

DOI: 10.11766/trxb202408190332

CSTR: 32215.14.trxb202408190332

吴能祥, 王萍, 刘亚龙, 汪景宽. 土壤有机碳对化肥减施与有机肥替代的响应特征及影响因素[J]. 土壤学报, 2026, 63 (3): 823–832.
WU Nengxiang, WANG Ping, LIU Yalong, WANG Jingkuan. Response Characteristics and Influencing Factors of Soil Organic Carbon to Reduced Chemical Fertilizers or Organic Fertilizer Substitution[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026, 63 (3): 823–832.

土壤有机碳对化肥减施与有机肥替代的响应特征及影响因素*

吴能祥, 王萍, 刘亚龙[†], 汪景宽

(沈阳农业大学土地与环境学院/土肥高效利用国家工程研究中心, 沈阳 110866)

摘要: 深入探讨化肥减施和有机肥替代对土壤有机碳的影响, 对于理解农业土壤有机碳库对施肥的响应过程, 并对早日实现农业减肥固碳具有重要意义。运用 Meta 整合分析法及随机森林模型分析化肥减施和有机肥替代下土壤有机碳含量的变化特征, 系统研究了各种因子对土壤有机碳的影响程度。结果表明, 化肥减施下土壤有机碳总体下降 2.61%, 地处温带地区(年均气温 $<10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、年均降水 $<1\ 000\ \text{mm}$)有机碳损失较大, 但随海拔高度变化, 有机碳无显著损失。初始有机碳含量高的土壤有利于有机碳的保持。随土壤初始 pH 和有效磷含量的增加, 土壤有机碳的损失总体呈增强趋势, 有机碳含量最高可下降 6.91%。而初始速效钾的影响却正好相反。化肥减施下农田和果园土壤有机碳下降幅度相近, 菜地有机碳变化不显著。有机肥替代下土壤有机碳显著增加 14.39%, 地处中低海拔和年均降水 $<600\ \text{mm}$ 的亚热带地区更有利于有机碳的积累。除低碱解氮水平外 ($50\ \text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 不同水平初始有机碳、全氮和碱解氮含量土壤有机碳未表现出显著差异。随初始 pH 和有效磷含量的提高, 有机碳的累积效应增强, 而初始速效钾的影响却正好相反。有机肥替代下以水旱轮作和菜地利用最有利于有机碳的积累。pH 和碱解氮分别是影响减施化肥和有机肥替代土壤有机碳的最重要因子。

关键词: 土壤有机碳; 减施化肥; 有机肥替代; 气候条件; 土壤初始性质; 土地利用

中图分类号: S158 文献标志码: A

Response Characteristics and Influencing Factors of Soil Organic Carbon to Reduced Chemical Fertilizers or Organic Fertilizer Substitution

WU Nengxiang, WANG Ping, LIU Yalong[†], WANG Jingkuan

(National Engineering Research Center for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, College of Land and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: [Objective] Delving into the impacts of reduced chemical fertilizers (RCF) and organic fertilizer substitution (OFS) on soil organic carbon (SOC) is crucial for understanding the response processes of agricultural SOC pools to fertilization and achieving sustainable agricultural development early. This study aims to explore the impacts of RCF and OFS on SOC under

* 国家重点研发专项(2022YFD150080205, 2023YFD150120401)资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (Nos. 2022YFD150080205, 2023YFD150120401)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: liuyalong@syau.edu.cn; yalongliu@aliyun.com

作者简介: 吴能祥(2000—), 男, 贵州黔东南人, 硕士研究生, 主要研究领域土壤肥力与耕地保育。E-mail: 3142179679@qq.com

收稿日期: 2024-08-19; 收到修改稿日期: 2024-10-31; 网络首发日期(www.cnki.net): 2024-12-10

different climatic conditions, initial soil properties, and land use patterns. Furthermore, it endeavors to estimate the key influencing factors and clarify the natural and anthropogenic conditions conducive to SOC accumulation. 【 Method 】 After collecting and sorting out 142 published literature, we analyzed the variation characteristics of SOC content under RCF and OFS using meta-analysis. Thereafter, the influence degrees of various factors on SOC were systematically investigated by the Random Forest Model. 【 Result 】 The results revealed that SOC decreased by 2.61% on average under RCF. Notably, greater SOC losses were observed in temperate regions (with annual mean temperature < 10 °C and annual mean precipitation < 1 000 mm), whereas SOC losses were not significant with changes in altitude. Soils with high initial SOC content favored SOC retention. With soil's initial pH and available phosphorus content increasing, the overall loss of SOC tended to intensify, with the highest SOC reduction reaching 6.91%, however, the effect of initial available potassium was the opposite. The declines in SOC under RCF were similar in farmland and orchards, while changes in SOC in vegetable fields were not significant. In contrast, SOC significantly increased by 14.39% under OFS, with subtropical regions at low to medium altitudes and annual precipitation < 600 mm being more conducive to SOC accumulation. Except for low levels of initially available nitrogen (50 mg·kg⁻¹), no significant differences in SOC were observed among soils with different initial SOC, total nitrogen, and available nitrogen contents. With initial pH and available phosphorus content increasing, the cumulative effect of SOC enhanced, whereas the effect of initially available potassium was the opposite. Among different land use types under OFS, paddy-upland rotation and vegetable field utilization were most favorable for SOC accumulation. 【 Conclusion 】 Under the two fertilization systems, the climatic and environmental conditions in subtropical regions are more conducive to SOC sequestration. Compared to the subsurface soil, the impact of RCF and OFS on SOC in the surface soil was more significant. The decline in SOC of RCF was similar in both farmland and orchards, while the change of SOC in vegetable fields was not significant. In contrast, paddy-upland rotation and vegetable fields were the most favorable practices for SOC accumulation under OFS. Additionally, pH and initially available nitrogen were the most critical factors influencing the changes in SOC with RCF and OFS, respectively. These research results are of great significance for achieving carbon neutrality and sustainable development in agriculture as soon as possible.

Key words: Soil organic carbon; Reduced chemical fertilizers; Organic fertilizer substitution; Climatic conditions; Initial soil properties; Land use

近年来, 全球变暖和气候变化等环境问题日益突出。为实现环境可持续发展, 我国基于在全球环境保护中的责任担当, 适时地提出了“双碳”目标。土壤有机碳库是陆地生态系统最大的碳库, 其矿化分解过程可直接影响温室气体的形成^[1]。植物经光合作用将 CO₂ 转化成有机物质, 在土壤微生物作用下转变为土壤有机质, 最终形成碳汇^[2]。施肥是影响农田土壤有机碳 (SOC) 周转方向和速率的重要因素, 决定着有机碳固持与分解间的平衡^[3]。然而, 化肥的过量施用或有机肥的不合理替代均会造成土壤有机碳下降、土壤酸化以及温室气体排放增加等问题, 从而对环境和土壤健康造成风险^[4]。

化肥减施和有机肥替代措施已被广泛应用于调控土壤有机碳含量、维持土壤肥力和作物生产力^[5]。Li 等^[6]通过整合分析发现氮肥减施可显著降低 2.76% 的土壤有机碳含量, 而在配施有机肥措施下,

土壤有机碳含量显著提高 4.92%。该研究同样发现, 减施化肥 20%~60% 配施绿肥作用下, 增加土壤活性有机碳含量的同时还可提高水稻产量^[6]。然而, Liu 和 Greaver^[7]的研究却发现, 减少施用化学氮肥可以提高约 20% 微生物生物量碳含量, 进而提升土壤有机碳。另一项全球尺度整合分析发现, 相比于单施化肥, 有机肥替代化肥可通过驱动土壤微生物功能提高作物产量^[8]。但是孔德宁等^[9]在四川紫色土进行试验时发现, 有机肥替代 50% 的化肥后土壤有机碳并无显著变化。因此, 减施化肥或有机肥替代对土壤有机碳的影响并非一致, 而且还受到气候条件、作物类型和土壤基本性质等共同作用, 其关键影响因子仍未明确^[10]。此外, 有关减施化肥研究发现年均气温的提高显著降低了土壤有机碳含量, 而不同年均降水对有机碳变化无影响^[6]。减施氮肥下土壤 pH 和碱解氮含量均强烈影响着有机碳的变化^[11]。相关有机肥替代研究发现降水量越低有机碳含量增

加越明显；pH 大小与土壤有机碳的增加呈正相关；土壤初始有机碳含量低的土壤类型具有更高的固碳潜力；但全氮含量与有机碳的变化并无显著相关性^[12]。

由此可见，目前关于减施化肥或有机肥替代对土壤有机碳含量的影响已有较广泛的研究，但主要集中于特定土壤类型和地理环境条件，同时针对减施化肥和有机肥替代影响土壤有机碳变化关键因子的认识较少。因此，本研究通过整合已有研究结果，将减施化肥和有机肥替代定为研究对象，综合分析不同气候环境条件、土壤基本理化性质和土地利用类型和方式等对减施化肥和有机肥替代施肥措施下有机碳的变化状况，研究结果将为制定土地利用政策、提高土壤肥力和减缓温室效应提供重要的理论依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究通过检索中国知网 (CNKI)、Web of Science 和 Google Scholar 等数据库，搜集建库以来至 2023 年 7 月已发表关于减施化肥和有机肥替代施肥制度土壤有机碳变化的相关研究。使用检索词：减施化肥和土壤有机碳 (有机质) (“Reduced chemical fertilizers” and “Soil organic carbon/matter”)、有机肥替代和土壤有机碳 (有机质) (“Organic fertilizer substitution” and “Soil organic carbon/matter”) 等，共检索 677 篇中英文文献。将不符合减施化肥和有机肥替代研究的文献剔除后初步筛选出 142 篇相关文献。继续明确土壤基本理化性质、土地利用类型和农田利用方式、试验处理后，最终从 116 篇中英文文献中得到 342 组有效数据。数据库除土壤有机碳外，还包括试验地点的经纬度、海拔和气候条件 (年均气温/降水)、采样深度、重复次数以及土壤初始理化性质等数据。土壤有机质数据利用转换系数 0.58 进行转化。所有数据按施肥制度分成减施化肥和有机肥替代，分析在不同的影响因素下 (气候条件、土壤基础养分状况、土地利用类型和农田利用方式) 土壤有机碳含量的变化。气候带根据世界气候区划图划分^[13]；海拔、年均气温、年均降水划分标准和土壤基本理化性质划分

标准参考文献[14]。

1.2 数据分析

采用 Microsoft Excel 2021 对数据进行归类整理，借助随机效应模型评估减施化肥和有机肥替代对土壤有机碳含量的影响，运用 R 语言对不同气候地理和土壤初始理化因子对应土壤有机碳含量变化的汇总数据进行分析，借助随机森林模型估算减施化肥和有机肥替代对土壤有机碳的关键影响因子。采用 Metawin2.1 计算有机碳含量的变化率。选择效应比 (R) 的自然对数 ($\ln R$) 作为效应值，效应值计算公式如下：

$$\ln R = \ln \left(\frac{X_t}{X_c} \right) = \ln X_t - \ln X_c$$

式中， X_t 为减施化肥或有机肥替代后土壤有机碳的含量，单位 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ； X_c 为采用常规施肥时土壤有机碳的含量。效应权重计算公式如下：

$$W = (nt + nt) / (nt \times nt)$$

式中， w 为效应权重； nt 为各个试验重复次数。利用 bootstrap 重复抽样法重复取样计算 95% 置信区间。为了更直观地表现土壤有机碳的变化，将效应值转变为土壤有机碳含量百分比形式，公式如下：

$$\Delta \text{SOC}(\%) = (e^{\ln R} - 1) \times 100\%$$

式中， ΔSOC 代表减施化肥或有机肥替代后土壤有机碳含量相比于常规施肥时有机碳的变化。

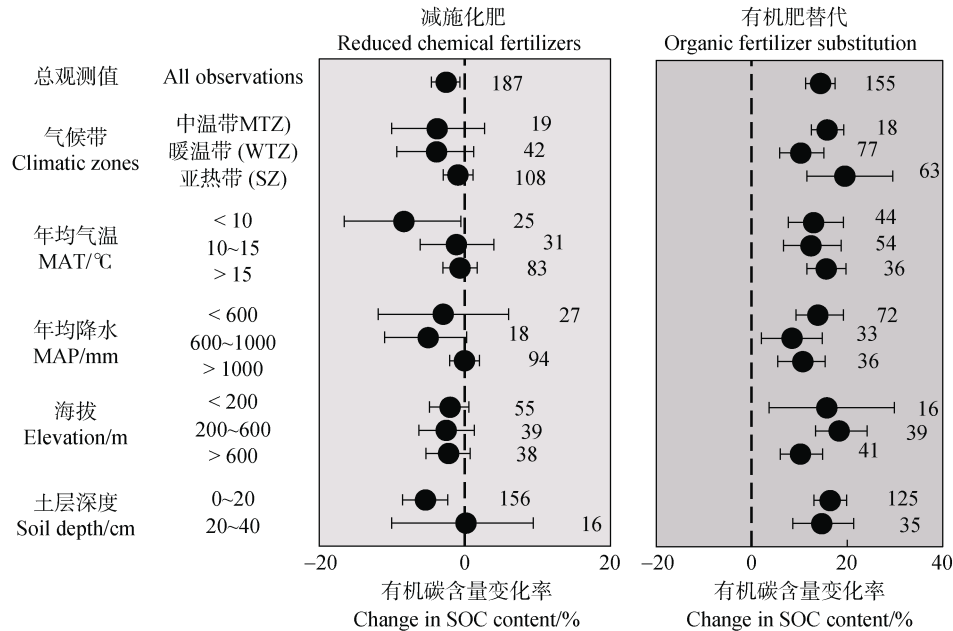
2 结果

2.1 不同气候条件和地理环境下减施化肥和有机肥替代对土壤有机碳的影响

由图 1 可以看出，减施化肥措施下 SOC 总体呈下降趋势，而在有机肥替代化肥措施下，SOC 总体呈显著增加趋势。但不同气候环境因素对 SOC 的影响存在差异。从气候带来看，减施化肥下有机碳损失表现为在暖温带与中温带相当，均高于亚热带，分别为 3.93%、3.84% 和 0.97%。有机肥替代下有机碳增幅由高到低依次为亚热带、中温带和暖温带，分别为 19.49%、15.80% 和 10.22%。SOC 在不同年均气温和年均降水下的响应

也不尽相同。减施化肥下,当气温小于 10 °C 时, SOC 损失最大,为 8.39%,当降水在 600~1 000 mm 时损失最大,为 5.07%。有机肥替代化肥下,当气温大于 15 °C 时, SOC 增幅最大,为 15.60%,当降水小于 600 mm 时增幅最大,为 13.83%。减施化肥下,不同海拔 SOC 损失接近,为 2.07%~2.59%。有机肥替代化肥下,当

海拔在 200~600 m 时, SOC 增幅最大为 18.29%。减施化肥下,土壤表层(0~20 cm) SOC 含量较常规施肥处理有机碳损失了 5.45%,而亚表层(20~40 cm) SOC 变化并不显著。有机肥替代下, SOC 含量显著增加,表现为表层高于亚表层,增幅分别为 16.39%和 14.63% (图 1)。



Note: MTZ, Medium temperate zone; WTZ, Warm temperate zone; SZ, Subtropics zone; MAT, Mean annual temperature; MAP, Mean annual precipitation.

图 1 不同气候条件和地理环境下减施化肥和有机肥替代土壤有机碳含量变化率

Fig.1 Changes in SOC contents with reduced chemical fertilizers or organic fertilizer substitution under different climatic conditions and geographic environments

2.2 不同土壤初始理化性质条件下减施化肥和有机肥替代对土壤有机碳的影响

减施化肥下, SOC 的降幅高低依次为碱性土壤、中性土壤和酸性土壤, 分别为 4.11%、3.35%和 1.25%。而有机肥替代化肥下, 碱性土壤的 SOC 增幅最大, 为 18.56%。此外, 减施化肥措施下, 初始 SOC 小于 10 g·kg⁻¹ 时, 较常规施肥相比 SOC 显著下降 4.95%, 初始 SOC 超过 10 g·kg⁻¹ 时, SOC 变化不显著。而有机肥替代化肥措施下, SOC 累积程度相似, 分别为 14.70%和 14.78%。不同初始全氮含量下减施化肥对 SOC 无显著影响, 但有机肥替代化肥对 SOC 均有显著提高, 其中在 0.9~1.5 g·kg⁻¹ 时, SOC 累积效果显著, 增幅为 16.66% (图 2)。

在土壤初始速效养分中, 不同初始碱解氮、有效磷及速效钾含量对两种施肥制度 SOC 的影响也

不尽相同。减施化肥下, 初始碱解氮小于 100 mg·kg⁻¹ 时, SOC 损失较大, 为 1.62%~2.93%, 而有机肥替代下碱解氮含量大于 50 mg·kg⁻¹ 时 SOC 增幅较大, 为 14.91%~16.86%。此外, 减施化肥下, 当初始有效磷大于 20 mg·kg⁻¹ 或初始速效钾小于 75 mg·kg⁻¹ 时, SOC 损失最大, 分别为 6.91%和 4.97%。而有机肥替代下初始有效磷大于 20 mg·kg⁻¹ 或初始速效钾小于 75 mg·kg⁻¹ 时有机碳增幅最显著, 分别为 12.49%和 24.29% (图 2)。

2.3 减施化肥与有机肥替代下不同土地利用类型和方式土壤有机碳的变化

从土地利用类型来看, 减施化肥下园地和农田 SOC 的损失相近, 均高于菜地, 有机碳损失分别为 3.06%和 2.61%, 其中菜地 SOC 的变化并不显著。在有机肥替代下 SOC 均显著增加, 增幅由高到低依

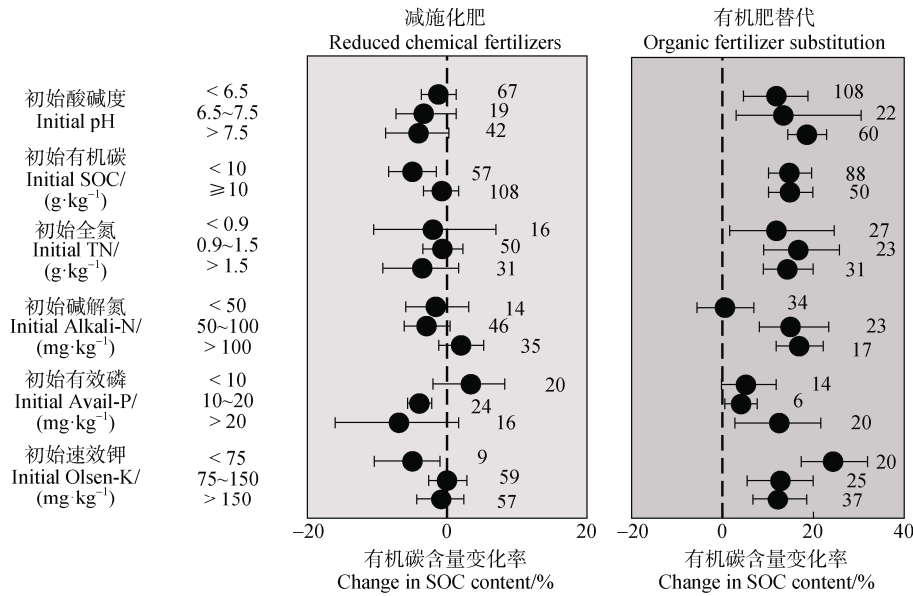
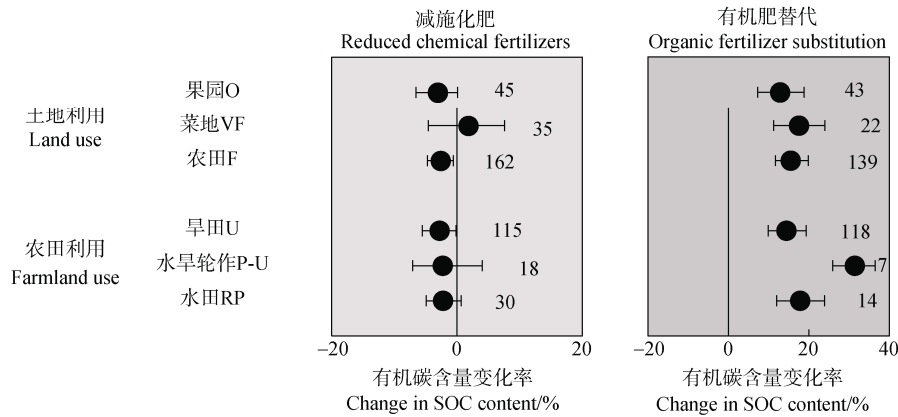


图 2 不同土壤初始理化性质条件下减施化肥和有机肥替代土壤有机碳含量变化率

Fig. 2 Changes in SOC contents with reduced chemical fertilizers or organic fertilizer substitution under different initial soil properties

次为菜地、农田和园地，增幅为 12.81%~17.50%。从农田利用方式来看，减施化肥下水田、旱田和水旱轮作的 SOC 的变化均不显著。而有机肥替代均显

著提高了这三类农田的 SOC，其中水旱轮作下有机碳增加最显著，增幅可达 31.39%，高于水田和旱田（图 3）。



Note: O, orchard; VF, vegetable field; F, farmland; RP, Rice paddy; U, Upland; P-U, Paddy-upland rotation.

图 3 减施化肥与有机肥替代下不同土地利用类型和方式土壤有机碳含量变化率

Fig. 3 Changes in SOC contents with reduced chemical fertilizers or organic fertilizer substitution under different land use types and practices

2.4 减施化肥与有机肥替代下影响土壤有机碳变化的主要因子

利用随机森林模型，估算了减施化肥和有机肥替代对土壤有机碳的关键影响因子。减施化肥下，pH、速效钾、碱解氮、有效磷和海拔是影响有机碳变化的主要因子。而在有机替代下，除有效磷和速效钾外，碱解氮、pH、有机碳、全氮、海拔、年均

降水和年均气温均是影响有机碳变化的主要因子（图 4）。

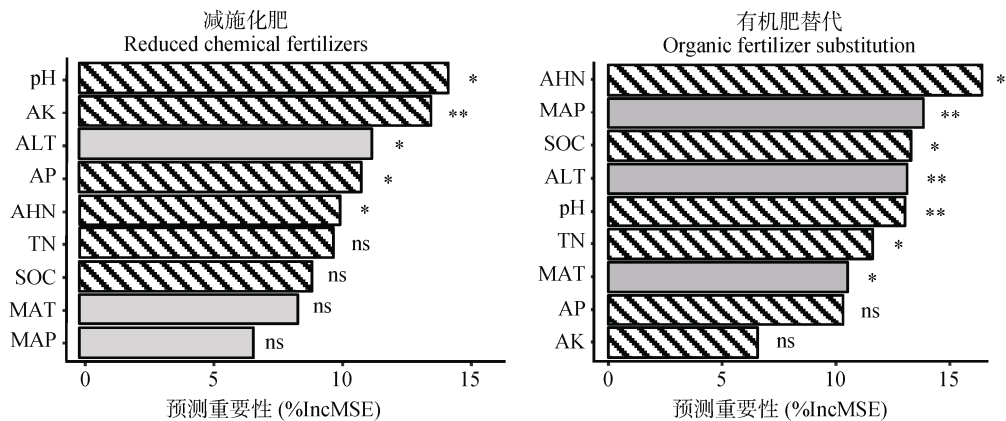
3 讨论

3.1 土壤有机碳含量对减施化肥的响应

与常规施肥相比，化肥减施 SOC 含量总体呈下

降趋势(图1),这主要是因为化肥尤其是氮肥的减施会导致作物生长受限,作物残体碳输入减少,从而导致SOC下降^[6]。从气候带来看,在暖温带与中温带SOC损失相当,均高于亚热带(图1),一方面是因为亚热带地区土壤初始SOC更低,进而限制了SOC的矿化潜力^[15]。另一方面,减施化肥导致氮素受限引起的SOC固存在温带气候带中表现更为强烈^[16]。温度和降水被认为是在空间和时间尺度上影响SOC积累的决定因素^[16]。在本研究中,相对较低的年均气温和降水气候条件下(年均气温 $<10^{\circ}\text{C}$

和降水 $<1000\text{mm}$)化肥减施使得SOC损失更大(图1)。这是因为在年均气温低的地区,SOC分解的敏感性更高,导致其碳库更容易变化^[17]。在较高的降水可以通过降低氧气可利用性,导致好氧微生物活性较低,进而减少了土壤有机碳损失^[18]。海拔差异在区域尺度上是气温和降水等环境因素的综合体现。在本研究中,土壤有机碳的损失随海拔升高有增加的趋势,但均无显著差异(图1),这主要是因为气温和降水对化肥减施土壤有机碳的影响有限(图4)。



注:阴影代表土壤理化因子,非阴影代表气候环境因子,* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$ 。pH,土壤酸碱度;AK,速效钾;ALT,海拔;AP,有效磷;AHN,碱解氮;TN,全氮;SOC,土壤有机碳;MAT,年均气温;MAP,年均降水。Note: Shaded areas represent soil physicochemical factors, non-shaded areas represent climatic and environmental factors, * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$ 。pH, soil acidity and alkalinity; AK, available potassium; ALT, altitude; AP, available phosphorus; AHN, available nitrogen by alkaline hydrolysis; TN, total nitrogen; SOC, soil organic carbon; MAT, mean annual temperature; MAP, mean annual precipitation.

图4 气候地理和土壤初始理化因子对土壤有机碳变化的相对重要性

Fig. 4 Relative importance of climatic geography and initial soil physicochemical factors on changes in SOC contents

减施化肥下表层有机碳的损失远大于亚表层(图3),这可能是由于表层土壤受到的人为扰动更多,加速了SOC的损失,而且随着土层的不断加深,土壤碳库中稳定碳组分的比例逐渐增加,更不容易受外界土壤环境变化的影响^[19]。现有证据表明,减施化肥下底土土壤含有更多高C/N的惰性有机碳,这限制了微生物的利用,有利于有机碳的积累^[20]。本研究发现pH是化肥减施土壤有机碳变化的最重要因子(图4)。随着初始pH的升高,减施化肥SOC损失有增大的趋势,但均无显著变化。一方面,这是由于减施化肥减缓了土壤酸化,有利于酶和微生物对土壤碳的周转,降低了SOC的损失^[21]。另一方面,碱性环境下会显著提高SOC溶

解度和微生物呼吸,这可能是碱性环境下SOC损失最大的重要原因^[22]。

减施化肥通过改变土壤养分的有效性进而影响土壤微生物的活性。初始SOC高的土壤减施化肥对微生物生物量没有影响,而对初始有机碳较低的土壤,当肥料用量减少时,土壤微生物生物量会降低^[23],由此可知减施化肥下初始有机碳低的土壤有机碳库下降较大。随全氮和碱解氮含量的变化,化肥减施并不会导致有机碳的显著损失。有研究发现减施化肥下,土壤全氮和碱解氮含量无显著变化,有机碳的下降不显著^[6]。土壤初始有效磷和速效钾对化肥减施土壤SOC的影响也存在差异。有证据表明,磷肥减施下有效磷含量的减少降低了土壤微生

物生物量和氧化酶活性,这减缓了有机碳的分解^[24],因此低土壤有效磷($<10\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)下 SOC 有增加的趋势。而土壤速效钾作为减施化肥土壤有机碳变化的重要因子(图 4),被认为是影响土壤团聚体稳定性的主要养分因子,较高的速效钾含量可降低团聚体的破碎,减缓 SOC 的损失^[25],因此高土壤速效钾下 SOC 的损失更少(图 2)。

不同土地利用类型和农田利用方式同样强烈影响着化肥减施下土壤有机碳的变化。本研究发现,园地和农田 SOC 的损失相近,均高于菜地(图 3)。Poeplau 等^[26]通过研究发现,减施化肥下土壤有机碳储量显著下降,这与本研究结果相同。已有研究表明,减氮会增加园草地植物群落组成中豆科植物的比例,但同时减磷又会抑制豆科植物的生长,因此可能并不会影响植物来源碳的输入量,导致化肥减施下 SOC 的变化不显著^[26-27]。农田自身生物量归还较少,且土壤的扰动程度越大,不利于 SOC 的积累;而菜地通常养分含量较高,因此短期内受化肥减施的影响较小。本研究中,减施化肥下不同农田利用方式的 SOC 均有下降的趋势,但都不显著。减施化肥会降低作物产量和地下碳输入,但水田和水旱轮作土壤的厌氧环境减缓了有机碳的周转^[28]。

3.2 土壤有机碳含量对有机肥替代的响应

有机肥替代化肥后,土壤有机碳显著增加(图 1)。有机肥中的有效养分可直接促进作物的生长,促进根系分泌物以及作物残留物归还土壤,从而增加土壤有机碳含量^[29]。有机肥还为微生物繁殖提供碳源和养分,微生物数量的增加有利于残体碳的积累^[29]。有机肥还可促进土壤团聚体的形成,并提高其稳定性,从而提高对土壤有机碳的固持^[30]。MacDonald 等^[31]发现有机肥替代后氮有效性的提高抑制了可降解惰性碳相关酶的活性,从而增强土壤的固碳潜力。而 Dash 等^[32]发现施用有机肥可提高土壤 C/N,微生物生长受限导致矿化作用减弱,促进了有机碳的积累。本研究表明有机肥替代后不同气候带的土壤有机碳均有显著累积,增幅由高到低依次为亚热带、中温带和暖温带(图 1)。虽然较中温带和暖温带相比,亚热带平均气温更高,可能导致更高的有机碳分解速率,但亚热带仍表现出最强的有机碳积累能力。这是由于有机肥替代下气候带对有机碳的积累效应不仅受气候的影响,同时还受人为管理活动所调控。不同的温度、降水和海拔条件下有机

肥替代均显著促进了土壤有机碳的积累(图 1)。气候因素作为控制土壤碳循环的重要因子,影响着有机物料输入后转化为土壤有机碳的重要过程^[33]。有研究表明发现,年均气温较低地区有机肥输入与土壤混合后带入大量土壤微生物,微生物发挥的作用较高温地区更显著;而平均气温较高地区,有机肥分解后期,土壤对有机碳的固定作用会更强烈,抑制了有机肥的分解,其稳定碳组分明显增加,这有利于有机碳的积累^[34]。与减施化肥不同,有机肥替代下年均降水是影响土壤有机碳变化的重要因子(图 4)。此外,通常认为有机肥施用对土壤有机碳的促进作用随着海拔升高而增加,但也有研究发现高海拔地区碳排放量更高,这不利于有机碳的积累^[35]。

有机肥替代下,不同土层有机碳均显著累积,但表层的有机碳累积效应更强一些。这是因为替代化肥的有机肥供应后,主要保留在表层土壤,经微生物转化为顽固性碳库保持下来。^[36]本研究还发现碱性土壤有机替代后有机碳的增幅显著高于中性和酸性土壤(图 2),这是因为较低的 pH 会抑制土壤微生物的活性,对有机肥的腐解能力降低,从而降低了外源碳的输入和转化^[37]。

尽管初始有机碳含量较低的土壤具有更强的固碳潜力和效率^[14],但不同初始有机碳水平土壤有机肥替代下 SOC 的积累程度相近。本研究发现碱解氮为有机肥替代下土壤有机碳变化的最重要因子(图 4)。除低水平碱解氮外($<50\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),不同初始全氮/碱解氮含量对有机肥替代土壤有机碳均表现为显著增加,且增幅接近。高量有机肥替代下,随全氮和碱解氮的变化,作物产量和氮肥利用率无显著变化,这导致了外源碳输入对土壤有机碳贡献无显著差别^[38]。本研究还发现,有机肥替代土壤初始有效磷和速效钾对 SOC 的影响均不显著(图 4)。然而有研究表明低碱解氮和有效磷水平土壤施入有机肥后,导致土壤活性组分 C: N 和 C: P 升高,微生物与作物共同竞争氮磷,并加速矿化有机质吸收其中的氮磷^[39]。有机肥替代下土壤速效钾水平对 SOC 的影响与有效磷和碱解氮相反。还有证据表明,土壤速效钾含量与土壤团聚体粒径大小呈正相关,小团聚体不容易破碎,有机质很难被微生物利用^[40],这有利于有机碳的积累。

本研究中,有机肥替代下有机碳的增幅由高到低依次为菜地、农田和果园(图 3)。这是由于菜地

较农田和园地施肥量最高,作物生长迅速,根系分泌物较多,且有机肥的施用增加了土壤腐殖质和微生物量^[41]。而园地土壤通气性相对较好,土壤孔隙度和氧气含量较高,好氧型微生物活性增强,有利于有机碳的分解^[42]。水分管理对土壤有机碳的变化也至关重要。有机肥替代下有机碳的增幅由高到低依次为水旱轮作、水田和旱地(图3)。相比于旱地,在水田的长期淹水环境中,真菌/细菌降低抑制了有机碳的矿化,并降低了微生物对有机肥的矿化释放,促进了土壤有机碳的积累^[43]。而干湿交替可以显著降低因CH₄排放以及激发效应强度造成的土壤碳损失,有机碳积累效果最强^[18]。研究发现无论是植物残体来源碳还是微生物残体来源碳均是水田输入更高^[44],有助于有机碳的积累。然而也有研究表明水田土壤木质素酚和氨基糖的比值较高,有机碳的稳定性低,更容易受环境或人为的干扰而造成有机碳的损失^[18, 29]。因此,有机肥替代下旱田和水田有机碳增幅有可能相近。

4 结 论

化肥减施下土壤有机碳总体下降2.61%,而有机肥替代下显著增加14.39%。两种施肥制度下,亚热带地区的气候环境条件更有利于土壤有机碳的固持。较亚表层相比,两种施肥制度对表层土壤有机碳的影响更大。随着初始有机碳的降低,化肥减施土壤有机碳的损失呈现增加的趋势,而有机肥替代土壤没有显著的差异。随着土壤初始pH、有效磷的增加以及速效钾的降低,化肥减施土壤有机碳呈现下降的趋势,而其对有机肥替代土壤的影响正好与之相反。pH和碱解氮分别是影响化肥减施和有机肥替代土壤有机碳变化的最重要因子。化肥减施下,不同土地利用土壤有机碳的损失表现为园地与农田相近且均高于菜地,不同农田利用方式下表现为旱田、水旱轮作和水田相近。而在有机肥替代下,有机碳的累积效应表现为菜地与农田相近且均高于园地,农田生态系统中由高到低则依次为水旱轮作、水田和旱田。

参考文献 (References)

[1] Liu Y L, Ge T D, van Groenigen K J, et al. Rice paddy soils are a quantitatively important carbon store

according to a global synthesis[J]. *Communications Earth & Environment*, 2021, 2: 154.

- [2] Liu Y L, Ge T D, Zhu Z K, et al. Carbon input and allocation by rice into paddy soils: A review[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2019, 133: 97—107.
- [3] Liu Y L, Ge T D, Wang P, et al. Residence time of carbon in paddy soils[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 400: 136707.
- [4] Ma J F, Chen Y P, Wang K B, et al. Re-utilization of Chinese medicinal herbal residues improved soil fertility and maintained maize yield under chemical fertilizer reduction[J]. *Chemosphere*, 2021, 283: 131262.
- [5] Bi R Y, Xu X T, Zhan L P, et al. Proper organic substitution attenuated both N₂O and NO emissions derived from AOB in vegetable soils by enhancing the proportion of *Nitrosomonas*[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 866: 161231.
- [6] Li C Z, Aluko O O, Yuan G, et al. The responses of soil organic carbon and total nitrogen to chemical nitrogen fertilizers reduction base on a meta-analysis[J]. *Scientific Reports*, 2022, 12 (1): 16326.
- [7] Liu L L, Greaver T L. A global perspective on belowground carbon dynamics under nitrogen enrichment[J]. *Ecology Letters*, 2010, 13 (7): 819—828.
- [8] Shu X Y, He J, Zhou Z H, et al. Organic amendments enhance soil microbial diversity, microbial functionality and crop yields: A meta-analysis[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 829: 154627.
- [9] Kong D N, Kang G D, Li P, et al. Effects of combined application of organic fertilizer on the active components of organic carbon in upland purple soil under reducing chemical fertilizer application[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40 (4): 1073—1080. [孔德宁, 康国栋, 李鹏, 等. 化肥减施条件下配施有机肥对旱地紫色土有机碳活性组分的影响[J]. *生态学杂志*, 2021, 40 (4): 1073—1080.]
- [10] Tao F, Huang Y Y, Hungate B A, et al. Microbial carbon use efficiency promotes global soil carbon storage[J]. *Nature*, 2023, 618 (7967): 981—985.
- [11] Aye N S, Butterly C R, Sale P W G, et al. Interactive effects of initial pH and nitrogen status on soil organic carbon priming by glucose and lignocellulose[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2018, 123: 33—44.
- [12] Bai X X, Tang J, Wang W, et al. Organic amendment effects on cropland soil organic carbon and its implications: A global synthesis[J]. *Catena*, 2023, 231: 107343.
- [13] Rubel F, Kotteck M. Observed and projected climate shifts 1901—2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification[J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 2010, 19 (2): 135—141.
- [14] Zhang Y C, Wang P, Liu Y L, et al. Effects of long-term

- crop cultivation on soil organic carbon in china's farmland: A Meta-analysis[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2024, 61 (6): 1628—1638. [张迎春, 王萍, 刘亚龙, 等. 长期种植作物对中国农田土壤有机碳影响的 Meta 分析[J]. *土壤学报*, 2024, 61 (6): 1628—1638.]
- [15] Du E Z, de Vries W. Nitrogen-induced new net primary production and carbon sequestration in global forests[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 242: 1476—1487.
- [16] Ngaba M J Y, Uwiragiye Y, Zhou J B. Patterns and controlling factors of soil carbon sequestration in nitrogen-limited and-rich forests in China — A meta-analysis[J]. *PeerJ*, 2023, 11: e14694.
- [17] Sun Y N, Yu X C, Huang S. Long-term organic amendment reduces the temperature sensitivity of organic carbon decomposition in an upland soil of subtropical China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(3): 185—189.
- [18] Li B Z, Zhou P, Li Y H, et al. Progress on the mechanism of sustainable carbon sequestration in subtropical paddy soils[J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2022, 41 (6): 71—78. [李宝珍, 周萍, 李宇虹, 等. 亚热带稻田土壤持续固碳机制研究进展[J]. *华中农业大学学报*, 2022, 41 (6): 71—78.]
- [19] Xiao L J, Wang G C, Wang M M, et al. Younger carbon dominates global soil carbon efflux[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28 (18): 5587—5599.
- [20] Tingskou R, Unc A. Impact of fertilizer source on the dynamics of carbon and nutrients in a podzol designated for land-use conversion[J]. *Soil Use and Management*, 2023, 39 (4): 1491—1503.
- [21] Yao J H, Sheng X W, Wang C Y, et al. Changes in soil aggregate stability and organic carbon content in corn fields with different pH values[J]. *Journal of Jilin Agricultural University*, 2026, 48 (1): 100—107. [姚俊红, 盛学文, 王玉呈, 等. 不同 pH 玉米田土壤团聚体稳定性及有机碳含量的变化[J]. *吉林农业大学学报*, 2026, 48 (1): 100—107.]
- [22] Marinós R E, Bernhardt E S. Soil carbon losses due to higher pH offset vegetation gains due to calcium enrichment in an acid mitigation experiment[J]. *Ecology*, 2018, 99 (10): 2363—2373.
- [23] Bardgett R D, Leemans D K. The short-term effects of cessation of fertiliser applications, liming, and grazing on microbial biomass and activity in a reseeded upland grassland soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1995, 19 (2): 148—154.
- [24] Luo X Z, Zhang L L, Lin Y B, et al. Nitrogen availability mediates soil organic carbon cycling in response to phosphorus supply: A global meta-analysis[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2023, 185: 109158.
- [25] Zhang Y, Liu Y L, Li Y, et al. Effects of land use patterns on soil aggregate stability and organic carbon distribution in the Karst rocky desertification area[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52 (6): 1308—1315. [张艳, 刘彦伶, 李渝, 等. 喀斯特石漠化地区土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳分布特征的影响[J]. *土壤通报*, 2021, 52 (6): 1308—1315.]
- [26] Poeplau C, Zopf D, Greiner B, et al. Why does mineral fertilization increase soil carbon stocks in temperate grasslands?[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 265: 144—155.
- [27] Spohn M, Pötsch E M, Eichorst S A, et al. Soil microbial carbon use efficiency and biomass turnover in a long-term fertilization experiment in a temperate grassland[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2016, 97: 168—175.
- [28] Liu Y L, Ge T D, Ye J, et al. Initial utilization of rhizodeposits with rice growth in paddy soils: Rhizosphere and N fertilization effects[J]. *Geoderma*, 2019, 338: 30—39.
- [29] Wang H X, Xu J L, Liu X J, et al. Effects of long-term application of organic fertilizer on improving organic matter content and retarding acidity in red soil from China[J]. *Soil & Tillage Research*, 2019, 195: 104382.
- [30] Liu Y L, Wang P, Wang J K. Formation and stability mechanism of soil aggregates: Progress and prospect[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2023, 60 (3): 627—643. [刘亚龙, 王萍, 汪景宽. 土壤团聚体的形成和稳定机制: 研究进展与展望[J]. *土壤学报*, 2023, 60 (3): 627—643.]
- [31] MacDonald C A, Delgado-Baquerizo M, Reay D S, et al. Soil nutrients and soil carbon storage[M]//*Soil Carbon Storage*. Amsterdam: Elsevier, 2018: 167—205.
- [32] Dash P K, Bhattacharyya P, Roy K S, et al. Environmental constraints' sensitivity of soil organic carbon decomposition to temperature, management practices and climate change[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 107: 105644.
- [33] Ma J P, Wu M Y, Zhang Y Q, et al. Accumulation and influencing factors of soil microbial necromass carbon in different grassland types of Ningxia, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44 (20): 9300—9313. [马进鹏, 吴梦瑶, 张雅琪, 等. 宁夏不同草地类型土壤微生物残体碳积累特征及其影响因素[J]. *生态学报*, 2024, 44 (20): 9300—9313.]
- [34] Li L. Decomposition characteristics of organic materials and driving Decomposition characteristics of organic materials and driving factors in typical cropland soils[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018. [李玲. 典型农田土壤中有有机物料分解特性及影响因素[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.]
- [35] Tian Q X, Jiang Q H, Zhao R D, et al. Microbial properties control soil priming and exogenous carbon incorporation along an elevation gradient[J]. *Geoderma*, 2023, 431: 116343.

- [36] Chen X, Lin J J, Wang P, et al. Resistant soil carbon is more vulnerable to priming effect than active soil carbon[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2022, 168: 108619.
- [37] Chen D M, Li J J, Lan Z C, et al. Soil acidification exerts a greater control on soil respiration than soil nitrogen availability in grasslands subjected to long-term nitrogen enrichment[J]. *Functional Ecology*, 2016, 30 (4): 658—669.
- [38] Ren K Y, Sun Y, Zou H Q, et al. Effect of replacing synthetic nitrogen fertilizer with animal manure on grain yield and nitrogen use efficiency in China : A meta-analysis[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1153235.
- [39] Bordeleau L M, Prévost D. Nodulation and nitrogen fixation in extreme environments[J]. *Plant and Soil*, 1994, 161 (1): 115—125.
- [40] Lei W Y, Li N, Teng P J, et al. Decomposition processes of organic materials and their mechanisms of improving soil fertility in cropland ecosystems[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30 (9): 1393—1408. [雷琬莹, 李娜, 滕培基, 等. 农田生态系统有机物料腐解过程及土壤培肥机制研究[J]. *中国生态农业学报*, 2022, 30 (9): 1393—1408.]
- [41] Liu X J, Ruecker A, Song B, et al. Effects of salinity and wet-dry treatments on C and N dynamics in coastal-forested wetland soils: Implications of sea level rise[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2017, 112: 56—67.
- [42] Zhang X F, Xin X L, Zhu A N, et al. Linking macroaggregation to soil microbial community and organic carbon accumulation under different tillage and residue managements[J]. *Soil & Tillage Research*, 2018, 178: 99—107.
- [43] Wang X J, Bei Q C, Liu G, et al. Microbial abundance and community composition in different types of paddy soils in China and their affecting factors[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2021, 58 (3): 767—776. [王晓洁, 卑其成, 刘钢, 等. 不同类型水稻土微生物群落结构特征及其影响因素[J]. *土壤学报*, 2021, 58 (3): 767—776.]
- [44] Liu Y L, Wang P, Cai G, et al. Divergent accumulation of microbial and plant necromass along paddy soil development in a millennium scale[J]. *Soil & Tillage Research*, 2023, 232: 105769.

(责任编辑: 卢 萍)