

DOI: 10.11766/trxb201601310626

人为与环境因子对农田土壤有机质影响的比较研究 ——以典型黑土区和水稻土区为例*

郭乃嘉^{1, 2} 史学正^{1, 2} 赵永存^{1, 2†} 徐胜祥^{1, 2} 王美艳^{1, 2} 孔超^{1, 2}

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

(2 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 目前关于土壤有机质(SOM)影响因子的研究多涉及单一或少量因素, 缺少环境因子与农田管理相结合的详细分析。为综合分析环境和人为因素对农田SOM的影响, 利用2011年采集于典型黑土样区的281个样点和水稻土样区的193个样点, 结合相应农田管理调查数据, 采用双样本Kolmogorov-Smirnov检验、Kendall τ 相关分析、随机森林模型进行对比研究。结果表明, 通过综合环境与农田管理措施数据, 随机森林方法可以较好地预测农田SOM含量, 对其变异的解释度达到80%以上。人为与环境因素对SOM变异的解释能力在两样区间存在差异。SOM含量水平在黑土区受环境因子影响为主, 在水稻土区受人为因子主导。相对重要性分析显示黑土区水热条件、黏粒含量影响显著, 水稻土区田间管理作用明显。

关键词 土壤有机质; 影响因子; 农田管理; 随机森林模型

中图分类号 S158.9 **文献标识码** A

土壤有机质(SOM)是衡量土壤肥力的重要指标, 其含量水平能够影响作物产量^[1], 与粮食安全密切相关。同时, 土壤能够固定大量的碳^[2], 缓解温室气体排放对环境的影响, SOM含量是土壤有机碳(SOC)储量的直接反映。在区域层面识别农田SOM的主要影响因子、分析各因子的作用大小与方式, 对于指导农田管理, 促进粮食增产和土壤固碳具有重要意义。

目前区域层面关于SOM影响因子的研究, 按所分析影响因子的性质可分为三类。第一类基于气候、地形和土地利用数据进行研究。Hobley等^[3]在澳大利亚新南威尔士地区的研究表明降水通过影响植被初级净生产力、气温通过影响微生物活性、

土地利用通过影响作物产量和土壤混合对SOM产生作用。Follett等^[4]在美国大平原、Xiong等^[5]在美国佛罗里达采用气候和土地利用数据研究了SOC的影响因子。此类研究侧重于环境因子, 人为因素的影响只能通过土地利用粗略衡量, 不能定量反映人为因素对SOM的影响。第二类研究主要采用文献数据以Meta分析方法评估田间管理措施对SOM的影响。Tian等^[6]利用1980—2012年间的95篇文献、582对样点分析了长期施肥与秸秆还田对中国水稻土SOC的影响, 结果表明肥料施用、秸秆还田均能显著提高稻田SOC含量。采用此类方法, Alvarez^[7]研究了氮肥施用和保护性耕作对SOC储量的影响, Ogle等^[8]研究了农用地利用类型和农

* 国家自然科学基金项目(41571209, 41301242)和中国科学院战略性先导科技专项——应对气候变化的碳收支认证及相关问题(XDA05050509)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (Nos. 41571209 and 41301242) and the Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences—Climate Change: Carbon Budget and Relevant Issues (No. XDA05050509)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: yczhao@issas.ac.cn

作者简介: 郭乃嘉(1987—), 男, 河南新乡人, 博士研究生, 主要从事资源环境与遥感信息研究。E-mail: njguo@issas.ac.cn

收稿日期: 2016-01-31; 收到修改稿日期: 2016-05-04; 优先数字出版日期(www.cnki.net): 2016-06-13

田管理措施在不同气候条件下对SOC储量的影响。此类研究侧重分析人为因素的影响,缺少与环境因子的结合。同时,其结果易受数据来源和精度的影响,存在一定程度的不确定性。与前两类研究不同,基于农田管理调查数据,结合区域内气候、地形等因素,分析SOM的主要影响因子,其结果更加全面、可靠。Goidts等^[9-10]和Meersmans等^[11]在比利时将土壤数据与农田管理问卷调查数据相结合,对SOM的演化进行了研究,结果表明农田管理措施、土壤黏粒含量和降水量是该区SOM演变的主导因子。目前在区域层面采用此类方法,综合分析人为与环境因子对我国农田SOM的影响、定量各影响因子相对重要性的研究仍十分缺乏。

随机森林作为一种机器学习方法已被应用于SOC与影响因子的分析^[12-14]。该方法能够反映土壤属性与各种因子间复杂的相互作用,提高影响因子对SOM的解释能力,并能定量各因子的相对重要性。基于目前研究的不足和新分析方法的优点,本文使用农田管理调查资料、气象和地形等数据,以

随机森林方法构建SOM与影响因素间的模型,定量评估环境和农田管理措施对SOM的影响,并对不同样区农田SOM主要影响因素的差异进行探讨。

1 材料与方法

1.1 采样设计

本文选择东北典型黑土区和华中典型水稻土区的农田进行研究(图1)。这两个区域是我国重要的粮食产区,涵盖了单季玉米、单季大豆、单季水稻和稻—麦轮作等典型种植制度和与之相应的施肥、耕作模式。能够反映旱地和水田两种土地利用方式下各种田间管理措施对农田SOM的影响。同时,两区域分属不同气候带,具有不同的水热条件及成土环境,能够充分反映气候、地形对农田SOM的影响。

土壤样点位置分两步确定:首先,在两区域中分别选择土壤类型以黑土和水稻土为主、能代表周边较大区域地貌、土地利用和作物轮作类型

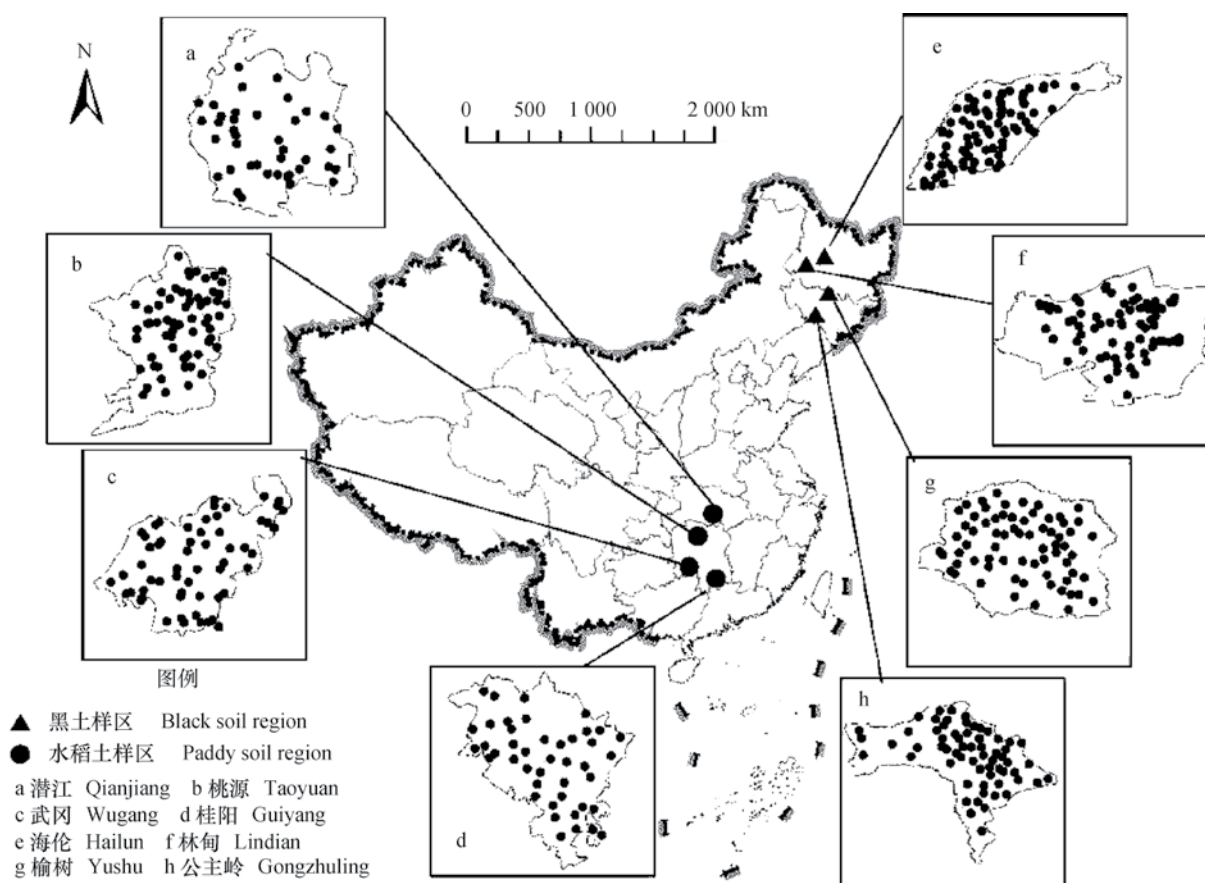


图1 采样点分布图

Fig. 1 Distribution of soil sampling sites

的区县。在保持两样区南北空间跨度相近的基础上,黑土样区选择了海伦(126.8°E, 47.4°N)、林甸(124.8°E, 47.1°N)、榆树(126.6°E, 44.9°N)和公主岭(126.4°E, 43.9°N)4个县,水稻土样区选择了潜江(112.7°E, 30.3°N)、桃源(111.2°E, 28.9°N)、武冈(110.6°E, 26.7°N)和桂阳(112.7°E, 25.7°N)4个县。在所选县内以土壤图为依据,采用土壤类型—土地利用联合单元法进行布点。各土壤类型样点数目按面积比例进行分配且保证空间分布大致均匀。总计布设样点474个,其中黑土样区281个,水稻土样区193个,采样点空间分布如图1所示。

1.2 数据来源

土壤样品采集于2011年秋季,采样时依据样点布设位置,在选定样地10 m × 10m范围的方格内采集中心点及其四角表层0~20cm的土壤并进行混合,以GPS记录下中心点经纬度坐标。样品经风干、研磨和过筛等处理,采用重铬酸钾(K₂Cr₂O₇)氧化—滴定法测定有机质含量、吸管法测定黏粒含量(<0.002mm)、电位法测定pH(土水比1:2.5)^[15]。

农田管理数据的收集与土壤样品的采集同时展开。通过走访农户调查获得474个采样地块近30年的种植制度,主要作物的播种、收获时间,秸秆的还田比例、还田年限和还田方式,近3~5年的平均产量,耕作、收割方式和耕作频率,有机肥、化肥的年平均施用量、施用时期和施用方式,以及灌溉水源等信息。调查结果中产量、施肥等数据对照各县统计年鉴进行了核实。

分别从耕作、施肥、灌溉和秸秆还田四个方面选取指标表征农田管理状况。其中选取耕作频率与耕作深度衡量农田的耕作强度,选择折纯后每公顷年施肥总量衡量施肥状况,以是否存在降水之外的水源为指标衡量灌溉条件优劣,以秸秆还田年份内累积的还田比例表征还田的强度,其计算公式如下:

$$RI = \sum_{i=1}^n P_i \quad (1)$$

式中,RI为多年秸秆累积还田比例, n 为秸秆还田年限, P_i 为每年秸秆还田比例。

气候因子选择对作物生长和微生物活动有重要影响的年均温(MAT)和年降水(MAP)作为指标,数据源于中国气象科学数据共享服务网

(<http://data.cma.gov.cn>)。

地形因子选择可能影响SOM空间变异性的海拔、坡度和地形湿度指数(TWI)为主要指标。海拔数据源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),空间分辨率为90m的DEM。以DEM为基础,通过ArcGIS计算得出坡度与TWI值,其中TWI的计算方法为:

$$TWI = \ln\left(\frac{CA}{\tan\alpha}\right) \quad (2)$$

式中,CA为汇水区面积, α 为坡度。

土壤理化性质通常会受到母岩的影响,因此使用ArcGIS从中国1:50万地质图提取采样地块对应的母岩类型。

1.3 统计分析

采用Shapiro-Wilk检验数据正态性。比较两区域SOM及影响因素间是否存在显著性差异时,数据符合正态分布的采用t检验,否则使用双样本Kolmogorov-Smirnov检验。采用Kendall τ 分析各因子与SOM间的相关关系。

1.4 模型构建

在相关分析的基础上,使用与SOM显著相关的全部因子以随机森林方法建模,得到总模型对SOM方差的解释度。去除其中田间管理措施后,以相同方法建模,得到环境因子对SOM方差的解释度。二者之差表征了单独由田间管理措施对SOM产生的影响。以同样的方法可以得到田间管理措施对SOM方差的解释度和单独由环境因子对SOM产生影响的大小。所有统计分析与模型拟合均在R^[16]中完成。

2 结果与讨论

2.1 样区SOM含量及影响因素的比较

黑土样区SOM含量显著高于水稻土样区(表1),这是因为该区自然土壤有机质含量高、耕作历史相对较短,农田SOM含量受开垦前含量水平影响较大。

两样区相比,环境因子中除海拔之间外,其他因子间均有显著差异。黑土样区低温少雨,水稻土样区高温多雨。两样区地形以平原为主,平均海拔较低。但水稻土样区自北向南逐渐从长江中游平原过渡到江南丘陵,坡度有所增加,TWI下降。与黑土样区相比,水稻土样区降水量大,黏粒易向下迁移,且土壤表蚀强,表层土壤中黏粒含量低。南方

高温高湿的气候条件使得土壤脱硅富铝化严重,土壤有酸化趋势。

两区域农田管理措施的差异主要体现在秸秆还田和耕作两个方面。黑土样区每年只种一季作物,大部分区域未进行秸秆还田,少部分区域常年进行还田。水稻土样区单季作物与双季作物种植比例相当,各调查样地均实施秸秆还田,但还田年限及还田比例存在差异。耕作方面,黑土样区总体上每年在4月与7月各耕作一次,该区没有少耕或免耕的习惯。水稻土样区只在每季作物播种前进行耕作,由于部分地区种植单季稻导致平均每年的耕作次数低于黑土样区。两区域每年投入的肥料总量间无显著差异,但水稻土样区施肥量的变异性较大,可能是由于该区存在多种不同种植制度引起的。

2.2 SOM主要影响因子的筛选

采用Kendall τ 相关分析对影响SOM含量的主要因子进行筛选(表2)。结果表明两样区内与SOM相关的环境因子明显不同。黑土样区与SOM相关的环境因子是气候和黏粒含量。该区SOM随年均温降低而升高,虽然植物的生物量与SOM的分解速率均随温度升高而增加^[17],但分解速率增加更为明显。降水对SOM的作用主要通过影响作物生物量实现,充足的降水能够促进作物生物量的增长,有利于SOM的提升^[1, 3]。SOM与黏粒含量间正相关是因为黏粒有利于SOM的稳定^[18-20]。水稻土样区SOM与降水、地形显著相关,这与Dai和Huang^[21]的研究结果一致。该区海拔分布在22~672m之间,随海拔上升,土壤温度下降、湿度增加,SOM矿化速率减慢^[22]。坡度较大的区域海拔较高,耕作次数少,土壤扰动相对较小,有利于SOM累积。该样区母岩的分布与海拔、黏粒含量的分布存在相关性,随着母岩从老到新,海拔、黏粒含量均逐渐下降,SOM含量逐渐降低。

两样区中,SOM与施肥、秸秆还田、耕作次数显著相关,与灌溉水源正相关但不显著。施用肥料,特别是有机肥与化肥配合施用能够显著促进作物生长^[23],促进土壤中大团聚体的形成^[24-25],有利于SOM含量提升。秸秆还田在增加SOM来源的同时,还可以改善土壤物理结构,调节土壤C/N,有利于SOM稳定。SOM与施肥、秸秆还田在水稻土样区正相关,而在黑土样区负相关。这是由于黑土样区按照开垦年限的不同可分为南北两部分,北部开垦晚,SOM含量高于南部^[26],但施肥、秸秆还

田小于南部造成的。耕作对土壤带来的扰动能够破坏保护SOM的物理结构,促使其分解,耕作次数和耕作深度均与SOM含量显著负相关。灌溉主要通过作物的生物量影响SOM。黑土样区不同作物生物量对灌溉的响应程度存在差异^[27],两者相关性不显著;水稻土样区年降水量高(大于1300mm),能够满足作物生长的基本需求,因而灌溉的影响也不显著。

2.3 SOM主要影响因子的重要性评价

无论是黑土样区还是水稻土样区,综合利用环境和农田管理数据的随机森林模型均有很好的拟合效果,对农田SOM变异的解释度达到80%及以上(表3)。两区域对比可知,黑土样区模型的解释度更高,预测效果优于水稻土样区。这是由于该区地块面积大、以大规模机械耕作为主,田间管理相对一致,SOM与影响因子间关系突出,易被模型刻画。与之相比,水稻土样区地块相对破碎、耕作管理差异性大,模型以反映总体规律为主,对于细节刻画略有不足,解释度有所下降。

以环境数据和农田管理数据分别在两样区内单独构建模型。黑土样区中,两模型对SOM的解释度均达到60%以上,其中环境因子模型能解释更多的方差,说明该区SOM的影响因素以环境因子为主。水稻土样区则与之相反,以农田管理数据构建的模型解释度大于环境因子模型,表明该区人为因素作用强烈,是影响SOM的主导因子。

进一步对两区域模型解释的总方差进行分解(图2)。无论是黑土区还是水稻土区,模型所解释的方差中绝大部分比例为田间管理和环境因子所公有,表明SOM主要受二者共同作用的影响。

黑土样区去除共有部分后由人为因子独立解释的方差小于环境因子的1/4,进一步表明该区SOM受环境因子影响为主。与之相比,水稻土样区人为因子与环境因子间的共同作用减弱,田间管理对SOM的直接影响增强,去除公共部分后其独立解释的方差比例是环境因子的3.5倍,表明人为因子成为该区影响SOM含量的主导因素。

保持其他因子不变,将某一因子的数值打乱并重新建模,利用数据打乱前后模型预测精度的变化可以定量表征该因子对SOM影响的大小。采用该方法对两个区域内影响因子的相对重要性进行排序(图3)。结果表明,黑土样区年均温所具有的相对重要性超过了所有田间管理措施相对重要性之

表1 黑土样区和水稻土样区土壤有机质含量及影响因素的比较

Table 1 Comparison between the Black soil region and Paddy soil region in of SOM content and its affecting factors

黑土样区 Black soil region	有机质 SOM	年均温 MAT	年降水 MAP	海拔 Elevation	坡度 Slope	地形湿度指数 TWI	pH	黏粒含量 Clay	施肥量 Fertilization	秸秆还田比例 Straw	耕作频率 Tillage	耕作深度 Plough depth
	(g kg ⁻¹)	(°C)	(mm)	(m)	(°)			(%)	(kg hm ⁻² a ⁻¹)	return ratio	frequency	(cm)
均值Mean	34.72	4.7	484.1	189.7	0.78	10.4	6.96	30.85	371.7	0.57	2.5	18
标准差SD	13.82	1.3	49	30.7	0.61	2.1	1.06	9.83	187.7	1.83	0.6	2.8
水稻土样区 Paddy soil region	有机质 SOM	年均温 MAT	年降水 MAP	海拔 Elevation	坡度 Slope	地形湿度指数 TWI	pH	黏粒含量 Clay	施肥量 Fertilization	秸秆还田比例 Straw	耕作频率 Tillage	耕作深度 Plough depth
	(g kg ⁻¹)	(°C)	(mm)	(m)	(°)			(%)	(kg hm ⁻² a ⁻¹)	return ratio	frequency	(cm)
均值Mean	32.54**	17.5**	1335.0**	208	3.98**	9.6**	6.42**	12.7**	378	11.33**	1.6**	17.3*
标准差SD	9.72	0.3	113.8	174.8	4.38	2.6	1.19	4.02	204.6	7.35	0.5	3.5

注：*，**分别代表两样区同一因子在0.05和0.01水平上差异显著 Note: *，**significant at probability levels of 0.05 and 0.01, respectively

表2 黑土样区和水稻土样区土壤有机质与影响因素的相关性

Table 2 Relationships of SOM with its impact factors in the Black soil region and Paddy soil region

有机质 SOM	年均温 MAT	年降水 MAP	海拔 Elevation	坡度 Slope	地形湿度指数 TWI	母岩 Parent rock	pH	黏粒含量 Clay	施肥量 Fertilization	秸秆还田 比例 Straw	耕作频率 Tillage	耕作深度 Plough	灌溉水源 Irrigation
										return ratio	frequency	depth	source
黑土样区 Black soil region	-0.62**	0.15**	0.04	0.06	-0.02	0.05	-0.05	0.38**	-0.31**	-0.13**	-0.4**	-0.25**	0.09
水稻土样区 Paddy soil region	0.03	0.18**	0.28**	0.19**	-0.08	-0.32**	0.01	0.05	0.13**	0.12*	-0.15**	0.05	0.01

注：**表示在0.01水平极显著，*表示在0.05水平显著 Note: **indicates very significant at 0.01 levels, *indicates significant at 0.05 levels

表3 黑土样区和水稻土样区随机森林模型效果

Table 3 Performance of the random forest models in the Black soil region and Paddy soil region

黑土样区 Black soil region	模型使用变量 Variables used in model	决定系数 R^2	均方误差 MSE
总模型 Complete model	年均温, 年降水, 黏粒含量, 施肥量, 秸秆还田比例, 耕作频率, 耕作深度 MAT, MAP, Clay, Fertilization, Straw return ratio, Tillage frequency, Plough depth	0.90	18.30
环境因子模型 Environment factors model	年均温, 年降水, 黏粒含量 MAT, MAP, Clay	0.84	30.85
管理因子模型 Field management model	施肥量, 秸秆还田比例, 耕作频率, 耕作深度 Fertilization, Straw return ratio, Tillage frequency, Plough depth	0.62	72.26
水稻土样区 Paddy soil region	模型使用变量 Variables used in model	决定系数 R^2	均方误差 MSE
总模型 ^① Complete model	年降水, 施肥量, 秸秆还田比例, 海拔, 母岩, 坡度 MAP, Fertilization, Straw return ratio, Elevation, Parent rock, Slope	0.80	18.64
环境因子模型 Environment factors model	年降水, 海拔, 母岩, 坡度 MAP, Elevation, Parent rock, Slope	0.52	45.14
管理因子模型 Field management model	施肥量, 秸秆还田比例 Fertilization, Straw return ratio	0.72	26.64

①采用Genuer等^[28]提出的方法筛选变量, 耕作次数被从模型中剔除
Variables screened with the method proposed by Genuer et al.^[28]. Tillage frequency was excluded from the model

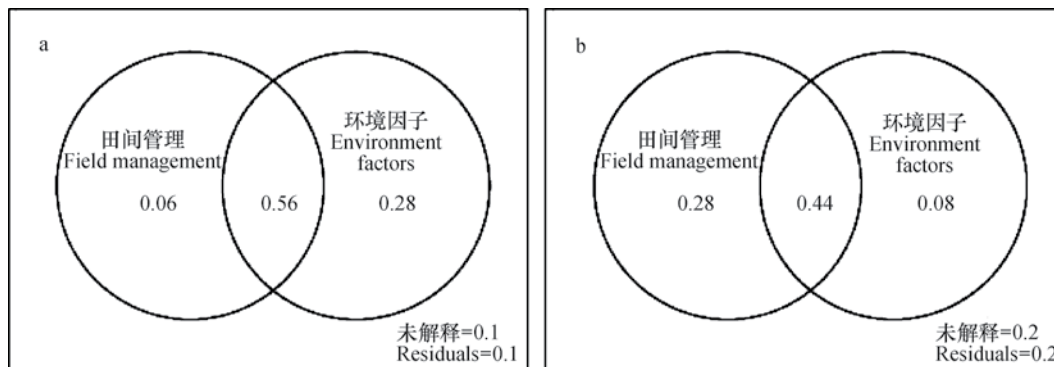


图2 模型解释方差的分解 (a.黑土样区, b.水稻土样区)

Fig. 2 Venn diagram presenting the variance partitions of SOM in the a. Black soil region, and b. Paddy soil region

和, 是该区内对SOM含量有决定性影响的因子。该区人为因子中, 施肥与耕作频率影响较强, 但相对重要性均低于10%。水稻土样区海拔和年降水量的相对重要性高, 均超过了30%。同黑土样区相比, 该区人为因子相对重要性增强, 施肥量的相对重要性超出平均期望值(图3中虚线所对应的值)。不同田间管理因素间相对重要性差异较大, 肥料施用的相对重要性约为秸秆还田重要性的3倍。

2.4 两样区主要影响因子对比

与黑土区的主要影响因子相比, 水稻土区有两

个突出的特点: 一是农田管理因素的重要性显著增加; 二是地方性因子作用突出。黑土区中, 水热条件决定了该区SOM高低的总体格局。水稻土区中, 农田管理、海拔、坡度和母岩等因子的作用通常在局部地区较为明显, SOM含量的变化是多种因素综合作用的结果。

两区域主导因素间的差异可能是由农田耕作年限、土地利用方式和开垦前自然土壤SOM含量水平造成的。水稻土样区土壤经过长期水耕熟化, 其性质同自然土壤已有较大差异, 水热条件的影响相对

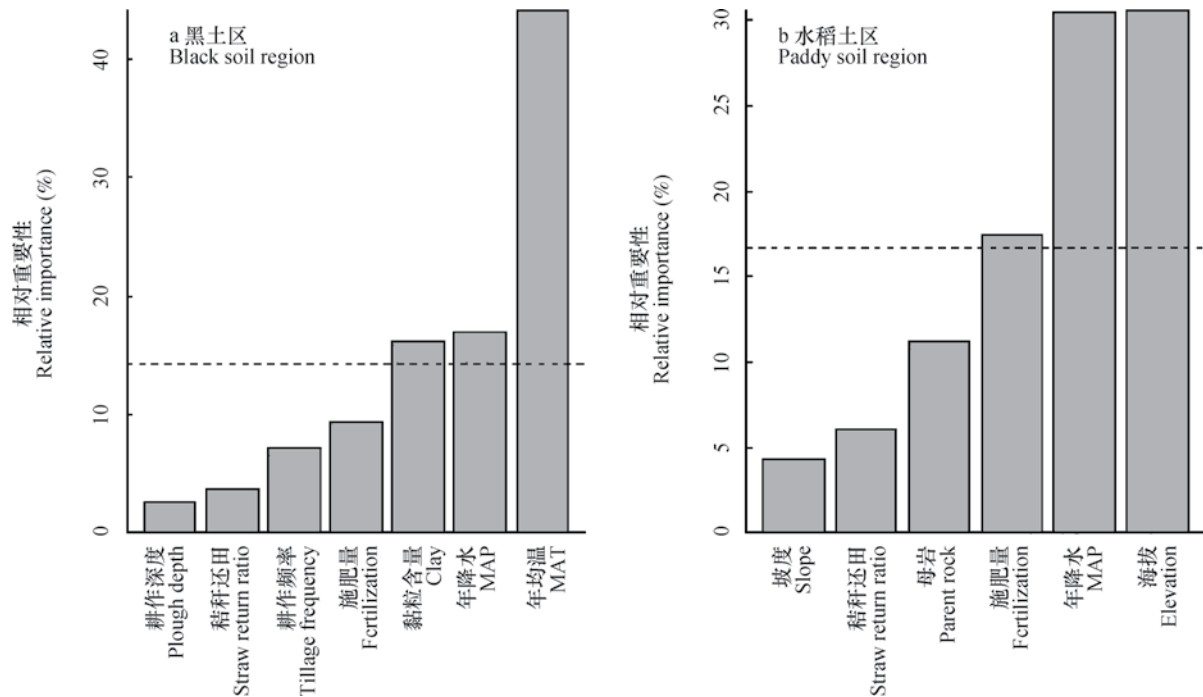


图3 影响因子相对重要性排序

Fig. 3 Rank of the affecting factors in relative importance in the a. Black soil region, and b. Paddy soil region

减弱。该区实施秸秆还田增加了土壤中有机的输入,对SOM含量具有直接的影响。黑土区开垦时间相对较短,农田管理的影响尚未充分显现,SOM含量水平仍受原先自然土壤性质的支配。随着黑土区农田耕作年限的增加,耕地土壤性质与自然土壤性质间的差异将逐渐增大,农田管理的作用也会随之凸显。

3 结论

本研究利用农田管理措施调查资料,结合气象、地形数据,使用随机森林方法,分析了典型黑土区和水稻土区农田SOM的主要影响因子。结果表明:黑土区环境因子对农田SOM的作用强于田间管理措施,水稻土区与之相反。黑土区气候、黏粒含量作用强烈,农田管理影响较小,水稻土区降水、地形影响显著,施肥、秸秆还田作用明显。本研究也表明,耕层SOM含量虽然易受人为活动影响而发生变化,但通过随机森林方法仍然可以得到较好的预测结果,其中关键是要整合耕层农田管理措施等因子。同时该方法识别出的农田SOM主控因素,可以为农田管理提供科学指导,也可作为进一步优化农田采样方案的基础。

参考文献

- [1] Pan G, Smith P, Pan W. The role of soil organic matter in maintaining the productivity and yield stability of cereals in China. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 129 (1): 344—348
- [2] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 2004, 304 (5677): 1623—1627
- [3] Hobley E, Wilson B, Wilkie A, et al. Drivers of soil organic carbon storage and vertical distribution in eastern Australia. *Plant and Soil*, 2015, 390 (1): 111—127
- [4] Follett R F, Stewart C E, Pruessner E G. Great plains climate and land-use effects on soil organic carbon. *Soil Science Society of America Journal*, 2015, 79 (1): 261—271
- [5] Xiong X, Grunwald S, Myers D B, et al. Interaction effects of climate and land use/land cover change on soil organic carbon sequestration. *Science of the Total Environment*, 2014, 493: 974—982
- [6] Tian K, Zhao Y, Xu X, et al. Effects of long-term fertilization and residue management on soil organic carbon changes in paddy soils of China: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 204: 40—50
- [7] Alvarez R. A review of nitrogen fertilizer and

- conservation tillage effects on soil organic carbon storage. *Soil Use and Management*, 2005, 21 (1): 38—52
- [8] Ogle S M, Breidt F J, Paustian K. Agricultural management impacts on soil organic carbon storage under moist and dry climatic conditions of temperate and tropical regions. *Biogeochemistry*, 2005, 72 (1): 87—121
- [9] Goidts E, van Wesemael B. Regional assessment of soil organic carbon changes under agriculture in southern Belgium (1955—2005). *Geoderma*, 2007, 141 (3/4): 341—354
- [10] Goidts E, van Wesemael B, van Oost K. Driving forces of soil organic carbon evolution at the landscape and regional scale using data from a stratified soil monitoring. *Global Change Biology*, 2009, 15 (12): 2981—3000
- [11] Meersmans J, van Wesemael B, Goidts E, et al. Spatial analysis of soil organic carbon evolution in Belgian croplands and grasslands, 1960—2006. *Global Change Biology*, 2011, 17 (1): 466—479
- [12] Grimm R, Behrens T, Märker M, et al. Soil organic carbon concentrations and stocks on Barro Colorado island—digital soil mapping using random forests analysis. *Geoderma*, 2008, 146 (1/2): 102—113
- [13] Were K, Bui D T, Dick Ø B, et al. A comparative assessment of support vector regression, artificial neural networks, and random forests for predicting and mapping soil organic carbon stocks across an afro-montane landscape. *Ecological Indicators*, 2015, 52: 394—403
- [14] Wiesmeier M, Barthold F, Spörlein P, et al. Estimation of total organic carbon storage and its driving factors in soils of Bavaria (southeast Germany). *Geoderma Regional*, 2014, 1: 67—78
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- Lu R K. Analytical methods for soil and agro-chemistry (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000
- [16] R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2015
- [17] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. *Ecological Applications*, 2000, 10 (2): 423—436
- [18] Six J, Conant R, Paul E, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 2002, 241 (2): 155—176
- [19] Mikutta R, Kleber M, Torn M S, et al. Stabilization of soil organic matter: Association with minerals or chemical recalcitrance? *Biogeochemistry*, 2006, 77 (1): 25—56
- [20] Rumpel C, Eusterhues K, Kögel-Knabner I. Non-cellulosic neutral sugar contribution to mineral associated organic matter in top- and subsoil horizons of two acid forest soils. *Soil Biology & Biochemistry*, 2010, 42 (2): 379—382
- [21] Dai W, Huang Y. Relation of soil organic matter concentration to climate and altitude in zonal soils of China. *Catena*, 2006, 65 (1): 87—94
- [22] 尚斌, 邹焱, 徐宜民, 等. 贵州中部山区植烟土壤有机质含量与海拔和成土母质之间的关系. *土壤*, 2014, 46 (3): 446—451
- Shang B, Zou Y, Xu Y M, et al. Relationship between SOM contents of tobacco fields and elevation and parent materials in central region of Guizhou Province (In Chinese). *Soils*, 2014, 46 (3): 446—451
- [23] 龚伟, 颜晓元, 王景燕. 长期施肥对土壤肥力的影响. *土壤*, 2011, 43 (3): 336—342
- Gong W, Yan X Y, Wang J Y. Effect of long-term fertilization on soil fertility (In Chinese). *Soils*, 2011, 43 (3): 336—342
- [24] 李凯, 窦森, 韩晓增, 等. 长期施肥对黑土团聚体中腐殖物质组成的影响. *土壤学报*, 2010, 47 (3): 579—583
- Li K, Dou S, Han X Z, et al. Effects of long-term fertilization on composition of humic substances in black soil aggregates (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 47 (3): 579—583
- [25] 毛霞丽, 陆扣萍, 何丽芝, 等. 长期施肥对浙江稻田土壤团聚体及其有机碳分布的影响. *土壤学报*, 2015, 52 (4): 828—838
- Mao X L, Lu K P, He L Z, et al. Effect of long-term fertilizer application on distribution of aggregates and aggregate-associated organic carbon in paddy soil (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (4): 828—838
- [26] Yu G, Fang H, Gao L, et al. Soil organic carbon budget and fertility variation of black soils in northeast China. *Ecological Research*, 2006, 21 (6): 855—867
- [27] Liu X, Herbert S, Jin J, et al. Responses of photosynthetic rates and yield/quality of main crops to irrigation and manure application in the black soil area of northeast China. *Plant and Soil*, 2004, 261

Comparative Study on Impacts of Anthropogenic and Environment Factors on Soil Organic Matter: A Case Study of Typical Black Soil Region and Paddy Soil Region

GUO Naijia^{1, 2} SHI Xuezheng^{1, 2} ZHAO Yongcun^{1, 2†} XU Shengxiang^{1, 2} WANG Meiyun^{1, 2} KONG Chao^{1, 2}

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China)

(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract 【Objective】 Soil organic matter (SOM) retains and recycles nutrients, improves soil structure and sustains soil microbes. Its content is not only an indicator of soil fertility, but also a direct reflection of soil organic carbon stocks. Keeping SOM content at a relatively high level can mitigate soil degradation, ensure food security and alleviate greenhouse gas emissions. Therefore it is important to dig out what are the factors that can exert influence on SOM content and what are the leading ones. Previous studies in this field used to focus on one or a few factors. Climate, terrain, and land-use data were frequently used in those researches. However, these factors were not adequate enough to reflect impacts of agricultural production on SOM. 【Method】 To comprehensively analyze influences of environmental and anthropogenic factors on SOM content in cropland in typical black soil region and paddy soil region, two grain-producing areas, 281 and 193 soil samples were collected, respectively, in the two regions in the autumn of 2011. Field management data, such as cropping system, yield of grains, fertilizer amount and history of residue incorporation of the sampling plots were collected through consulting related farmers. Two-sample Kolmogorov-Smirnov tests were employed to compare the soil samples from the two regions in SOM content and in impact of the affecting factors on SOM. Kendall τ correlation analysis was conducted to screen out factors that were significantly related to SOM content for comparative analysis with random forest models established based on environment factors alone, anthropogenic factors alone or both, and the influence strength of each factor on SOM content was evaluated. 【Result】 Results show that all the factors expect for elevation and fertilizer amount, vary sharply in impact on SOM content between the two regions and so does SOM content. Among the environmental factors, mean annual precipitation (MAP) is the one SOM is closely related to in both regions, and mean annual temperature (MAT) and clay content in the Black Soil Region and parent rock and terrain in the Paddy Soil Region are the ones SOM is closely related to, while among the anthropogenic factors, fertilization, tillage and residue incorporation are in both regions and irrigation is not. Random forests models using both environment factors and field management in these two regions perform well in fitting, explaining over 80% of the variances of SOM content in croplands of the two regions. Environment and anthropogenic factors vary between the two regions in explanation of the variation of SOM content. Environment factors explain 84% in the Black Soil Region and 52% in the Paddy Soil Region of the variation of SOM, and field management practices do 62% and 72%, respectively. After ruling out the variance which could be explained by both environment factors and field management, environmental factors explain 4.7 times as much as anthropogenic factors the variation of SOM in the Black Soil Region, and 2/7 times as much in the Paddy Soil Region. Therefore SOM content is mainly affected by environmental factors in the Black Soil Region and

by anthropogenic factors in the Paddy Soil Region. Relative importance analysis shows that key impact factors are MAT, MAP and clay content in the Black Soil Region and MAP, elevation and fertilizer in the Paddy Soil Region. **【Conclusion】** The findings of this study also demonstrate that although SOM content in topsoil could change rapidly as affected by human activities, it is still feasible to predict SOM content quite accurately by using Random forest models with the key lying in the integration of environment factors and field management. Therefore it is of important significance to collect field management data year by year. These data can be used not only to improve performance of the model, but also to analyze trend of spatio-temporal variation of SOM content. The key factors identified in this study affecting SOM may be used to guide field management in study area and soil sampling design for future studies.

Key words Soil organic matter; Affecting factor; Field management; Random forest model

(责任编辑: 檀满枝)