

doi: 10.11838/sfsc.1673-6257.23342

施肥对我国农田土壤易氧化有机碳影响的整合分析

何宁波^{1, 2}, 高 静^{1, 2}, 孙 楠^{3*}, 李 然³, 王恒飞^{1, 2}, 卢晋晶^{1, 2}, 徐明岗^{1, 2, 3*}

(1. 山西农业大学资源环境学院, 山西 太谷 030800; 2. 山西农业大学生态环境产业技术研究院 / 土壤环境与养分资源山西省重点实验室, 山西 太原 030031; 3. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 / 北方干旱半干旱耕地高效利用全国重点实验室 / 农业农村部耕地质量监测与评价重点实验室, 北京 100081)

摘 要: 土壤易氧化有机碳 (ROC) 作为土壤有机碳的重要组成部分, 与土壤养分供应密切相关, 在提升土壤肥力方面有着重要意义。施肥是影响土壤易氧化有机碳的重要措施之一, 探讨不同土壤性质和气候条件下施肥对 ROC 变化的影响, 为农田合理施肥和培肥地力提供理论依据。收集了 2000—2022 年公开发表的文献 78 篇, 建立了 378 组包含不同施肥条件下表层土壤 ROC 含量的数据库。采用整合分析和随机森林方法分析全国农田土壤 ROC 的提升幅度在不同施肥措施之间的差异, 定量分析不同肥料施用量, 土壤性质和气候条件等因素对 ROC 提升的相对贡献。结果表明: (1) 施肥能显著提高 ROC 的含量, 且施用有机肥 (单施或配施) 对 ROC 的提升幅度 (70.1%) 是施用化肥 (17.7%) 的 4.1 倍。随着有机肥施用量的增加, ROC 的提升幅度也在逐渐提高。(2) 在不同土壤养分含量下, 施肥均能显著增加 ROC 含量, 但在养分较低的土壤中 ROC 的提升幅度显著高于养分较高的土壤; 中性土壤施用化肥后对 ROC 的提升幅度 (34.8%) 显著高于酸性土壤 (16.6%) 和碱性土壤 (10.4%), 但施用有机肥对 ROC 的提升幅度在不同 pH 下的土壤中无显著差异。(3) 不同气候条件下, 施肥对 ROC 的提升幅度存在显著差异, 寒冷干旱地区施用有机肥对 ROC 的提升幅度显著高于温暖湿润地区。(4) 不同施肥条件下 (施用化肥和有机肥) 均是土壤性质对 ROC 的提升幅度起决定性作用。因此, 建议在我国构建以有机肥为核心的肥料施用体系, 因地制宜地选择有机肥配施化肥的施用量, 从而改善土壤性质, 以最大的程度提高 ROC 含量, 提升土壤肥力。

关键词: 施肥; 易氧化有机碳; 土壤性质; 气候; 整合分析

土壤有机碳 (SOC) 是农作物生产中的重要肥力要素, 各碳组分含量也与土壤肥力密切相关^[1]。能被 333 mmol/L KMnO₄ 溶液氧化的有机碳称作易氧化有机碳 (ROC), 其在种植作物时变化最大^[2]。土壤 ROC 是 SOC 活性较高的主要组分, 不仅是土壤养分的潜在来源, 而且是土壤微生物活动的重要能量来源, 在土壤碳循环和农田可持续管理方面具有重要意义^[3]。近年来, 关于施肥对农田土壤 ROC 含量的影响已有大量研究^[4]。石丽红等^[5]研究认为, 长期施肥均可以不同程度地提高土壤中 ROC 的含量, 且以有机无机肥配合施用的提升幅度

最高。罗原骏等^[6]研究发现, 与不施肥相比, 施用化肥与有机肥均显著提高了 ROC 含量, 分别提高了 33% 和 109%。Li 等^[7]研究表明, 施有机肥可以显著提高 ROC 含量, 且有机肥施用量增加 1 倍后, ROC 含量显著提高了 76%; 然而, 张继光等^[8]研究发现, 虽然施用化肥可以显著提高 ROC 含量, 但化肥施用量增加 1 倍后对 ROC 含量的提升作用不显著。此外, 也有研究发现, 施用化肥能够抑制土壤活性有机质的释放, 从而降低 ROC 的含量^[9-10], 而且施用有机肥也不会对 ROC 含量造成显著影响^[11-12]。张英等^[13]通过 11 年的定位试验发现, 施用化肥或有机肥均会降低 ROC 的含量。另外, 土壤性质的不同也会导致 ROC 含量对施肥的响应产生较大的变化。不同土壤养分条件下施用有机肥对 ROC 的提升幅度存在显著差异, 在养分含量较低的土壤中施用有机肥对 ROC 的提升幅度显著高于养分含量较高的土壤^[14-15]。除此之外, 气候的不同也会导致施肥对 ROC 含量的提升幅度有所

收稿日期: 2023-06-04; 录用日期: 2023-08-19
基金项目: 山西省重点研发计划项目 (202102140601010); 山西省科技合作交流项目 (202104041101002)。
作者简介: 何宁波 (1999-), 在读硕士研究生, 主要从事耕地质量演变研究。E-mail: 2549741790@qq.com。
通讯作者: 徐明岗, E-mail: xuminggang@caas.cn; 孙楠, E-mail: sunnan@caas.cn。

差异,气候也是影响施肥对 ROC 含量提升的重要因素^[16]。于维水等^[17]研究发现,在寒冷干旱的东北地区施用有机肥对 ROC 含量的提升幅度高于温暖湿润的南方地区,是南方地区的 1.8 倍。因此,施肥对 ROC 含量的影响存在着一定的不确定性,需要在全国范围内系统量化施肥对 ROC 含量的影响。众多研究者都是基于一个或者某几个长期试验点进行的区域分析,因此,其结果受该区域土壤性质与气候条件的限制,为了系统认识不同条件下施肥对 ROC 含量的影响,须利用这些相对独立的研究进行大样本数据整合分析。通过对已发表文献数据的收集和整理,采用整合分析的方法,定量分析不同施肥处理、土壤性质和气候条件下施肥对 ROC 含量的影响,并利用随机森林方法分析肥料施用量、土壤性质和气候条件对 ROC 提升幅度的贡献率,为农田 ROC 含量的可持续管理、养分有效利用和土壤肥力提升提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 数据来源

为了系统分析施肥对我国农田 ROC 含量的影响,本研究以“中国农田”“易氧化有机碳”和“施肥”为主要关键词,并设置检索时间“2000—2022 年”,从中国知网、维普、百度学术、Web of Science 和 Science Direct 等文献数据库对相关文献进行检索。筛选文献条件为:(1)同一试验必须包含对应的处理组和对照组,处理组为施用化肥(单施氮、磷、钾肥和综合施用氮磷钾肥等)或有机肥(单施或有机无机配施),对照组为不施肥,且每一个试验处理的重复数必须 ≥ 3 ;(2)ROC 的测定方法均为 333 mmol/L 的高锰酸钾氧化法;(3)收集的数据中,要包含试验地点的年均温与年降水;土壤初始理化性质要包括有机质、全氮和 pH;施肥措施中包括施肥类型和施用量;(4)处理组中的年均化学氮肥和有机肥施用量均转化为年均氮投入量;(5)所有试验均为田间试验。共筛选出 78 篇已发表的文献,包含 378 组数据样本。

对于收集到的影响因素,根据文献及数据情况进行分组。其中,年均温分为 ≤ 8 、 $8 \sim 17$ 和 $>17^\circ\text{C}$ ^[18];年降水参考尚宗波等^[19]的相关研究,将其分为 ≤ 600 、 $600 \sim 1200$ 和 >1200 mm;年均氮投入量分为 3 组,即 ≤ 120 、 $120 \sim 240$ 和 >240

$\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{年})$ ^[20];土壤初始养分指标主要是依据全国第二次土壤普查时土壤养分分级标准^[21]划分,土壤有机质含量一级、二级为丰富($>30 \text{ g/kg}$),三级、四级为中等($10 \sim 30 \text{ g/kg}$),五级和六级为缺乏($\leq 10 \text{ g/kg}$);土壤全氮含量一级、二级为丰富($>1.5 \text{ g/kg}$),三级、四级为中等($0.75 \sim 1.5 \text{ g/kg}$),五级和六级为缺乏($\leq 0.75 \text{ g/kg}$);土壤 pH 分为酸性土壤($\text{pH} \leq 6.5$)、中性土壤($6.5 < \text{pH} \leq 7.5$)和碱性土壤($\text{pH} > 7.5$)^[22]。

本文中所有的数据均来自已发表的文献。在数据搜集的过程中,如果文献中的数据是以图表形式表现的,则采用 GetData Graph Digitizer 2.24 来获得;文献中土壤初始 SOC 含量需乘以转化系数 1.724 得到土壤初始有机质含量。如图 1 所示,施肥后 ROC 含量响应比符合正态分布($P < 0.05$),检验结果符合 Meta 分析的必要条件。

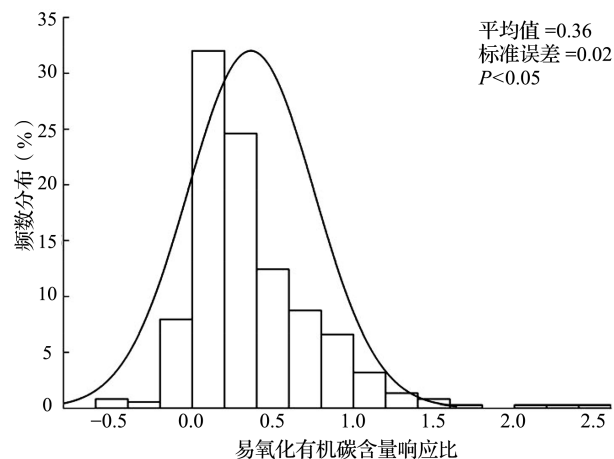


图 1 易氧化有机碳的分布

注:曲线代表数据的高斯分布(正态分布)。

1.2 数据分析

Meta 分析是一种综合具有同一主题的多个独立研究的统计学方法,其在生态学上的应用逐渐增加^[23]。本研究采用整合分析的方法,比较施肥对 ROC 影响的效应大小。在进行效应量计算时,每组数据中必须包含平均数(M)、标准差(SD)和样本量(n),若文献中给出的是标准误(SE),则用公式(1)进行转换:

$$SD = SE\sqrt{n} \quad (1)$$

式中, n 是重复次数。整合分析需要对每个数据集进行变异性评估,然而,一些文献中没有明确指出 SD 或 SE ,因此,本文采用整个数据库的变异系数来计算缺失的 SD ^[24]。统计学指标选择响应比(RR)

作为效应值,并计算 95% 置信区间 (95%CI)。在计算响应比前,需对各试验处理和结果的异质性进行卡方检验与 I^2 检验,如果纳入的研究结果之间没有异质性,即 $P \geq 0.05$ 、 $I^2 < 50\%$,选用固定效应模型 (FEM),反之则用随机效应模型 (REM)^[25]。其中,RR 计算公式如下:

$$RR = M_d / M_c \quad (2)$$

式中, M_d 与 M_c 分别表示处理组和对照组的平均值。在分析过程中,需要将 RR 对数化,采用自然对数响应比 (lnRR) 来反映施肥对 ROC 含量的影响程度,并通过式 (3) 计算可得^[26]:

$$\ln RR = \ln(M_d / M_c) = \ln M_d - \ln M_c \quad (3)$$

此外,平均值的变异系数 V 、权重 W_{ij} 、权重响应比 RR_{++} 、 RR_{++} 的标准误 (S) 以及其 95% CI 按如下公式计算^[27]:

$$V_{\ln RR} = \frac{SD_d^2}{n_d M_d^2} + \frac{SD_c^2}{n_c M_c^2} \quad (4)$$

$$W_{ij} = 1 / V \quad (5)$$

$$RR_{++} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{ki} W_{ij} RR_{ij} / \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{ki} W_{ij} \quad (6)$$

$$S(RR_{++}) = 1 / \sqrt{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{ki} W_{ij}} \quad (7)$$

$$95\% CI = RR_{++} \pm 1.96 S(RR_{++}) \quad (8)$$

式 (4) 中, SD_d^2 和 SD_c^2 分别代表处理组和对照组的方差; n_d 和 n_c 分别表示处理组和对照组的样本数。效应值的标准差越小,分配的权重越大,权重响应比 (处理相对于对照增减的百分数) 及其 95% CI 可以通过 $(e^{RR_{++}} - 1) \times 100\%$ 来转化^[28]。若结果包含零点,表示和对照组相比,处理组对 ROC 的变化无显著影响,否则表示有显著影响 ($P < 0.05$)^[29]。

本研究采用 MetaWin 2.1 进行 Meta 分析,运用 Excel 2016 进行数据统计分析,用 SPSS 20.0 的 LSD 方法进行显著性检验,利用随机森林方法分析各因素对 ROC 含量提升的相对贡献率。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理下 ROC 含量的差异

施用有机肥处理下 ROC 含量显著高于不施肥和施用化肥处理 ($P < 0.05$),而施用化肥和不施肥处理下 ROC 含量无显著差异 (表 1)。不施肥、施用化肥和有机肥处理下的 ROC 含量均值分别为 2.77、3.05 和 4.72 g/kg。

表 1 不同施肥处理下土壤易氧化有机碳的含量 (g/kg)

项目	土壤易氧化有机碳		
	不施肥	化肥	有机肥
样本数	102	175	203
平均值	2.77b	3.05b	4.72a
中值	2.11	2.58	3.39
偏度	1.78	2.22	0.17
峰度	3.75	7.98	17.75
范围	0.22 ~ 11.76	0.35 ~ 15.29	0.69 ~ 35.61

注:不同小写字母表示各处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

2.2 不同施肥处理下 ROC 含量的差异

与不施肥相比,施肥能显著提高 ROC 的含量 ($P < 0.05$),且施用有机肥对 ROC 含量的提升幅度 (70.1%) 显著高于施用化肥 (17.7%),是施用化肥的 4.1 倍 ($P < 0.05$) (图 2)。不同年均氮投入量下,施肥均能显著提高 ROC 的含量。施用化肥或有机肥均在氮投入量 $> 240 \text{ kg} / (\text{hm}^2 \cdot \text{年})$ 时对 ROC 含量的提升幅度最高 (28.6% 和 81.1%),显著高于氮投入量 $120 \sim 240 \text{ kg} / (\text{hm}^2 \cdot \text{年})$ (8.9% 和 59.7%) 和 $\leq 120 \text{ kg} / (\text{hm}^2 \cdot \text{年})$ (14.8% 和 36.9%) 水平,同一施肥处理下后两者氮投入量对 ROC 的提升幅度不存在显著差异。

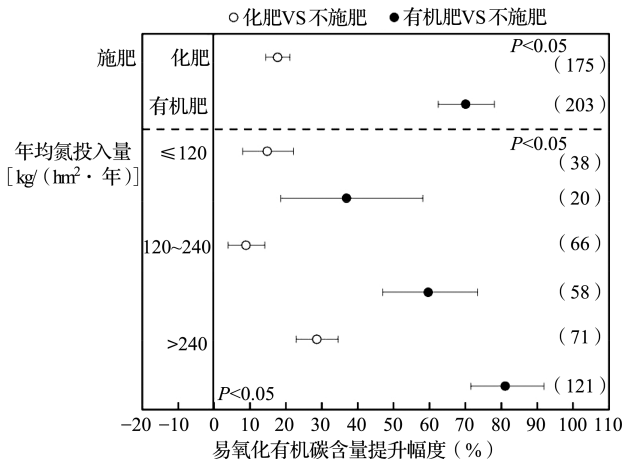


图 2 不同施肥处理及年均氮投入量下对土壤易氧化有机碳含量的影响

注:点和误差线分别代表增加的百分数及其 95% 的置信区间,如果 95% 的置信区间没有跨越零线表示处理与对照存在显著差异;括号内的数值代表样本数;右上方 P 值表示同一组间施用化肥与施用有机肥对 ROC 的提升幅度的差异,左下方 P 值表示同一施肥处理不同组间对 ROC 提升幅度的差异。下同。

2.3 不同土壤性质下施肥对 ROC 含量的影响

与不施肥相比,不同初始有机质、全氮含量

及土壤 pH 下, 施肥对 ROC 含量的提升幅度存在显著差异 (图 3)。当土壤有机质含量缺乏时, 施用化肥对 ROC 含量的提升幅度最高 (46.7%), 显著高于有机质含量中等和丰富的土壤 (12.0% 和 6.5%), 后两者之间不存在显著差异; 对于施用有机肥来说, 当土壤有机质含量缺乏时, 其对 ROC 含量的提升幅度最高 (87.0%), 显著高于有机质含量丰富的土壤 (52.2%), 但与有机质含量中等的土壤 (73.0%) 差异不显著。不同全氮含量水平下, 施肥对 ROC 含量的影响存在显著差异。与全氮含量中等 (16.4% 和 67.1%) 和丰富 (12.7% 和 58.8%) 的土壤相比, 在全氮含量缺乏的土壤中施用化肥与有机肥对 ROC 含量的提升幅度最高 (35.1% 和 92.9%), 而在全氮含量中等的土壤中施用化肥和有机肥对 ROC 含量的提升幅度均与全氮含量丰富的土壤无显著差异。不同土壤 pH 条件下, 相较于不施肥, 施用化肥和有机肥均可以显著提高 ROC 的含量。中性土壤下施用化肥对 ROC 含量的提升幅度 (34.8%) 显著大于酸性土壤 (16.6%) 与碱性土壤 (10.4%); 而施用有机肥对 ROC 含量的提升幅度在不同土壤 pH 下无显著差异。

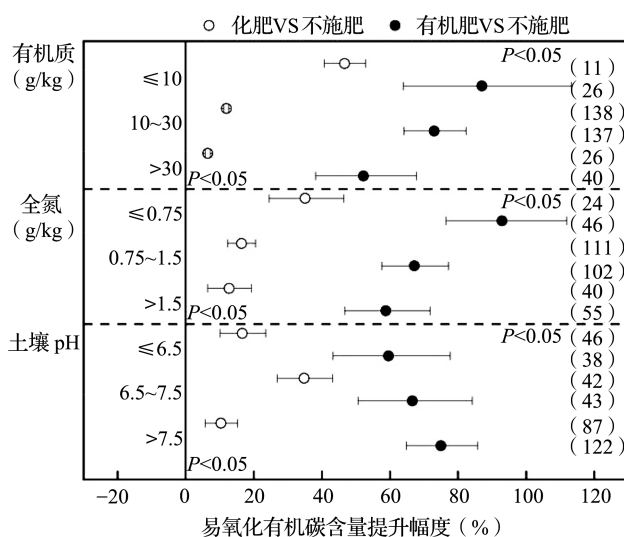


图 3 不同土壤性质下施肥对土壤易氧化有机碳含量的影响
注: pH 分组中左下角的 P 值仅表示施用化肥对 ROC 提升幅度的差异。

2.4 不同气候条件下施肥对 ROC 含量的影响

与不施肥相比, 不同气候条件下施肥均能显著提升 ROC 含量 ($P < 0.05$) (图 4)。不同年均温条件下, 施肥对 ROC 含量的提升幅度存在显著差异。在年均温 8 ~ 17℃ 的地区施用化肥对 ROC

含量的提升幅度最高 (21.4%), 显著高于年均温 $>17^\circ\text{C}$ 的地区 (8.0%), 但与年均温 $\leq 8^\circ\text{C}$ 的地区 (20.5%) 差异不显著; 另外, 在年均温 $\leq 8^\circ\text{C}$ 的地区施用有机肥对 ROC 含量的提升幅度最高 (92.0%), 分别是年均温 $>17^\circ\text{C}$ 的地区 (35.2%) 与年均温 8 ~ 17℃ 的地区 (75.2%) 的 2.6 和 1.2 倍, 且三者之间差异显著。不同年降水条件下, 施肥对 ROC 含量的提升幅度存在显著差异。在年降水量 600 ~ 1200 mm 的地区施用化肥对 ROC 含量的提升幅度最高 (42.5%), 显著高于 ≤ 600 mm 的地区 (13.0%), 但在年降水 ≤ 600 mm 的地区与 >1200 mm 的地区 (11.1%) 差异不显著; 在年降水 ≤ 600 mm 的地区施用有机肥对 ROC 含量的提升幅度最高 (75.3%), 显著高于 >1200 mm 的地区 (52.9%), 但与 600 ~ 1200 mm 的地区 (71.5%) 差异不显著。

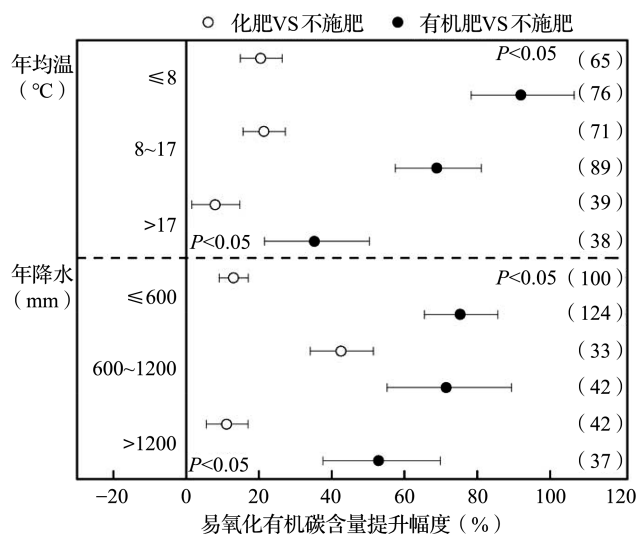


图 4 不同气候条件下施肥对土壤易氧化有机碳含量的影响

2.5 各影响因素对 ROC 含量提升的贡献率

由相关分析 (图 5 和图 6) 可知, 施用化肥处理下, 土壤 ROC 响应比与年均温、年降水、土壤初始 pH、土壤初始全氮含量、年均氮投入量和有机碳响应比存在显著的相关关系 ($P < 0.05$), 且 ROC 响应比与年均氮投入量和土壤有机碳响应比呈现显著线性正相关。施用有机肥处理下, 土壤 ROC 响应比与年均温和土壤初始全氮含量呈显著负相关, 而与年均氮投入量和有机碳响应比存在显著的正相关关系, 与土壤初始 pH 不相关。随机森林结果 (图 7) 表明, 施用化肥处理下, 土壤因素对 ROC 含量提升的贡献率最高 (52.6%), 是气候因素贡献率

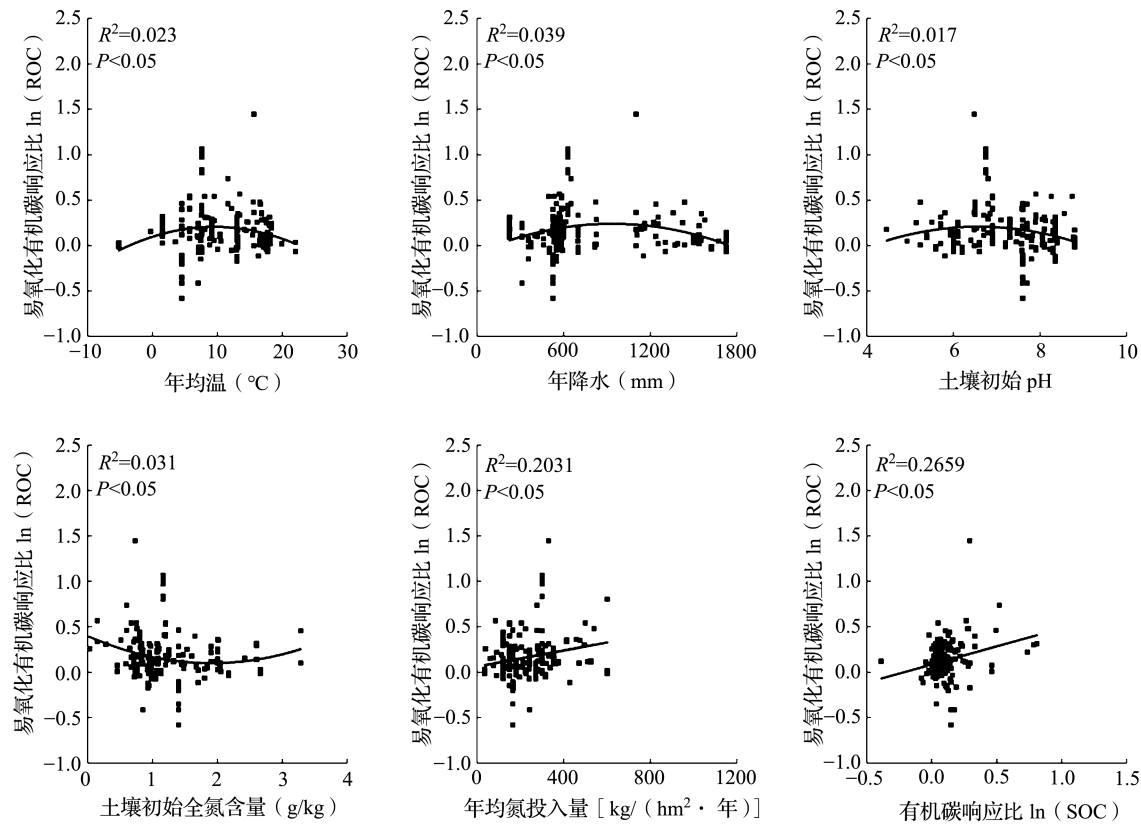


图5 施用化肥处理下各影响因素与土壤易氧化有机碳响应比的线性关系

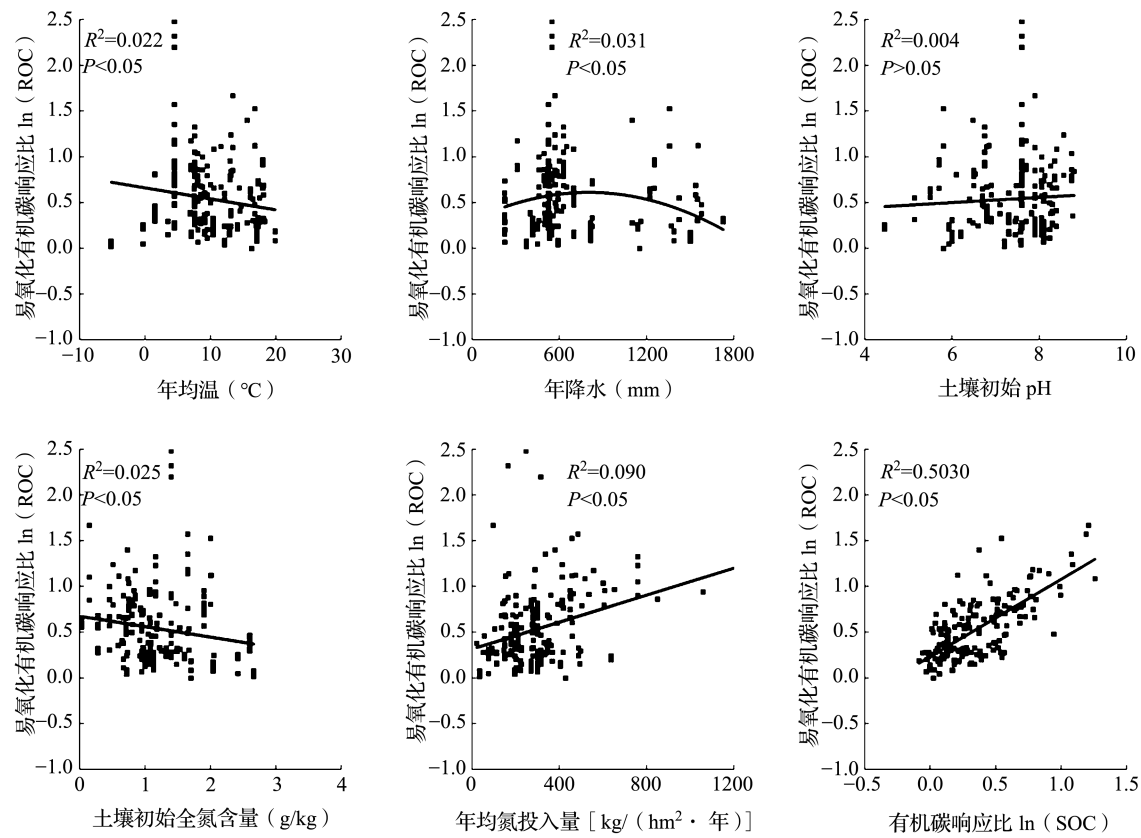


图6 施用有机肥处理下各影响因素与土壤易氧化有机碳响应比的线性关系

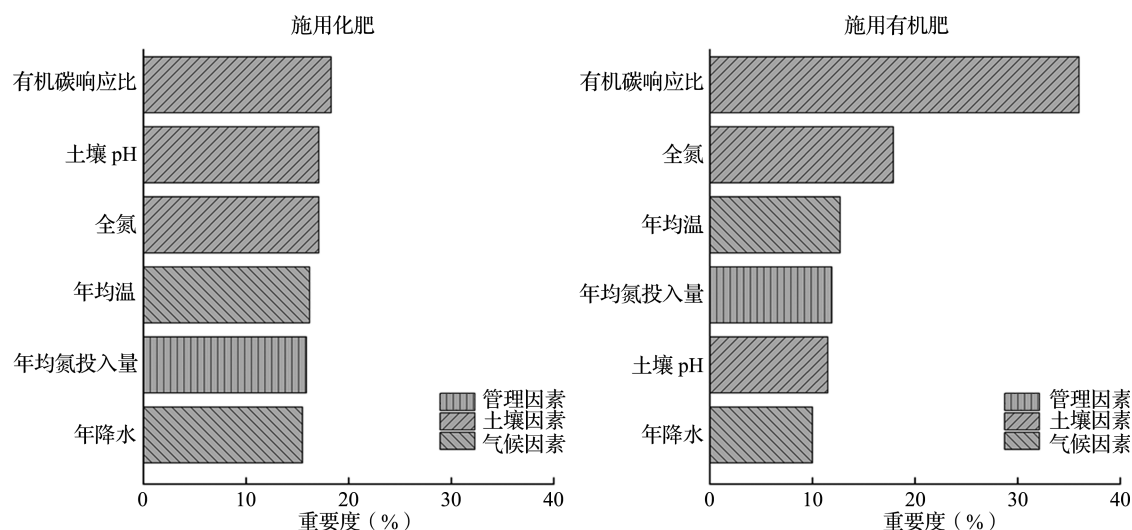


图7 施肥处理下各影响因素对土壤易氧化有机碳提升的贡献率

的1.65倍。而施用有机肥处理下,土壤因素对ROC含量提升的贡献率为65.4%,分别是气候因素和管理因素贡献率的2.9和3.6倍。总体而言,施用化肥或有机肥处理下对ROC含量提升的主要影响因子均是土壤因素。施用化肥或有机肥处理下,土壤有机碳响应比均对ROC含量提升的贡献率最高(18.3%和36.0%),在施用化肥处理下,土壤pH对ROC含量提升的贡献率为17.1%,但在施用有机肥处理下仅有11.5%。

3 讨论

3.1 不同施肥处理对ROC含量的影响

ROC含量与农业管理措施关系密切,受施肥措施影响明显^[4, 30]。本研究发现,与不施肥相比,施肥能显著提高ROC的含量,这与赵玉皓等^[31]的研究结果一致,其主要原因是施肥直接或间接地加速了土壤SOC的输入,促进了动植物残体向有机质的转化,从而增加土壤有机碳的含量,而土壤有机碳含量与ROC含量存在极显著的相关关系^[32-33],有机碳含量的增加影响了ROC含量的提高。施用有机肥对ROC含量的提升幅度(70.1%)显著高于化肥,是施用化肥(17.7%)的4.1倍。这可能是由于有机肥本身中含有大量的SOC,施入土壤后可作为碳源被作物吸收利用,更有利于土壤SOC的积累, SOC的积累促进了土壤中ROC的生成;而化肥仅可以为作物提供无机养分,因此,施用有机肥对ROC含量的提升幅度显著高于化肥。此外,随着肥料施用量的增加,ROC

的含量得到显著提升,这与Li等^[7]和Yang等^[34]的研究结果一致,其原因可能是与土壤外源碳的输入量有关。肥料的投入增加了土壤外源碳的输入,随着肥料投入量的增加,土壤外源碳的输入量也在不断增加,加速了土壤有机质的生成,从而促进了ROC含量的显著升高。

3.2 不同土壤性质下施肥对ROC含量的影响

土壤养分是指由土壤提供的植物必需的营养元素,是土壤肥力的重要物质基础,也是评价土壤肥力水平的重要内容之一^[35-36]。本研究结果表明,在养分含量低的土壤中施肥对ROC含量的提升幅度显著高于养分含量高的土壤。蔡岸冬等^[37]通过整合分析发现,在养分含量较低的砂土中施肥对土壤总有机碳的提升幅度显著高于养分含量较高的壤土和粘土,这与本研究的结果相似,其原因可能与土壤本身的养分供应能力有关。首先,土壤养分含量高时,养分供应能力强,作物对土壤养分的依赖度高,而对肥料养分的依赖度低;土壤养分含量低时,养分供应能力相对较弱,作物对土壤养分的依赖度低,而对肥料养分的依赖度高^[38],因此,当肥料施入养分缺乏的土壤中后,作物对肥料养分的需求更高,导致肥料养分被更快地分解与吸收,促进了肥料中养分向土壤中释放;其次,在有机质和全氮含量低的土壤中,ROC含量很低,微生物活性也相对较弱,施肥能够促进微生物生长发育和代谢活性,增加土壤微生物数量,激活土壤微生物的活性^[39],促进了土壤中有机物质的矿化分解,从而加速了ROC的形成;而在有机质和全氮含量高的

土壤中, ROC 含量已经相对较高, 且微生物活性也相对较强, 因此降低了施肥对 ROC 含量的提升幅度^[40]。此外, 有机质和全氮含量高的土壤往往具有较强的蓄水和保水能力^[41], 能够保护土壤中的 SOC 不被流失, 从而使得土壤中活性物质的含量相对较高, 施肥对土壤中 ROC 含量的提升作用较弱。另外, 相较于施用化肥, 有机肥的应用可以提高土壤的保水能力、改善土壤的通气性、促进大团聚体的形成, 增加土壤中大团聚体的比例^[42], 使土壤中的成分更加稳定, 从而有助于提高土壤的有机质含量, 进而更好地促进土壤中 ROC 等活性物质的生成。

3.3 不同气候条件下施肥对 ROC 含量的影响

本研究结果表明, 不同气候条件下施肥均可以显著提高 ROC 含量。施用化肥和有机肥在年均温 $\leq 8^{\circ}\text{C}$ 的地区对 ROC 含量的提升幅度最高, 显著高于年均温 $>17^{\circ}\text{C}$ 的地区, 这与 Qi 等^[43] 研究结果相似; 施用化肥在年降水 600 ~ 1200 mm 的地区对 ROC 含量的提升幅度最高, 而施用有机肥在年降水 >1200 mm 的地区最高。其可能的原因首先是温暖潮湿的环境会对土壤生态系统产生影响, 导致土壤微生物数量和活性升高^[44-45], 从而加速了土壤中 ROC 的分解速度, 进而导致肥料施用后对 ROC 含量的提升幅度降低。其次, 降水还会对土壤产生淋溶作用^[46-47], 大量的降水会导致土壤中 ROC 等活性物质随着水分的移动而迁移至深层土壤, 而降水量较少也会减少 ROC 等活性物质的淋溶与下渗。另外, 温暖潮湿地区主要分布在我国南方, 其种植制度基本为一年两熟甚至一年三熟, 对土壤的扰动较多, 破坏了土壤中微生物群落的环境和土壤团聚体结构, 导致土壤中有机质降解和氧化的速率加快; 而低温少雨地区主要分布在我国东北地区和西北地区, 其种植制度主要为一年一熟, 对土壤的扰动更少, 更有利于有机质的积累^[48], 因此, 对 ROC 含量的提升幅度更高。

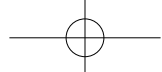
4 结论

施肥可以显著提高 ROC 含量, 且施用有机肥(单施或配施)对 ROC 含量的提升幅度是施用化肥的 4.1 倍; 施用化肥和有机肥在氮投入量 >240 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{年})$ 时对 ROC 含量的提升幅度最高, 显著高于氮投入量 ≤ 120 $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{年})$ 水平; 不同土壤性质下, 有机质和全氮含量缺乏的土壤中施用

化肥和有机肥对 ROC 含量的提升幅度显著高于有机质和全氮含量丰富的土壤; 在中性土壤中施用化肥对 ROC 含量的提升幅度最高, 显著高于酸性土壤和碱性土壤; 施用有机肥对 ROC 含量的提升幅度在不同土壤初始 pH 条件下差异不显著; 不同气候条件下, 寒冷干旱地区施用化肥和有机肥后对 ROC 含量的提升幅度显著高于温暖湿润地区。在施肥条件下, 土壤性质是影响 ROC 含量提升的关键驱动因素。因此, 通过优化施肥措施, 构建以有机肥为核心的肥料施用体系, 因地制宜地选择有机肥配施化肥的施用量, 从而改善土壤性质, 以最大程度提高 ROC 含量, 进而提升土壤肥力。

参考文献:

- [1] 郭振, 王小利, 段建军. 土壤活性有机碳的监测及在土地管理中的应用[J]. 山地农业生物学报, 2017, 36(4): 55-63.
- [2] Blair G, Lefroy R, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1995, 46(7): 393-406.
- [3] Hao X X, Han X X, Wang S Y, et al. Dynamics and composition of soil organic carbon in response to 15 years of straw return in a Mollisol[J]. Soil & Tillage Research, 2022, 215: 105221.
- [4] 柳敏, 宇万太, 姜子绍, 等. 土壤活性有机碳[J]. 生态学杂志, 2006, 25(11): 1412-1417.
- [5] 石丽红, 李超, 唐海明, 等. 长期不同施肥措施对双季稻田土壤活性有机碳组分和水解酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(3): 921-930.
- [6] 罗原骏, 蒲玉琳, 龙高飞, 等. 施肥方式对土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响[J]. 浙江农业学报, 2018, 30(8): 1389-1397.
- [7] Li J, Wen Y C, Li Y T, et al. Soil labile organic carbon fractions and soil organic carbon stocks as affected by long-term organic and mineral fertilization regimes in the North China Plain[J]. Soil & Tillage Research, 2018, 175(8): 281-290.
- [8] 张继光, 秦江涛, 要文倩, 等. 长期施肥对红壤旱地土壤活性有机碳和酶活性的影响[J]. 土壤, 2010, 42(3): 364-371.
- [9] Wang F, Tong Y A, Gao P C, et al. Organic amendments to a wheat crop alter soil aggregation and labile carbon on the Loess Plateau, China[J]. Soil Science, 2014, 179(3): 166-173.
- [10] 张贵龙, 赵建宁, 宋晓龙, 等. 施肥对土壤有机碳含量及碳库管理指数的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 359-365.
- [11] 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.



- [12] 吴鹏博, 李立军, 张艳丽, 等. 轮作结合施肥对土壤有机碳及其组分和土壤养分的影响[J]. 土壤通报, 2020, 51(2): 416-422.
- [13] 张英, 褚秋华, 邱多生, 等. 11年连续肥料处理对水稻土碳、氮及微生物量的影响[J]. 南京农业大学学报, 2001, 24(4): 112-114.
- [14] 戚瑞敏, 赵秉强, 李娟, 等. 添加牛粪对长期不同施肥潮土有机碳矿化的影响及激发效应[J]. 农业工程学报, 2016, 32(S2): 118-127.
- [15] 徐金忠, 高德武, 许靖华, 等. 不同施肥处理对黑土碳素及活性有机质的影响[J]. 中国农学通报, 2016, 32(15): 130-133.
- [16] 张维理, Kolbe H, 张认连. 土壤有机碳作用及转化机制研究进展[J]. 中国农业科学, 2020, 53(2): 317-331.
- [17] 于维水, 王碧胜, 王士超, 等. 长期不同施肥下我国4种典型土壤活性有机碳及碳库管理指数的变化特征[J]. 中国土壤与肥料, 2018(2): 29-34.
- [18] Shi J, Luo Y Q, Zhou F, et al. The relationship between invasive alien species and main climatic zones[J]. Biodiversity and Conservation, 2010, 19(9): 2485-2500.
- [19] 尚宗波, 高琼, 杨莫安. 利用中国气候信息系统研究年降水量空间分布规律[J]. 生态学报, 2001, 21(5): 689-694.
- [20] 任科宇, 段英华, 徐明岗, 等. 施用有机肥对我国作物氮肥利用率影响的整合分析[J]. 中国农业科学, 2019, 52(17): 2983-2996.
- [21] 全国土壤普查办公室. 中国土壤[D]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 356.
- [22] 任凤玲, 张旭博, 孙楠, 等. 施用有机肥对中国农田土壤微生物量影响的整合分析[J]. 中国农业科学, 2018, 51(1): 119-128.
- [23] 郭明, 李新. Meta分析及其在生态环境领域研究中的应用[J]. 中国沙漠, 2009, 29(5): 911-919.
- [24] Geisseler D, Scow K W. Long-term effects of mineral fertilizers on soil microorganisms - A review[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2014, 75: 54-63.
- [25] 王若琦, 秦超英. Meta分析中异质性检验方法的改进[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(10): 2256-2259.
- [26] Hedges L V, Gurevitch J, Curtis P S. The meta-analysis of response ratios in experimental ecology[J]. Ecology, 1999, 80(4): 1150-1156.
- [27] Luo Y Q, Hui D F, Zhang D Q. Elevated CO₂ stimulates net accumulations of carbon and nitrogen in land ecosystems: a meta-analysis[J]. Ecology, 2006, 87(1): 53-63.
- [28] Liu C, Lu M, Cui J, et al. Effects of straw carbon input on carbon dynamics in agricultural soils: A meta-analysis[J]. Global Change Biology, 2014, 20(5): 1366-1381.
- [29] Niu L A, Hao J M, Zhang B Z, et al. Influences of long-term fertilizer and tillage management on soil fertility of the north China plain[J]. Pedosphere, 2011, 21(6): 813-820.
- [30] 付修勇, 井大炜, 段晓尘, 等. 不同施肥措施对德州市农田土壤生物学性状的影响[J]. 水土保持通报, 2017, 37(5): 76-80.
- [31] 赵玉皓, 张艳杰, 李贵春, 等. 长期不同施肥下褐土有机碳储量及活性碳组分[J]. 生态学杂志, 2016, 35(7): 1826-1833.
- [32] 王玲莉, 娄翼来, 石元亮, 等. 长期施肥对土壤活性有机碳指标的影响[J]. 土壤通报, 2008(4): 752-755.
- [33] 熊翱宇, 程谅. 长期施肥对南方红壤碳库管理指数的影响[J]. 水土保持研究, 2021, 28(1): 73-79.
- [34] Yang X Y, Ren W D, Sun B H, et al. Effects of contrasting soil management regimes on total and labile soil organic carbon fractions in a loess soil in China. [J]. Geoderma, 2012, 177-178: 49-56.
- [35] 张久明, 匡恩俊, 刘亦丹, 等. 有机肥替代不同比例化肥对土壤有机碳组分的影响[J]. 麦类作物学报, 2021, 41(12): 1534-1540.
- [36] 卫婷, 韩丽娜, 韩清芳, 等. 有机培肥对旱地土壤养分有效性和酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(3): 611-620.
- [37] 蔡岸冬, 张文菊, 杨品品, 等. 基于Meta-Analysis研究施肥对中国农田土壤有机碳及其组分的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(15): 2995-3004.
- [38] Lu X S, Yu D S, Chen Y, et al. Yield and nitrogen use efficiency of winter wheat with different soil fertility[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2020, 116(2): 165-177.
- [39] 王明友, 井大炜, 张红, 等. 蚯蚓粪对豇豆土壤活性有机碳及微生物活性的影响[J]. 核农学报, 2016, 30(7): 1404-1410.
- [40] Bowles T M, Acosta-Martínez V, Calderón F, et al. Soil enzyme activities, microbial communities, and carbon and nitrogen availability in organic agroecosystems across an intensively-managed agricultural landscape[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2014, 68: 252-262.
- [41] 陈悦, 吕光辉, 曹靖, 等. 荒漠土壤水、盐、有机质空间分布及相互关系[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(12): 254-257, 265.
- [42] 孙雪, 张玉铭, 张丽娟, 等. 长期添加外源有机物料对华北农田土壤团聚体有机碳组分的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(8): 1384-1396.
- [43] Qi R M, Li J, Lin Z A, et al. Temperature effects on soil organic carbon, soil labile organic carbon fractions, and soil enzyme activities under long-term fertilization regimes[J]. Applied Soil Ecology, 2016, 2(102): 36-45.
- [44] 王文立, 孔维栋, 曾辉. 土壤微生物对增温响应的Meta分析[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(11): 2169-2175.
- [45] 张翠景, 沈菊培, 孙翼飞, 等. 模拟的增温增雨对内蒙古温带草原土壤氨氧化微生物的影响[J]. 环境科学, 2017, 38(8): 3463-3472.
- [46] 陈小梅, 刘菊秀, 邓琦, 等. 降水变率对森林土壤有机碳组分与分布格局的影响[J]. 应用生态学报, 2010, 21(5): 1000-1006.

- 1210-1216.
- [47] 潘根兴, 曹建华, 周运超. 土壤碳及其在地球表层系统碳循环中的意义 [J]. 第四纪研究, 2000 (4): 325-334.
- [48] 苑广源, Munyampirwa T, 毛丽萍, 等. 16 年保护性耕作措施对粮草轮作系统土壤碳库及稳定性的影响 [J]. 水土保持学报, 2021, 35 (3): 252-258, 267.

Effects of fertilization on soil readily oxidizable carbon of croplands in China: a meta-analysis

HE Ning-bo^{1, 2}, GAO Jing^{1, 2}, SUN Nan^{3*}, LI Ran³, WANG Heng-fei^{1, 2}, LU Jin-jing^{1, 2}, XU Ming-gang^{1, 2, 3*}

(1. College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu Shanxi 030800; 2. Shanxi Key Laboratory of Soil Environment and Nutrient Resources, Shanxi Institute of Ecological and Environmental Technology, Shanxi Agricultural University, Taiyuan Shanxi 030031; 3. State Key Laboratory of Efficient Utilization of Arid and Semi-arid Arable Land in Northern China, Key Laboratory of Arable Land Quality Monitoring and Evaluation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081)

Abstract: As an important component of soil organic carbon, readily oxidizable carbon (ROC) is closely related to soil nutrient supply and plays an important role in improving soil fertility. Fertilization is one of the important measures to affect soil ROC. The change law of ROC after fertilization under different soil properties and climate conditions was discussed, which provided theoretical basis for rational fertilization and fertility improvement in farmland. 78 published literatures from 2000 to 2022 were collected, and 378 groups of ROC content database were established under different fertilization treatments. Meta-analysis was used to analyze the difference of ROC increase range among variable fertilization measures in farmland soil of China, and the relative contribution of different fertilizer application rates, soil properties and climate conditions to ROC enhancement was quantitatively analyzed by random forest. The results showed that: (1) Application of organic fertilizer significantly increased ROC content, and the increase of organic fertilizer (70.1%) was 4.1 times than that of chemical fertilizer (17.7%). With the increase of organic fertilizer application rate, the increase of ROC was gradually increasing. (2) Under different soil nutrient contents, fertilization significantly increased the ROC content, but the increase of ROC in soil with low nutrients was significantly higher than that in soil with high nutrients. The application of chemical fertilizers in neutral soil significantly increased ROC (34.8%) compared to acidic soil (16.6%) and alkaline soil (10.4%), while the application of organic fertilizers showed no significant difference in the increase of ROC. (3) Under different climatic conditions, there were significant differences in the increase of ROC by fertilization, and the increase of ROC by organic fertilizer application in cold and dry areas was significantly higher than that in warm and humid areas. (4) Soil properties played a crucial role in the increase of ROC under fertilization conditions (applying chemical fertilizer and organic fertilizer). Therefore, it is suggested to establish a fertilization strategy with organic fertilizer as the core in China, and select the application amount of organic fertilizer combined with chemical fertilizer according to local conditions in order to improve soil properties, maximize ROC content and further improve soil fertility.

Key words: fertilization; readily oxidizable carbon; soil property; climate; meta-analysis