DOI: 10.5846/stxb202202080310

张婧婷,石浩,田汉勤,逯非,徐希燕,刘迪,刚诚诚,方善民,秦小羽,潘乃青,王思远.1981—2019年华北平原农田土壤有机碳储量的时空变化及影响机制.生态学报,2022,42(23):9560-9576.

Zhang J T, Shi H, Tian H Q, Lu F, Xu X Y, Liu D, Gang C C, Fang S M, Qin X Y, Pan N Q, Wang S Y.Spatial-temporal changes in and influencing mechanisms for cropland soil organic carbon storage in the North China Plain from 1981 to 2019. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(23):9560-9576.

1981—2019 年华北平原农田土壤有机碳储量的时空变 化及影响机制

张婧婷¹,石浩^{1,*},田汉勤²,逯¹,徐希燕³,刘¹,刚诚诚⁴,方善民¹, 秦小羽¹,潘乃青²,王思远¹

1 中国科学院生态环境研究中心,北京 100085

2 奥本大学林业与野生生物科学学院国际气候与全球变化研究中心,奥本 36849

3 中国科学院大气物理研究所,北京 100029

4 西北农林科技大学水土保持研究所,杨凌 712100

摘要:农业土壤具有可观的固碳及减碳潜力,有助于减缓人类温室气体排放导致的气候变化。为了更好地了解华北平原土壤有 机碳储量动态及其驱动因子,结合荟萃分析、随机森林机器学习模型和卫星遥感数据,研究了 1981—2019 年间中国华北平原农 田土壤有机碳储量的时空变化及其驱动因子。结果表明,1981—2019 年间华北平原 0—20 cm 农田土壤有机碳储量约为 (523.10±79.36) Tg C((14.56±1.66) Mg C/hm²),并以 5.94 Tg C/a(0.12 Mg C hm⁻² a⁻¹)的年固持速率稳步增长,占比约为中国 农田每年新增土壤有机碳的 23.3%。其中,常规农田管理措施,包括无机肥施用、有机肥施用和秸秆还田,对土壤有机碳增长的 贡献平均为 25.1%,即 1.49 Tg C/a(0.03 Mg C hm⁻² a⁻¹)。相比对照组,氮磷钾无机肥施用可提高 22.7%—26.0%的土壤有机碳 固定速率,有机肥可提高 48.3%,秸秆还田可提高 23.4%。同时,上述常规农田管理措施对土壤有机碳的积累作用受到土壤本 身理化性质的调控,在温度和降水较高的气候条件下更显著。值得注意的是,无论是无机肥施用、有机肥施用还是秸秆还田,当 投入量超过农作物和土壤微生物对碳和养分的需求时,土壤有机碳累积速率会显著下降。这也导致 2000 年后土壤有机碳固持 速率明显减缓,由 9.4 Tg C/a 下降为 3.5 Tg C/a。总的来说,过去几十年农田管理措施的改进显著提高了华北平原农田土壤有 机碳的增加速率,而未来华北平原农田系统固碳潜力仍然可观,但亟待明确在保证粮食产量的同时不同气候和土壤环境条件下 最佳固碳所需的化肥、有机肥和秸秆投入量。

关键词:土壤有机碳;荟萃分析;随机森林模型;华北平原;农田管理措施

Spatial-temporal changes in and influencing mechanisms for cropland soil organic carbon storage in the North China Plain from 1981 to 2019

ZHANG Jingting¹, SHI Hao^{1,*}, TIAN Hanqin², LU Fei¹, XU Xiyan³, LIU Di¹, GANG Chengcheng⁴, FANG Shanmin¹, QIN Xiaoyu¹, PAN Naiqing², WANG Siyuan¹

1 Research Center for Eco-Environmental Sciences, State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

2 International Center for Climate and Global Change Research, School of Forestry and Wildlife Sciences, Auburn University, Auburn, AL 36849, USA

3 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

4 Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金项目(32201355)

收稿日期:2022-02-08; 采用日期:2022-08-22

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: haoshi@ rcees.ac.cn

Abstract: Agricultural soils have significant carbon sequestration and reduction potentials to help mitigate climate change caused by human greenhouse gas emissions. To better understand the dynamics of soil organic carbon (SOC) storage and its driving factors in the North China Plain (NCP), this study combined meta-analysis, random forest machine learning, and satellite remote sensing data to study the spatio-temporal changes of cropland soil organic carbon storage and the contributions of its driving factors from 1981 to 2019. The results show that the cropland soil organic carbon storage of the top 0-20 cm in the NCP was (523.10±79.36) Tg C ((14.56±1.66) Mg C /hm²) from 1981 to 2019, with a growing rate of 5.94 Tg C/a (0.12 Mg C hm⁻² a⁻¹), which accounted for about 23.3% of the total annual increase of SOC in China's cropland. The total contribution of conventional cropland management options, including inorganic fertilizer use, organic fertilizer application and straw returning to SOC accumulation was 25.1%, 1.49 Tg C/a (0.03 Mg C hm⁻² a⁻¹). Compared with control experiments, inorganic fertilizer use (including nitrogen, phosphorus and potassium) increased the SOC sequestration rate by 22.7% - 26.0%, organic fertilizer application increasing by 48.3%, and straw returning increasing by 23.4%. Meanwhile, the effects of such conventional management on SOC accumulation were modulated by soil physical and chemical properties. This phenomenon was more obvious under high temperature and precipitation conditions. It is worth noting that when the use of inorganic/organic fertilizer or straw returning exceeded the carbon and nutrient demands of crops and soil microbes, the SOC accumulation decreased significantly. Consequently, the SOC accumulation slowed down from 9.4 Tg C/a to 3.5 Tg C/a during the 2000s. In summary, the increase of cropland SOC in the NCP could be largely attributed to the improvement of cropland management in the past few decades, and the carbon sequestration potential in the NCP cropland is considerable. Nevertheless, it is essential to clarify the input amount of organic fertilizer, inorganic fertilizer, and straw for optimal carbon sequestration under varied climate and soil conditions, while ensuring crop yield.

Key Words: soil organic carbon; Meta-analysis; Random Forest model; North China Plain; farmland management measures

土壤是陆地生态系统中最大的碳库,约为大气中总碳量的 2—3 倍,一个微小的波动都能引起大气中二氧 化碳(CO₂)浓度的剧烈变化^[1]。农业生态系统是受到自然和人类活动综合影响最为显著的陆地生态系统,因 此可以在较短时间尺度内调节其土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)收支状态^[2]。农田土壤有机碳增加既 可以将大气 CO₂固定到土壤中,又可以抵消农业生态系统中甲烷和氧化亚氮等其他温室气体的排放的影 响^[3]。因此,准确评估农田土壤有机碳储量将对缓解当前气候变暖、实现"碳中和"可持续发展目标具有重要 意义。

农田土壤有机碳动态受到气候变化和人为管理措施的共同驱动。气候条件调控土壤过程和作物生长,并 最终影响土壤有机碳的数量和质量^[4-7]。人类活动对土壤有机碳的影响也非常显著,通过改善农业管理措 施,比如采取秸秆还田和增施有机肥等措施,一般能够减缓甚至逆转土壤有机碳损失^[8-12]。但正是由于农田 土壤有机碳变化同时受到两者复杂的交互影响,在较大时间和空间尺度上准确捕捉土壤有机碳动态变化特征 十分困难。目前,区域尺度农田土壤有机碳储量估算大部分基于站点观测实验结果,通过空间统计等方法外 推获得^[9,12],由于实验站点分布多集中在较肥沃的农田,在一定程度上存在高估区域尺度的农田土壤有机碳 储量的可能性。而基于过程的农业生态系统模型,例如 DeNitrification-DeComposition (DNDC)模型^[13]、 Rothamsted carbon(RothC)模型^[14]和 Agricultural Production Systems sIMulator 模型^[15],则需要进行大量复杂的 参数化过程,增加了区域数据获取的难度。相对而言,机器学习模型具有自学习功能,可以发现其他因果关 系,在较大时空尺度上模拟农田土壤有机碳动态方面具有一定优势,目前已被广泛用于模拟区域尺度农田土 壤有机碳的变化^[12,16-18]。

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。自20世纪80年代 以来,华北平原农田管理措施,包括无机肥、有机肥施用、农田作物秸秆还田比率、保护性耕作措施以及灌溉量 都发生了一定的变化^[12,19-21]。但截至目前,依然缺少华北平原农田土壤有机碳高精度的时空变化及常规管 理措施的相对贡献研究。因此,明晰华北平原土壤有机碳含量的时空变化和归因,在全球变暖和粮食安全的 背景下,对未来农业管理措施具有重要意义。本文首先利用荟萃分析解析华北平原常规管理措施(氮磷钾无 机肥、有机肥施用和秸秆还田)对农田土壤有机碳变化的贡献,然后结合区域尺度数据,包括土壤(土壤容重、 pH 值、土壤总碳、总氮、总磷、土壤质地)、气候和大气成分变化(温度、降水和氮沉降)、作物生长状况(LAI)和 其他管理措施(灌溉、耕作措施),使用随机森林机器学习模型,模拟了 1981—2019 年华北平原农田土壤有机 碳的时空变化。

1 材料与方法

1.1 研究区域

华北平原是东亚最大的冲积平原,也是中国最多产的农业区之一,其中农田占地 35 Mhm^{2[22]}。由于对粮 食供应的重要贡献,它被称为"中国的粮仓"。华北平原属半干旱半湿润气候区,降水和温度等气候要素具有 明显的季节特征和年际波动^[3,23]。年平均温度 14—15℃,京、津一带降至 11—12℃,南北相差 3—4℃。受季 风降水影响,大部分降雨(超过 70%)发生在 6 月至 9 月,平原年降水量 500—1000 mm,降水有由北向南增加 的趋势^[24]。大部分海拔低于 50 m 的平原区覆盖冲积土。

1.2 数据收集

本研究从 40 篇以华北平原为研究区域的同行评审文章中提取了 22 个土壤有机碳实验站点共 1047 条数 据(包括 692 条无机氮肥实验、656 条磷肥、403 条钾肥、197 条有机肥、294 条秸秆还田数据,大部分为交叉实 验数据)。所有的文章都来自中国知网(https://www.cnki.net/)和科睿唯安科学网(the Web of Science, www. webofscience.com)。搜索关键词为"土壤有机碳"、"土壤有机质"、"氮肥"、"磷肥"、"钾肥"、"化肥/无机肥"、 "有机肥"、"秸秆还田"、"保护性耕作"、"秸秆还田"以及相对应的英文名称。所有选定的研究都符合以下标 准:(1)有机碳含量是在田间实验中测定的;(2)提供辅助信息,如实验时间、重复次数、采样深度、气候和土壤 理化性质;(3)除本研究的 3 种目标管理措施(包括无机肥氮磷钾、有机肥和秸秆还田措施)外,还包括其他华 北平原常规农田管理措施,如耕作措施、灌溉等。土壤有机碳数据从选定文献表中获取,或者使用图片数字化 工具(GetData Graph Digitizer software v2.26, http://getdata-graph-digitizer.com/download.php)从图中提取。从 选定的研究中获得的其他相关信息也被记录下来,包括位置(即经纬度)、实验时间、气候特征(生育期平均气 温和降水总量)、土壤性质(容重、质地、土壤养分含量和 pH 值)和其他农学实践(作物耕作措施、灌溉)。按 研究时间分为两类:中短期(小于 20 a)和长期(大于等于 20 a)。同时,由于华北平原的空间异质性相对较 小,为确保每个研究组有足够的数据量,本文接下来的分组中提到的阈值,原则上都是取中位数,例如站点观 测的生育期内平均温度的分组阈值定为 20℃。

以上数据,分别用于荟萃分析以及随机森林机器学习模型的训练和测试。其他区域尺度的环境数据(均 重采样并降尺度到0.05°),则用于补充缺项数据以及作为随机森林模型区域模拟的输入数据。例如土壤理化 性质数据,如土壤容重、土壤质地、土壤总碳、总氮、总磷含量和 pH 值,来自 CSDE 土壤数据库 (http:// globalchange.bnu.edu.cn/research/soilw),该套数据是基于各个国家和地区土壤剖面数据库、土壤清查数据和 分类数据库生成^[25],该套数据的原始空间分辨率为 30′,垂直方向共 8 层,本研究使用了双线性内插的方法重 采样到 0.05°,取顶层 4 层(0—28.9 cm)土壤理化性质数据的均值作为表层土壤理化性质;作物 LAI,来自 GLASS LAI 遥感数据 0.05°的格点提取值(www.glass.umd.edu);作物生育期平均温度和降水总量,来自国家气 象局数据共享平台(http://www.cma.gov.cn/2011qxfw/2011qsjgx/)和阳坤等^[26];氮沉降数据,来自化学-气候 模式计划(Chemisty-Climate Model Initiative,CCMI),它融合了多种大气化学传输模型的模拟结果并同时考虑 了人为与自然的含氮化合物的排放与传输^[27]。其原始数据时间跨度为 1850—2014 年,空间分辨率为 0.5°, 使用最邻近插值法将数据重采样到 0.05°,2014 年后的氮沉降数据使用 2014 的值替代;灌溉数据,来源于国 家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn)^[28-29];秸秆还田数据,来自 Han 等^[12];化肥氮磷钾数据,来自当地县级统计年鉴;有机肥数据,来自 Zhang 等^[30];农田分布和覆盖比例数据, 采用美国航空航天局(NASA)的中分辨率成像光谱仪(Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) 地表覆盖产品(MCD12C1v006)^[31],时间跨度为 2001—2019 年,空间分辨率为 0.05°,分类体系参照国际地圈 生物圈计划标准分类(International Geosphere-Biosphere Programme, IGBP)。在模拟和分析时,通过拼接、投影 转换、裁剪等得到华北平原 2001—2019 年农田分布和栅格占比的空间数据。1981—2000 年的农田分布数据 来自 LUH2 数据集^[32],因其空间范围大,时间跨度长,在许多区域和全球评估报告中被广泛采用^[33—35]。

1.3 荟萃分析

荟萃分析(Meta-anlysis)通过响应比(response ratio, *RR*)来表示实验处理水平对结果的影响,本研究对响应比进行了对数转换^[36],公式为:

$$\ln RR = \ln(\overline{X_t}/\overline{X_c}) = \ln \overline{X_t} - \ln \overline{X_c}$$
(1)

式中, X_i 和 X_c 分别为研究中处理组和对照组结果的平均值。此外,为了排除研究中样本量、环境条件等因素的干扰,得到综合所有研究的累积效应值(RR_*),需要根据均值和方差对每项研究赋予权重(w_i)^[36],其中固定效应模型权重计算方法为:

$$v_{i} = \frac{S_{i}^{2}}{n \overline{X^{2}}} + \frac{S_{c}^{2}}{n \overline{X^{2}}}$$
(2)

$$w_i = 1/v_i \tag{3}$$

$$RR_{+} = \frac{\sum_{i} w_{i} \ln R R_{i}}{\sum_{i} w_{i}}$$
(4)

式中, S_t 、 n_t 和 S_c 、 n_e 分别表示处理组和对照组的标准差及样本量。在本研究中采用随机效应模型,相比于固定效应模型,考虑了不同研究间的变异,单个研究的权重由 w_i 更改为 w_i^* ,计算公式如下^[37]。

$$w_i^* = 1/(v_i + \tau^2)$$
(5)

 τ^2 表示研究间的方差,可由约束最大似然法(restricted maximum likelihood, REML)求出^[37]。以上计算过 程利用 R 软件^[38]的荟萃软件包^[39]完成,并且最终的对数响应比利用 ($e^{RR_+} - 1$) × 100% 转换为百分比,以便 更好地体现实验处理对有机碳的影响^[10]。

1.4 随机森林机器学习模型

随机森林(Random forest, *RF*)是一种用于分类和回归的集成学习方法。算法中生成了大量的决策树,并最终聚合成一个单一的预测^[40-41]。由于对大量决策树进行平均, *RF*模型实现了低偏差和低方差^[42]。该算法不会出现过度拟合,因为每棵决策树是由一个唯一的引导子样本的数据训练而来,而过拟合不会根据 *RF*模型中的树的增加而增加,它随着更多的树而趋于稳定^[43]。

本研究利用收集的 1047 条土壤有机碳储量数据,利用 RF 模型检测了该地区 0—20 cm 农田土壤有机碳 储量变化的控制因素。首先,本研究将数据分为两部分,其中 25%(约 261 个点)是测试数据,75%(约 786 个点)是 RF 模型构建的训练数据。对于每棵树,需要说明 3 个训练参数。第一个训练参数是在森林中生长的 决策树的数量(the number of decision trees,ntree),较高的数量将对变量重要性的的估计更稳定^[44]。本研究 将 ntree 设置为默认值 500。第二个参数是每个节点随机选择的预测变量的数量(mtry)。回归问题的默认值 是预测因子总数的三分之一。因为 RF 预测性对 mtry 很敏感^[45],所以本研究使用了一种迭代的方法,以最小的袋外(out of bag,OOB)均方误差来确定最佳 mtry (公式 6)。第三个参数是在树的终端节点上观察的最小数量(node size)。在这里,本研究使用默认值进行回归 RF。RF 模型使用扩展的交叉验证,其中每个 OOB 样 本由相应的引导训练树预测。之前的所有 OOB 都被聚合到一起通过均方误差(mean square error, MSE)估计 精度,"百分比方差解释"可以由 1—MSE 推导出来^[41]。本研究使用测试数据集来验证 RF 回归模型,利用观

测值与预测值之间的差异来估计平均百分比误差(mean percentage error, MPE)、预测均方根误差(root mean square error of the prediction, RMSEP)和决定系数(coefficient of determination, R^2)^[41,46]。

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (y_i - \hat{y_i}^{OOB})^2$$
(6)

$$MPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} (pred_i - obs_i)$$
(7)

$$\text{RMSEP} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} (\text{obs}_i - \text{pred}_i)^2}{n}}$$
(8)

$$R^{2} = 1 - \sum_{i=1}^{n} \frac{(\operatorname{obs}_{i} - \operatorname{pred}_{i})^{2}}{(\operatorname{obs}_{i} - \operatorname{obs})^{2}}$$
(9)

式(6)中, \hat{y}_i^{00B} 表示所有 OOB 预测值的平均, 公式(7—9)中 obs_i 表示测试集中第 *i* 个样本, pred_i 表示 RF 模型对测试及第 *i* 个样本的预测值, obs表示测试集的样本均值。

1.5 土壤有机碳储量计算

根据 Huang 等^[47]的计算方法,土壤有机碳密度(soil organic carbon density,SOC_{density})(Mg C/hm²)计算公 式为:

$$SOC_{density} = c \times B \times 20/10 \tag{10}$$

式中, c 为 0—20 cm 土壤有机碳含量(g/kg); B 为 0—20 cm 土壤容重(g/cm³);式中 20 和 10 分别指土层深 度和面积转换系数。

2 结果与分析

2.1 土壤有机碳对化肥、有机肥和秸秆还田管理措施的响应

在华北平原3种常见的农田管理措施中,有机肥施用对农田土壤有机碳(SOC_{density})的影响最为显著,平均提高了48.3%的SOC_{density}增长速率,且随着有机肥投入量的增加,SOC_{density}增长速率会继续增大(图1)。氮磷钾无机肥料可分别提高23.3%,22.7%和26.0%的SOC_{density}增长速率。其中小于300 kg/hm²的氮肥投入使SOC_{density}增长速率增加了29.6%,但是,超过300 kg/hm²的氮肥投入反而使促进效应降低了35.7%。秸秆还田促进SOC_{density}提高了23.4%,较高还田比率(>30%)有助于SOC_{density}进一步增加26.8%。值得注意的是,不管是无机肥、有机肥还是秸秆还田输入,当投入量超过农作物和土壤微生物对碳、氮的需求时,土壤有机碳的积累速率会显著下降。例如,相对于低投入量,超过300 kg/hm²的氮肥投入、超过200 kg/hm²的有机肥输入以及大于30%的秸秆还田率的措施使土壤有机碳的积累速率分别下降了34.3%、69.9%和22.9%。但不同于快速分解的无机氮肥,有机肥和生物肥的缓慢的分解速率使土壤微生物拥有更丰富持久的营养物^[24],最终会显著增加农田土壤的SOC_{density}(图1)。

这些传统的农田管理措施对土壤 SOC_{density}的积累起到了正面作用,但其长期的效应却各不相同(图1)。 结果表明,长期(≥20 a)的有机肥施用极大地有利于土壤 SOC_{density}积累,较中短期有机肥施用的效果高 49.7%。长期的无机氮磷钾肥料的施用也促进了 27.2%—34.5%的土壤 SOC_{density}积累,但相对于短期施肥,其 增效作用只提高了 14.4%—21.2%,远低于有机肥。通过秸秆还田增加碳投入可以在土壤碳饱和之前提高碳 浓度,但长期的秸秆还田对土壤 SOC_{density}固定的增加效应却略微有所降低(-2.5%)。

2.2 不同环境因子对化肥、有机肥和秸秆还田管理措施引起的土壤有机碳固持的影响

在华北平原,降水量增加、适当增温以及高氮沉降均有利于农田管理措施固定更多的 SOC_{density}(图 2)。相对于低降水条件,在年降水量高于 1500 mm 时,氮磷钾无机肥分别促使 SOC_{density}增长速率提高了 16.6%, 12.7%和 18.1%;有机肥和秸秆还田的碳汇效应增加了 20%左右。生育期平均温度高于 20℃条件下的氮肥、







图 2 华北平原常规农业管理措施对不同气候、氮沉降分布下的土壤有机碳变化速率的平均影响

Fig.2 Mean effects of conventional agricultural management on soil SOC changes in the North China Plain under different climate and N deposition conditions

括号里的数字表示观测集个数,误差棒表示 95% 置信区间

有机肥和秸秆还田分别使 SOC_{density} 增加速率提高了 33.1%、62.5%和 45.2%, 较低温度条件下则分别提高了 19.7%、34.7%和 33.8%。高氮沉降条件下, 3种管理措施对 SOC_{density}的促进作用比低氮沉降条件下高11.3%— 24.3%。

土壤质地以及相关理化性质对华北平原常规农业管理措施引起的土壤有机碳固持有显著的调控作用 (图 3)。譬如,无机肥在黏土比重大的农田土壤中,对 SOC_{density}的促进作用提高了(14.5%—19.6%);相对于 低壤土,壤土含量高的农田土壤中的有机肥施用提高了 54.0%的 SOC_{density}增长速率,而秸秆还田措施则使 SOC_{density}增加速率降低了 23.8%;在沙土比重大的农田土壤中,氮磷钾无机肥和有机肥施用对 SOC_{density}的促进 效应分别降低了 5.8%—11.0%和 61.6%,秸秆还田反而使其提高了 22.4%。较低的初始土壤养分含量为有机 碳固存提供了潜在空间(图 4)。例如,在全碳含量较低的农田土壤中,有机肥和秸秆还田对 SOC_{density}的增汇 作用较强,其效应较高碳土壤分别提高了 37.3%和 29.8%。但值得注意的是,相对养分含量较低的土壤,总 氮、总磷含量较高的土壤中秸秆还田措施使 SOC_{density}增长速率分别提高了 38.1%和 21.6%。另外,土壤 pH 值 增大使 SOC_{density}增长速率有所降低,而土壤容重小则对 SOC_{density}增长的促进作用更大(图 5)。譬如,在碱性农 田土壤中,有机肥施用对 SOC_{density}的积累作用大幅下降了 38.1%;在土壤容重小的农田中有机肥施用对 SOC_{density}的很进作用提高了 40.9%(图 5)。





Fig.3 Mean effects of conventional agricultural management on SOC changes in the North China Plain under different soil texture conditions

括号里的数字表示观测集个数,误差棒表示 95% 置信区间

化肥、有机肥和秸秆还田管理措施在长势更好的冬小麦-夏玉米系统中对 SOC_{density}的积累效果更好,达到 了 21.2%—57.4%(图 5)。有机肥施用对 SOC_{density}影响的差距在不同长势的小麦-玉米轮作系统中尤为显著。 由于根系和地上茎叶更为发达,长势更好的作物既可以通过根系分泌营养物提供给土壤微生物更多营养,又 可以通过根系残留和秸秆还田为土壤提供更多的碳输入^[24],所以长势更好的作物大大提高有机肥的固碳能 力,较之在长势弱的作物田中高出 23.1%。化肥和秸秆还田措施的效应与之相同,在长势更好的农田中对



SOC_{density}的积累作用比之在长势弱的农田中高 1.9%—6.9%。

图 4 华北平原常规农业管理措施对不同土壤初始肥力下的土壤有机碳变化速率的平均影响

Fig.4 Mean effects of conventional agricultural management on soil SOC changes in the North China Plain among different initial fertility 括号里的数字表示观测集个数,误差棒表示 95%置信区间

有机肥的施用和秸秆还田都能极大地促进无机肥(氮磷钾)对 SOC_{density}的积累作用(图 6)。增施有机肥 后,氮肥、磷肥和钾肥分别使 SOC_{density}积累提高了 19.0%,20.3%和 18.6%。当秸秆还田小于 30%,氮肥、磷肥 和钾肥会使 SOC_{density}积累提高 14.8%,13.2%和10.1%,但当秸秆还田大于 30%时,氮肥、磷肥对 SOC_{density}的增 加效应有轻微的降低(-3.0%至-8.3%),但钾肥对 SOC_{density}的增加效应增加了 17.9%。总的来说,化肥、有机 肥和秸秆还田管理措施的耦合作用促进 25.1%的农田 SOC_{density}积累(图 7)。在较温暖的条件下(>20℃),华 北地区 3 种常规的农田管理措施使 SOC_{density}显著提高了 35.6%;在较湿润的条件下(>1500 mm),相关的 SOC_{density}固定增加了 33.3%;该耦合作用在高氮沉降条件下(>1.7 g N/m²)促进了 29.5%的农田 SOC_{density}的积 累。在弱酸性和中性(pH<8.0)农田土壤中,这些管理措施提高了 43.7%的 SOC_{density} 想长速率。而化肥、有机 肥和秸秆还田措施的协同作用在较贫瘠的土壤(总碳<0.65 g/kg)中对 SOC_{density}积累的效应更显著,达到了 37.1%。黏土(>30%)、壤土(>40%)含量较大的农田中,管理措施的碳汇效应分别达到了 52.2%和 26.7%。 在长势较好(LAI>1.5)的作物田中,这些措施使土壤碳固持提高了 26.3%,而在高灌溉条件下(>200 mm)土 壤 SOC_{density}的固定效应为 27.8%。虽然长期(>20 a)的秸秆还田对 SOC_{density}的增强效应有所降低,但与化肥、 有机肥的耦合作用却依然很强(28.6%),比中短期措施的效应提高了 17.5%。

2.3 华北平原常规农田管理措施下土壤有机碳的时空变化

运用随机森林模型,本研究模拟预测了常规管理措施下华北平原 1981—2019 年的农田土壤有机碳储量的时空分布。随机森林模型的模拟性能见图 8。结果表明,模型中使用的自变量解释了华北平原 SOC 储量变化总方差的 90%以上。区域模拟结果显示,1981—2019 年间,华北平原 0—20 cm 土壤有机碳储量平均为(14.56±1.66) Mg C/hm²((523.10±79.36) Tg C),并且每年以 0.12 Mg C hm⁻² a⁻¹(5.94 Tg C/a)的固持率稳步

42 卷



图 5 华北平原常规农业管理措施对不同土壤理化性质和作物生长状态下的土壤有机碳变化速率的平均影响

Fig.5 Mean effects of conventional agricultural managements on SOC changes in the North China Plain under different soil properties and crop growth states

括号里的数字表示观测集个数,误差棒表示 95%置信区间



图 6 华北平原常规农业管理措施对土壤有机碳的交互式影响

Fig.6 Interactive effects of normal agricultural management on soil SOC changes in the North China Plain 括号里的数字表示观测集个数,误差棒表示 95%置信区间

9568



图 7 华北平原施用化肥、有机肥和秸秆还田管理措施对不同环境类型下的土壤有机碳的耦合影响

Fig.7 Mean effects of inorganic and organic fertilizer and straw returning on soil SOC changes in the North China Plain under different environmental conditions

括号里的数字表示观测集个数,误差棒表示 95% 置信区间

增长(图9)。平均来讲,华北平原农田土壤有机碳库在 1980年代、1990年代、2000年代和2010年代的平均增加 速率分别为7.46 Tg C、16.27 Tg C、3.11 Tg C 和 3.48 Tg C。可见,华北平原土壤有机碳积累速率在逐渐变缓,到 2010年代,华北平原0—20 cm 土壤有机碳储量稳定在 (16.48±0.79) Mg C / hm²((602.61±32.70) Tg C)。

总体而言,1981—2019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9)。由于碳氮投 入量的增加,华北平原大部分地区的农田土壤有机碳都 呈上升趋势,较高的农田土壤有机碳储量集中在农田面 积分布较广的区域,并以每年0.14—0.40 Mg C hm⁻² a⁻¹ 的固持速率增长,而山地和近海区域农田土壤有机碳储 量较低,部分区域甚至呈现出有机碳逐渐减少的趋势 (图 10),例如河北省北部、山东省中部和东部部分地区 农田土壤有机碳仍在减少。平均而言,1981—2019年,



图 8 华北平原农田 0—20 cm 土壤有机碳储量变化控制因素的 随机森林模型性能

Fig.8 RF model performance on predicting cropland SOC stock of the top 0—20 cm soil in the North China Plain

RMSE:均方根误差 Root Mean Square Error; MAE:平均绝对误差 Mean Absolute Error

京津冀地区、山东省以及河南省的农田有机碳储量分别为(14.63±1.89) Mg C/hm²((169.57±22.24) Tg C)、(14.21±1.92) Mg C/hm²((165.55±34.79) Tg C)和(15.94±2.30) Mg C/hm²((187.98±31.59) Tg C)(表 1),其积 累速率分别为 0.78、2.88、2.28 Tg C/a。到 2010年代,京津冀地区、山东省以及河南省的农田有机碳储量分别 稳定在(176.25±12.99) Tg C、(209.47±15.35) Tg C 和(216.90±12.50) Tg C。





Fig.9 Temporal changes in the total cropland SOC stock in the North China Plain from 1981 to 2019

正方形数据点是对荟萃分析数据进行简单的空间区域平均所得(站点主要分布在土壤有机碳较高的农田中);圆形数据点为随机森林模型 预测的平均华北平原农田土壤有机碳密度;三角形数据点为随机森林模型预测的 0—20 cm 华北平原农田土壤有机碳储量





3 讨论

3.1 土壤有机碳积累速率

本研究结果表明,1981—2019年,华北平原 0—20 cm 土壤每年土壤有机碳积累为 0.12 Mg C hm⁻² a⁻¹ (5.94 Tg C/a),与 Zhao 等^[9]报道的 0.16 Mg C hm⁻² a⁻¹较为一致,约为中国农田每年土壤有机碳积累量的 23.3%(按最大固持率 25.5 Tg C/a 算^[12,48-60]),相当于中国每年 CO₂排放的 0.61%(大约 0.98 Pg C/a ^[61])。目前,大量的研究结果已经证实,无机肥、有机肥和秸秆还田以及配套的管理措施,使中国农田由碳源转变为

省份	市	土壤有机碳密度	土壤有机碳储量	土壤有机碳储量变化率
Provinces	Cities	SOC density/	SOC stock/	SOC stock change rate/
- 1.		(Mg C/hm ²)	(1g C)	(Tg C/a)
「南	洛阳市	14.70 (1.19)	11.26 (1.53)	0.105
	平顶山市	15.38 (2.50)	9.07 (1.53)	0.093
	郑州市	16.19 (2.81)	9.34 (1.40)	0.091
	开封市	16.24 (3.56)	8.80 (2.09)	0.156
	焦作市	18.37 (1.82)	5.41 (0.56)	0.027
	安阳市	15.75 (2.51)	9.29 (1.65)	0.103
	鹤壁市	15.32 (2.80)	2.86 (0.57)	0.039
	新乡市	17.64 (2.86)	12.34 (2.05)	0.145
	三门峡市	13.63 (0.39)	4.90 (0.56)	0.038
	漯河市	16.06 (3.24)	3.55 (0.71)	0.048
	许昌市	17.12 (3.39)	8.01 (1.63)	0.120
	濮阳市	16.09 (3.21)	5.47 (1.15)	0.077
	驻马店市	13.52 (2.41)	17.80 (3.81)	0.258
	周口市	17.09 (2.97)	18.30 (3.63)	0.267
	商丘市	17.18 (3.02)	14.56 (2.97)	0.207
	南阳市	14.17 (1.84)	25.17 (3.92)	0.181
	济源市	16.03 (1.77)	1.95 (0.48)	-0.026
	信阳市	16.47 (2.29)	17.73 (4.16)	0.329
	平均	15.94 (2.30)	187.98 (31.60)	2.280
山东	青岛市	11.74 (0.74)	6.29 (3.56)	0.277
	淄博市	15.32 (2.37)	7.15 (1.28)	0.100
	济南市	18.08 (1.83)	11.84 (1.76)	0.139
	枣庄市	17.35 (3.34)	5.82 (1.32)	0.106
	烟台市	11.94 (0.60)	9.43 (3.03)	0.235
	东营市	11.75 (3.30)	4.59 (1.40)	0.102
	济宁市	15.20 (2.86)	12.90 (2.75)	0.195
	潍坊市	13.62 (1.75)	17.04 (2.35)	0.187
	泰安市	16.14 (2.58)	10.59 (2.02)	0.146
	日照市	11.24 (0.58)	3.87 (1.37)	0.106
	威海市	11.58 (0.57)	4.06 (0.18)	0.004
	滨州市	13.58 (3.25)	9.79 (2.67)	0.210
	临沂市	13.13 (2.06)	17.92 (3.40)	0.276
	菏泽市	15.52 (3.23)	17.48 (3.70)	0.234
	聊城市	15.83 (3.11)	12.64 (2.82)	0.201
	德州市	16.17 (2.44)	15.38 (2.84)	0.195
	莱芜市	13.40 (2.01)	2.22(0.43)	0.034
	平均	14.21 (1.92)	165.55 (34.79)	2.883
津冀	石家庄市	17.22 (2.56)	16.74 (2.49)	0.149
ijing-Tianiin-Hebei	唐山市	13.18 (1.18)	10.28 (2.18)	0.182
, . <u></u>	秦皇岛市	13.01 (0.32)	4 54 (2.68)	0 198
	北鄭市	16.59 (2.56)	15 65 (2.60)	0 108
	邢台市	17 14 (2.69)	18.03 (3.02)	0.176
	保定市	15.27(2.07)	22.02(3.02)	0.170
	中美国	13.27 (2.0+) 12.20 (2.21)	16.17(4.22)	0.261
	715.711.114	13.37 (3.21)	10.17 (4.2.)	0.201

表 1 1981—2019 年华北平原各地区农田土壤表层(0—20 cm)有机碳的变化

9572		生态学	42 卷	
续表				
省份 Provinces	市 Cities	土壤有机碳密度 SOC density/ (Mg C/hm ²)	土壤有机碳储量 SOC stock/ (Tg C)	土壤有机碳储量变化率 SOC stock change rate/ (Tg C/a)
	张家口市	11.07 (0.15)	10.56 (5.39)	-0.367
	承德市	13.69 (0.22)	15.06 (5.44)	-0.386
	衡水市	15.21 (3.46)	12.05 (2.88)	0.175
	廊坊市	15.08 (3.61)	6.72 (1.82)	0.128
	天津市	13.31 (3.06)	9.43 (2.40)	0.159
	北京市	14.96 (1.46)	9.14 (2.69)	-0.143
	香河县	15.73 (3.03)	1.61 (0.39)	0.029
	平均	14.63 (1.89)	169.57 (22.24)	0.782
华北平原 North China Plain	平均	14.56 (1.66)	523.10 (79.36)	5.94

SOC:土壤有机碳 soil organic carbon

碳汇^[9,48-49,51-58]。但由于开展农田观测、实验的站点大多集中在农田面积分布较广、农业投入较多的区域,相应的土壤有机碳积累较多,而山区丘陵等贫瘠的农田土壤则不然。因此,仅根据实验或观测站点的土壤有机碳积累速率进行的简单的空间升尺度平均法来估算区域尺度的土壤有机碳储量,很大程度上忽略了空间异质性,可能会高估土壤碳库的潜力^[58-59,62-63]。而随机森林机器学习模型,考虑了区域上的气候变化、大气主成分变化、土壤理化性质、作物生长状况和多种常规的农田管理措施的时空分布,例如氮磷钾化肥、有机肥、秸秆还田、灌溉等,在一定程度上更能全面的准确的估算华北平原区域尺度的土壤有机碳储量和积累速率。

3.2 土壤有机碳积累的驱动因子

本研究表明华北平原土壤有机碳的增加主要归功于过去几十年的农田管理投入的提高。其中,华北平原 有机肥施用增加了 48.3%的农田土壤有机碳储量,无机肥对土壤有机碳固持的影响为 22.7%—26.0%,秸秆还 田对土壤有机碳积累的促进作用也达到了23.4%。本研究结果与前人的结果相一致[9-10.12]。尽管这些常规 管理措施对土壤有机碳积累都起到了积极的作用,但长期施用后的影响却有很大差异。例如,长期施用有机 肥较中短期的效果高出 49.7%,但长期施用无机氮肥相对于短期施肥,其增效作用只为 14.4%—21.2%,远低 于有机肥。这可能是由于有机肥含有大量的有效碳源,可提高微生物生物量和活性,促使微生物同化更多的 铵态氮进入土壤活性有机氮库[24]。相比而言,无机氮肥施入仅仅通过提高土壤中根和作物残体的自然还田 量增加土壤有机碳含量,因而其提供的有效碳源相对有限,对提高土壤铵态氮同化速率的能力也就弱于施入 有机氮肥^[24]。长期施用无机氮肥还容易使土壤氮含量过量,而过量的氮肥对土壤的影响是多方面的。首先, 从对土壤理化性质的影响来看,过量的氮肥将导致土壤结构变差、容重增加、孔隙度减少、土壤酸碱性改变,部 分养分含量降低或不平衡,相应的土壤有益微生物数量减少,进而导致土壤有机质上升速度减缓甚至下 降^[64]。例如,本文中华北平原施肥量小于 300 kg/hm²的氮肥投入使土壤有机碳增加了 29.6%,但是,超过 300 kg/hm²的氮肥投入反而使该促进效应相对降低了 35.7%(图 1)。秸秆还田增加了土壤中根系分泌物的数量, 根系分泌物可以为微生物生长提供营养物质[24]。此外,作物秸秆还可以提供含有如木质素、纤维素和半纤维 素等较稳定的有机化合物[24]。但秸秆还田对土壤有机质的积累作用通常小于有机肥施用。这是因为农作物 秸秆 C/N 比通常较高,微生物需从土壤中吸收更多的无机氮来满足自身生长需要,致使自养硝化的底物减 少,微生物需要与作物争夺氮素,最终导致秸秆分解缓慢,长期以往就会使土壤有机质积累降低[24],本文中长 期的秸秆还田对土壤有机碳固定的增加效应略微有所降低(-2.5%)证实了上述观点。因此亟待明确化肥、有 机肥和秸秆投入的阈值以及合理的投入比例。

这些管理实施对土壤有机碳的影响可能受到环境因素的影响。气候是调节土壤有机碳分布的主要驱动 力之一。一般来讲,温度上升会加速土壤中有机碳的分解^[4]。但也有学者^[5]指出,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^[6];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^[7]。而华北平 原地处东亚季风区,属半干旱半湿润气候,降水和温度等气候要素具有明显的季节和年际波动^[23]。降水和增 温在华北平原有利于土壤微生物的活性增加,进而加速进入土壤中的腐殖质和其他营养元素的转化积累。

土壤质地以及相关理化性质对土壤有机碳固持有显著的调控作用。譬如,土壤有机碳与粘粒含量密切相关^[65];有机碳矿化速率可能随着粘土浓度的增加而降低^[66]。值得注意的是,相对于其他两种措施,秸秆还田在粘土、壤土含量较大的土壤中的碳汇作用增加不显著,甚至有所降低,相反,在沙土含量较大的土壤,秸秆还田的增汇效应则提高了 22.3%,这可能是由于秸秆还田对土壤的物理状况有积极的影响,可改善土壤孔隙度和非毛管孔隙度,降低土壤容重,增加土壤团聚体含量,增强土壤保水蓄水性能和粘土渗透性。较低的初始有机碳储量是有机碳固存量增大的前提条件^[9-10,12]。因此,本文中化肥和有机肥施用对土壤有机碳积累的促进效应在初始碳氮磷含量较高土壤中都有所降低,特别是有机肥,其碳汇效应降低了 31.0%—39.0%。而在初始土壤总氮总磷含量较高的土壤中,秸秆还田的增汇效应相应提高了 38.1%和 21.6%。土壤 pH 被认为是影响土壤有机质周转率的主要因素,但其影响模式尚不清楚^[67]。一般认为土壤 pH 可通过影响有机碳的溶解度,并间接改变微生物的生长、活性和群落结构,从而改变作物秸秆和有机碳的分解速率结构^[68-69]。可溶性有机碳的含量可能随着酸度的增加而增加^[70-71]。在本研究中,华北平原农田管理措施在弱酸性和中性土壤中的碳汇效应比碱性土壤高,特别是施用有机肥,其效应提高了 38.1%。而土壤有机碳跟容重则呈现负相关的关系^[72]。在本研究中,华北平原农田土壤容重大于 1.4 g/kg 时,化肥、有机肥和秸秆还田对土壤有机碳的 累积效应都将下降,其中有机肥的碳汇效应下降达到 40.9%,也证实了上述观点。

3.3 土壤有机碳积累的可持续发展道路

在过去的几十年里,中国农田有机物输入经历了3个不同的阶段,这些阶段与社会经济的发展密切相 关^[9]。第一个阶段的特征是在 20 世纪 70 年代后期有机物输入较少。第二阶段(1980—1999)是由化学施肥 导致的根系生物量的稳定增加所决定的。第三阶段在1999年后,为了促进作物残留返还的实施,中国政府对 农民采取了各种经济激励措施和示范项目,导致越来越多的作物残留被返还到土壤中。前两个阶段主要是经 济驱动。第一阶段,农家肥产量有限,作物秸秆燃料/饲料利用率低是主要原因。第二阶段是由增加肥料投入 所带来的植物生产力和根系生物量的提高所驱动的。第三阶段主要是政策驱动阶段。政策强制执行的地上 残余物返还导致了更多的有机碳投入。2000年以来,秸秆碳投入的快速增加对碳固存的效益最大。华北平 原的土壤碳含量明显低于中国的其他地区[9],20世纪60年代开始经历了一个快速下降,在80年代末达到最 低水平(图9),这与其他人的研究结果一致^[12,72-73]。通过采用增施化肥、有机肥和加大秸秆还田率,华北平 原农田土壤有机碳储量自90年代开始稳步上升(图9)。根据前人研究预测,华北平原每年需要投入7254 kg/hm²的生物量来维持目前的土壤有机碳水平^[74],但当前每年的作物残茬投入量(9651 kg/hm²)超过了C的 积累需求[12]。根据本研究的研究发现,大于 30%的秸秆还田率使土壤有机碳固持效率下降了 22.9%。前人 研究结果也证实了随着 SOC 储量接近饱和水平,碳固存效率似乎可能会下降^[53,75-76]。目前,秸秆还田率已 达50%,未来生物体、秸秆成型燃料等也会是前景可期的温室气体减排途径^[3,12],而有机施肥和保护性耕作仍 处于较低水平。根据 Wang 等^[60]的研究,如果采用碳优化策略,华北平原土壤有机碳储量可达到 55 Mg/hm², 几乎是目前 SOC 密度(0-20 cm 14.56 Mg/hm²)的 3.8 倍。可见,未来的华北平原将是中国农田土壤有机碳 固存最有潜力的地区之一。在未来,无机和有机肥料的优化应用,随着保护性耕作的推广,可能是一条可行的 途径以满足对食物需求,同时继续扩大有机碳固存。

4 结论

本文利用荟萃分析、随机森林机器学习模型以及相关的土壤、气候和农业管理措施等模型遥感输入数据, 研究了 1981—2019 年间华北平原农田土壤有机碳的时空变化,主要结果如下: (1)1981—2019 年间华北平原 0—20 cm 农田有机碳储量约为(14.56±1.66) Mg C/hm²((523.10±79.36) Tg C),并且每年以 0.12 Mg C hm⁻² a⁻¹(5.94 Tg C/a)的固持率稳步增长,但进入 2000 年代后,趋势明显减缓为 3.5 Tg C/a。

(2) 华北平原大部分农田有机碳呈增加趋势, 仅河北省北部、山东省中部和东部部分地区农田土壤有机 碳减少。平均而言, 1981—2019 年, 京津冀地区、山东省以及河南省的农田有机碳储量的积累速率分别为 0.78、2.88 和 2.28 Tg C/a。到 2010 年代, 京津冀地区、山东省以及河南省的农田有机碳储量分别稳定在 (176.25±12.99) Tg C、(209.47±15.35) Tg C 和(216.90±12.50) Tg C。

(3) 华北平原常规农田管理措施对土壤有机碳累积的贡献平均为 25.1%。值得注意的是,不管是化肥、 有机肥还是生物碳输入,当投入量超过农作物和土壤微生物对碳、氮的需求时,土壤有机碳累积效应会显著下 降。亟待明确化肥、有机肥和秸秆投入的阈值以及合理的投入比例。

总之,在土壤和气候环境以及农业管理措施共同影响下,1981—2019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起 到了积极作用。

参考文献(References):

- [1] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. Science, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [2] Robert M. Soil carbon sequestration for improved land management. 2001.
- [3] 王国成,许晶晶,李婷婷,张稳. 1980—2010年华北平原农田土壤有机碳的时空变化. 气候与环境研究, 2015, 20(5): 491-499.
- [4] Post W M, Emanuel W R, Zinke P J, Stangenberger A G. Soil carbon pools and world life zones. Nature, 1982, 298(5870): 156-159.
- [5] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. Nature, 2006, 440(7081): 165-173.
- [6] Cavelier J, Penuela M C. Soil respiration in the clud forest and dry deciduous forest of serrania de macuira, Colombia. Biotropica, 1990, 22 (4): 346.
- [7] Zhang L H, Chen Y N, Zhao R F, Li W H. Significance of temperature and soil water content on soil respiration in three desert ecosystems in Northwest China. Journal of Arid Environments, 2010, 74(10): 1200-1211.
- [8] West T O, Post W M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation. Soil Science Society of America Journal, 2002, 66(6): 1930-1946.
- [9] Zhao Y C, Wang M Y, Hu S J, Zhang X D, Ouyang Z, Zhang G L, Huang B, Zhao S W, Wu J S, Xie D T, Zhu B, Yu D S, Pan X Z, Xu S X, Shi X Z. Economics- and policy-driven organic carbon input enhancement dominates soil organic carbon accumulation in Chinese croplands. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(16): 4045-4050.
- [10] Bai X X, Huang Y W, Ren W, Coyne M, Jacinthe P A, Tao B, Hui D F, Yang J, Matocha C. Responses of soil carbon sequestration to climatesmart agriculture practices: a meta-analysis. Global Change Biology, 2019, 25(8): 2591-2606.
- [11] Wang G C, Luo Z K, Wang E L, Huang Y. Contrasting effects of agricultural management on soil organic carbon balance in different agricultural regions of China. Pedosphere, 2013, 23(6): 717-728.
- [12] Han D R, Wiesmeier M, Conant R T, Kühnel A, Sun Z G, Kögel-Knabner I, Hou R X, Cong P F, Liang R B, Ouyang Z. Large soil organic carbon increase due to improved agronomic management in the North China Plain from 1980s to 2010s. Global Change Biology, 2018, 24(3): 987-1000.
- [13] Li C S, Frolking S, Harriss R. Modeling carbon biogeochemistry in agricultural soils. Global Biogeochemical Cycles, 1994, 8(3): 237-254.
- [14] Jenkinson D S. The turnover of organic carbon and nitrogen in soil. Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences, 1990, 329(1255): 361-368.
- [15] Keating B A, Carberry P S, Hammer G L, Probert M E, Robertson M J, Holzworth D, Huth N I, Hargreaves J N G, Meinke H, Hochman Z, McLean G, Verburg K, Snow V, Dimes J P, Silburn M, Wang E, Brown S, Bristow K L, Smith C J. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. European Journal of Agronomy, 2003, 18(3/4): 267-288.
- [16] Ma Y X, Minasny B, Wu C F. Mapping key soil properties to support agricultural production in Eastern China. Geoderma Regional, 2017, 10: 144-153.
- [17] Zhou T, Geng Y J, Chen J, Pan J J, Haase D, Lausch A. High-resolution digital mapping of soil organic carbon and soil total nitrogen using DEM derivatives, Sentinel-1 and Sentinel-2 data based on machine learning algorithms. Science of the Total Environment, 2020, 729: 138244.
- [18] Hamzehpour N, Shafizadeh-Moghadam H, Valavi R. Exploring the driving forces and digital mapping of soil organic carbon using remote sensing and soil texture. CATENA, 2019, 182: 104141.

- [19] 高利伟,马林,张卫峰,王方浩,马文奇,张福锁.黄淮海三省两市作物秸秆及其养分资源利用现状分析.中国农学通报,2009,25 (11):186-193.
- [20] 易中懿. 2008 中国农业机械化年鉴. 北京:中国农业科学技术出版社, 2008.
- [21] Zhang W, Yu Y Q, Huang Y, Li T T, Wang P. Modeling methane emissions from irrigated rice cultivation in China from 1960 to 2050. Global Change Biology, 2011, 17(12): 3511-3523.
- [22] Shi W J, Tao F L, Liu J Y. Changes in quantity and quality of cropland and the implications for grain production in the Huang-Huai-Hai Plain of China. Food Security, 2013, 5(1); 69-82.
- [23] Ren G Y, Zhou Y Q, Chu Z Y, Zhou J X, Zhang A Y, Gou J, Liu X F. Urbanization effects on observed surface air temperature trends in North China. Journal of Climate, 2008, 21(6): 1333-1348.
- [24] 王敬,程谊,蔡祖聪,张金波.长期施肥对农田土壤氮素关键转化过程的影响.土壤学报,2016,53(2):292-304.
- [25] Shangguan W, Dai Y J, Duan Q Y, Liu B Y, Yuan H. A global soil data set for earth system modeling. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2014, 6(1): 249-263.
- [26] 阳坤,何杰.中国区域地面气象要素驱动数据集(1979-2018).国家青藏高原科学数据中心,2019. https://doi.org/10.11888/ AtmosphericPhysics.tpe.249369.file.
- [27] Morgenstern O, Hegglin M, Rozanov E. Review of the global models used within phase 1 of the Chemistry-Climate Model Initiative (CCMI). Geoscientific Model Development, 2017, 10(2): 639-671.
- [28] Jing W L, Yao L, Zhao X D, Zhang P Y, Liu Y, Xia X L, Song J, Yang J, Li Y, Zhou C H. Understanding terrestrial water storage declining trends in the Yellow River Basin. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2019, 124(23): 12963-12984.
- [29] Jing W L, Zhao X D, Yao L, Jiang H, Xu J H, Yang J, Li Y. Variations in terrestrial water storage in the Lancang-Mekong River Basin from GRACE solutions and land surface model. Journal of Hydrology, 2020, 580: 124258.
- [30] Zhang B W, Tian H Q, Lu C Q, Dangal S R S, Yang J, Pan S F. Global manure nitrogen production and application in cropland during 1860-2014: a 5 arcmin gridded global dataset for Earth system modeling. Earth System Science Data, 2017, 9(2): 667-678.
- [31] Sulla-Menashe D, Friedl M. User Guide to collection 6 MODIS land cover (MCD12Q1 and MCD12C1) product. USGS: Reston, VA, USA, 2018.
- [32] Hurtt G C, Chini L P, Frolking S, Betts R A, Feddema J, Fischer G, Fisk J P, Hibbard K, Houghton R A, Janetos A, Jones C D, Kindermann G, Kinoshita T, Goldewijk K K, Riahi K, Shevliakova E, Smith S, Stehfest E, Thomson A, Thornton P, van Vuuren D P, Wang Y P. Harmonization of land-use scenarios for the period 1500-2100: 600 years of global gridded annual land-use transitions, wood harvest, and resulting secondary lands. Climatic Change, 2011, 109(1): 117.
- [33] Eyring V, Bony S, Meehl G A, Senior C A, Stevens B, Stouffer R J, Taylor K E. Overview of the Coupled Model Intercomparison Project Phase 6 (CMIP6) experimental design and organization. Geoscientific Model Development, 2016, 9(5): 1937-1958.
- [34] Le Quéré C, Andrew R M, Canadell J G, et al. Global carbon budget 2016. Earth System Science Data, 2016, 8(2): 605-649.
- [35] Solomon S, Manning M, Marquis M, et al. Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC. Cambridge university press, 2007.
- [36] Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology. Ecology, 1999, 80(4): 1150-1156.
- [37] Thorlund K, Wetterslev J, Awad T, Thabane L, Gluud C. Comparison of statistical inferences from the DerSimonian-Laird and alternative randomeffects model meta-analyses - an empirical assessment of 920 Cochrane primary outcome meta-analyses. Research Synthesis Methods, 2011, 2(4): 238-253.
- [38] Team R C. A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2020. https://www.R-project.org/.
- [39] Viechtbauer W. Conducting meta-analyses in R with the meta for package. Journal of statistical software, 2010, 36(3): 1-48.
- [40] Breiman L. Random forests. Machine Learning, 2001, 45(1): 5-32.
- [41] Liaw A, Wiener M. Classification and regression by randomForest. R news, 2002, 2(3): 18-22.
- [42] Díaz-Uriarte R, Alvarez de Andrés S. Gene selection and classification of microarray data using random forest. BMC Bioinformatics, 2006, 7: 3.
- [43] Arun K, Langmead C. Structure based chemical shift prediction using Random Forests non-linear regression//Proceedings of the 4th Asia-Pacific Bioinformatics Conference. 2006; 317-326.
- [44] Grimm R, Behrens T, Märker M, Elsenbeer H. Soil organic carbon concentrations and stocks on Barro Colorado Island—digital soil mapping using Random Forests analysis. Geoderma, 2008, 146(1/2): 102-113.
- [45] Breiman L, Cutler A. Random forest manual V4.0, (2003). ftp://ftp.stat.berkeley.edu/pub/users/breiman/Using random forests v4.0.pdf.
- [46] Wiesmeier M, Barthold F, Blank B, Kögel-Knabner I. Digital mapping of soil organic matter stocks using Random Forest modeling in a semi-arid steppe ecosystem. Plant and Soil, 2011, 340(1): 7-24.http://dx.doi.org/10.1007/s11104-010-0425-z
- [47] Huang T, Gao B, Christie P, Ju X. Net global warming potential and greenhouse gas intensity in a double-cropping cereal rotation as affected by nitrogen and straw management. Biogeosciences, 2013, 10(12): 7897-7911.
- [48] Yan X Y, Cai Z C, Wang S W, Smith P. Direct measurement of soil organic carbon content change in the croplands of China. Global Change Biology, 2011, 17(3): 1487-1496.
- [49] 刘纪远,王绍强,陈镜明,刘明亮,庄大方. 1990—2000年中国土壤碳氮蓄积量与土地利用变化. 地理学报, 2004, 59(4): 483-496.

[50]	Yu Y Y, Guo Z T, Wu H B, Kahmann J A, Oldfield F. Spatial changes in soil organic carbon density and storage of cultivated soils in China from
	1980 to 2000. Global Biogeochemical Cycles, 2009, 23(2): 2008GB003428.

- [51] Huang Y, Sun W J. Changes in topsoil organic carbon of croplands in mainland China over the last two decades. Chinese Science Bulletin, 2006, 51(15): 1785-1803.
- [52] Xie Z B, Zhu J G, Liu G, Cadisch G, Hasegawa T, Chen C M, Sun H F, Tang H Y, Zeng Q. Soil organic carbon stocks in China and changes from 1980s to 2000s. Global Change Biology, 2007, 13(9): 1989-2007.
- [53] Sun W J, Huang Y, Zhang W, Yu Y Q. Carbon sequestration and its potential in agricultural soils of China. Global Biogeochemical Cycles, 2010, 24(3):2009GB003484.
- [54] Pan G X, Xu X W, Smith P, Pan W N, Lal R. An increase in topsoil SOC stock of China's croplands between 1985 and 2006 revealed by soil monitoring. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2010, 136(1/2): 133-138.
- [55] Zheng J F, Cheng K, Pan G X, Pete S, Li L Q, Zhang X H, Zheng J W, Han X J, Du Y L. Perspectives on studies on soil carbon stocks and the carbon sequestration potential of China. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(35): 3748-3758.
- [56] Lu F, Wang X K, Han B, Ouyang Z Y, Duan X N, Zheng H, Miao H. Soil carbon sequestrations by nitrogen fertilizer application, straw return and no-tillage in China's cropland. Global Change Biology, 2009, 15(2): 281-305.
- [57] 吴乐知, 蔡祖聪. 基于长期试验资料对中国农田表土有机碳含量变化的估算. 生态环境, 2007, 16(6): 1768-1774.
- [58] Tian H Q, Melillo J, Lu C Q, Kicklighter D, Liu M L, Ren W, Xu X F, Zhang C, Pan S F, Liu J Y, Running S. China's terrestrial carbon balance: contributions from multiple global change factors. Global Biogeochemical Cycles, 2011, 25(1): 2010GB003838.
- [59] 林飞燕. 中国农田土壤固碳增汇潜力的秸秆还田措施模拟研究[D]. 武汉:华中师范大学, 2013.
- [60] Wang G C, Li T T, Zhang W, Yu Y Q. Impacts of agricultural management and climate change on future soil organic carbon dynamics in North China Plain. PLoS One, 2014, 9(4): e94827.
- [61] Zhu L. China's carbon emissions report 2015. Sustainability Science Program and Energy Technology Innovation Policy research group, Belfer Center Discussion Paper, 2015, 2: 8.
- [62] Li C, Zhuang Y, Frolking S, Galloway J, Harriss R, Moore B, Schimel D, Wang X K. Modeling soil organic carbon change in croplands of China. Ecological Applications, 2003, 13(2): 327-336.
- [63] Tang H J, Qiu J J, van Ranst E, Li C S. Estimations of soil organic carbon storage in cropland of China based on DNDC model. Geoderma, 2006, 134(1/2): 200-206.
- [64] 肖新,朱伟,肖靓,邓艳萍,赵言文,汪建飞.适宜的水氮处理提高稻基农田土壤酶活性和土壤微生物量碳氮.农业工程学报,2013,29 (21):91-98.
- [65] Meersmans J, Martin M P, De Ridder F, Lacarce E, Wetterlind J, De Baets S, Le Bas C, Louis B P, Orton T G, Bispo A, Arrouays D. A novel soil organic C model using climate, soil type and management data at the national scale in France. Agronomy for Sustainable Development, 2012, 32(4): 873-888.
- [66] Sainju U M, Singh B P, Whitehead W F. Long-term effects of tillage, cover crops, and nitrogen fertilization on organic carbon and nitrogen concentrations in sandy loam soils in Georgia, USA. Soil and Tillage Research, 2002, 63(3/4): 167-179.
- [67] van Bergen P F, Nott C J, Bull I D, Poulton P R, Evershed R P. Organic geochemical studies of soils from the Rothamsted Classical Experiments—IV. Preliminary results from a study of the effect of soil pH on organic matter decay. Organic Geochemistry, 1998, 29(5/6/7): 1779-1795.
- [68] Aciego Pietri J C, Brookes P C. Substrate inputs and pH as factors controlling microbial biomass, activity and community structure in an arable soil.
 Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(7): 1396-1405.
- [69] Wang X J, Butterly C R, Baldock J A, Tang C X. Long-term stabilization of crop residues and soil organic carbon affected by residue quality and initial soil pH. Science of the Total Environment, 2017, 587/588; 502-509.
- [70] Kemmitt S J, Wright D, Goulding K W T, Jones D L. pH regulation of carbon and nitrogen dynamics in two agricultural soils. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38(5): 898-911.
- [71] Willett V B, Reynolds B A, Stevens P A, Ormerod S J, Jones D L. Dissolved organic nitrogen regulation in freshwaters. Journal of Environmental Quality, 2004, 33(1): 201-209.
- [72] 柴华,何念鹏.中国土壤容重特征及其对区域碳贮量估算的意义.生态学报,2016,36(13):3903-3910.
- [73] Wang S Q, Tian H Q, Liu J Y, Pan S F. Pattern and change of soil organic carbon storage in China: 1960s—1980s. Tellus B, 2003, 55(2): 416-427.
- [74] 王文静,魏静,马文奇,杨玉荣,郭彩娟. 氮肥用量和秸秆根茬碳投入对黄淮海平原典型农田土壤有机质积累的影响. 生态学报, 2010, 30(13): 3591-3598.
- [75] Stewart C E, Paustian K, Conant R T, Plante A F, Six J. Soil carbon saturation: implications for measurable carbon pool dynamics in long-term incubations. Soil Biology and Biochemistry, 2009, 41(2): 357-366.
- [76] Wiesmeier M, Hübner R, Spörlein P, Geuß U, Hangen E, Reischl A, Schilling B, von Lützow M, Kögel-Knabner I. Carbon sequestration potential of soils in southeast Germany derived from stable soil organic carbon saturation. Global Change Biology, 2014, 20(2): 653-665.