因此本文的结果在一定程度上还是能够反映农田生态系统特别是不同利用方式下耕层土壤有机碳密度特征及其区域差异的。另外，土壤有机碳密度的计算方法一般用公式(1)，但由于第二次土壤普查数据中缺乏相关参数，使得本文对公式进行了简化。首先是对砾石含量的处理，虽然在大部分农业土壤耕层中粒径 $>2\text{ mm}$ 的砾石含量很低，但是在特殊的土壤类型如粗骨土、风沙土等其含量较大，该计算方法可能导致对其耕层有机碳密度估计偏高。其次，土壤容重的获取方法也是影响计算精确度的一个重要方面，由于该文采用 Haibin Wu 提供的容重计算方法，因此对比相似的研究^[11,18]，本文的结果更接近于 Haibin Wu 的结果。对土壤有机碳密度的计算，已有的研究一般都采取计算一定厚度如 1m 深度土层的有机碳密度，以便于比较对照。本文由于是基于对农业耕层土壤有机碳密度的研究，而不同的土壤类型其耕层的厚度差异较大，因此采用土壤发生学分类法提取实际的耕层信息可能更能反映农业土壤的特殊性。

目前国内的一些研究表明中国土壤有机碳密度的区域分布与中国土壤类型的地带性分布相一致，东北地区是全国土壤有机碳密度最高的区域之一^[10,11,18]，而本研究对农业土壤耕层有机碳密度的分析发现东北地区农田土壤有机碳密度略低于西南地区，主要原因可能东北地区选取的 189 个样本中辽宁地区占了将近 52%，而该地区土壤有机碳密度相对黑龙江和吉林而言处于最低水平^[20]，这在进行平均值计算时对整个东北地区土壤有机碳密度的估算有一定的影响。而且经过开垦后，东北地区土壤有机质含量下降迅速，其农田土壤有机碳密度水平较自然土壤而言要低些^[21]。其农田土壤有机碳密度变化特征还有待进一步的深入探讨。在华北地区，由于人类对土壤开发强度大，气候干旱，农业土壤有机碳密度相对最低，这与以往的一些研究结果相一致^[22]。此外，研究结果还发现，西北地区农田土壤有机碳密度高于华北地区，与华东农田水平基本相当。水稻土耕层土壤有机碳密度甚至高于华东地区，Pan Genxin 关于中国水稻土耕层土壤碳密度的研究也有类似的结果^[23]。这在很大程度上可能与第二次土壤普查中西北地区农田土壤典型剖面样点在该区的分布不均有关^[10]，该区占土地面积较大的风沙土和棕漠土、灰棕漠土几乎没有样点分布，这可能导致对整个西北地区农田土壤有机碳密度水平估计过高。

鉴于中国农田土壤有机碳密度存在显著的区域差异，尤其是水田土壤。在今后的土壤碳收集理论与技术研究中，要充分应该考虑土地利用方式的差异，并针对不同的区域进行碳收集技术的选择和配套政策制定。应该着力解决以下问题：一是要明确不同土地利用方式下影响土壤有机碳变化的关键因素，特别是要明确可以人为调控的关键因子及其调控途径。鉴于中国水田温室气体排放问题一直是国际关注的热点，而且其有机碳密度特征突出，而国内外在此方面的研究还较少^[4]。另外，水稻土是重要的碳收集土壤类型之一^[24]。因此，水田土壤应该是中国的研究重点。其次要明确不同区域农田土壤碳收集的技术创新和推广方向。比如秸秆还田、少免耕、多熟种植对于提高土壤有机碳密度的作用已经得到各国实践的证实，但这些技术在中国不同的农区进一步推广的潜力差异很大，所以要根据中国各区域的农业生产特性，选择适合不同区域的农田土壤碳收集技术并加大推广力度。另外，考虑到中国农业生产的特殊性，应该从农户行为上着手，探讨如何从政策和配套措施上来促进农户采用这些保护性种植技术或农业生产管理措施。

4 结论

中国农田耕层土壤有机碳密度除存在显著的区域差异之外，不同土地利用方式下，水田耕层土壤有机碳密度显著高于旱地，但其区域间差异却比旱地小。另外，年平均温度和年降水量与土壤有机碳密度的关系显示，水热因子对农业土壤有机碳密度的影响显著小于自然土壤，且农作历史越久水热因子的作用越小。不同利用方式下，水热因子对水田土壤有机碳密度的作用显著小于旱地的。这些结果说明，中国稻作制形成的水稻土，更有利于土壤有机碳储存，而且稻作制下所形成的独特且相对比较均一的土壤环境，显著降低了水田土壤有机碳密度的区域变异。而且，随着人类对土壤的利用和干扰加强，土壤有机碳密度将更多的是受人因子诸如农业生产管理措施的调控，尤其是水田。这在一定程度上说明，可以通过调整农业生产管理措施来调控农田土壤尤其是水田土壤的有机碳密度。

References

- [1] Olesen J E, Bindi M. Consequences of climate change for European agricultural productivity, land use and policy. *European Journal of Agronomy*, 2002, 16(4): 239-262.

- [2] 丁一汇, 耿全震. 大气、海洋、人类活动与气候变暖. 气象, 1998, 24(3): 12-17.
Ding Y H, Geng Q Z. Atmosphere, ocean, human activity and global warming. *Meteorological Monthly*, 1998, 24(3): 12-17. (in Chinese)
- [3] Rosenzweig C, Hillel D. Soils and global climate change: challenges and opportunities. *Soil Science*, 2000, 165(1): 47-56.
- [4] Martens D A, Emmerich W, Jean E T, McLain J E T, Johnsen T N. Atmospheric carbon mitigation potential of agricultural management in the southwestern USA. *Soil and Tillage Research*, 2005, 83(1): 95-119.
- [5] Schroth G, D'Angelo S A, Teixeira W G, Haag D, Lieberei R. Conversion of secondary forest into agroforestry and monoculture plantations in Amazonia: consequences for biomass litter and soil carbon stocks after 7 years. *Forest Ecology and Management*, 2002, 163(1-3): 131-150.
- [6] Edwards J H, Wood C W, Thurlow D L, Ruf M E. Tillage and crop rotation effects on fertility status of a hapludalt soil. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56: 1577-1582.
- [7] Jawson M D, Shafer S R, Franzluebbers A J, Parkin T B, Follett R F. GRACEnet: Greenhouse gas reduction through agricultural carbon enhancement network. *Soil and Tillage Research*, 2005, 83(1): 167-172.
- [8] Bayer C, Martin-Neto L, Mielniczuk J, Pavinato A, Dieckow J. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. *Soil and Tillage Research*, 2006, 86(2): 237-245.
- [9] Donigian A S, Barnwell T O, Jackson R B, Patwardhan A S, Weinrich K B, Rowell A L, Chinnaaswamy R V, Cole C V. *Alternative Management Practices Affecting Soil Carbon in Agroecosystems of the Central US*. Washington, DC: US Environmental Protection Agency, 1994.
- [10] 王绍强, 周成虎, 李克让, 朱松丽, 黄方红. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析. 地理学报, 2000, 55: 533-544.
Wang S Q, Zhou C H, Li K L, Zhu S L, Huang F H. Analysis on spatial distribution characteristics soil organic carbon reservoir in China. *Acta Geographica Sinica*, 2000, 55: 533-544. (in Chinese)
- [11] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 李忠佩, 李安波. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析. 土壤学报, 2004, 41: 35-43.
Xie X L, Sun B, Zhou H Z, Li Z P, Li A B. Organic carbon density and storage in soils of China and spatial analysis. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41: 35-43. (in Chinese)
- [12] Wu H B, Guo Z T, Peng C H. Land use induced changes of organic carbon storage in soil of China. *Global Change Biology*, 2003, 9(3): 305-315.
- [13] 全国土壤普查办公室. 中国土种志(1~6册). 北京: 中国农业出版社, 1993-1996.
The National Soil Survey Office. *Soil Species of China* (Vol.1-6). Beijing: China Agricultural Press, 1993-1996. (in Chinese)
- [14] Somebroek W G, Nachtergaele F O, Hebel A. Amounts, dynamics and sequestration of carbon in tropic and subtropical soil. *Ambio*, 1993, 22: 417-426.
- [15] 金峰, 杨浩, 蔡祖聪, 赵其国. 土壤有机碳密度及储量的统计研究. 土壤学报, 2001, 38: 522-528.
Jin F, Yang H, Cai Z C, Zhao Q G. Calculation of density and reserve of organic carbon in soils. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38: 522-528. (in Chinese)
- [16] Pouyat R, Groffman P, Yesilonis I, Hernandez L. Soil carbon pool and fluxes in urban ecosystems. *Environmental Pollution*, 2002, 116(Suppl.): 107-118.
- [17] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, Stangenberger A G. Soil carbon pools and life zones. *Nature*, 1982, 298: 156-159.
- [18] Wu H B, Guo Z T, Peng C H. Distribution and storage of soil organic carbon in China. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17: 1048-1058.
- [19] Li Z, Zhao Q G. Organic carbon content and distribution in soil under different land uses in tropical and subtropic China. *Plant and Soil*, 2001, 231: 175-185.
- [20] 孙维侠, 史学正, 于东升, 王库, 王洪杰. 我国东北地区土壤有机碳密度和储量的估算研究. 土壤学报, 2004, 41: 298-300.
Sun W X, Shi X Z, Yu D S, Wang K, Wang H J. Estimation of soil organic carbon density and storage of northeast China. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41: 298-300. (in Chinese)
- [21] 邱建军, 王立刚, 唐华俊, 李红, Changsheng Li. 东北三省耕地土壤有机碳储量变化的模拟研究. 中国农业科学, 2004, 37: 1166-1171.
Qiu J J, Wang L G, Tang H J, Li H, Li C S. Study on the situation of soil organic carbon storage in arable lands in northeast China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37: 1166-1171. (in Chinese)
- [22] 潘根兴. 中国土壤有机碳和无机碳库量研究. 科技通报, 1999, 15: 330-332.
Pan G X. Study on carbon reservoir in soil of China. *Bulletin of Science and Technology*, 1999, 15: 330-332. (in Chinese)
- [23] Pan G X, Li L Q, Wu L S, Zhang X H. Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China's paddy soils. *Global Change Biology*, 2003, 10: 79-92.
- [24] 潘根兴, 李恋卿, 张旭辉, 代静玉, 周运超, 张平究. 中国土壤碳库量与农业土壤碳固定动态的若干问题. 地球科学进展, 2003, 18: 609-618.
Pan G X, Li L Q, Zhang X H, Dai J Y, Zhou Y C, Zhang P J. Soil organic carbon storage of China and the sequestration dynamics in agricultural lands. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18: 609-618. (in Chinese)

(责任编辑 李云霞)