

王国成, 许晶晶, 李婷婷, 等. 2015. 1980~2010 年华北平原农田土壤有机碳的时空变化 [J]. 气候与环境研究, 20 (5): 491-499. Wang Guocheng, Xu Jingjing, Li Tingting, et al. 2015. Spatiotemporal changes in agricultural soil organic carbon across the North China Plain during 1980-2010 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (5): 491-499, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.14079.

1980~2010 年华北平原农田土壤有机碳的时空变化

王国成 许晶晶 李婷婷 张稳

中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029

摘要 利用农业生态系统过程模型 (Agricultural Production Systems sIMulator, APSIM), 研究了 1980~2010 年间中国华北平原农田土壤有机碳 (Soil Organic Carbon, SOC) 的时空变化。模型验证结果表明, 校正后的 APSIM 模型总体能够较好地模拟徐州、郑州和昌平 3 个长期定位试验站点中各处理下小麦和玉米的产量变化以及 SOC 的变化。区域模拟结果显示, 1980~2010 年间华北平原大部分农田 SOC 呈增加趋势, 仅河北省的北部、山东省中部和东部部分地区农田 SOC 减少。华北平原总的农田面积约为 24.52 Mha (1 ha=0.01 km²), 其 SOC 密度的平均变化速率为 0.35 Mg(C) ha⁻¹ a⁻¹, 总的 SOC 贮量增加了约 257.43 Tg。在京津冀地区、山东省以及河南省的农田中, SOC 分别平均增加了 102.05、59.82、95.56 Tg。SOC 的增加, 主要归功于过去几十年里外源碳投入量的增加。

关键词 土壤有机碳 APSIM 模型 华北平原 时空变化 碳投入量

文章编号 1006-9585 (2015) 05-0491-09

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.14079

Spatiotemporal Changes in Agricultural Soil Organic Carbon across the North China Plain during 1980-2010

WANG Guocheng, XU Jingjing, LI Tingting, and ZHANG Wen

State Key Laboratory of Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract A process-based model (Agricultural Production systems SIMulator, APSIM), which was developed in Australia, was used to study the spatiotemporal changes in agricultural soil organic carbon (SOC) across the North China Plain (NCP) from 1980 to 2010. The modeling results suggested that the calibrated APSIM model generally performed well in terms of simulating changes in yields of wheat and maize and SOC under different treatments at three selected long-term experimental sites: Xuzhou, Zhengzhou, and Changping. The regional simulations showed that most croplands of NCP experienced an increase in SOC, except several areas of the northern part of Hebei Province, and central and eastern parts of Shandong Province. The average rate of change of SOC was 0.35 Mg(C) ha⁻¹ a⁻¹, and the total increase in the SOC pool was 257.43 Tg (with a total cropland area of ~24.52 Mha in NCP). Spatially, the cropland SOC pool increased by 102.05, 59.82, and 95.56 Tg in the Beijing-Tianjin-Hebei area, Shandong Province, and Henan Province, respectively. The increase in cropland SOC was mainly attributed to the increasing amount of carbon input during the past several decades.

Keywords Soil organic carbon, APSIM model, North China Plain, Spatiotemporal change, Carbon input

收稿日期 2014-04-08; 网络预出版日期 2014-09-25

资助项目 国家自然科学基金重点项目41130104, 中国科学院战略性先导科技专项XDA05050507

作者简介 王国成, 男, 1986 年出生, 博士, 主要从事陆地生态系统碳循环的模拟研究。E-mail: wanggc@mail.iap.ac.cn

通讯作者 张稳, E-mail: zhw@mail.iap.ac.cn

1 引言

土壤是陆地生态系统中最大的碳库，全球土壤中有有机碳的总贮量约为大气中总碳量的 2~3 倍。因此，土壤碳库的一个微小波动都能引起大气中二氧化碳 (CO₂) 浓度的剧烈变化 (Lal, 2004)。在不同类型的陆地生态系统中，农业生态系统受人类活动的影响最为显著，同时也可在较短时间尺度内调节其碳收支状况 (Food and Agriculture Organization, 2001)。农田土壤有机碳增加既可将大气 CO₂ 固定到土壤中，又可抵消农业生态系统中甲烷 (CH₄) 和氧化亚氮 (N₂O) 等其它温室气体的排放，这对于缓解当前气候变暖具有重要意义。

农田土壤有机碳动态同时受到气候变化和人为管理措施的驱动。气候环境调控土壤过程和植物生长，并最终影响土壤有机碳的数量和质量。一般来讲，温度上升会加速土壤中有机碳的分解 (Post et al., 1982)。有学者指出 (Davidson and Janssens, 2006)，土壤有机碳内部的复杂结构和土壤其它环境因子能够掩盖温度上升对土壤有机碳 (soil organic carbon, SOC) 动态的影响。降水量或降水格局的变化能显著改变土壤的呼吸作用，但这一影响因时、因地而异。比如：在较为湿润地区的湿润季节里，降水增加可能会明显地抑制土壤呼吸 (Cavelier and Penuela, 1990)；而在干旱或半干旱地区的干旱季节里，降水增加往往会促进土壤的呼吸作用 (Zhang et al., 2010a)。人类活动对 SOC 的影响也非常显著，比如据 Davidson and Ackerman (1993) 报道，自然植被开垦为农田后土壤表层 30 cm 有机碳的损失平均可达到 40%；也有研究发现 (West and Post, 2002; Wang et al., 2013b)，通过改善农业管理措施，比如采取秸秆还田、少免耕和增施化肥及有机肥等，一般能够减缓甚至逆转 SOC 的丢失。

华北平原是我国重要的粮食生产基地，以冬小麦—夏玉米一年两熟的种植制度为主。华北平原地处季风带，属半干旱半湿润气候区，降水和温度等

气候要素具有明显的季节和年际波动 (Ren et al., 2008)。另外，自 20 世纪 80 年代以来，华北平原农田中包括化肥和动物有机肥的施用总量、农田作物的秸秆还田比例以及保护性耕作措施等在内的农业管理措施都发生了一定的变化 (高利伟等, 2009; 易中懿, 2010; Zhang et al., 2011)。

正是由于农田土壤有机碳变化同时受到气候环境和农业管理措施的影响，两者对土壤有机碳复杂的交互影响使得在较大时间和空间尺度上准确捕捉土壤有机碳动态显得十分困难。相对来讲，数学模型的方法在较大时空尺度上模拟农田土壤有机碳动态方面更具优势。国际上目前使用较多的碳模型主要包括 DNDC (Li et al., 1994)、RothC (Jenkinson et al., 1990)、CENTURY (Parton et al., 1993) 以及 APSIM (Keating et al., 2003) 等，这些模型都已经被用于模拟国家和区域尺度农田土壤有机碳的变化 (Li et al., 2003; Falloon et al., 2006; Ogle et al., 2010; Wang et al., 2013a)。

本文首先利用中国华北 3 个农田试验站点的观测数据，检验 APSIM 模型在各种环境和管理措施下模拟农田 SOC 长期变化的效果。然后结合区域尺度的土壤、气候以及人为管理措施 (例如化肥、有机肥、秸秆等) 等信息，使用校验后的 APSIM 模型模拟了 1980~2010 年间华北平原农田土壤有机碳的时空变化。

2 材料与方法

2.1 试验地概况及数据收集

用于 APSIM 模型校正和验证的观测数据来自中国华北 3 个长期定位试验站点——徐州、郑州和昌平，各个试验站点的地理位置及气候背景如表 1 所示。实验数据来源于文献和相关书籍 (Jiang et al., 2006; Zhang et al., 2010b; Zhao et al., 2010)。

2.1.1 徐州

田间试验始于 1980 年秋季，初始耕层土壤主要性状为：有机质含量为 10.8 g kg⁻¹，全氮含量为 0.66 g kg⁻¹，全磷含量为 0.74 g kg⁻¹，速效磷含量为

表 1 徐州、郑州和昌平 3 地的地理位置及气候背景 (1980~2010 年)

Table 1 Locations and climate conditions (1980–2010) of the three long-term experimental sites

站点	纬度	经度	气候类型	海拔/m	年均温度/°C	年均降雨量/mm	研究时段
徐州	33°39'N	116°22'E	暖温带、湿润	20	15	848	1980~2003 年
郑州	34°47'N	113°39'E	暖温带、半湿润	29	15	632	1990~2003 年
昌平	40°13'N	116°12'E	冷温带、半湿润	20	11	600	1990~2005 年

12.0 mg kg⁻¹, 速效钾含量为 63.0 mg kg⁻¹, 缓效钾含量为 738.5 mg kg⁻¹, pH 为 8.0。种植制度为冬小麦—夏玉米轮作, 一年两熟。

试验地共设 8 个不同梯度的化肥和有机肥处理, 本文选取其中的 2 个处理, 分别为不施肥(CK)、施氮磷钾肥和有机肥(NPKM)。NPKM 处理中的氮、磷、钾肥每年施用量为纯氮(N) 300 kg ha⁻¹ (1 ha=0.01 km²), 有机肥为猪粪。作物成熟后平茬收割, 采集土壤样品, 采用重铬酸钾容量法测定土壤有机质含量。关于田间试验其它更详细的信息请见 Jiang et al. (2006) 和 Zhang et al. (2010b)。

2.1.2 郑州

田间试验始于 1990 年秋季, 初始耕层土壤主要性状为: 有机质含量为 10.2 g kg⁻¹, 全氮含量为 0.65 g kg⁻¹, 有效磷含量为 7.7 mg kg⁻¹、有效钾含量为 65 mg kg⁻¹, pH 为 8.3。种植制度为冬小麦—夏玉米轮作, 一年两熟。

试验地共设 9 个不同梯度的化肥和有机肥处理, 本文选取其中的 4 个处理, 分别为 CK、施氮磷钾肥(NPK)、施高量氮磷钾肥和有机肥(HNPKM)、施氮磷钾肥和秸秆还田(NPKSt)。各施氮肥的处理中, 小麦每季作物施 N 165 kg ha⁻¹; 玉米 1991 年施 N 165 kg ha⁻¹, 1992 年后改为施 N 187.5 kg ha⁻¹。HMNPK 处理中有机肥主要为马粪、牛粪和猪粪。NPKSt 处理中玉米秸秆全部还田。作物成熟后平茬收割, 采集土壤样品, 采用重铬酸钾容量法测定土壤有机质含量。关于田间试验其它更详细的信息请见 Zhao et al. (2010) 和 Zhang et al. (2010b)。

2.1.3 昌平

田间试验始于 1991 年秋季, 基础土壤性状为: 有机质含量为 11.7 g kg⁻¹, 全氮含量为 0.64 g kg⁻¹, 全磷含量为 1.6 g kg⁻¹, 全钾含量为 17.3 g kg⁻¹, pH 为 8.7。种植制度为冬小麦—夏玉米轮作, 一年两熟。

试验地共设 10 个不同梯度的化肥和有机肥处理, 本文选取其中的 2 个处理, 分别为 NPKM 和 HNPKM。两个处理中每茬作物施用纯 N 150 kg ha⁻¹, HNPKM 处理中施有机肥(猪粪)比 NPKM 处理高 1.5 倍。作物成熟后平茬收割, 采集土壤样品, 采用重铬酸钾容量法测定土壤有机质含量。关于田间试验其它更详细的信息请见 Zhang et al. (2010b) 和 Zhao et al. (2010)。

2.2 APSIM 模型及其参数化

APSIM 模型发展于澳大利亚, 主要用于模拟农

田生态系统生产过程以及农业系统管理 (Keating et al., 2003)。模型的土壤氮模块 (SoilN) 将土壤碳划分为 3 个概念库: 新鲜有机质库 (FOM)、微生物碳库 (BIOM) 以及腐殖质库 (HUM)。FOM 包括所有进入土壤中的新鲜有机物质 (比如作物的残茬、死根及有机肥等), FOM 进一步分为 3 个亚库, 即类碳水化合物库 (CH)、类纤维素库 (CL) 以及类木质素库 (LIG)。BIOM 代表土壤中所有的微生物及其分泌物。HUM 则包括了土壤中其余的碳库, HUM 中一部分碳库为极难分解的惰性碳库 (Inert_C)。上述各个土壤碳库及其亚库的分解遵循一级动力学反应, 相应的一级动力学速率常数受土壤环境影响函数的修正, 这些环境影响因子包括土壤温度、湿度、碳氮比以及 pH 等 (Thorburn et al., 2001)。

APSIM 模型的模拟步长以日为单位, 用于驱动模型的逐日气象数据包括最高温、最低温、降水和辐射, 这些气象数据通过 Met 模块输入模型。本文用于上述 3 个长期定位试验站点模拟的气象数据来自其最邻近的气象站点, 气象观测数据来自中国气象局网站。其中, 辐射数据根据观测的日照时数及其地理位置等信息计算 (Jones, 1992)。

上述 3 个长期定位试验站点观测的土壤有机碳数据用于模型土壤碳库的初始化。根据 Luo et al. (2011), 初始土壤碳库的分配原则为: 1) 总土壤有机碳随土壤深度增加而指数递减, 大部分土壤碳分布于表层 0~20 cm; 2) 在深层土壤中 (>20 cm), 不易分解的碳的比例较表层土壤高; 3) FOM 库主要分布在表层 (0~20 cm) 中。若文献中只报道了 0~20 cm 土层的土壤有机碳密度, 则以 1.32 与之相乘得到 0~30 cm 土层的土壤有机碳密度 (Qin and Huang, 2010)。

2.3 APSIM 模型的校正和验证

本研究采用均方根误差 (RMSE, 记为 R_{MSE})、相对平均偏差 (RMD, 记为 R_{MD}) 和模型校率 (EF, 记为 E_F) 等统计学指标来考量模型的准确性与精确性:

$$R_{MSE} = \frac{100}{O} \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(P_i - O_i)^2}{n}}, \quad (1)$$

$$R_{MD} = \frac{100}{O} \sum_{i=1}^n \frac{(P_i - O_i)}{n}, \quad (2)$$

$$E_F = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (\bar{O} - O_i)^2}, \quad (3)$$

其中, n 为样本量, P_i 为模拟值, \bar{P} 为模拟值的平

均值, O_i 为观测值, \bar{O} 为观测值平均值。

在上述 3 个长期定位试验站点中, 小麦和玉米的产量的观测值分别有 112 个独立样本, 随机挑选其中 56 个用于模型作物参数的校正, 另外 56 个用于模型的验证; 而土壤有机碳数据由于相对较少 (56 个), 并且同一站点、同一处理不同年份间的土壤有机碳相互不独立, 所以本文只对 APSIM 土壤碳库分配比例进行了校正。表 2、表 3 和表 4 分别为模型校正后小麦、玉米的作物参数以及各层土壤碳库分配比例, 各土壤碳库分解速率采用模型的默认值。

表 2 APSIM 模型校正后小麦的作物参数

Table 2 Parameters of wheat in the calibrated APSIM model

参数	描述	数值
vern_sens	春化指数	2.8
photo_sens	光周期系数	2.5
phyllchron	一片叶长出到展开所需热时数	85 °C d
grains_per_grain_stem	单位质量茎秆干物质的籽粒数	26
potential_grain_filling_rate	每颗籽粒的潜在灌浆速度	0.0033 mg d ⁻¹

表 3 APSIM 模型校正后玉米的作物参数

Table 3 Parameters of maize in the calibrated APSIM model

参数	描述	数值
tt_emerg_to_endjuv	出苗到大喇叭口末期孕穗前所需热时数	240 °C d
est_days_endjuv_to_init	孕穗期到开花期所需天数	20 d
tt_flower_to_maturity	开花到成熟所需热时数	700 °C d
tt_flag_to_flower	旗叶到开花所需热时数	10 °C d
tt_flower_to_start_grain	开花到开始灌浆所需热时数	140 °C d
head_grain_no_max	每株最大籽粒数	660
grain_gth_rate	每颗籽粒的生长速率	11 mg d ⁻¹
photoeriod_crit1	光周期临界值 1	12.5
photoeriod_crit2	光周期临界值 2	24
photoeriod_slope	光周期斜率	19

表 4 APSIM 模型校正后各层土壤碳库分配系数

Table 4 Allocation of the total soil organic carbon (SOC) pool to each sub-pool

土层深度/cm	土壤碳库中微生物碳的比例	土壤碳库中惰性碳的比例
0~20	0.06	0.40
20~40	0.05	0.60
40~70	0.04	0.80
70~100	0.02	0.90
100~150	0.01	0.95

2.4 区域数据收集及空间化

模型区域模拟的时间为 1980~2010 年, 范围为华北平原 (主要包括北京、天津、河北、山东和河南) 的农田。所涉及的模型输入参数主要包括气

象数据、土壤数据、农田管理措施 (如化肥施用量、秸秆还田率、有机肥施用量) 以及作物生育期数据等。收集区域尺度上模型的基础输入数据, 采用地理信息系统 (GIS) 的空间分析与处理技术, 将具有不同空间属性的基础源数据转换成能够覆盖目标研究区域且空间分辨率相同的空间数据。

区域尺度的气象数据使用空间插值方法计算 (Thornton et al., 1997)。首先, 收集全国 670 个站点 1981~2010 年的逐日气象数据, 包括最高温、最低温、降水等。而后, 基于 GIS 的空间分析与处理技术, 将上述站点气象数据插值成等面积圆锥投影坐标系下空间分辨率为 10 km×10 km 的栅格数据。根据 Thornton et al. (2000), 逐日的辐射数据由温度和降水计算获得。

土壤属性数据包括初始土壤有机碳含量、容重、全氮含量、pH 值、田间持水量和凋萎系数等来自于中国科学院南京土壤研究所 (Yu et al., 2007), 该数据集的空间分辨率为 10 km×10 km。其中, 初始土壤各个碳库根据总土壤有机碳库的量与各分库的分配比例 (表 4) 进行计算。

农田的空间分布数据来自中国土地利用数据集 (Liu et al., 2003), 该数据集表征了 2000 年左右的土地利用情况。由于缺乏逐年的土地利用数据, 本文假设从 1980~2010 年间华北平原农田的空间分布未发生显著改变。

由于没有详细的区域尺度作物播种日期, 本文中小麦播种日期根据当地耕作习惯设定, 从北到南大致在 10 月 5 日至 11 月 10 日之间; 而玉米的播种日期从南到北大致在 6 月 6~15 日之间 (Wu et al., 2008)。

由于近几十年来华北平原普遍实施了灌溉 (Wang et al., 2008), 本文假定当土壤表层 (30 cm) 水分含量低于田间持水量的 70% 时, 模型自动对农田进行灌溉, 直到土壤含水量达到田间持水量 (Yu et al., 2012)。

根据高利伟等 (2009) 估算的各省市不同年代小麦和玉米的秸秆还田率如表 5 所示。

各地区历年的氮肥施用量来自于中国农业科学院的统计数据 (Huang and Tang, 2010), 而逐年有机肥施用量来自统计数据 (中华人民共和国农业部, 2009)。由于有机肥的年施用量只有省级的数据, 类似 Yu et al. (2012), 我们认为模型输入数据中最大的不确定性来自于有机肥的投入。因此, 本

文使用 Monte Carlo (Robert and Casella, 2009) 方法在每个栅格中建立有机肥施用量 (平均值±10%) 的概率密度方程 (PDF), 而后 APSIM 在每个栅格中从上述 PDF 中随机挑选 300 个有机肥施用量运行 300 次, 取模拟结果的平均值和上下 95% 置信区间用于结果分析。

表 5 华北平原各省市 1980~2010 年秸秆还田率

Table 5 Stubble retention rates across different areas of the North China Plain (NCP) from 1980 to 2010

地区	1980~1990 年		1991~2000 年		2001~2010 年	
	小麦	玉米	小麦	玉米	小麦	玉米
北京	0.25	0.25	0.48	0.36	0.55	0.43
天津	0.25	0.25	0.48	0.36	0.55	0.43
河北	0.25	0.25	0.64	0.49	0.65	0.53
河南	0.25	0.25	0.41	0.43	0.57	0.57
山东	0.25	0.25	0.39	0.16	0.45	0.18

3 结果与分析

3.1 APSIM 模型的验证

模型模拟结果显示, 校正后的 APSIM 模型可以较好地模拟徐州、郑州和昌平 3 个长期定位试验站点中小麦和玉米的产量 (图 1)。总体而言, 校正后的 APSIM 模型可以分别解释 56% 和 78% 的玉米和小麦的产量变化, 模型模拟各站点、不同处理下

小麦产量的效果总体优于玉米的模拟结果。

对 APSIM 模型中各土壤碳库的比例进行校正后 (表 4), 模型能够较为准确地捕捉到各试验站点中、各处理下表层 (0~30 cm) 土壤有机碳的年际变化 (图 2)。在徐州站点的 CK 处理和郑州站点的 CK 及 NPK 处理中, 模拟和观测的土壤有机碳总体随时间减少, 而其它全部站点中 NPKSt、NPKM 及 HNPKM 处理中的土壤有机碳总体随时间呈增加趋势 (图 2)。

3.2 土壤有机碳的变化

区域模拟结果显示, 1980~2010 年间, 华北平原农田土壤有机碳储量总体呈上升趋势 (图 3)。土壤有机碳密度在 1980 年代、1990 年代以及 2000 年代的平均值分别为 31.15 (31.10~31.20, 95% 置信区间下限—上限, 下同) Mg ha⁻¹, 34.51 (34.39~34.63) Mg ha⁻¹ 和 38.65 (38.46~38.83) Mg ha⁻¹ (表 6), 相较于 1980 年的初始土壤有机碳密度 (29.27 Mg ha⁻¹) 分别上升了 6%、18% 和 32%。平均来讲, 1980~2010 年间, 华北平原农田土壤有机碳库在 1980 年代、1990 年代以及 2000 年代的平均增加速率分别为 6.44、8.78、10.52 Tg a⁻¹ (图 3)。将所有年份中土壤有机碳的变化量相加, 华北平原农田土壤有机碳贮量自 1980~2010 年共增加了 257.43 Tg, 单位面积土壤有机碳密度平均增加速率约为 350 kg ha⁻¹ a⁻¹。

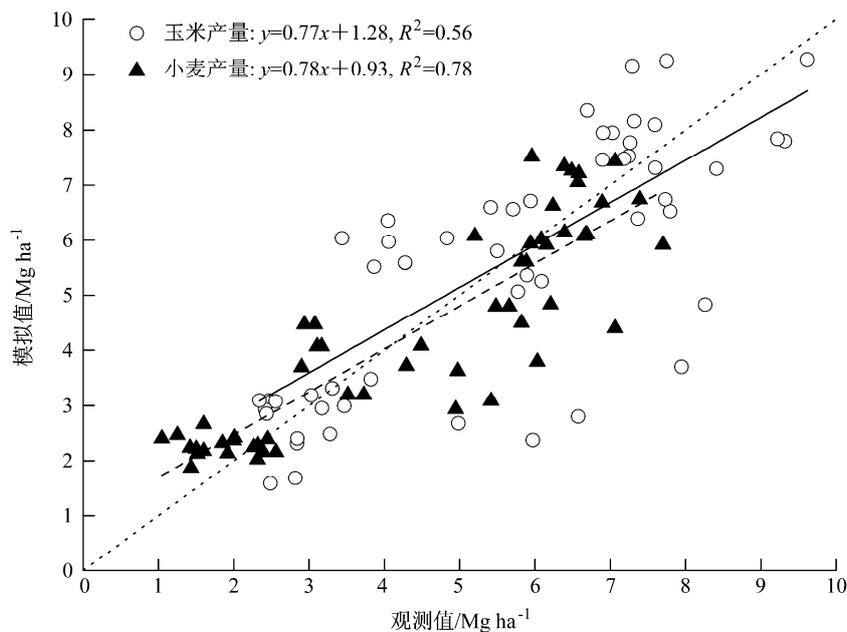


图 1 APSIM 模型模拟长期定位试验站点中小麦和玉米产量的结果 (点状线为 1:1 线, 直线和虚线分别表示玉米和小麦产量的拟合线)

Fig. 1 Validation of APSIM-simulated wheat and maize yield at the long-term experimental sites (dotted line is the 1:1 line; solid and dashed lines are the fitted curves of maize and wheat yield, respectively)

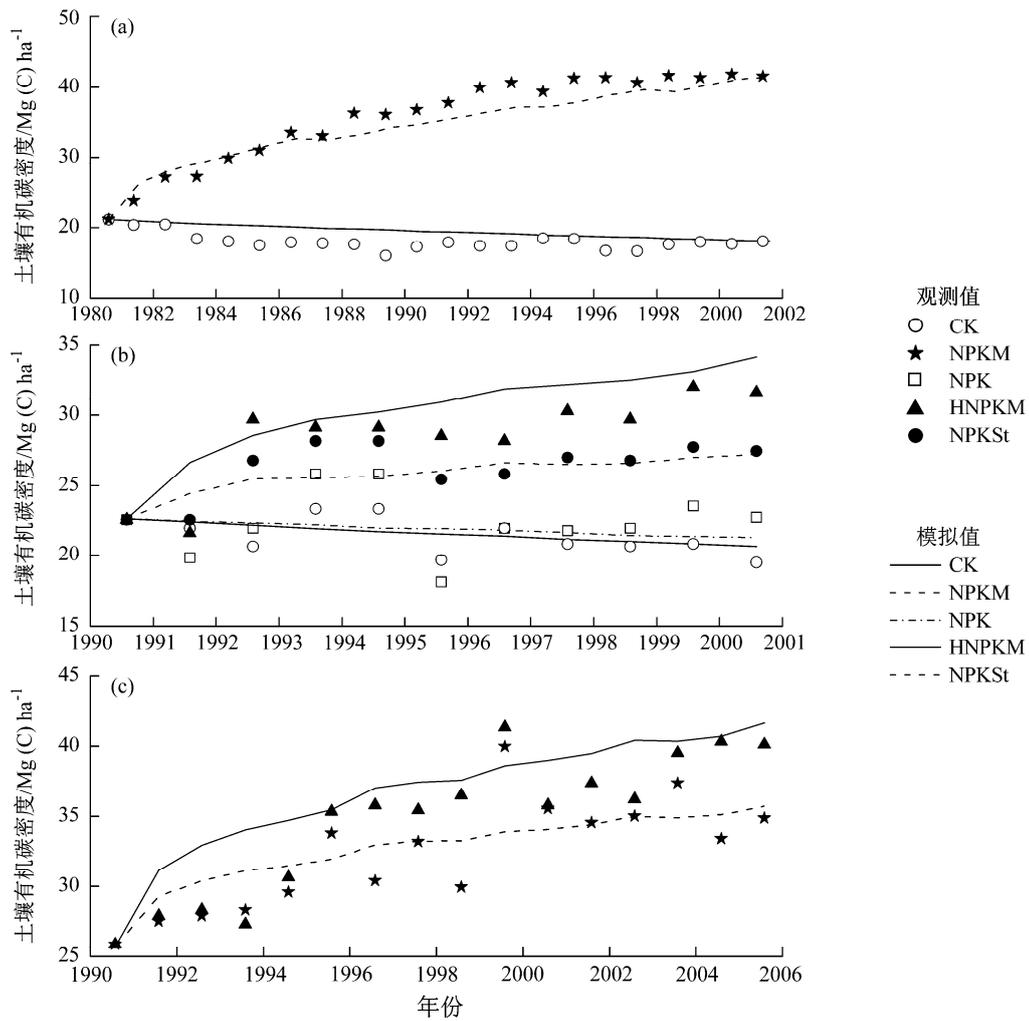


图2 APSIM模型校正后各站点、各处理中模拟和观测的0~30 cm土壤有机碳含量: (a) 徐州; (b) 郑州; (c) 昌平
Fig. 2 Modeled and observed SOC (0~30 cm) under different treatments at each site after calibration of APSIM model: (a) Xuzhou; (b) Zhengzhou; (c) Changping

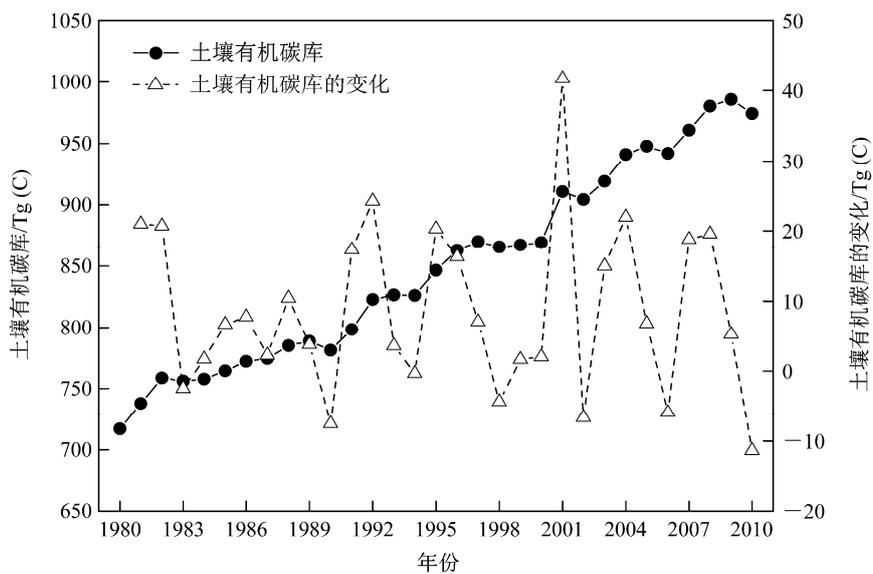


图3 1980~2010年间华北平原农田土壤有机碳平均变化及年际变化
Fig. 3 Average changes and annual changes in cropland SOC across the NCP from 1980-2010

华北平原农田土壤有机碳在 1980~2000 年间显著增加的主要原因是外源碳投入量的增加 (图 4)。尽管来自有机肥和作物根部的碳投入量随时间增加缓慢,但来自作物秸秆部分的碳投入量增加十分明显,尤其在 1980~2000 年间,这主要归因于华北平原农田在过去几十年里相关政策推动造成的秸秆还田率的增加 (表 5)。

3.3 农田土壤有机碳变化的空间特征

总体而言,1980~2010 年间,华北平原各地区土壤有机碳变化存在明显的区域差异 (图 5)。由于外源碳投入量的增加 (图 4),华北平原大部分地区的农田土壤有机碳都呈上升趋势 (图 5);但河北省北部、山东省中部和东部部分地区农田土壤有机碳仍在减少,其主要原因为初始土壤有机碳含量较高。

平均而言,在北京市、天津市以及河北省,农田土壤有机碳密度在 1980 年代、1990 年代以及

2000 年代分别为 30.90(30.86~30.94)Mg ha⁻¹、35.61 (35.51~35.70) Mg ha⁻¹、40.24 (40.08~40.39) Mg ha⁻¹ (表 6), 相较其 1980 年农田初始土壤有机碳密度(28.93 Mg ha⁻¹)分别上升了 7%、23%和 39%。在山东省,农田土壤有机碳密度在 1980 年代、1990 年代以及 2000 年代分别为 30.27 (30.21~30.32) Mg ha⁻¹、32.32 (32.18~32.46) Mg ha⁻¹ 和 34.67 (34.46~34.88) Mg ha⁻¹, 相较其 1980 年农田初始土壤有机碳密度 (28.27 Mg ha⁻¹) 分别上升了 7%、14%和 23%。而在河南省,农田土壤有机碳密度在 1980 年代、1990 年代以及 2000 年代分别为 32.26 (32.30~32.41) Mg ha⁻¹、35.73 (35.60~35.85) Mg ha⁻¹和 41.42 (41.04~41.43) Mg ha⁻¹, 相较其 1980 年农田初始土壤有机碳密度 (30.67 Mg ha⁻¹) 分别上升了 6%、17%和 35% (表 6)。将各个年份的土壤有机碳变化量相加,结果显示:在京津冀地区、山东省以及河南省,农田土壤有机碳贮量自

表 6 1980~2010 年华北平原各地区农田土壤表层 (0~30 cm) 有机碳的变化

Table 6 Estimated changes in cropland SOC (0-30 cm) across North China Plain from 1980 to 2010

地区	面积/ Mha	初始 SOC 密 度/Mg(C) ha ⁻¹	1980 年代		1990 年代		2000 年代	
			平均 SOC 密度/ Mg(C) ha ⁻¹	平均碳投入量/ Mg(C) ha ⁻¹ a ⁻¹	平均 SOC 密度/ Mg(C) ha ⁻¹	平均碳投入量/ Mg(C) ha ⁻¹ a ⁻¹	平均 SOC 密度/ Mg(C) ha ⁻¹	平均碳投入量/ Mg(C) ha ⁻¹ a ⁻¹
河北-北 京-天津	8.18	28.93	30.90(30.86 - 30.94)	3.55	35.61(35.51 - 35.70)	5.43	40.24(40.08 - 40.39)	5.89
山东	8.45	28.27	30.27(30.21 - 30.32)	3.99	32.32(32.18 - 32.46)	5.02	34.67(34.46 - 34.88)	5.33
河南	7.89	30.67	32.36(32.30 - 32.41)	3.95	35.73(35.60 - 35.85)	5.55	41.24(41.04 - 41.43)	6.75
全部	24.52	29.27	31.15(31.10 - 31.20)	3.83	34.51(34.39 - 34.63)	5.33	38.65(38.46 - 38.83)	5.98

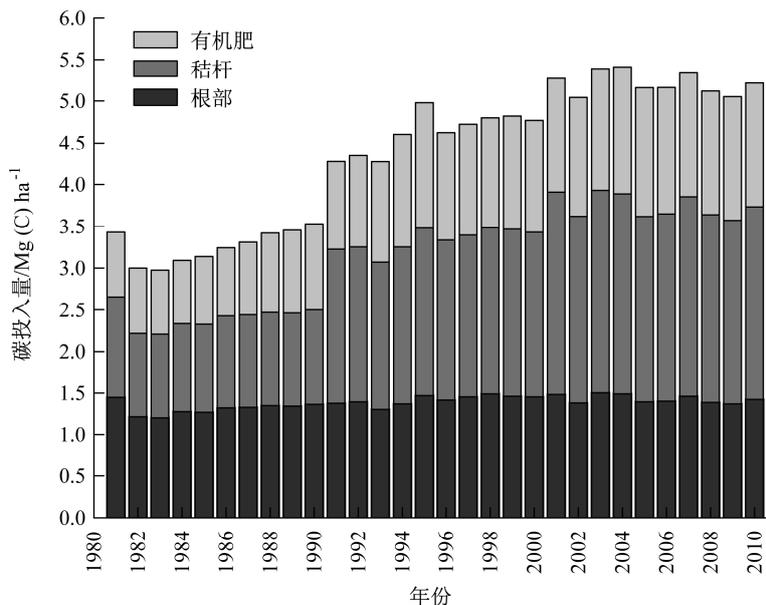


图 4 华北平原农田外源碳投入量

Fig. 4 Carbon input to soils in the NCP

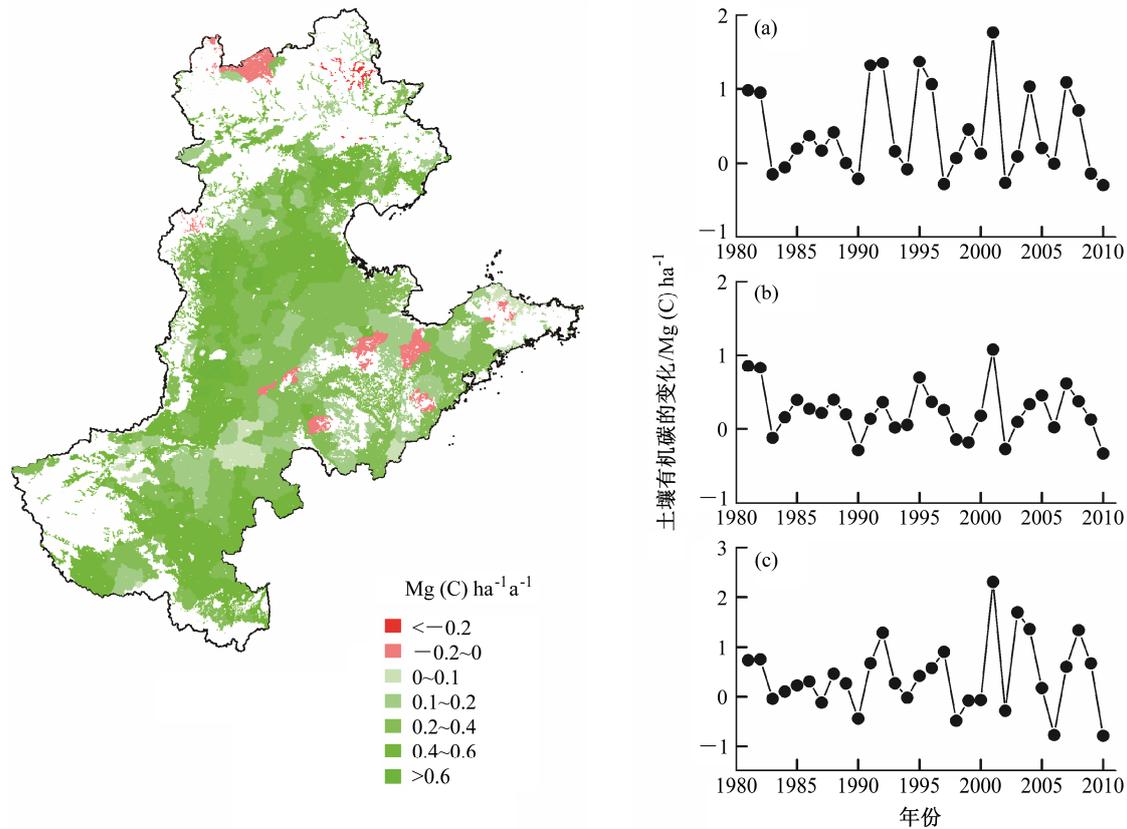


图5 1980~2010年(a)京津冀地区、(b)山东省和(c)河南省农田土壤有机碳的空间变化

Fig. 5 Spatial changes of cropland SOC over (a) Beijing-Tianjin-Hebei area, (b) Shandong Province, and (c) Henan Province during 1980-2010

1980~2010年间分别增加了102.05(100.74~103.37)Tg、59.82(57.92~61.68)Tg和95.56(93.92~97.20)Tg。

4 总结

本文利用APSIM模型以及相关土壤、气候和农业管理措施等模型输入数据,研究了1980~2010年间中国华北平原农田土壤有机碳的时空变化,主要结果如下:

(1) 校正后的APSIM模型总体能够较好地捕捉到我国北方部分长期定位试验站点中各处理下小麦和玉米的产量变化以及土壤有机碳变化,表明该模型中国小麦-玉米轮作的农业系统中具有较好的模拟功能。

(2) 1980~2010年间华北平原大部分农田土壤有机碳呈增加趋势,仅河北省的北部、山东省中部和东部部分地区农田SOC减少。华北平原农田土壤有机碳密度的平均变化速率为 $0.35 \text{ Mg(C) ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$,总的土壤有机碳贮量增加了257.43 Tg。区域上,在

京津冀地区、山东省以及河南省,农田土壤有机碳分别平均增加了102.05、59.82、95.56 Tg(C)。土壤有机碳的增加,主要归功于外源碳投入量的增加。

总而言之,在土壤和气候环境以及农业管理措施共同影响下,1980~2010年间华北平原大部分地区农田土壤有机碳呈增加趋势,总体表现为一个净碳汇,这对于一定程度缓解当前的全球变暖以及保障我国粮食安全都起到了积极的作用。

致谢 感谢罗忠奎博士(Land and Water, CSIRO, Australia)对本文APSIM区域模拟工作给予的帮助。

参考文献 (References)

- Cavelier J, Penuela M C. 1990. Soil respiration in the cloud forest and dry deciduous forest of Serrania de Macuira, Colombia [J]. *Biotropica*, 22 (4): 346-352.
- Davidson E A, Ackerman I L. 1993. Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils [J]. *Biogeochemistry*, 20 (3): 161-193.
- Davidson E A, Janssens I A. 2006. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change [J]. *Nature*, 440 (7081): 165-173.

- Falloon P, Smith P, Bradley R I, et al. 2006. RothC_{UK}—A dynamic modelling system for estimating changes in soil C from mineral soils at 1-km resolution in the UK [J]. *Soil Use and Management*, 22 (3): 274–288.
- Food and Agriculture Organization. 2001. Soil carbon sequestration for improved land management [R]. Rome, Italy: World Soil Resources Reports, 27.
- 高利伟, 马林, 张卫峰, 等. 2009. 黄淮海三省两市作物秸秆及其养分资源利用现状分析 [J]. *中国农学通报*, 25 (11): 186–193. Gao Liwei, Ma Lin, Zhang Weifeng, et al. 2009. Analysis on the quantities and utilization of crop straw and its nutrient in Huang-Huai-Hai region [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin (in Chinese)*, 25 (11): 186–193.
- Huang Y, Tang Y H. 2010. An estimate of greenhouse gas (N₂O and CO₂) mitigation potential under various scenarios of nitrogen use efficiency in Chinese croplands [J]. *Global Change Biology*, 16 (11): 2958–2970.
- Jenkinson D, Andrew S P S, Lynch J M, et al. 1990. The turnover of organic carbon and nitrogen in soil [J]. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*, 329 (1255): 361–367.
- Jiang D, Hengsdijk H, Dai T B, et al. 2006. Long-term effects of manure and inorganic fertilizers on yield and soil fertility for a winter wheat–maize system in Jiangsu, China [J]. *Pedosphere*, 16 (1): 25–32.
- Jones H G. 1992. Plants and microclimate: A quantitative approach to environmental plant physiology [M]. New York: Cambridge University Press, 20.
- Keating B A, Carberry P S, Hammer G L, et al. 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation [J]. *European Journal of Agronomy*, 18 (3–4): 267–288.
- Lal R. 2004. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. *Science*, 304 (5677): 1623–1627.
- Li C S, Frolking S, Harriss R. 1994. Modeling carbon biogeochemistry in agricultural soils [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 8 (3): 237–254.
- Li C S, Zhuang Y H, Frolking S, et al. 2003. Modeling soil organic carbon change in croplands of China [J]. *Ecological Applications*, 13 (2): 327–336.
- Liu J Y, Liu M L, Zhuang D F, et al. 2003. Study on spatial pattern of land-use change in China during 1995–2000 [J]. *Science in China (Ser. D: Earth Sciences)*, 46 (4): 373–384.
- Luo Z K, Wang E L, Sun O J, et al. 2011. Modeling long-term soil carbon dynamics and sequestration potential in semi-arid agro-ecosystems [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151 (12): 1529–1544.
- Ogle S M, Breidt F J, Easter M, et al. 2010. Scale and uncertainty in modeled soil organic carbon stock changes for US croplands using a process-based model [J]. *Global Change Biology*, 16 (2): 810–822.
- Parton W J, Scurlock M O, Ojima D S, et al. 1993. Observations and modeling of biomass and soil organic matter dynamics for the grassland biome worldwide [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 7 (4): 785–809.
- Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, et al. 1982. Soil carbon pools and world life zones [J]. *Nature*, 298 (5870): 156–159.
- Qin Z C, Huang Y. 2010. Quantification of soil organic carbon sequestration potential in cropland: A model approach [J]. *Science China Life Sciences*, 53 (7): 868–884.
- Ren G Y, Zhou Y Q, Chu Z Y, et al. 2008. Urbanization effects on observed surface air temperature trends in North China [J]. *J. Climate*, 21 (6): 1333–1348.
- Robert C P, Casella G. 2009. *Introducing Monte Carlo Methods with R* [M]. New York: Springer Science & Business Media, 278pp.
- Thornton P E, Running S W, White M A. 1997. Generating surfaces of daily meteorological variables over large regions of complex terrain [J]. *J. Hydrol.*, 190 (3): 214–251.
- Thornton P E, Hasenauer H, White M A. 2000. Simultaneous estimation of daily solar radiation and humidity from observed temperature and precipitation: An application over complex terrain in Austria [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 104 (4): 255–271.
- Thorburn P J, Probert M E, Robertson F A. 2001. Modelling decomposition of sugar cane surface residues with APSIM-Residue [J]. *Field Crops Research*, 70 (3): 223–232.
- Wang E L, Yu Q, Wu D R, et al. 2008. Climate, agricultural production and hydrological balance in the North China Plain [J]. *International Journal of Climatology*, 28 (14): 1959–1970.
- Wang G C, Huang Y, Wang E L, et al. 2013a. Modeling soil organic carbon change across Australian wheat growing areas, 1960–2010 [J]. *PLoS One*, 8 (5): e63324.
- Wang G C, Luo Z K, Wang E L, et al. 2013b. Contrasting effects of agricultural management on soil organic carbon balance in different agricultural regions of China [J]. *Pedosphere*, 23 (6): 717–728.
- West T O, Post W M. 2002. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: A global data analysis [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 66 (6): 1930–1946.
- Wu D, Yu Q, Wang E, et al. 2008. Impact of spatial–temporal variations of climatic variables on summer maize yield in North China Plain [J]. *International Journal of Plant Production*, 2 (1): 71–88.
- 易中懿. 2010. *中国农业机械化年鉴——2010* [M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 375pp. Yi Zhongyi. 2010. *The Yearbook of Agricultural Mechanization in China (in Chinese)* [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 375pp.
- Yu D S, Shi X Z, Wang H J, et al. 2007. Regional patterns of soil organic carbon stocks in China [J]. *Journal of Environmental Management*, 85 (3): 680–689.
- Yu Y Q, Huang Y, Zhang W. 2012. Modelling soil organic carbon change in croplands of China, 1980–2009 [J]. *Global and Planetary Change*, 82–83: 115–128.
- Zhang L H, Chen Y N, Zhao R F, et al. 2010a. Significance of temperature and soil water content on soil respiration in three desert ecosystems in northwest China [J]. *Journal of Arid Environments*, 74 (10): 1200–1211.
- Zhang W J, Wang X J, Xu M G, et al. 2010b. Soil organic carbon dynamics under long-term fertilizations in arable land of northern China [J]. *Biogeosciences*, 7 (2): 409–425.
- Zhang W, Yu Y Q, Huang Y, et al. 2011. Modeling methane emissions from irrigated rice cultivation in China from 1960 to 2050 [J]. *Global Change Biology*, 17 (12): 3511–3523.
- Zhao B Q, Li X Y, Shi X P, et al. 2010. Long-term fertilizer experiment network in China: Crop yields and soil nutrient trends [J]. *Agronomy Journal*, 102 (1): 216–230.
- 中华人民共和国农业部. 2009. *新中国农业 60 年统计资料* [M]. 北京: 中国农业出版社, 749. Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. 2009. *Sixty Years' Agricultural Statistics of New China (in Chinese)* [M]. Beijing: China Agriculture Press, 749.