

贵州省主要植烟区植烟土壤有机碳特征及固碳潜力^①

杨世福¹, 张业雨¹, 胡鹏¹, 孙华¹, 马云飞², 高维常², 蔡凯², 朱经纬², 曾艳^{1*}

(1 中国科学院地球化学研究所环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081; 2 贵州省烟草科学研究院, 贵阳 550081)

摘要: 本研究以贵州省主要烟草种植区(遵义市、铜仁市、毕节市和黔西南州)典型植烟土壤为研究对象, 探讨不同植烟区植烟土壤有机碳含量、有机碳密度及固碳潜力的差异。结果表明: 贵州主要植烟区植烟土壤有机碳含量和有机碳密度存在显著差异, 黔西南州的植烟土壤有机碳含量(19.39 g/kg)显著高于毕节市(15.35 g/kg)、遵义市(15.53 g/kg)和铜仁市(13.65 g/kg)($P<0.05$), 遵义市的植烟土壤有机碳密度显著高于毕节市、黔西南州和铜仁市($P<0.05$)。不同植烟区植烟土壤有机碳储量表现为遵义市(12.30 Tg)>毕节市(11.10 Tg)>黔西南州(5.83 Tg)>铜仁市(2.48 Tg)。遵义市、铜仁市、黔西南州和毕节市植烟区的固碳潜力分别为 2.23、2.36、1.25 和 1.51 kg/m²。随机森林模型分析表明, 碱解氮、全氮、全磷、海拔和 pH 是影响土壤有机碳密度的主要因素。综上所述, 贵州主要植烟区植烟土壤具有较大的固碳潜力。本研究可为贵州主要植烟区固碳增汇策略制定提供参考。

关键词: 典型植烟区; 土壤有机碳; 固碳潜力; 碳储量

中图分类号: S153 文献标志码: A

Characteristics of Soil Organic Carbon and Carbon Sequestration Potential in Major Tobacco-planting Areas of Guizhou Province

YANG Shifu¹, ZHANG Yeyu¹, HU Peng¹, SUN Hua¹, MA Yunfei², GAO Weichang², CAI Kai², ZHU Jingwei², ZENG Yan^{1*}

(1 State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; 2 Guizhou Academy of Tobacco Science, Guiyang 550081, China)

Abstract: In this study, soil organic carbon content, organic carbon density, and carbon sequestration potential in tobacco-growing soils in the main tobacco growing areas of Guizhou Province (Zunyi City, Bijie City, Tongren City, and Southwest Guizhou Autonomous Prefecture) were analyzed. Results showed that there were significant differences in organic carbon contents and organic carbon densities of tobacco-growing soils in the main tobacco-growing areas of Guizhou Province. Organic carbon content of tobacco-growing soils in Southwest Guizhou (19.39 g/kg) was significantly higher than that in Bijie (15.35 g/kg), Zunyi (15.53 g/kg), and Tongren (13.65 g/kg) ($P<0.05$). Organic carbon density of tobacco-growing soils in Zunyi was significantly higher than that in Bijie, Southwest Guizhou, and Tongren($P<0.05$). Organic carbon storage in tobacco-growing soils of different tobacco-growing areas showed the order of Zunyi (12.30 Tg) > Bijie (11.10 Tg) > Southwest Guizhou (5.83 Tg) > Tongren (2.48 Tg). Carbon sequestration potentials of tobacco-growing areas in Zunyi, Tongren, Southwest Guizhou and Bijie were measured at 2.23, 2.36, 1.25, and 1.51 kg/m², respectively. Random forest model analysis showed that soil alkali-hydrolyzable nitrogen, total nitrogen, total phosphorus, altitude, and pH were the important factors affecting soil organic carbon density. In conclusion, the tobacco-growing soils in Guizhou Province demonstrated substantial potential for carbon sequestration. This research can serve as a reference for formulating strategies aimed at enhancing carbon sequestration and increasing carbon sinks in the main tobacco-growing areas of Guizhou.

Key words: Typical tobacco-growing areas; Soil organic carbon; Carbon sequestration potential; Carbon storage

土壤有机碳库作为陆地最大的碳库^[1], 是陆地生态系统的重要组成部分, 在缓解全球气候变暖中具有重要作用^[2]。农业生态系统是温室气体排放的重要来源^[3], 同时, 农田也是农业生态系统和陆地生态系统

①基金项目: 中国烟草总公司贵州省公司重点研发项目(2023XM11)和中国烟草总公司重点研发项目(110202402016、110202102038)资助。

* 通信作者(zengyan@vip.skleg.cn)

作者简介: 杨世福(1998—), 男, 贵州三穗人, 硕士, 主要从事土壤碳循环研究。E-mail: yangshifu@mail.gyig.ac.cn

中的重要碳汇^[4]。农田被认为具有巨大的碳封存潜力和碳储存能力,并且可以在短时间内通过科学合理的措施对其进行有效的管理和调控^[3-4]。此外,有研究表明,农田的表层土壤有机碳含量仍然处于未饱和状态,仍具有较大的固碳潜力^[5]。因此,了解农田土壤有机碳的现状和准确预测土壤的固碳潜力对缓解气候变化及制定农业耕作措施具有重要意义。

土壤有机碳可以通过物理分组将其划分为颗粒有机碳和矿物结合态有机碳^[6]。颗粒有机碳是部分分解植物及其副产物的混合物,易受微生物分解的影响,平均滞留时间较短(数年至数十年);而矿物结合态有机碳是由植物浸出或微生物转化的有机碳小分子与矿物颗粒结合形成的,受到与矿物相关的化学键保护,平均滞留时间较长(数十年至数百年),属于稳定有机碳组分^[7-9]。因此,了解矿物结合态有机碳的形成和积累可能是土壤持久固定有机碳的关键^[7]。由于矿物吸附容量的限制,矿物结合态有机碳会达到其理论最大容量,即碳饱和^[2,10-11]。Hassink^[10]研究发现,黏土和粉粒(<20 μm)的含量与矿物结合态有机碳呈显著正相关关系,并基于最小二乘线性回归方法提出了估算土壤碳饱和容量的经验公式,从而进一步估算土壤固碳潜力。线性回归方法可能低估了最大有机碳储存能力^[12]。此外,不同类型黏土矿物有不同的比表面积,从而影响碳饱和水平^[13]。与 1:1 型黏土矿物相比,2:1 型黏土矿物更有利于土壤有机碳的吸附^[11, 14]。因此, Feng 等^[12]提出了利用碳负荷法和边界线回归法来预测碳饱和和容量。最近, Georgiou 等^[2]还利用分位数回归的方法,估算了全球 1 044 个地点的矿物结合态有机碳储量和最大碳储存能力。边界线回归和分位数回归方法被认为是比线性回归更好的预测碳饱和容量的方法^[2, 12]。总而言之,土壤固碳潜力取决于其物理化学或矿物学的碳存储能力以及碳饱和和亏缺水平^[15-16]。

烟草(*Nicotiana tabacum* L.)作为世界性经济作物之一,在全球广泛种植^[17]。据中国国家统计局统计(<https://data.stats.gov.cn>),2023 年我国烟草种植面积为 $2.13 \times 10^6 \text{ hm}^2$,其中贵州作为我国第二大烟草产区,种植面积为 $0.28 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 。以往的研究更多关注于烟草的病害^[18]、光合生理特性^[19]以及植烟土壤的肥力^[17]和土壤微生物群落^[20]等方面,但对植烟土壤有机碳含量、有机碳密度及固碳潜力等方面的认识尚少。本研究以贵州主要烟草种植区(遵义市、铜仁市、毕节市、黔西南州)典型植烟耕地为研究对象,探讨不同植烟区植烟土壤有机碳含量、有机碳密度及土壤

固碳潜力的差异,以期可为可持续耕作和实现“双碳”目标提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

贵州省($24^{\circ}37'N \sim 29^{\circ}13'N$, $103^{\circ}36'E \sim 109^{\circ}35'E$)属于亚热带湿润季风气候区,全省大部分地区气候温和,年均温约为 15°C ,年均降水量为 $800 \sim 1\,600 \text{ mm}$,平均海拔约 $1\,100 \text{ m}$,主要土壤类型为黄壤、红壤、黄棕壤、石灰土等^[21-22]。据 2023 年贵州省统计局数据(<https://stjj.guizhou.gov.cn/>),遵义市、铜仁市、毕节市以及黔西南州的烟草种植总面积占贵州省烟草种植总面积的 70% 以上,是全省烟草种植规模最大的 4 个地区。本研究即以上述 4 个植烟区为主要研究区域。

1.2 样品采集

本研究基于烟草种植面积、空间分布、气候条件、地形地貌和土壤类型等基础信息以及样点布设均匀性等因素进行样点布置和采样。于 2022 年 7 月在 4 个主要植烟区设置采样点(图 1),一共设置 410 个样点,其中遵义市(ZY)138 个、铜仁市(TR)40 个、毕节市(BJ)147 个、黔西南州(QXN)85 个。在每个采样点内分别随机选取具有代表性的 $5 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ 样方,采集植烟土壤样品。在每个样方内按照五点取样法进行采样。采集土壤样品前,先将凋落物、地膜等移除,再使用土钻(内径为 5 cm)取 5 个 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层的土壤样品,并将其混合均匀为一个土壤样品。在采样过程中,记录各样点经纬度、海拔和土壤类型等信息。

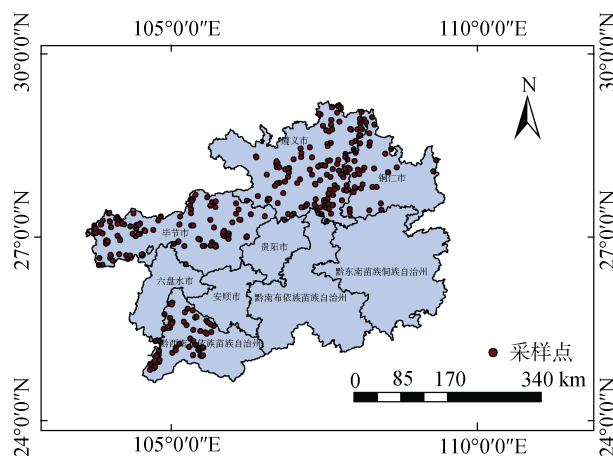


图 1 采样点分布

Fig.1 Distribution of sampling points

1.3 土壤理化性质分析

土壤样品运回实验室后,自然风干,剔除土壤中

的碎石和植物根系, 过 2 mm 筛, 用于土壤理化性质测定。土壤有机碳采用元素分析法测定^[23]; 土壤 pH 采用电位法测定; 土壤全氮采用靛酚蓝比色法测定^[24]; 土壤全磷采用硫酸消煮-钼锑抗比色法测定^[24]; 土壤容重采用环刀法测定; 土壤有效磷采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗比色法测定^[24]; < 20 μm 细颗粒土壤有机碳组分的分离和收集方法参照文献^[25]。

1.4 指标计算

土壤有机碳密度(SOCD, kg/m^2)计算公式^[25]:

$$\text{SOCD} = \text{SOC} \times \text{BD} \times (1 - \text{RF}) \times D \times 10^{-2} \quad (1)$$

土壤有机碳储量(SOCS, kg)计算公式^[26]:

$$\text{SOCS} = \text{SOCD} \times S \quad (2)$$

土壤碳饱和容量(CSC, g/kg)计算公式^[12]:

$$\text{CSC} = 0.45 \times M_{\text{fine}} \quad (3)$$

土壤碳饱和水平(CSL, %)计算公式^[25]:

$$\text{CSL} (\%) = \text{SOC}_{\text{fine}} / \text{CSC} \times 100 \quad (4)$$

土壤固碳潜力(CSP, kg/m^2)计算公式^[25, 27]

$$\text{CSD} = \text{CSC} - \text{SOC}_{\text{fine}} \quad (5)$$

$$\text{CSP} = \text{CSD} \times \text{BD} \times D \times (1 - \text{RF}) \times 10^{-2} \quad (6)$$

式中: SOC 为土壤有机碳含量(g/kg); BD 为土壤容重(g/cm^3); RF 为 > 2 mm 石砾的含量(%); D 为土层厚度(cm); S 为土壤面积(m^2); M_{fine} 为 < 20 μm 细颗粒的质量百分含量(%); SOC_{fine} 为 < 20 μm 细颗粒土壤有机碳含量(g/kg); CSD 为碳饱和亏缺(g/kg)。

1.5 数据处理与统计分析

采用 Shapiro-Wilk 检验对数据进行正态性检验, 采用 Levene 检验对数据进行方差齐性检验。在满足正态性和方差齐性的前提下, 采用单因素方差分析(ANOVA)和 LSD(Least significant difference)多重比较法检验不同植烟区之间的土壤理化性质、土壤有机碳密度和固碳潜力。使用随机森林模型探究不同环境因素对土壤有机碳含量和有机碳密度的重要性。使用 Pearson 相关性分析探究土壤有机碳含量和有机碳密度与土壤理化性质之间的相关关系。显著性水平为 $P < 0.05$ 。所有数据处理均使用 R 4.3.0 完成, 图形绘制使用 R 4.3.0 和 ArcMap 10.8 完成。图中数据以平均值 $\pm$ 标准误表示。

2 结果与分析

2.1 不同植烟区植烟土壤理化性质

贵州主要植烟区土壤理化性质如图 2 所示。黔西南州植烟土壤 pH 显著高于毕节市、铜仁市和遵义市($P < 0.05$)。不同植烟区植烟土壤全氮含量差异显著,

具体表现为黔西南州显著高于毕节市、铜仁市和遵义市($P < 0.05$), 且铜仁市显著高于毕节市和遵义市($P < 0.05$), 但毕节市和遵义市之间无显著差异。黔西南州植烟土壤全磷含量显著高于毕节市、铜仁市和遵义市($P < 0.05$)。不同植烟区植烟土壤碱解氮含量无显著差异。遵义市植烟土壤有效磷含量显著高于毕节市、铜仁市和黔西南州, 毕节市和铜仁市则显著高于黔西南州($P < 0.05$), 但毕节市和铜仁市之间无显著差异。

2.2 不同植烟区植烟土壤有机碳特征及其储量

贵州主要植烟区植烟土壤有机碳含量存在显著差异(图 3A), 黔西南州植烟土壤有机碳含量(19.39 g/kg)显著高于毕节市(15.35 g/kg)、遵义市(15.53 g/kg)和铜仁市(13.65 g/kg)($P < 0.05$); 毕节市和遵义市无显著差异, 但均显著高于铜仁市($P < 0.05$)。遵义市植烟土壤有机碳密度显著高于毕节市、黔西南州和铜仁市($P < 0.05$), 毕节市和黔西南州显著高于铜仁市, 但毕节市和黔西南州之间无显著差异(图 3B)。据 2023 年贵州省统计局数据(<https://stjj.guizhou.gov.cn/>), 遵义市、毕节市、黔西南州和铜仁市烟草种植面积分别为 3.90×10^4 、 3.91×10^4 、 1.99×10^4 和 1.03×10^4 hm^2 。按照 2023 年烟草种植面积对贵州主要植烟区植烟土壤有机碳储量进行估计, 遵义市、毕节市、黔西南州和铜仁市的植烟土壤有机碳储量分别为 12.30、11.10、5.83 和 2.48 Tg(图 3C)。

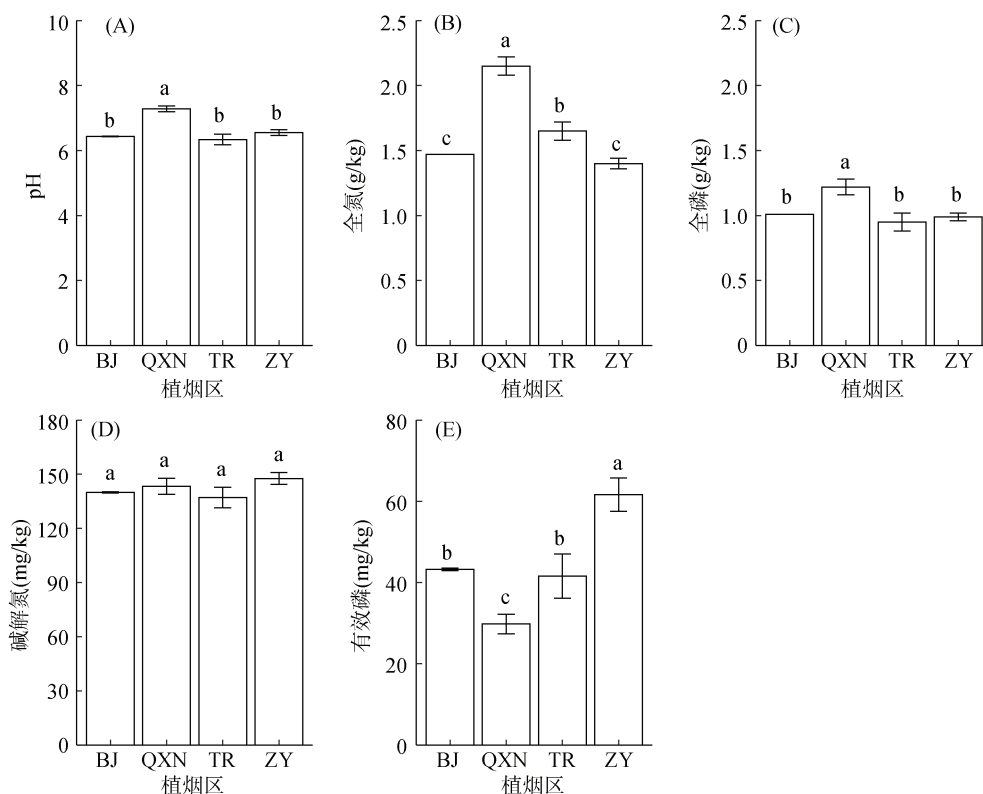
2.3 不同植烟区植烟土壤固碳潜力

由图 4 可见, 贵州 4 个主要植烟区植烟土壤碳饱和和水平存在显著差异。毕节市、黔西南州和遵义市植烟土壤碳饱和水平显著高于铜仁市($P < 0.05$), 但该 3 个地区间差异不显著。同时, 铜仁市和遵义市植烟土壤固碳潜力显著高于毕节市和黔西南州($P < 0.05$)。

2.4 土壤有机碳含量、有机碳密度与环境因子之间的关系

Pearson 相关性分析表明(图 5), 土壤有机碳含量与海拔、年均降水量、pH、全氮、全磷及碱解氮呈显著正相关关系($P < 0.01$)。土壤有机碳密度与 pH、全氮、全磷、碱解氮和有效磷呈显著正相关关系($P < 0.05$)。

为进一步探究对土壤有机碳含量和有机碳密度影响相对重要性较高的因子, 采用随机森林模型评估各因子的贡献, 结果如图 6 所示。全氮、碱解氮是影响土壤有机碳含量最重要的两个因子, 除此之外, 土壤有机碳含量也受到 pH、年均降水量、海拔、全磷及有效磷的显著影响。碱解氮是影响土壤有机碳密度最重要的因子, 另外, 有机碳密度也受到全氮、全磷、海拔和 pH 的显著影响。



(图中小写字母不同表示不同植烟区之间差异达 $P < 0.05$ 显著水平, 下同)

图 2 贵州主要植烟区植烟土壤理化性质

Fig. 2 Physicochemical properties of tobacco-growing soils in main tobacco-growing areas of Guizhou Province

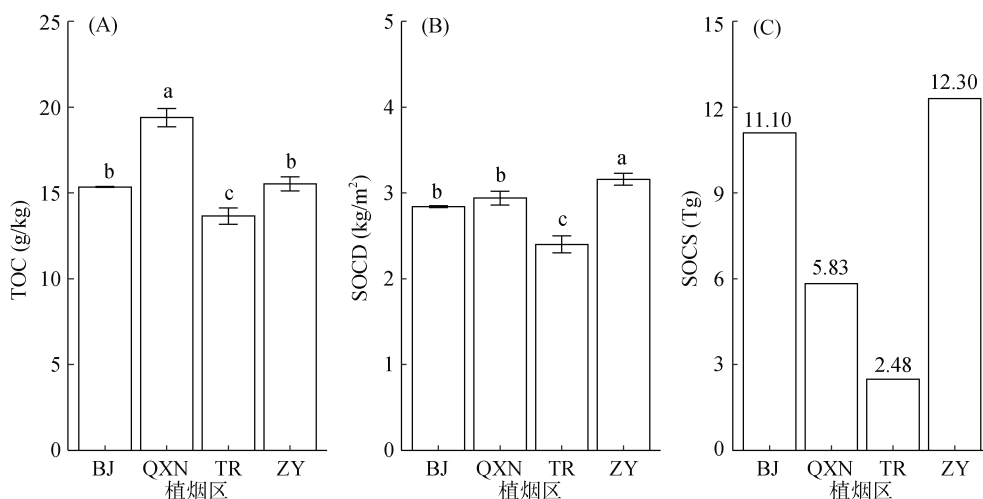


图 3 贵州主要植烟区植烟土壤有机碳含量、有机碳密度及碳储量

Fig. 3 Soil organic carbon contents, organic carbon densities and organic carbon storages of tobacco-growing soils in main tobacco-growing areas of Guizhou Province

3 讨论

土壤有机碳是土壤质量和土壤肥力的重要指标,在缓解全球气候变化和增加作物产量中具有重要作用^[28-29]。本研究结果表明,黔西南州、毕节市、遵义市和铜仁市是贵州主要烟草种植区,其植烟土壤有机碳含量分别为 19.39、15.35、15.53 和 13.65 g/kg。与

第二次全国土壤普查结果相比,贵州主要植烟区植烟土壤有机碳含量均高于全国耕层土壤有机碳含量 (11.48 g/kg),但低于贵州省耕层土壤有机碳含量 (17.98 g/kg)^[30]。这说明与贵州省其他耕地相比,植烟土壤有机碳含量仍然有提高的空间。另外,赵书军等^[31]研究表明,湖北省植烟土壤平均有机碳含量为 14.97 g/kg。李枝桦等^[32]研究表明,云南省植烟土壤

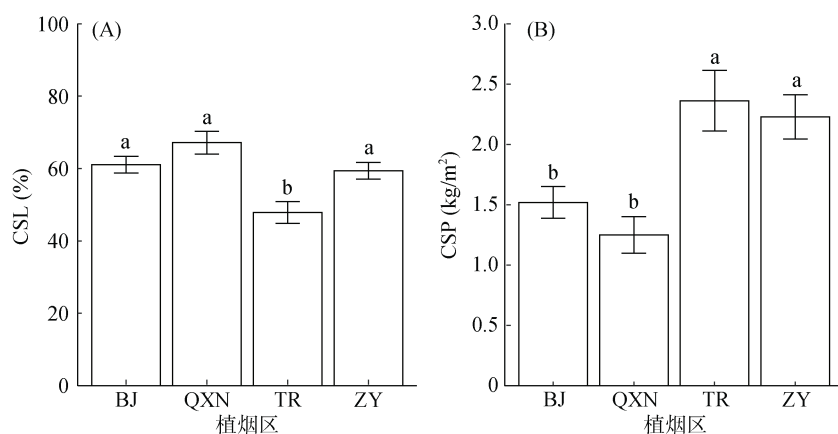
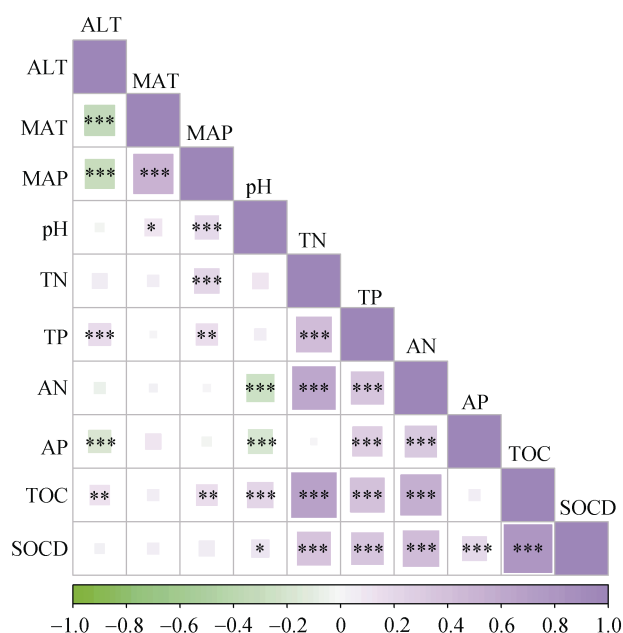


图4 贵州主要植烟区植烟土壤碳饱和水平和固碳潜力

Fig. 4 Carbon saturation levels and carbon sequestration potentials of tobacco-growing soils in main tobacco-growing areas of Guizhou Province



(ALT: 海拔; MAT: 年均温; MAP: 年均降水量; pH: 土壤 pH; TN: 全氮; TP: 全磷; AN: 碱解氮; AP: 有效磷; TOC: 土壤有机碳含量; SOCD: 土壤有机碳密度。*、**、***分别表示相关性达 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 、 $P<0.001$ 显著水平。下同)

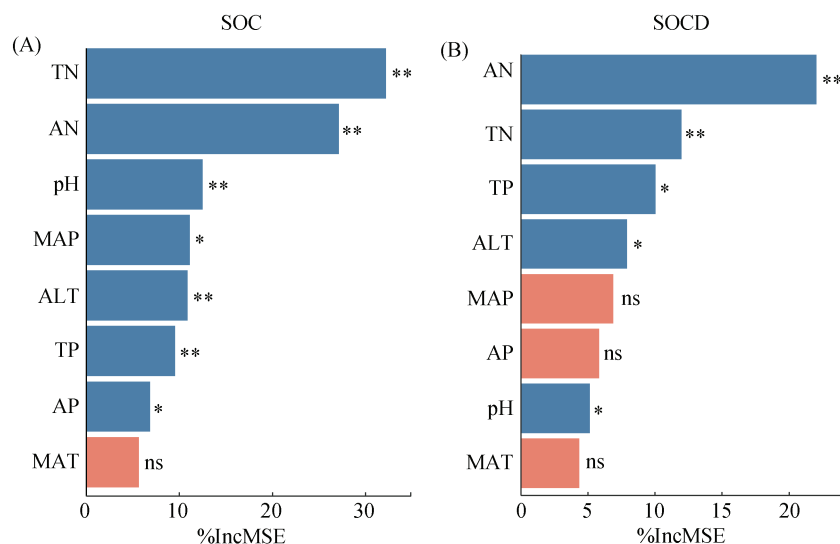
图5 土壤有机碳含量、有机碳密度和环境因子之间的 Pearson 相关性

Fig. 5 Pearson correlations of soil organic carbon content, organic carbon density and environmental factors

平均有机碳含量为 14.04 g/kg。杨梅^[33]研究表明,四川省植烟土壤平均有机碳含量为 13.66 g/kg。贵州主要植烟区中,除铜仁市外,黔西南州、毕节市和遵义市的植烟土壤有机碳含量高于湖北、云南和四川。这说明贵州主要植烟区的植烟土壤有机碳含量相对较高。

土壤有机碳密度是衡量有机碳储量的重要指标,明确土壤有机碳密度对科学制定可持续性耕作和土

壤固碳增汇策略至关重要^[34]。本研究结果表明,贵州主要植烟区黔西南州、毕节市、遵义市和铜仁市的植烟土壤有机碳密度平均值分别为 2.94、2.84、3.16 和 2.40 kg/m²。除遵义市的植烟土壤有机碳密度高于全国表层(0~20 cm)土壤有机碳密度平均水平(2.97 kg/m²)^[35]外,黔西南州、毕节市和铜仁市的植烟土壤有机碳密度均低于全国平均水平。且贵州主要植烟区植烟土壤有机碳密度均低于云南省(4.84 kg/m²)^[36]、湖南省(4.53 kg/m²)^[37]及福建省(4.06 kg/m²)^[38]表层土壤有机碳密度。另外,有研究表明,云南省植烟土壤平均有机碳密度为 10.21 kg/m²^[39]。由此可以看出,相比之下,贵州主要植烟区植烟土壤有机碳密度处于较低水平。这可能与气候条件、地形地貌、耕作措施、作物类型及施肥量等有关^[36, 40]。由于遵义市和毕节市烟草种植面积较大,因而植烟土壤有机碳储量更多。本研究结果表明,遵义市、毕节市、黔西南州和铜仁市植烟土壤有机碳储量分别为 12.30、11.10、5.83 和 2.48 Tg。碳饱和水平是预测未来土壤有机碳固持量的重要指标。本研究发现,黔西南州、毕节市、铜仁市和遵义市植烟土壤碳饱和水平为 47.84%~67.16%,这说明贵州主要植烟区植烟土壤有机碳仍具有较大固持潜力。通过对贵州主要植烟区植烟土壤固碳潜力进行预测(图 4B),结果表明,遵义市和铜仁市植烟区的固碳潜力较高,分别为 2.23 kg/m² 和 2.36 kg/m²;黔西南州和毕节市植烟区的固碳潜力则较低,分别为 1.25 kg/m² 和 1.51 kg/m²。贵州黔西南州和毕节市植烟区土壤的固碳潜力高于东北黑土区坡耕地表层土壤(1.13 kg/m²)^[25],但低于我国耕地 0~20 cm 土层(2.13 kg/m²)^[5];而遵义市和铜仁市植烟区土壤固碳潜力则高于全国耕地和东北黑土区坡耕



(*、**、***分别表示影响达 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 和 $P<0.001$ 显著水平, ns 表示影响不显著)

图 6 土壤有机碳含量(A)和有机碳密度(B)影响因子的相对重要性

Fig. 6 Relative importance of influencing factors on soil organic carbon content(A) and organic carbon density(B)

地。上述差异可能与气候、海拔、耕作措施等有关^[5]。总而言之,遵义市和铜仁市植烟区植烟土壤碳固持能力仍然有较高的提升空间,在未来需要进一步关注,制定科学合理的可持续性耕作和土壤固碳增汇策略。

由于大多数农业生态系统通过施肥等方式控制养分输入,土壤养分通常被认为是影响土壤有机碳积累的重要因素^[41-42]。根据生态化学计量比理论,土壤中氮、磷元素的输入量和有效性制约着土壤有机碳的积累速率与储存能力^[43]。本研究结果表明,土壤有机碳含量与全氮、全磷及碱解氮含量呈显著正相关关系(图 5),这与邱巡巡等^[44]的研究结果一致。有研究表明,土壤养分有效性能够提高土壤微生物碳利用效率,促进微生物生长和生物量积累,降低土壤酶活性并抑制有机碳矿化,从而增加有机碳的储存^[45]。除了土壤养分,土壤 pH 也是影响土壤有机碳含量的重要因素。有研究表明,土壤 pH 过高或过低会抑制微生物活性,减少有机碳分解,从而增加有机碳含量^[46]。本研究发现,土壤有机碳含量与 pH 呈显著正相关关系,与 Sun 等^[47]的结果相反。这可能是因为贵州主要植烟区植烟土壤 pH 接近中性(图 2A),在 pH 接近中性时,由于养分充足,提高了土壤微生物的生长效率,从而使得土壤具有更大的碳储存潜力^[48]。此外,降雨和海拔对土壤有机碳的积累也具有重要影响^[36]。本文相关性分析结果显示,土壤有机碳含量与海拔、年均降水量呈显著正相关关系($P<0.05$)。降水量和气温受到海拔的影响,温度和水分影响微生物的代谢活动和有机碳的矿化^[46, 49]。随机森林模型分析显示(图 6),全氮、碱解氮是影响土壤有机碳含量最重要的两

个因素,同时,土壤有机碳含量也受到 pH、年均降水量、海拔、全磷及有效磷的影响。与土壤有机碳含量不同的是,碱解氮是影响土壤有机碳密度最重要的因素,同时土壤有机碳密度还受全氮、全磷、海拔和 pH 的影响,但气候(年均温和年均降水量)对其重要性较低。总体而言,土壤有机碳含量和有机碳密度并不是由单一因素决定的,而是自然因素和人为因素等多种因子共同作用的结果。因此,在未来制定耕作策略时应综合考虑。

4 结论

贵州不同植烟区植烟土壤有机碳含量和有机碳密度存在差异,有机碳含量表现为黔西南州(19.39 g/kg)>毕节市(15.35 g/kg)>遵义市(15.53 g/kg)>铜仁市(13.65 g/kg),有机碳密度则表现为遵义市(3.16 kg/m²)>黔西南州(2.94 kg/m²)>毕节市(2.84 kg/m²)>铜仁市(2.40 kg/m²)。遵义市、毕节市、黔西南州、铜仁市植烟土壤有机碳储量分别为 12.30、11.10、5.83、2.48 Tg,固碳潜力则分别为 2.23、1.51、1.25、2.36 kg/m²。随机森林模型分析表明,全氮、碱解氮是土壤有机碳含量最重要的影响因子,pH、年均降水量、海拔、全磷及有效磷也显著影响有机碳含量;而土壤有机碳密度最重要的影响因子是碱解氮,其次是全氮、全磷、海拔和 pH。

参考文献:

- [1] Scharlemann J P, Tanner E V, Hiederer R, et al. Global soil carbon: Understanding and managing the largest terrestrial carbon pool[J]. Carbon Management, 2014, 5(1): 81-91.

- [2] Georgiou K, Jackson R B, Vinduškova O, et al. Global stocks and capacity of mineral-associated soil organic carbon[J]. *Nature Communications*, 2022, 13: 3797.
- [3] Chen Y, Chen X W, Zheng P, et al. Value compensation of net carbon sequestration alleviates the trend of abandoned farmland: A quantification of paddy field system in China based on perspectives of grain security and carbon neutrality[J]. *Ecological Indicators*, 2022, 138: 108815.
- [4] Liu X C, Wang S, Zhuang Q L, et al. A review on carbon source and sink in arable land ecosystems[J]. *Land*, 2022, 11(4): 580.
- [5] Wang S, Xu L, Adhikari K, et al. Soil carbon sequestration potential of cultivated lands and its controlling factors in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 905: 167292.
- [6] Lugato E, Lavalley J M, Haddix M L, et al. Different climate sensitivity of particulate and mineral-associated soil organic matter[J]. *Nature Geoscience*, 2021, 14(5): 295–300.
- [7] Lavalley J M, Soong J L, Cotrufo M F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(1): 261–273.
- [8] Cotrufo M F, Ranalli M G, Haddix M L, et al. Soil carbon storage informed by particulate and mineral-associated organic matter[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(12): 989–994.
- [9] Mao H R, Cotrufo M F, Hart S C, et al. Dual role of silt and clay in the formation and accrual of stabilized soil organic carbon[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2024, 192: 109390.
- [10] Hassink J. The capacity of soils to preserve organic C and N by their association with clay and silt particles[J]. *Plant and Soil*, 1997, 191(1): 77–87.
- [11] Six J, Conant R T, Paul E A, et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils[J]. *Plant and Soil*, 2002, 241(2): 155–176.
- [12] Feng W T, Plante A F, Six J. Improving estimates of maximal organic carbon stabilization by fine soil particles[J]. *Biogeochemistry*, 2013, 112(1): 81–93.
- [13] Singh M, Sarkar B, Sarkar S, et al. Stabilization of soil organic carbon as influenced by clay mineralogy[M]// *Advances in Agronomy*. Amsterdam: Elsevier, 2018: 33–84.
- [14] Traoré S, Thiombiano L, Bationo B A, et al. Organic carbon fractional distribution and saturation in tropical soils of West African savannas with contrasting mineral composition[J]. *Catena*, 2020, 190: 104550.
- [15] Stewart C E, Paustian K, Conant R T, et al. Soil carbon saturation: Concept, evidence and evaluation[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 86(1): 19–31.
- [16] West T O, Six J. Considering the influence of sequestration duration and carbon saturation on estimates of soil carbon capacity[J]. *Climatic Change*, 2007, 80(1): 25–41.
- [17] Yang K, Zi S H, Ouyang C R. Effects of the tobacco-maize relay intercropping pattern on soil nutrients and soil microbial diversity[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2024, 15: 1389156.
- [18] 付景圆, 王晶, 陈海涛, 等. 重庆烟区烟草叶斑病的诊断与鉴定[J]. *烟草科技*, 2023, 56(3): 25–29.
- [19] 袁贵林, 黄瑞寅, 刘兰, 等. 绿肥与生物炭对土壤养分及烤烟农艺和光合特性的影响[J]. *中国烟草科学*, 2024, 45(6): 65–72.
- [20] Xuan P X, Ma H K, Deng X P, et al. Microbiome-mediated alleviation of tobacco replant problem via autotoxin degradation after long-term continuous cropping[J]. *iMeta*, 2024, 3(2): e189.
- [21] 余祝媛, 贺中华, 梁虹, 等. 贵州省近 55 年降水量时空变化分析[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(6): 208–215.
- [22] 文鑫, 王艺惠, 钟聪, 等. 贵州表层土壤有机质空间变异特征及其影响因素分析[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(3): 218–224.
- [23] 闵秀云, 武君, 高春亮, 等. 基于元素分析仪测定土壤有机碳的不同前处理方法对比研究[J]. *盐湖研究*, 2020, 28(4): 64–70.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [25] 翟国庆, 韩明钊, 李永江, 等. 黑土坡耕地有机碳变化及固碳潜力分析[J]. *生态学报*, 2020, 40(16): 5751–5760.
- [26] 陈新邦, 唐光木, 张云舒, 等. 不同类型外源碳添加对灰漠土土壤碳储量的影响[J]. *水土保持学报*, 2023, 37(3): 330–335.
- [27] 徐嘉晖, 高雷, 孙颖, 等. 大兴安岭森林土壤矿物结合态有机碳与黑碳的分布及土壤固碳潜力[J]. *土壤学报*, 2018, 55(1): 236–246.
- [28] Ma Y Q, Woolf D, Fan M S, et al. Global crop production increase by soil organic carbon[J]. *Nature Geoscience*, 2023, 16(12): 1159–1165.
- [29] Yu P J, Han K X, Li Q, et al. Soil organic carbon fractions are affected by different land uses in an agro-pastoral transitional zone in Northeastern China[J]. *Ecological Indicators*, 2017, 73: 331–337.
- [30] 杨帆, 徐洋, 崔勇, 等. 近 30 年中国农田耕层土壤有机质含量变化[J]. *土壤学报*, 2017, 54(5): 1047–1056.
- [31] 赵书军, 朱柳, 周剑雄, 等. 湖北省植烟土壤养分现状及其变化趋势[J]. *湖北农业科学*, 2024, 63(9): 35–41.
- [32] 李枝桦, 伞金辉, 陈兴位, 等. 云南植烟土壤有机质与养分的关系及主要养分的空间变化[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(12): 220–224.
- [33] 杨梅. 四川省主要植烟区土壤生态化学计量学特征研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2015.
- [34] 孙维侠, 史学正, 于东升, 等. 基于 1: 100 万土壤空间数据库的有机碳储量估算研究——以中国东北三省为例[J]. *地理科学*, 2004, 24(5): 568–572.
- [35] 解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 中国土壤有机碳密度和储量的估算与空间分布分析[J]. *土壤学报*, 2004, 41(1): 35–43.
- [36] Sun T, Tong W J, Chang N J, et al. Estimation of soil organic carbon stock and its controlling factors in cropland

- of Yunnan Province, China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2022, 21(5): 1475–1487.
- [37] 杨琪. 湖南省耕地表层土壤碳储量研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2015.
- [38] 程金, 黄文卿, 张世昌, 等. 福建省表层土壤有机碳密度空间分布及影响因素分析[J]. *农业资源与环境学报*, 2023, 40(4): 805–816.
- [39] 邱学礼, 李军营, 李向阳, 等. 云南省植烟土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(4): 51–56.
- [40] 韩天富, 都江雪, 曲潇琳, 等. 1988—2019 年中国农田表土有机碳库密度变化及其主要影响因素[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(7): 1145–1157.
- [41] Liu Y H, Li C, Cai G, et al. Meta-analysis on the effects of types and levels of N, P, and K fertilization on organic carbon in cropland soils[J]. *Geoderma*, 2023, 437: 116580.
- [42] Hu H L, Zhao L, Tan W B, et al. Discrepant responses of soil organic carbon dynamics to nitrogen addition in different layers: A case study in an agroecosystem[J]. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering*, 2024, 11(2): 314–325.
- [43] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. *生态学报*, 2008, 28(8): 3937–3947.
- [44] 邱巡巡, 曹广超, 张卓, 等. 高寒农田土壤有机碳和全氮密度垂直分布特征及其与海拔的关系[J]. *土壤通报*, 2022, 53(3): 623–630.
- [45] Sun H, Wang L L, Kumar A, et al. Nutrient availability mediates organic carbon turnover in paddy soils through regulating microbial metabolism[J]. *Geoderma*, 2025, 458: 117313.
- [46] Zhang X M, Guo J H, Vogt R D, et al. Soil acidification as an additional driver to organic carbon accumulation in major Chinese croplands[J]. *Geoderma*, 2020, 366: 114234.
- [47] Sun X L, Minasny B, Wu Y J, et al. Soil organic carbon content increase in the east and south of China is accompanied by soil acidification[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 857: 159253.
- [48] Malik A A, Puissant J, Buckeridge K M, et al. Land use driven change in soil pH affects microbial carbon cycling processes[J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 3591.
- [49] Zeng X M, Feng J, Yu D L, et al. Local temperature increases reduce soil microbial residues and carbon stocks[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(21): 6433–6445.

(责任编辑: 毛小芳)