

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.06.024

董丽, 史学正, 徐胜祥, 等. 基于 Meta 分析研究不同管理措施对中国农田土壤剖面有机碳的影响. 土壤, 2021, 53(6): 1290–1298.

# 基于 Meta 分析研究不同管理措施对中国农田土壤剖面有机碳的影响<sup>①</sup>

董丽<sup>1,2</sup>, 史学正<sup>1,2</sup>, 徐胜祥<sup>1,2\*</sup>, 王美艳<sup>1,2</sup>

(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:** 本研究收集了 1980—2019 年间国内外已发表有关中国农田管理措施对剖面有机碳(SOC)影响的文献, 利用 Meta 分析研究不同农田管理措施对我国农田土壤剖面 SOC 变化的影响。结果表明, 不同耕作条件下, 免耕覆盖(NTS)对土壤剖面 SOC 的提升速率显著大于传统耕作(CT), 年变化率达 36.1%, 深层土壤(>20 cm)SOC 也明显增加约 7%~31%, 增加了深层土壤碳的输入量; 与不施肥相比, 不同施肥措施均能显著提高剖面 SOC 含量, 其中化肥与有机肥配施(MNPK)对耕层(0~20 cm)SOC 增长速率最大, 约为 0.52 g/(kg·a); 常年水田耕作形成的淹水厌氧环境, 可有效减缓有机物质的矿化分解、增加表层(0~20 cm)SOC 累积, 年增长率达 24.84%; 随耕作年限增加, 表层土壤碳随耕作输入深层土壤, 深层(>20 cm)SOC 固定量增加约 2.17%~20.29%。不同农田管理措施比较分析结果显示, MNPK、NTS 和水田耕作处理通过保护土壤结构稳定、维持土壤环境不被破坏、增加土壤碳输入等手段, 均可达到抑制 SOC 矿化分解和提升土壤固碳量的效果, 其中, NTS 处理对剖面 SOC 的年提升率达 11%~36%, 在管理措施中表现最佳, 可广泛推广。

**关键词:** 土壤剖面; 有机碳; 耕作; 施肥; 土地利用

**中图分类号:** S152.4; S156.6 **文献标志码:** A

## Effects of Different Management Measures on the Organic Carbon of Farmland Soil Profile in China Based on Meta-analysis

DONG Li<sup>1,2</sup>, SHI Xuezheng<sup>1,2</sup>, XU Shengxiang<sup>1,2\*</sup>, WANG Meiyang<sup>1,2</sup>

(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:** In this study, 313 literatures were collected at home and abroad from 1980 to 2019 on the effect of farmland management measures on soil profile SOC in China. The meta-analysis method was used to study the influence of the farmland management measures on soil profile SOC. The results showed that the increasing rate of surface SOC content was significantly higher under NTS (no tillage + straw) than that under CT (conventional tillage) among different tillage conditions, with an annual change rate of 36.1%. NTS also showed a significant increasing rate of SOC concentration (about 7%–31%) in deeper soil (>20 cm), and then improved the input of carbon. Compared with the no fertilization treatment, the fertilization measures could significantly increase SOC content in the whole profile. And, the MNPK treatment (combined application of chemical fertilizer and organic fertilizer) had the highest increasing rate of SOC in the surface layer (0–20 cm), which was about 0.52 g/(kg·a). The flooded anaerobic environment formed by perennial paddy field could effectively slow down the mineralization and decomposition of organic materials and significantly increase the SOC accumulation in the surface layer (0–10 cm), with an annual growth rate of 24.84%. The topsoil carbon was leached to deeper soil (>20 cm) during different tillage, the amount of SOC sequestration had an increasing trend (about 2.17%–20.29%) with the increase of tillage years. The comparative analysis results of different farmland management measures showed that the MNPK, NTS and the paddy cultivation treatment could inhibit SOC

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0503906)、国家自然科学基金项目(41771253)和中国科学院科技服务网络计划(STS)项目(KFJ-STZ-ZDTP-057)资助。

\* 通讯作者(sxxu@issas.ac.cn)

作者简介: 董丽(1993—), 女, 山东日照人, 硕士研究生, 主要从事土壤资源利用研究。E-mail: dongli@issas.ac.cn

mineralization and enhance its sequestration by protecting soil structure and maintaining the soil environmental stability. Among agricultural management measures, NTS had the best effect of soil carbon sequestration, and the annual variation rate of soil profile SOC was 11%–36%, and it should be widely popularized.

**Key words:** Soil profile; Soil organic carbon; Farming; Fertilization; Land use

土壤碳库是陆地生态系统最大的碳库,其碳储量约为大气碳库的 3 倍,且农田土壤碳是土壤碳库中受人类活动等外界条件影响最大的组成部分<sup>[1]</sup>。杨柯<sup>[2]</sup>利用中国第二次土壤普查数据和多目标区域地球化学调查方法估算出全国农田剖面(1 m 深)土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)储量可达 15.1 Pg。Wang 等<sup>[3]</sup>研究指出土壤深层(>20 cm)SOC 含量约占 1 m 深土壤 SOC 库的 60%~70%,且稳定性碳组分占比随土层剖面加深而显著提高。Schöning 和 Kögel-Knabner<sup>[4]</sup>认为 SOC 在土壤中的周转时间随土层加深逐渐增加,深层碳驻留时间远大于表层碳,且深层 SOC 储量增加明显提升土壤固碳作用<sup>[5]</sup>,减少农田土壤碳排放量,减缓气候变化。Jobbágy 和 Jackson<sup>[6]</sup>认为土壤深层碳储量是土壤碳库的主要组成部分,其累积和排放量的微小变化会对影响土壤向大气排放 CO<sub>2</sub> 的速率和排放量,进而影响全球碳循环和气候变化。Yu 等<sup>[7]</sup>根据 SOC 组分在土壤深层(>20 cm)垂直分布特征估算得出,稳定性碳组分随土层加深而增加、SOC 生物利用率降低,这意味着深层碳库的增加有利于土壤碳固定、增加土壤稳定性碳库、减少土壤碳排放量、降低温室效应的速率。可见深入理解深层土壤碳活动规律及其主要影响因素对准确估算土壤碳库储量、监测 SOC 动态变化及全球碳排放量具有重要意义,现有研究大多集中于土壤剖面上层碳库的分布,因而不能准确估算农田土壤碳库储量大小及其变化。

农田土壤剖面 SOC 的分布和变化受人类活动影响剧烈,如耕作方式<sup>[8-9]</sup>、施肥措施<sup>[10]</sup>和土地利用<sup>[11]</sup>等耕作管理措施,一方面通过表层土壤养分降解和淋溶输入深层土壤、外来碳源的直接输入等方式增加土壤固碳量<sup>[12]</sup>,另一方面农田耕作会通过扰动表层土壤环境加快土壤养分向下淋失或向大气排放 CO<sub>2</sub>、促进作物吸收利用等方式影响土壤碳源功能。因此,合理调节农田管理措施可调节土壤碳库循环,加速或减缓土壤向大气排放 CO<sub>2</sub> 的速率,影响全球固碳效应和气候变化。Zhao 等<sup>[13]</sup>报道了与不施肥相比,长期施用化肥和有机肥对 0~20 cm 土层 SOC 的提升幅度分别为 8.24% 和 41.15%,显著增加了表层土壤的碳汇功能。张婧<sup>[14]</sup>通过长期定位试验得出,与传统耕

作相较,免耕+秸秆还田处理、传统耕作+秸秆还田处理显著增加 0~80 cm 土层的 SOC 含量约 3.82%、2.07%,提升了土壤的固碳效果。Mi 等<sup>[15]</sup>通过定位试验证明与旱作土壤相比,水田耕作提高总有机碳(TOC)含量约 17.4%,这可能是由于长期水田耕作造成的淹水厌氧环境可降低土壤微生物活性、促进土壤养分的厌氧分解,从而减少土壤碳的损失量。前人研究多基于单个监测位点的农田 SOC 含量对管理措施的响应,如石小霞等<sup>[16]</sup>;或如孟凡乔等<sup>[17]</sup>集中研究农业管理措施对耕层(0~20 cm)SOC 含量的影响,而深层 SOC 含量变化及 SOC 变化对全球碳循环和气候变化的影响阐释尚不明确;由于各地的土壤性质和光热条件不同,所得结论也有所不同,少有研究综合多种农田管理措施对农田土壤深层 SOC 含量的影响。

Meta 分析是一种整合、比较多个研究的分析工具,可以在区域、全国甚至全球尺度上确定一个相对普遍的结论<sup>[18-19]</sup>。本文利用 Meta 分析整合已发表文献,综合比较不同农田管理措施下农田 SOC 的垂直分布特征,重点比较不同农田管理措施分别对土壤表层和深层 SOC 分布的影响差异,阐释深层土壤碳变化的主要影响因素,进而分析农田管理措施对土壤固碳作用和气候变化速率的影响,旨在筛选合适的农田管理方式,以达到提高作物产量和农田土壤的固碳作用、减少土壤 CO<sub>2</sub> 排放量的目的。

## 1 材料与方 法

### 1.1 数据收集

本文数据来源于 CNKI 和 Web of Science 两大文献数据库,设定检索时间为“1980—2019 年”,以“中国农田”、“土壤剖面”、“土壤有机碳(有机质)”、“耕作方式”、“施肥措施”和“土地利用方式”等为关键词进行文献检索。为减少数据的随机误差,文献筛选标准如下:①研究区域为中国农田(大田试验);②试验周期≥3a;③土壤采样深度为 1 m,且土层划分清楚;④农业管理措施分别为耕作、施肥、土地利用方式;⑤文献中数据均值、标准差 SD(或标准误差 SE)、重复数等数据记录清晰。经过筛选,最终获得可用文献 313 篇、有效数据 3 409 对(表 1)。采用 Excel 2010 建立了农田 SOC 数据库,包括作者、发表时间、试

验年限、土层深度、试验 SOC 的初始值和终值等。数据收集过程中,若文献中以图的形式表达 SOC,则采用 Get Data Graph Digitizer 2.24 软件提取;如果

文献中 SOC 数据以土壤有机质(soil organic matter, SOM)形式表达,则将 SOM 数据乘以转换系数 0.58 转化为 SOC 数值。

表 1 数据分类与统计  
Table 1 Groups used in meta-analysis

农田管理措施	处理分组	说明	数据对
耕作方式	传统耕作(conventional tillage, CT)	播种前使用机械、畜力或人力进行土壤翻耕	305
	传统耕作还田(CT + straw, CTS)	翻耕, 秸秆全量还田	245
	免耕(no tillage, NT)	不翻动土壤, 直接播种	337
	免耕覆盖(no tillage + straw, NTS)	免耕, 秸秆全量覆盖还田	260
	旋耕(rotary tillage, RT)	播种前用旋耕机整地, 一般深度为 12~15 cm	286
	旋耕还田(RT + straw, RTS)	旋耕, 秸秆全量还田	290
施肥处理	N	单施氮肥	83
	NP	施氮磷肥	64
	NPK	施氮磷钾肥	108
	M	单施有机肥	83
	MN	施氮肥和有机肥	76
	MNP	施氮磷肥和有机肥	69
	MNPK	施氮磷钾肥和有机肥	46
	S	秸秆全量还田	106
	SN	施氮肥和秸秆全量还田	85
	SNP	施氮磷肥和秸秆全量还田	68
土地利用方式	SNPK	施氮磷钾肥和秸秆全量还田	124
	水田(paddy field, PF)	常年水田耕作, 种植水稻	271
	旱地(up land, UL)	常年种植旱地作物	316
	水旱轮作(paddy-upland rotation, PUR)	水田-旱地种植方式轮作模式	312

## 1.2 数据分析

试验期间不同施肥措施下 SOC 年平均变化率计算公式如下:

$$M = \frac{SOC_t - SOC_0}{t} \quad (1)$$

式中:  $M$  表示试验观测期间内 SOC 年平均变化率 ( $g/(kg \cdot a)$ );  $t$  为试验持续时间;  $SOC_t$  和  $SOC_0$  分别为 SOC 终值和初始值 ( $g/kg$ )。

为消除试验站点之间的环境条件、土壤类型等差异造成的随机影响,准确判断试验期间不同施肥措施对 SOC 的净影响,即试验观测期间处理组(e)扣除相对照组(c)后的相对年变化率 MD ( $g/(kg \cdot a)$ ), 计算如下:

$$MD = \frac{(SOC_t - SOC_0)_e - (SOC_t - SOC_0)_c}{t} \quad (2)$$

MD 为正值时,表示该处理增加 SOC;反之,MD 为负值时,则表示施肥后 SOC 减少。

MD 的标准差( $SD_{mean}$ )用下式计算:

$$SD_{mean} = \sqrt{\frac{(n_e - 1) \times SD_e^2 + (n_c - 1) \times SD_c^2}{n_e + n_c - 2}} \quad (3)$$

式中:  $n_e$  和  $n_c$  分别为处理组和对照组的样本量,  $SD_e$  和  $SD_c$  分别为处理组和对照组的标准差。若文中用标准误差(SE)表示样本间的误差,则用下式转换为 SD:

$$SD = SE \times \sqrt{n} \quad (4)$$

若文中未出现 SD 或 SE,用下式根据已提取 SD 进行估算<sup>[20]</sup>:

$$SD_j = \frac{\sum_{i=1}^k SD_i \times \sqrt{n_i}}{k \times \sqrt{n_j}} \quad (5)$$

式中:  $SD_j$  和  $n_j$  分别表示未知标准差文献数据的标准差和样本量;  $SD_i$  和  $n_i$  分别表示第  $i$  个已知 SD 研究的标准差和样本量;  $k$  表示明确 SD 的文献共计  $k$  篇。

响应比(response ratios, RR)为数据收集合并后的统计学指标,并计算其 95% 的置信区间(即 95% CI)。利用 R 中 Meta 包进行 Meta 分析,若  $P \geq 0.1$ 、 $I^2 < 50\%$  时,即纳入研究结果无异质性,采用固定效应模型

(fixed effect model, FEM)进行 Meta 分析; 否则采用随机效应(random effect model, REM)。RR 可用下式计算:

$$RR = \bar{x}_t / \bar{x}_0 \quad (6)$$

式中:  $\bar{x}_t$  和  $\bar{x}_0$  分别表示试验观测终期和初期的 SOC 均值(g/kg)。分析过程中, 为方便统计检验, 取 RR 的自然对数作为响应比, 即

$$\ln RR = \ln(\bar{x}_t / \bar{x}_0) = \ln(\bar{x}_t) - \ln(\bar{x}_0) \quad (7)$$

若 95% CI 不与 0 重叠, 说明该处理对 SOC 的影响达到显著水平( $P < 0.05$ )。若置信区间包含 0, 则说明与初始值相比, 该处理对 SOC 的影响达不到显著水平; 若置信区间全部大于 0, 说明该处理提高 SOC 含量, 且达到显著水平; 反之, 则该处理导致 SOC 含量显著降低。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同农田管理措施下 SOC 含量分布

运用 Origin 对收集的 SOC 含量数据进行经典统计特征分析。由图 1 频率分布曲线分析得出, SOC 含量的偏度和峰度分别为 2.27 和 11.29, 说明其分布曲线右偏, SOC 含量均值为 13.09 g/kg, 中值为 10.84 g/kg, 二者差值较大, 说明全国农田区域内 SOC 分布不均匀, 易受异常值、管理措施、地形、区域等因素影响。

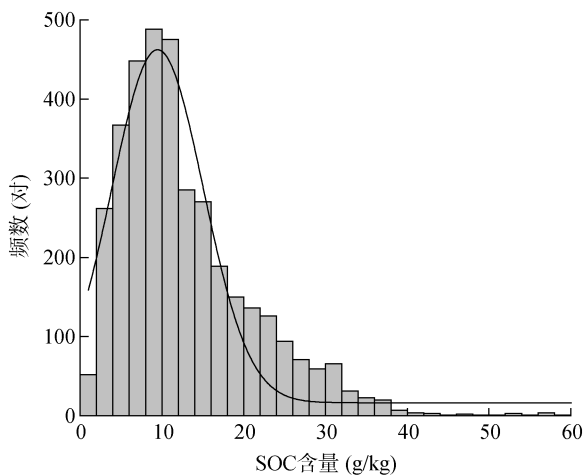


图 1 土壤 SOC 含量频率分布

Fig.1 Frequency distribution histogram of SOC concentrations

图 2 显示不同农田管理措施下 SOC 含量分布现状, 不同管理措施间 SOC 含量分布差异明显, NT、MNPk 和 PF 等管理措施下 SOC 含量明显高于其他耕作措施。不同耕作方式下 SOC 含量变化范围为 15.77 ~ 19.84 g/kg; 不同施肥措施下 SOC 含量变化范

围为 14.98 ~ 19.43 g/kg; 不同土地利用方式下 SOC 含量变化范围为 18.54 ~ 19.13 g/kg。

### 2.2 耕作方式对农田土壤剖面 SOC 含量的影响

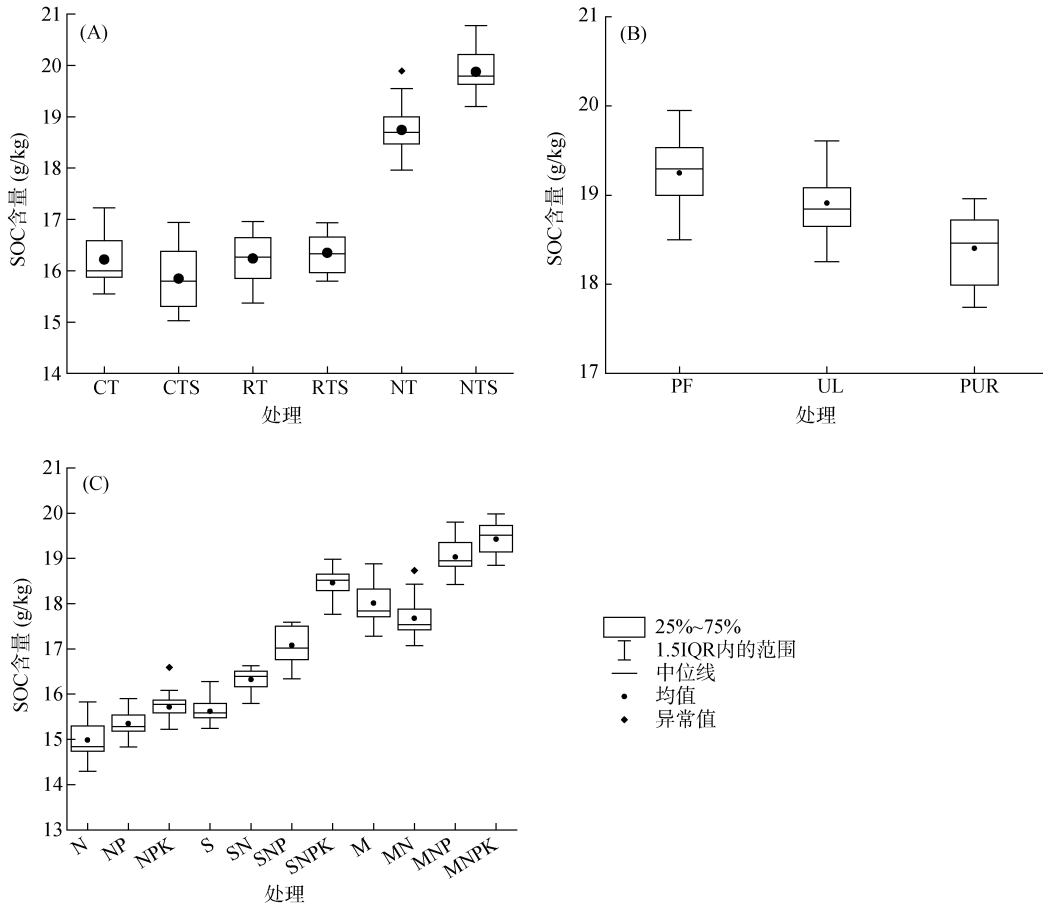
Meta 分析对长期定位试验的 SOC 含量数据分析结果(图 3)表明, 不同耕作方式可显著提升整个土壤剖面的 SOC 含量, 且提升幅度随剖面深度增加而减少; 不同耕作方式对农田 SOC 的作用差异随土层加深而减小。从整个土壤剖面来看, 耕作方式对 0 ~ 60 cm 土层 SOC 含量的提升作用显著大于深土层 (>60 cm)。

不同耕作方式对 SOC 的提升效果表现为 NTS > NT > CTS > CT > RTS > RT。NT 和 NTS 作用下 0 ~ 10 cm 土层 SOC 年变化率显著大于 CT(22.4%)和 CTS(23.1%), 分别为 35.4% 和 36.1%; 耕作扰动频繁的 RT 和 RTS 处理下 SOC 年变化率最小, 分别为 17.5%、19.7%; 10 ~ 20 cm 的 SOC 变化速率表现出相似趋势。由于耕作犁底层的扰动远小于土壤表层, 且表层养分的向下淋溶积累作用, 使得 CT 和 RT 作用下的 SOC 增长速率略大于耕作层(0 ~ 20 cm)。>60 cm 土层 SOC 的变化差异明显小于表层 SOC 变化, 且不同耕作处理间差异随土层加深而减小。秸秆还田后, 土壤耕层 SOC 的提升幅度略有增加, 主要表现为 CTS、NTS 和 RTS 处理下 0 ~ 10 cm 土层的 SOC 变化速率分别为 23.2%、31.2% 和 22.1%; 从整个土壤剖面来看, 秸秆还田作用下 SOC 含量提升幅度约 0.01% ~ 0.05%。从整个土壤剖面的 SOC 垂直分布来看, NTS 处理是土壤碳累积效果最佳的耕作方式, 可有效增加土壤固碳量。

### 2.3 施肥措施对农田耕层 SOC 含量变化的影响

鉴于目前研究中, 施肥措施对 SOC 影响的文献多集中于耕层土壤(0 ~ 20 cm), 为保证本文数据的准确度, 分析施肥措施对 SOC 变化的影响差异以 0 ~ 20 cm 土层为主。分析结果表明不同施肥措施对土壤剖面上部的 SOC 含量均有明显提升效果。图 4 中 Meta 分析结果表明, MNPk 处理的 SOC 年变化率最大, 为 0.52 g/(kg·a); NP 处理最小, 为 0.06 g/(kg·a); 秸秆还田后 SOC 年变化率明显大于无机肥处理。

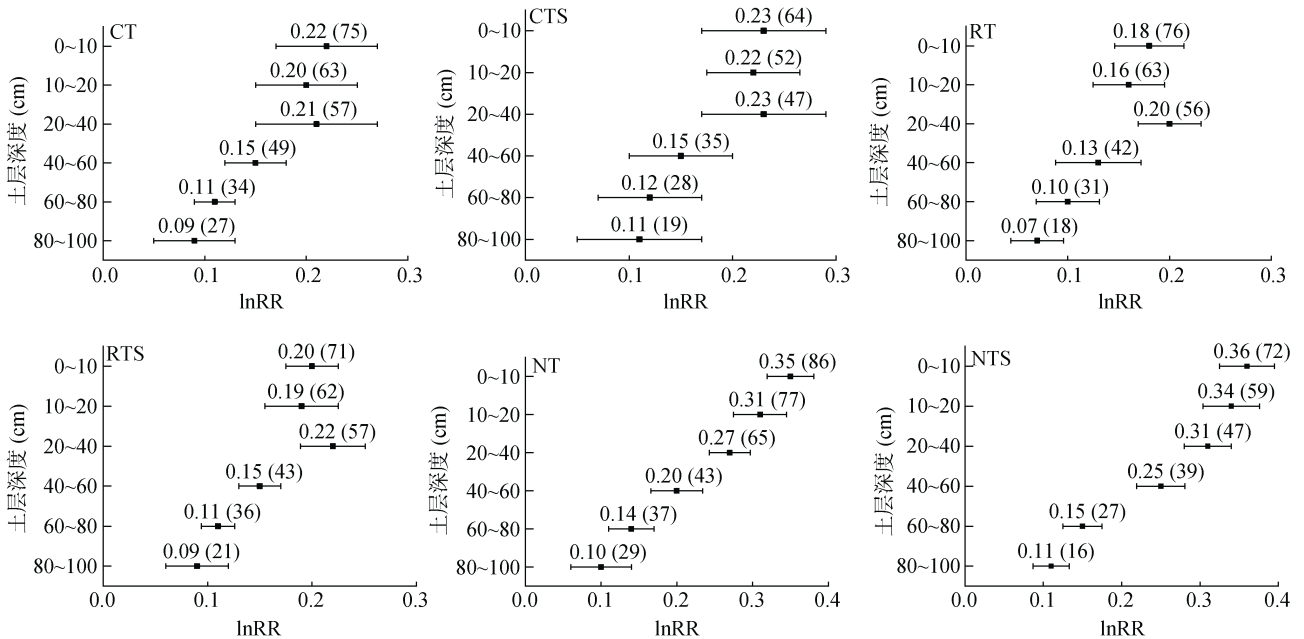
不同施肥措施下 SOC 的提升速率差异整体表现为: 有机肥组(M、MN、MNP、MNPk) > 秸秆还田组(S、SN、SNP、SNPK) > 无机肥组(N、NP、NPK), 有机肥处理 SOC 的平均增速分别是秸秆还田组 and 无机肥组的 1.54 倍和 3.33 倍。无机肥处理组(N、NP、NPK)的 SOC 年变化率分别为 0.12、0.06、0.17



(A~C 分别表示耕作、土地利用、施肥措施下 SOC 含量分布)

图 2 不同农田管理措施下 SOC 含量的分布情况

Fig. 2 SOC contents under different farmland management measures



(点和误差线分别代表响应比及其 95% 的置信区间, 如果误差线与零线无相交表示处理与对照存在显著差异; 括号内的数值代表样本数; 下同)

图 3 耕作方式对剖面 SOC 含量的影响

Fig. 3 SOC concentrations in soil profiles under different tillage methods

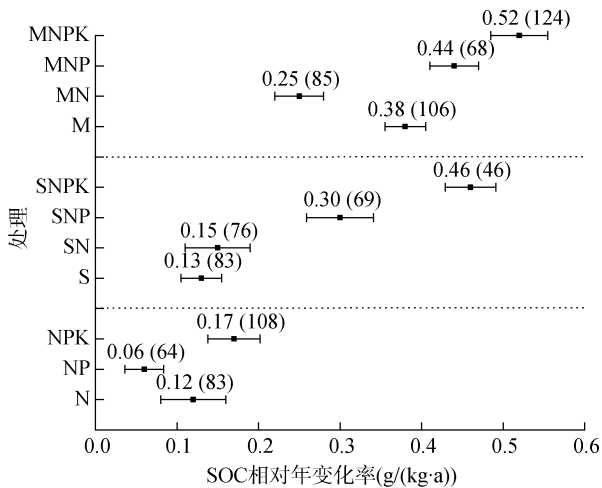


图 4 施肥措施对耕层 SOC 年变化率的影响

Fig. 4 Mean differences in SOC change rates under different fertilization

g/(kg·a), 秸秆还田组(S、SN、SNP、SNPK)对 SOC 增加幅度分别为 0.13、0.15、0.30、0.46 g/(kg·a), 施用有机肥(M、MN、MNP、MNPK)对 SOC 提升速率分别为 0.38、0.25、0.44、0.52 g/(kg·a)。上述结果表明, 与长期不施肥处理相比, 施用化肥显著增加农田土壤对 SOC 的固定量, 且化肥与有机物料(作物残渣、有机粪肥)或秸秆粉碎还田配合施用的固碳

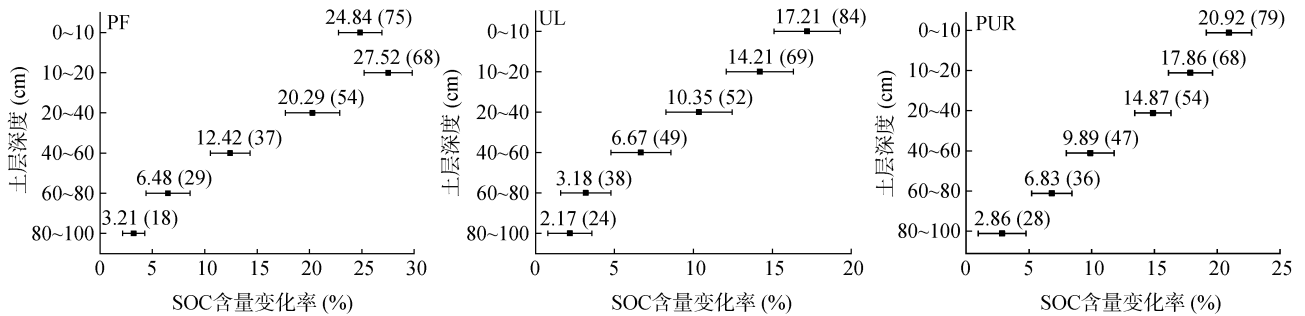


图 5 土地利用方式对土壤剖面 SOC 含量的影响

Fig. 5 Change rates of soil profile SOC contents under different land use modes

### 3 讨论

#### 3.1 农业管理措施对农田剖面 SOC 分布的影响

农业耕作前的翻土、犁地等机械化操作改变土壤温度和湿度等环境因素, 影响微生物的生长代谢速率和作物对养分的吸收利用速率<sup>[9,12]</sup>, 以及土壤碳的矿化分解累积量和农田土壤碳汇效应<sup>[22]</sup>。Liu 等<sup>[23]</sup>指出频繁翻土扰动会加速土壤养分氧化分解淋失, 免耕对耕层土壤(0~30 cm)的扰动减少, 有利于保护微生物的生活环境, 降低 SOC 的分解速率、减少养分损失量。Ma 等<sup>[20]</sup>研究结果表明, 免耕可以显著增加土

效果更佳。

#### 2.4 土地利用方式对农田土壤剖面 SOC 含量变化的影响

不同土地利用方式会引起土壤环境的改变及土壤剖面养分重分配现象, 进而影响土壤剖面碳的分布差异(图 5)。整个土壤剖面的 SOC 增长速率差异表现为: 水田(PF)>水旱轮作(PUR)>旱作(UL)。不同土地利用方式(PF、PUR、UL)下 0~10 cm 土层的 SOC 变化率差异明显, 分别为 24.84%、20.92% 和 17.21%。耕层土壤(0~20 cm)的 SOC 积累速率显著大于深层土壤, UL 的碳汇效果最差, 仅为 PF 和 PUR 处理的 57%和 74%。PF 处理出现犁底层(10~20 cm)的 SOC 积累速率明显大于 0~10 cm 土层的现象, 约为 27.52%; 而 PUR 和 UL 处理的犁底层 SOC 增长率锐减, 分别为 14.87%、14.21%。这可能是由于 PF 种植方式下造成长期渍水的厌氧环境, 微生物代谢活动减弱、有机物料的分解速率小于表层, 从而增加犁底层养分累积量<sup>[21]</sup>, 而 PF 和 PUR 种植方式下表层土壤环境扰动频繁, 微生物代谢活动加快, 土壤养分矿化分解加速。SOC 变化率的差异随土层加深而减小, 且不同土地利用方式间 SOC 的变化幅度差异减弱, >40 cm 土层的 SOC 含量变化幅度约维持在 2.17%~12.42%。

壤微生物生物量碳(MBC)和 MBC 与 SOC 的比率, SOM 水平表现出增加趋势, 这主要是由于免耕有效地抑制了土壤过度通气, 减少了 SOM 的氧化降解。Varvel 和 Wilhelm<sup>[24]</sup>认为免耕处理对土壤剖面(0~150 cm) SOC 质量分数的提升幅度约 18.6%~43.8%, 且对上层土壤(0~60 cm)的作用强度影响显著大于传统耕作, 本研究结果与此相似。秸秆还田能够显著增加土壤的碳汇功能, 一方面秸秆还田通过直接增加有机物质的输入, 增加土壤碳输入<sup>[15]</sup>; 另一方面秸秆覆盖还田有利于保持土壤温度、湿度等环境因子稳定, 同时保护土壤结构不被破坏, 间接促进了土壤碳

积累<sup>[25]</sup>。本研究结果表明,与免耕相比,免耕覆盖处理在整个土壤剖面显著增加 SOC 含量约 2.1%~14.4%;与旋耕相较,免耕覆盖处理则增加剖面 SOC 约 4.7%~18.3%,这可能是由于机械化旋耕对土壤团聚体结构的破坏力更大<sup>[26]</sup>,促进 SOC 的矿化分解、向下层淋溶损失<sup>[27]</sup>。Wang 等<sup>[28]</sup>通过长期定位试验证明,与传统耕作相比,免耕覆盖处理显著提升 SOC 水平约 47.13%,这是由于免耕覆盖能够减少土壤养分受耕作扰动的分解损失、增加农田土壤的固碳量。石小霞等<sup>[16]</sup>和徐蒋来等<sup>[29]</sup>认为免耕覆盖处理通过农田覆盖秸秆可减少土壤水分蒸发及提高土壤温度,增加土壤碳向剖面深层运移,减缓土壤碳循环速率及 CO<sub>2</sub> 的排放,甚至减缓气候变化。

本研究表明,施用化肥和有机肥均能显著提高农田耕层 SOC 含量,且有机肥与化肥配施处理(MNPK)的固碳效果最佳,这可能是由于配合施肥可直接添加有机物、平衡养分,促进土壤团粒结构生成,从而增加 SOC 质量分数,这与许多研究结果相似<sup>[26, 29]</sup>。Lee 等<sup>[30]</sup>认为氮肥能增加作物生物量及由此增加进入土壤的作物残体量;其次,施用铵态氮肥可以导致土壤酸化,能降低 SOM 的分解速率。研究认为有机肥与化肥配施,一方面有机肥本身含有高质量的有机速效养分,可直接增加土壤碳含量、促进养分下移、增加土壤剖面的养分含量<sup>[31]</sup>;另一方面,施用有机肥可有效改善土壤结构、促进团粒结构的形成<sup>[32]</sup>,从而提高土壤保肥能力。兰宇等<sup>[33]</sup>指出,施用有机肥既能保持土壤良好的结构,又能持续供给作物生长所需的养分。作物残茬、秸秆粉碎还田能调节土壤水热平衡,加快微生物活动、代谢速率<sup>[29]</sup>,促进秸秆降解和养分吸收转换,提高 SOC 水平。

由于全球土地利用方式发生改变而导致 SOM 分解产生了大量的 CO<sub>2</sub>,这可能是由于土地利用方式的改变易引起植被类型、养分重分配作用及土壤碳库的累积和转化速率的变化<sup>[34]</sup>。本研究中,不同土地利用方式对农田碳的影响已达到 100 cm,其中对 0~40 cm 土层 SOC 变化的影响程度最大;水田耕作的淹水条件使土壤长期处于还原状态,养分积累水平最大, SOC 增长速率可达 27.52%,这是由于厌氧环境会抑制微生物活动、促进有机物厌氧分解,从而增加 SOC 积累<sup>[35]</sup>。

### 3.2 农业管理措施对固碳效应的影响

农田土壤 SOC 库的大小取决于 SOC 输入和输出之间的动态平衡。SOC 主要来源于植物根系残留物、农业耕作时肥料及有机物的输入,而输出途径主要包

括植物吸收利用、随水分运移至土壤深层及土壤 CO<sub>2</sub> 的释放<sup>[26]</sup>。SOC 的分解速率和累计分解量均随土层深度加深逐层递减,但其深层 SOC 与表层 SOC 以相似的分解规律参与全球碳循环,且因深层土壤的碳储量大,其分解量对 1 m 深土层的 SOC 分解和累积总量贡献大<sup>[36]</sup>,因此,应将深层 SOC 与表层 SOC 在全球碳循环过程中置于同等重要的地位。

表层 SOC 主要来源于根系脱落物和农耕时肥料输入,而深层 SOC 主要来源于植物根系和根系分泌物、土壤生物及表层养分淋溶渗透至土壤深层<sup>[6]</sup>。表层碳会随耕作、降雨和淋溶作用运输至土壤深层,且表层向深层土壤淋溶的碳多为稳定性、微生物难利用形态碳<sup>[34, 37]</sup>。Wang 等<sup>[35]</sup>研究结果表明耕作时外源碳输入能有效激发土壤表层和深层原有稳定性 SOC 的矿化分解,但外源养分会补偿土壤分解损失部分,深层土壤的固持比例显著高于表层土壤,导致更高的净碳固持。Fontaine 等<sup>[38]</sup>和 Paul<sup>[39]</sup>研究发现添加新鲜有机肥后深层 SOC 矿化激发效应显著高于表层土壤,而深层土壤相比于表层土壤更稳定,说明稳定性 SOC 有更大的激发潜力,且会潜在地限制微生物的养分需求。Ekschmitt 等<sup>[40]</sup>认为气候是影响表层土壤碳变化的主要因素,而微生物是影响深层 SOC 分解速率的主导因子。Fierer 等<sup>[41]</sup>发现,深层土壤碳矿化速率比表层碳更易受温度、湿度等土壤环境因素影响,且深层土壤 SOM 比表层 SOM 的生物降解速率低、损耗率低,在土壤中周转时间长。前人研究发现秸秆还田和免耕处理下,深层土壤具有更高的固碳效率,一方面是由于深层土壤对环境的响应受到表层土壤的阻隔保护作用,深层土壤环境较表层环境更为稳定,且较高稳定性的 SOC 会潜在地限制微生物的养分需求<sup>[26]</sup>;生物扰动直接或间接地影响深层 SOC 的输入、分解、储存, SOC 的垂直分布表现出明显的空间异质性。长期旱地耕作环境,养分输入少、土壤通气性好、微生物代谢活动强烈,促进表层养分向下淋溶损失,减小 SOC 质量分数<sup>[21]</sup>;水旱轮作条件下,季节性积水环境可有效制约微生物的代谢活动<sup>[30]</sup>,减少土壤 CO<sub>2</sub> 的排放量,增加土壤碳积累。

## 4 结论

Meta 分析结果表明,不同施肥处理对农田土壤固碳效果存在显著差异,由于化肥可速效提供植物所需养分,有机肥可有效改良土壤结构,增加土壤保肥性能,则氮磷肥处理对农田剖面 SOC 的提升效果最

低,氮磷钾肥和有机肥配施对 SOC 的提升幅度最大,是农田土壤固碳效果最佳的施肥措施;保护性耕作和秸秆还田可减少土壤扰动频率,有效保持土壤环境稳定,显著提升农田土壤剖面的固碳效果,增加土壤固碳量,且各处理间对 SOC 水平的影响差异随剖面深度增加而减小;长期水田耕作造成的淹水厌氧环境能有效减缓土壤养分矿化分解作用,有利深层土壤养分蓄积,增加土壤碳库储量。气候是影响土壤表层 SOC 变化的主要因素,且土壤碳稳定性随土层加深而增加,影响深层土壤碳行为的主要因素是微生物群落结构和活性。配施有机肥、秸秆还田及免耕处理不仅增加土壤养分输入、保护土壤物理结构,并有效促进稳定性碳向深层土壤淋溶,增加深层土壤碳库储量,从而可减少土壤碳向大气的释放量,间接减缓气候变化速率。

综上所述,合理的农田管理措施一方面可直接增加土壤养分输入、补偿作物的吸收量、维持土壤碳库动态稳定;另一方面合适的农耕措施可保护、改良土壤结构,增加土壤保肥性能,促进稳定性碳组分向深层土壤输入,增加土壤碳储量,更是农田生态系统可持续发展的重要环节。

#### 参考文献:

- [1] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014, 65(1): 10–21.
- [2] 杨柯. 我国典型农耕地土壤固碳潜力研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2016.
- [3] Wang S, Huang M, Shao X M, et al. Vertical distribution of soil organic carbon in China[J]. *Environmental Management*, 2004, 33(1): S200–S209.
- [4] Schöning I, Kögel-Knabner I. Chemical composition of young and old carbon pools throughout Cambisol and Luvisol profiles under forests[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(8): 2411–2424.
- [5] 范亚琳, 刘贤赵, 高磊, 等. 不同培肥措施对红壤坡耕地土壤有机碳流失的影响[J]. *土壤学报*, 2019, 56(3): 638–649.
- [6] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. *Ecological Applications*, 2000, 10(2): 423–436.
- [7] 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.
- [8] Mendham D S, Heagney E C, Corbeels M, et al. Soil particulate organic matter effects on nitrogen availability after afforestation with *Eucalyptus globulus*[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36(7): 1067–1074.
- [9] Chen Z M, Wang H Y, Liu X W, et al. Changes in soil microbial community and organic carbon fractions under short-term straw return in a rice-wheat cropping system[J]. *Soil and Tillage Research*, 2017, 165: 121–127.
- [10] 林清美, 廖超林, 谢丽华, 等. 地下水位和长期施肥对红壤性水稻土有机碳矿化特征的影响[J]. *土壤学报*, 2019, 56(6): 1414–1424.
- [11] Yu X, Zhou W J, Wang Y Q, et al. Effects of land use and cultivation time on soil organic and inorganic carbon storage in deep soils[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2020, 30(6): 921–934.
- [12] Xiao L G, Zhou S Q, Zhao R Q, et al. Evaluating soil organic carbon stock changes induced by no-tillage based on fixed depth and equivalent soil mass approaches[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 300: 106982.
- [13] Zhao X, Liu S L, Pu C, et al. Crop yields under no-till farming in China: A meta-analysis[J]. *European Journal of Agronomy*, 2017, 84: 67–75.
- [14] 张婧. 不同保护性耕作措施对麦—豆轮作条件下土壤有机碳库及土壤养分的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2014.
- [15] Mi W H, Sun Y, Zhao C, et al. Soil organic carbon and its labile fractions in paddy soil as influenced by water regimes and straw management[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 224: 105752.
- [16] 石小霞, 赵诣, 张琳, 等. 华北平原不同农田管理措施对于土壤碳库的影响[J]. *环境科学*, 2017, 38(1): 301–308.
- [17] 孟凡乔, 匡星, 杜章留, 等. 不同土地利用方式及栽培措施对土壤有机碳及  $\delta^{13}\text{C}$  值的影响[J]. *环境科学*, 2010, 31(8): 1733–1739.
- [18] Vander Werf E. Lack's clutch size hypothesis: An examination of the evidence using meta-analysis[J]. *Ecology*, 1992, 73(5): 1699–1705.
- [19] Bender D J, Contreras T A, Fahrig L. Habitat loss and population decline: A meta-analysis of the patch size effect[J]. *Ecology*, 1998, 79(2): 517–533.
- [20] Ma J B, Liu W R, Hunter A, et al. Performing meta-analysis with incomplete statistical information in clinical trials[J]. *BMC Medical Research Methodology*, 2008, 8(1): 56.
- [21] Luo Y, Li Q, Shen J, et al. Effects of agricultural land use change on organic carbon and its labile fractions in the soil profile in an urban agricultural area[J]. *Land Degradation and Development*, 2019, 30(15): 1875–1885.
- [22] Liu E K, Teclerian S G, Yan C R, et al. Long-term effects of no-tillage management practice on soil organic carbon and its fractions in the Northern China[J]. *Geoderma*, 2014, 213: 379–384.
- [23] Liu Z, Gao T, Tian S, et al. Soil organic carbon increment sources and crop yields under long-term conservation tillage practices in wheat-maize systems[J]. *Land Degradation and Development*, 2020, 31(9): 1138–1150.



- [24] Varvel G E, Wilhelm W W. No-tillage increases soil profile carbon and nitrogen under long-term rainfed cropping systems[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 114(1): 28–36.
- [25] Li C H, Li Y, Xie J B, et al. Accumulation of organic carbon and its association with macro-aggregates during 100 years of oasis formation[J]. *CATENA*, 2019, 172: 770–780.
- [26] Yu Q G, Hu X, Ma J W, et al. Effects of long-term organic material applications on soil carbon and nitrogen fractions in paddy fields[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 196: 104483.
- [27] Li M, Han X Z, Du S L, et al. Profile stock of soil organic carbon and distribution in croplands of Northeast China[J]. *CATENA*, 2019, 174: 285–292.
- [28] Wang Z C, Liu S S, Huang C, et al. Impact of land use change on profile distributions of organic carbon fractions in peat and mineral soils in Northeast China[J]. *CATENA*, 2017, 152: 1–8.
- [29] 徐蒋来, 胡乃娟, 张政文, 等. 连续秸秆还田对稻麦轮作农田土壤养分及碳库的影响[J]. *土壤*, 2016, 48(1): 71–75.
- [30] Lee S B, Lee C H, Jung K Y, et al. Changes of soil organic carbon and its fractions in relation to soil physical properties in a long-term fertilized paddy[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 104(2): 227–232.
- [31] Gai X P, Liu H B, Liu J, et al. Contrasting impacts of long-term application of manure and crop straw on residual nitrate-N along the soil profile in the North China Plain[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 650: 2251–2259.
- [32] 柳开楼, 叶会财, 李大明, 等. 长期施肥下红壤旱地的固碳效率[J]. *土壤*, 2017, 49(6): 1166–1171.
- [33] 兰宇, Muhammad I A, 韩晓日, 等. 长期施肥对棕壤有机碳储量及固碳速率的影响[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(1): 264–270.
- [34] Kalbitz K, Kaiser K. Contribution of dissolved organic matter to carbon storage in forest mineral soils[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(1): 52–60.
- [35] Wang Q K, Wang Y P, Wang S L, et al. Fresh carbon and nitrogen inputs alter organic carbon mineralization and microbial community in forest deep soil layers[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 72: 145–151.
- [36] Wang H, Boutton T W, Xu W H, et al. Quality of fresh organic matter affects priming of soil organic matter and substrate utilization patterns of microbes[J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: 10102.
- [37] 殷丹, 李欢, 徐江兵, 等. 长期配施秸秆与猪粪的红壤旱地有机碳库组成特征[J]. *土壤学报*, 2020, 57(5): 1259–1269.
- [38] Fontaine S, Barot S, Barré P, et al. Stability of organic carbon in deep soil layers controlled by fresh carbon supply[J]. *Nature*, 2007, 450(7167): 277–280.
- [39] Paul E A. The nature and dynamics of soil organic matter: Plant inputs, microbial transformations, and organic matter stabilization[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 98: 109–126.
- [40] Ekschmitt K, Kandeler E, Poll C, et al. Soil-carbon preservation through habitat constraints and biological limitations on decomposer activity[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2008, 171(1): 27–35.
- [41] Fierer N, Allen A S, Schimel J P, et al. Controls on microbial CO<sub>2</sub> production: A comparison of surface and subsurface soil horizons[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9(9): 1322–1332.