

王永慧, 杨殿林, 红 雨, 等. 不同地力玉米田土壤有机碳矿化特征[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(3): 590–599.

WANG Yong-hui, YANG Dian-lin, HONG Yu, et al. Characteristics of soil organic carbon mineralization in the soil of maize fields with different soil fertility [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(3): 590–599.

不同地力玉米田土壤有机碳矿化特征

王永慧^{1,2}, 杨殿林², 红 雨^{1*}, 赵建宁², 轩青霞³, 霍莉莉², 谭炳昌²,
修伟明², 王丽丽^{2*}

(1. 内蒙古师范大学生命科学与技术学院, 呼和浩特 010022; 2. 农业农村部环境保护科研监测所, 农业农村部产地环境污染防控重点实验室/天津市农业环境与农产品安全重点实验室, 天津 300191; 3. 山东省齐河县农业局, 山东 齐河 251100)

摘 要:为探讨不同地力玉米田土壤有机碳矿化特征, 通过为期 196 d 的土壤有机碳矿化培养试验, 对高、中、低 3 种不同地力玉米田 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤进行了研究。结果表明: 不同地力玉米田土壤有机碳矿化速率随时间的变化呈现相同的变化趋势, 即随培养时间延长, 呈现先高后低的变化趋势, 最后趋于平稳; 但随地力等级的降低, 土壤有机碳矿化速率逐渐减小。培养结束时, 不同地力玉米田 0~20 cm 和 20~40 cm 土层土壤有机碳累积矿化量之间均存在显著性差异 ($P < 0.05$); 低地力土壤有机碳稳定性最差, 固存量最小。同一地力, 20~40 cm 土层土壤有机碳矿化速率和累积矿化量较 0~20 cm 显著降低 ($P < 0.05$), 表层土壤稳定性较差, 不利于土壤有机碳固定。伴随土壤有机碳矿化过程, 土壤微生物生物量碳 (MBC) 和土壤可溶性有机碳 (DOC) 含量均较初始含量显著降低 ($P < 0.05$); 土壤有机碳潜在矿化势 (C_p) 与土壤有机碳、全氮、铵态氮、硝态氮、MBC 和 DOC 均呈极显著正相关。土壤有机碳矿化是陆地生态系统碳循环的重要过程, 且当地力等级变化时, 各土层土壤有机碳的稳定性均受到不同程度的影响。

关键词: 地力; 土壤有机碳; 有机碳矿化; 活性有机碳

中图分类号: S153.6 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2019)03-0590-10 doi:10.11654/jaes.2018-1032

Characteristics of soil organic carbon mineralization in the soil of maize fields with different soil fertility

WANG Yong-hui^{1,2}, YANG Dian-lin², HONG Yu^{1*}, ZHAO Jian-ning², XUAN Qing-xia³, HUO Li-li², TAN Bing-chang²,
XIU Wei-ming², WANG Li-li^{2*}

(1. College of Life Science and Technology, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China; 2. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Key Laboratory of Original Agro-Environmental Pollution Prevention and Control, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/Tianjin Key Laboratory of Agro-Environment and Agro-Product Safety, Tianjin 300191, China; 3. Qihe Agricultural Bureau in Shandong Province, Qihe 251100, China)

Abstract: In order to explore the mineralization characteristics of soil organic carbon, we carried out soil organic carbon mineralization culture experiments lasting 196 days using the soil from 0~20 cm and 20~40 cm depths with different fertility (high, medium, and low soil fertility). The results showed that the soil organic carbon mineralization rate varied over time and exhibited a consistent trend in maize fields with different soil fertility (the mineralization rate first increased, then decreased, and finally stabilized). With the decrease in soil fertility, the mineralization rate of soil organic carbon gradually decreased. At the end of the culture experiment, there were significant differences in

收稿日期: 2018-08-13 录用日期: 2018-12-28

作者简介: 王永慧 (1992—), 女, 山西朔州人, 硕士研究生, 主要从事植物功能生态学研究。E-mail: wyh920505@126.com

*通信作者: 红 雨 E-mail: hongyu@imnu.edu.cn 王丽丽 E-mail: lili0229ok@126.com

基金项目: 国家重点研发计划课题子课题 (2016YFD0201009); 中国农业科学院协同创新任务 (CAAS-XTCX2016015); 公益性行业 (农业) 科研专项经费项目 (2015-3121-04); 国家自然科学基金项目 (41501102)

Project supported: Sub-project of National Key R&D Program (2016YFD0201009); Collaborative Innovation Task of Chinese Academy of Agricultural Sciences (CAAS-XTCX2016015); Public Welfare Industry (Agriculture) Scientific Research Special Funding Project (2015-3121-04); The National Natural Science Foundation of China (41501102)

the cumulative mineralization amount of soil organic carbon between the 0~20 cm and 20~40 cm deep soils with the same soil fertility level ($P<0.05$). Compared to the other soil fertility levels, the soil organic carbon in the low fertility soil was the most unstable, with the smallest soil carbon pool. Compared to the 0~20 cm deep soil, both the organic carbon mineralization rate and the cumulative mineralization amount of soil organic carbon of the 20~40 cm deep soil were lower for the same soil fertility level, which indicated that the surface soil stability was poor, and inhibited the fixation of organic carbon. Accompanied by the process of soil organic carbon mineralization, the soil microbial biomass carbon (MBC) and dissolved organic carbon (DOC) contents were lower than the initial stage. The mineralization potential (C_p) of soil organic carbon was positively correlated with the soil organic carbon, total nitrogen, ammonium nitrogen, nitrate nitrogen, MBC, and DOC contents. Soil organic carbon mineralization is an important part of the carbon cycle in the terrestrial ecosystem, and the stability of soil organic carbon at different soil depths likely would be affected when the soil fertility varies. This study provides data support for understanding the dynamic trend of soil organic carbon in soils with different fertility levels and the benefits of carbon sequestration and emission reduction in maize fields.

Keywords: soil fertility; soil organic carbon; organic carbon mineralization; active organic carbon

土壤碳库的动态变化是影响全球陆地生态系统碳平衡的重要因素^[1]。土壤碳库主要包括土壤有机碳(Soil organic carbon, SOC)库和土壤无机碳(Soil inorganic carbon, SIC)库,是陆地生态系统中最大的碳库,约为陆地植被碳储量的3倍,是大气碳储量的2倍^[2]。农田生态系统是陆地土壤碳库中最活跃且固碳潜力最大的碳库之一^[3],也是唯一能被人类活动干预影响的部分^[4],具有多种经济、社会和生态功能^[5]。全球耕地面积约占陆地总面积的10.62%^[6],玉米作为世界三大主粮之首,是中国种植面积最大的粮食作物^[7-8],因此,玉米田土壤有机碳的动态变化对精确评估全球碳库储量具有重要的研究意义。

土壤有机碳矿化是指土壤中含有的有机质和外源有机质在微生物作用下分解、转化生成 CO_2 的过程^[9],是陆地生态系统有机碳循环过程中的重要组成部分,对土壤养分的释放具有积极影响^[10]。土壤微生物是土壤有机碳矿化的重要参与者和驱动者^[11],其数量和种类会影响土壤有机碳的矿化速率^[12]。土壤活性有机碳指的是对植物养分供应最直接且易被土壤中的微生物分解矿化的那部分有机碳^[13],易矿化、不稳定且对微生物有较高活性的碳素,在土壤碳素的转化过程中具有重要的促进作用,其含量高低能够显著影响微生物活性,从而影响大气中 CO_2 的平衡^[14-15]。因此,从活性有机碳角度研究土壤有机碳的矿化逐渐受到许多学者的关注。土壤中微生物生物量碳(Microbial biomass carbon, MBC)和可溶性有机碳(Dissolved organic carbon, DOC)都是土壤活性有机碳的重要组成部分,是土壤微生物的主要营养成分^[16],易被土壤微生物分解利用,也是土壤有机碳矿化的重要组成部分。土壤有机碳矿化过程产生的 CO_2 排放到大

气中,使土壤向大气释放的 CO_2 数量增加, CO_2 浓度的增加加剧了大气温室效应,气温升高反过来又会促进土壤有机碳的矿化^[17]。系统研究土壤有机碳矿化与活性有机碳的关系对揭示土壤碳循环动态具有重要的指导意义。

近年来,国内外对土壤有机碳矿化的研究较多,国内对土壤有机碳矿化也取得了一些重要的研究成果,主要涉及土地利用方式^[18-19]、土壤理化性质^[20]、土壤类型^[21-22]、外源物质添加^[23-24]等。郭建红等^[19]揭示了相同温度时,不同土地利用方式下土壤有机碳的矿化累积释放量不同。李顺姬等^[20]对黄土高原土壤有机碳矿化及土壤理化性质的关系进行研究发现,土壤类型的差异会影响土壤有机碳矿化,且影响因素复杂。李英臣等^[25]研究发现,土壤有机碳的矿化速率和矿化累积量与初始的土壤SOC、全氮(Total nitrogen, TN)、MBC含量呈显著正相关关系。但不同地力背景下农田土壤有机碳矿化动态及其影响因素尚不明确。耕地地力是指在自然条件下,受土壤本身特性、管理水平和基础设施水平等要素综合影响的耕地生产能力^[26]。目前,中国耕地等级划分主要采用两种方法:一是地力等级法,二是产量法^[27]。本研究在已有地力等级认识基础上^[28],结合近几年的产量,按高低顺序排列,取其中值作为划分高地力和低地力的阈值。本文选取3种典型地力等级(高、中、低)玉米田土壤为研究对象,拟在揭示农田基础地力与土壤有机碳矿化特征之间的相关性,并结合土壤理化性质、活性有机碳等深入了解玉米田生态系统土壤有机碳矿化过程,为精确评估我国玉米田土壤有机碳损失动态和制定科学的土壤碳库管理措施提供科学依据和数据支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于山东省德州市齐河县(116°23'28"~116°57'35"E, 36°24'37"~37°1'44"N)。地处鲁西北平原,黄河北岸。该地属于暖温带半湿润季风气候区,四季分明,气候温和,年均气温14.2℃,年均降水量521.2 mm,年日照时数2 656.4 h,无霜期235 d,主要土壤类型为潮土。常规管理方式,玉米-小麦轮作制度,本试验样品在春玉米收获时期采集。

1.2 土壤样品采集

2017年9月25—30日,在齐河县已有地力等级认识基础上,结合近几年的产量按高低顺序排列,选取具代表性的高、中、低不同地力各3块试验样地。在每个样地内用内径2 cm的土钻按照“S”型选取10~15个点,分别采集0~20 cm和20~40 cm土壤样品。充分混合后去除凋落物和根,装入无菌自封袋中,迅速放入冰盒保存,并带回实验室。一部分立即放到4℃冰箱保存,用于土壤有机碳矿化培养试验及MBC、DOC等指标的测定;另一部分经自然风干、研磨、过筛后于通风干燥处密封保存,用于其他理化性质等的测定。

1.3 试验方法

1.3.1 土壤基本理化性质测定

土壤含水量采用烘箱105℃(10 h)烘干法,持续烘干直到土壤恒质量;土壤pH采用玻璃电极法(pHS-3,水土比2.5:1);SOC含量采用重铬酸钾容量法-外加热法测定;TN采用半微量开氏法,使用连续流动分析仪(AA3-HR, SEAL, Germany)测定;MBC含量采用氯仿熏蒸-硫酸钾测定。具体操作方法参见文献[29]。

DOC含量测定:称取相当于10 g干土的新鲜土于50 mL离心管中,加入30 mL去离子水,常温下振荡浸提30 min,用高速离心机(Allegra 64R, Beckman, 美国)离心,上清液过0.45 μm滤膜,用Multi N/C 3100总有机碳/总碳分析仪(Aanalytik Jena, Branch Überlingen, 德国)测定^[30]。不同地力等级玉米田0~20 cm和20~40 cm土壤基本理化性质见表1。

1.3.2 土壤有机碳矿化培养

将采集的不同地力等级玉米田0~20 cm和20~40 cm新鲜土壤样品过2 mm筛,分别随机取60 g(干质量)均匀放入250 mL的玻璃培养瓶底部。在25℃、避光条件下进行室内恒温有机碳矿化培养。每个土样均做5个重复,在同等条件下将不加土样的广口瓶作为空白对照。在培养试验的第1、3、5、7、14、28、42、56、70、84、98、112、154、168、182、196 d用注射器从培养瓶中抽取20 mL气体,用气相色谱仪(7890B, 美国)在24 h内测定CO₂浓度,以CO₂的产生量计算土壤有机碳矿化速率。每次采集气体后,将培养瓶通气20 min,补充氧气,使培养瓶的气体与环境大气充分交换混合,然后密封培养瓶,继续培养。具体培养方法参考刘德燕等的方法^[31]。整个培养结束后,再次测定土壤MBC和DOC含量。

1.4 指标计算

对于土壤有机碳矿化累积量随时间的变化应用一级动力学方程,模拟分析供试土壤有机碳矿化动态:

$$y = C_p [1 - \exp(-kt)] \quad (1)$$

式中: y 表示 t 时刻土壤有机碳累积矿化量,即所能释放的CO₂最大值,mg·kg⁻¹; C_p 为土壤有机碳的潜在矿化势; k 表示有机碳矿化常数,d⁻¹; t 表示时间,d^[31]。 C_p 、 k 用来表征土壤有机碳矿化作用, C_p 值越大, k 值越小则土壤有机碳的矿化作用越强,反之则土壤有机碳

表1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the tested soil

土壤地力 Soil fertility	土壤深度 Soil depth/cm	含水量 Soil moisture/%	pH(H ₂ O)	全氮 Total nitrogen/g·kg ⁻¹	有机碳 Organic carbon/g·kg ⁻¹	铵态氮 NH ₄ ⁺ -N/g·kg ⁻¹	硝态氮 NO ₃ ⁻ -N/g·kg ⁻¹
高地力 HSF	0~20	16.10±0.00Ab	8.11±0.04Ab	1.12±0.01Aa	8.43±0.15Aa	3.56±0.22Aa	36.80±6.34Aa
	20~40	18.85±0.00Aa	8.20±0.06Aa	0.75±0.02Ab	5.65±0.16Ab	2.92±0.33Ab	21.11±2.37Ab
中地力 MSF	0~20	14.47±0.00Bb	7.92±0.06Bb	1.07±0.01Ba	7.87±0.14Ba	2.90±0.75Ba	29.10±3.87Ba
	20~40	16.95±0.01Ba	8.16±0.14Aa	0.57±0.01Bb	4.84±0.17Bb	1.88±0.11Bb	15.23±1.23Bb
低地力 LSF	0~20	11.16±0.00Cb	7.36±0.05Cb	0.91±0.01Ca	4.94±0.07Ca	2.25±0.09Ca	12.42±1.00Ca
	20~40	13.89±0.00Ca	7.55±0.06Ba	0.45±0.02Cb	2.66±0.12Cb	1.31±0.10Cb	10.98±0.51Cb

注:不同大写字母表示不同地力间差异显著($P<0.05$),不同小写字母表示0~20 cm与20~40 cm间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different capital letters indicate significant differences in different fertility ($P<0.05$), and different lowercase letters indicate significant differences between 0~20 cm and 20~40 cm ($P<0.05$). The same below.

矿化作用越弱^[32]。 C_p/SOC 值能够反映土壤有机碳的固存能力,该值越高,土壤有机碳的矿化能力越强,有机碳的固存量越少^[20]。

1.5 数据处理

利用 Microsoft Excel 2010 和 SPSS 18.0 软件对试验数据进行处理和统计分析,差异显著性检验($P<0.05$)采用 One-way ANOVA 的 LSD 法,相关性分析采用 Pearson 法,作图采用 Origin 9.1 软件。

2 结果与分析

2.1 地力水平及土层深度对土壤理化性质的影响

由表 1 可知,地力等级对土壤含水量、pH、TN、SOC、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 影响显著($P<0.05$)。土壤 pH 值均大于 7,供试土壤均为弱碱性。不同土层对土壤理化指标也有显著的影响。相同地力等级 0~20 cm 土层土壤中 SOC 均大于 20~40 cm 土层,TN、 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的含量也随土层加深呈降低趋势。

对供试土壤各理化性质进行双因素分析,结果(表 2)显示本次试验中地力等级和土层深度对土壤 TN、SOC、 NO_3^--N 均有极显著的交互作用($P<0.01$),对土壤 pH、 NH_4^+-N 有显著的交互作用($P<0.05$),对土壤含水量没有交互影响($P>0.05$),表明二者对于土壤理化性质的影响不完全存在耦合关系。

2.2 不同地力等级土壤有机碳矿化特征

有机碳矿化速率即单位干土每日矿化的有机碳数量,又叫有机碳日均矿化量。土壤有机碳累积矿化量是指在一定时间内土壤有机碳矿化为无机碳后所释放的 CO_2 数量,二者均是土壤有机碳矿化动态的重要指标^[20]。

研究结果显示(图 1),不同地力等级土壤有机碳矿化速率随时间变化呈现明显的阶段性特征:在培养初期,土壤有机碳的矿化速率不稳定,第 7 d 左右达到峰值,后期缓慢下降并逐渐趋于稳定。培养结束时,HSF 玉米田 0~20 cm 土层土壤有机碳矿化速率为 $2.00\pm0.08\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$,分别是 MSF 和 LSF 的 1.52 倍和

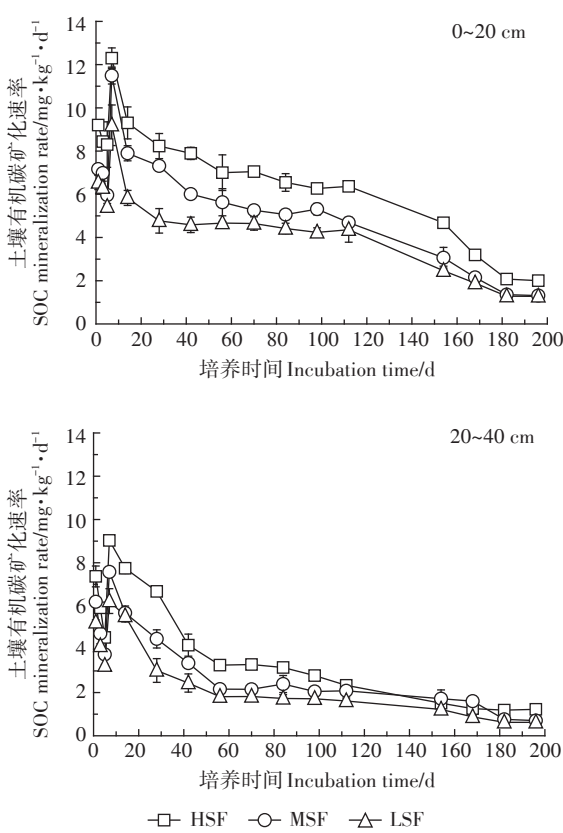


图 1 不同地力土壤有机碳矿化速率
Figure 1 Soil organic carbon mineralization rate under different soil fertility

1.57 倍;20~40 cm 土层土壤有机碳矿化速率较 0~20 cm 均减少,HSF、MSF、LSF 土壤有机碳矿化速率分别为 1.22 ± 0.08 、 0.70 ± 0.05 、 $0.62\pm0.05\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。玉米田土壤有机碳矿化速率在两个土层均呈现 $HSF>MSF>LSF$ 的趋势。HSF 积累了更多的有机碳,有利于土壤有机碳的矿化。

不同地力等级土壤有机碳累积矿化量均表现为 0~20 cm 土层高于 20~40 cm 土层的规律,且不同地力等级同一土层间土壤有机碳累积矿化量不同,其中 HSF 土壤有机碳累积矿化量最大,其次为 MSF,LSF 最小(图 2)。不同地力等级土壤有机碳累积矿化量

表 2 土壤理化性质双因素方差分析

Table 2 Two way ANOVA results of soil physico-chemical properties

项目 Items	pH	含水量 Soil moisture	全氮 Total N	有机碳 Organic carbon	铵态氮 NH_4^+-N	硝态氮 NO_3^--N
地力等级 Soil fertility	**	**	**	**	**	**
土壤深度 Soil depth	**	**	**	**	**	**
地力水平×土壤深度 Soil fertility×Soil depth	*	ns	**	**	*	**

注:*表示在 0.05 水平上差异显著;**表示在 0.01 水平上差异显著;ns 表示差异不显著。下同。
Note:*Correlation is significant at the 0.05 level;**Correlation is significant at the 0.01 level;ns is not significant. The same below.

随时间延长均表现为前期增加快,后期增加缓慢。在前42 d其有机碳累积矿化量增加较快,在第42 d开始至培养结束时增加缓慢。培养结束时,0~20 cm和20~40 cm土层不同地力等级玉米田土壤有机碳累积矿化量均存在显著性差异($P<0.05$),且土壤有机碳的累积矿化量表现为 $\text{HSF}>\text{MSF}>\text{LSF}$;同一地力等级玉米田土壤0~20 cm土层有机碳累积矿化量显著高于20~40 cm土层($P<0.05$)。

2.3 土壤有机碳矿化模型拟合

根据196 d恒温室内各个培养阶段测定的 $\text{CO}_2\text{-C}$ 释放量,对不同地力等级玉米田土壤0~20 cm和20~40 cm土层有机碳累积矿化量进行一级动力学方程拟合,拟合效果均较好($R^2>0.990$),得到土壤有机碳 C_p 和 k (表3)。不同地力等级玉米田土壤有机碳 C_p 存在一定差异,HSF土壤有机碳 C_p 明显大于其他地力,且0~20 cm土层土壤的有机碳 C_p 大于20~40 cm土层;LSF土壤0~20 cm和20~40 cm土层的 C_p/SOC 值均较大,说明LSF土壤的固存能力较HSF和MSF土壤差,0~20 cm土层MSF的固存能力较HSF较强,而20~40 cm土层则相反。同一地力,0~20 cm土层土壤 C_p/SOC

较大,表明0~20 cm土层土壤固存能力较20~40 cm土层差。不同土层矿化常数的变化趋势并不一致,0~20 cm土层MSF的 k 值最大,矿化作用最弱,HSF和LSF的 k 值相接近;而20~40 cm土层MSF矿化作用最强,其次是LSF,HSF矿化作用最弱。同一地力条件,除MSF外,在垂直分布上随土层加深,土壤有机碳 k 值增加。

2.4 土壤有机碳矿化特征与MBC和DOC的关系

不同地力等级玉米田土壤在0~20 cm和20~40 cm土层MBC和DOC初始含量均表现出显著差异;同一地力等级玉米田土壤0~20 cm土层MBC和DOC含量均显著高于20~40 cm土层(表4)。培养结束后,土壤MBC和DOC含量也发生了明显变化。随着培养时间的延长,土壤MBC和DOC含量较初始含量均呈现降低的趋势。0~20 cm土层HSF、MSF、LSF玉米田土壤MBC含量分别较培养初始含量减少了18.68%、15.95%和28.22%,其DOC含量较培养初始含量分别减少了44.02%、62.13%、33.72%;同一土层深度不同地力MBC含量减少量差异显著($P<0.05$),而DOC含量减少量存在差异,但未达到显著效果。

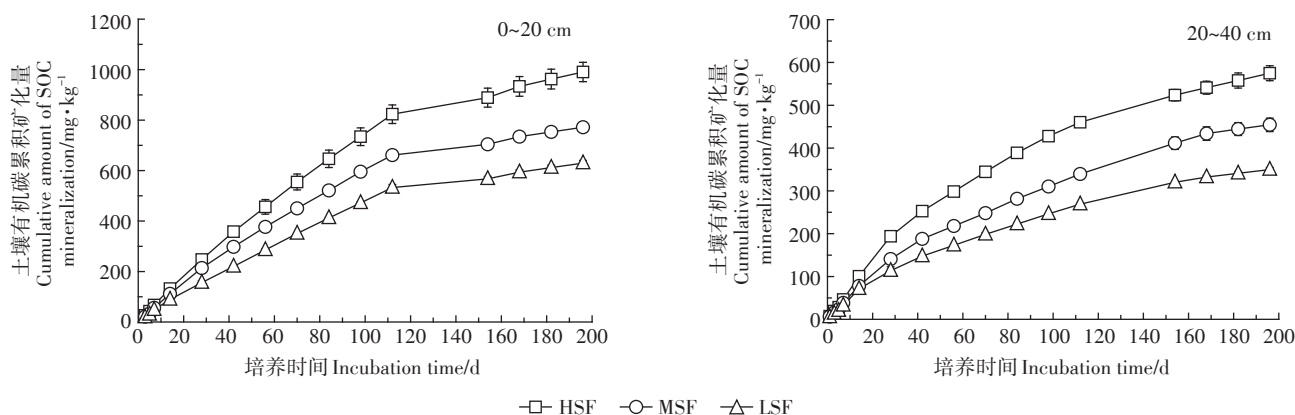


图2 不同地力土壤有机碳矿化量

Figure 2 Cumulative amount of soil organic carbon mineralization with different soil fertility

表3 土壤有机碳矿化的一级动力学参数

Table 3 Parameters of the first-order kinetics for the soil organic matter mineralization

地力等级 Soil fertility	土壤深度 Soil depth/cm	累积矿化量 Cumulative mineralization/mg·kg ⁻¹	拟合参数 Fitting parameters			$(C_p/\text{SOC})/\%$
			潜在矿化势 $C_p/\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	矿化常数 $k/\times 10^{-3} \text{d}^{-1}$	R^2	
高地力 HSF	0~20	990.66±38.27Aa	1 513.78±112.09Aa	8.98±0.55Bb	0.996	14.32
	20~40	574.87±17.47Ab	649.32±56.28Ab	11.65±0.35Aa	0.990	11.20
中地力 MSF	0~20	771.75±8.83Ba	1 207.99±109.97Ba	10.19±0.60Aa	0.990	11.48
	20~40	454.368±15.77Bb	460.892±45.74Bb	9.14±0.54ABa	0.998	11.30
低地力 LSF	0~20	629.60±10.63Ca	817.35±38.80Ca	8.97±0.68Ba	0.998	15.59
	20~40	349.77±4.97Cb	372.77±12.12Cb	10.26±0.60Ba	0.999	15.10

2.5 土壤有机碳矿化参数与理化性质及其他碳组分的关系

通过对3种地力等级2个土层土壤的 C_p 和 k 值与土壤理化性质、土壤MBC和DOC含量进行相关性分析(表5),发现土壤 C_p 与SOC、TN、 NH_4^+-N 、 NO_3^--N 、DOC、MBC之间存在极显著正相关($P<0.01$)。土壤 C_p 与土壤MBC和TN关系最密切,相关系数最大,达到0.941和0.935,表明在影响土壤有机碳矿化强度的众多因子中,MBC和TN含量更重要。土壤SOC、 NO_3^--N 、DOC、 NH_4^+-N 与土壤 C_p 相关关系也较为密切,相关系数分别为0.930、0.869、0.863、0.788。但 C_p 与pH、含水量关系较弱,并未呈现显著的相关性,说明地力等级和养分含量的高低对土壤有机碳矿化会产生影响,进而影响土壤有机碳稳定性。 k 值与各养分含量没有明显的相关性,说明地力等级、土层深度和土壤理化性质等对 k 的影响不大。

3 讨论

3.1 地力水平对土壤有机碳矿化的影响

随培养时间的延长,土壤有机碳累积矿化量不断增加。而不同基础地力玉米田土壤有机碳矿化过程大致可分为3个阶段,即快速矿化阶段、缓慢矿化阶段和矿化速率稳定阶段,这与前人的研究结果基本一致。培养第1 d矿化速率较高,主要是培养前期加入的土壤混合液中水分对土壤微生物产生了激发作用^[31],有研究证实:水分对土壤微生物有激发作用,会影响土壤微生物群落结构和微生物活性,进而对土壤

有机碳矿化动态过程产生影响^[33];在培养第7 d左右达到高峰,可能是由于土壤有机碳中易矿化有机碳组分含量高,伴随着土壤中轻组有机碳分解,产生了大量供微生物代谢所需的营养物质^[23],从而导致土壤微生物的活性增加,土壤有机碳的矿化速率增加;而在培养后期,随着易矿化碳含量减少,土壤有机碳矿化速率下降,微生物开始分解较为稳定的有机碳组分,土壤有机碳矿化速率逐渐减小后趋于稳定。

基础地力作为衡量土壤肥力的综合指标,与土壤养分的供应能力有直接的关系,从而影响作物对土壤和肥料养分的吸收^[34]。一般而言,农田基础地力越高,其土壤肥力水平就越高。本研究中,地力等级的变化对玉米田土壤有机碳矿化作用有显著影响。随地力等级的升高,土壤有机碳矿化速率加快;土壤有机碳矿化释放的碳累积量也有明显增加的趋势,表明高地力的供肥能力较强,中地力次之,低地力最差。在对基础地力与土壤养分的相关分析中发现,土壤有机碳是基础地力的主要驱动因素^[35]。本研究也发现不同地力等级土壤有机碳含量差异显著,高地力土壤有机碳含量显著高于中地力和低地力,同样中地力土壤有机碳含量显著高于低地力。高地力土壤有机碳含量较高,活性有机碳所占的比例也较高,其生物的有效性较高,土壤的矿化速率也较快,累积矿化量较大。研究还发现,土壤有机碳含量与累积矿化量呈极显著正相关,因此,不同地力等级土壤有机碳矿化的差异,主要是由于土壤有机碳含量的不同所导致。土壤有机碳是微生物矿化的底物,而土壤有机碳含量的

表4 不同地力及深度土壤活性有机碳初始含量及其培养后变化值

Table 4 The initial content of soil active organic carbon in different soil fertility, depth and its changes after cultivation

地力水平 Soil fertility	土壤深度 Soil depth/cm	微生物生物量碳 MBC/mg·kg ⁻¹			可溶性有机碳 DOC/mg·kg ⁻¹		
		初始含量	培后含量	减少值	初始含量	培后含量	减少值
高地力 HSF	0~20	440.67±14.40Aa	358.34±17.68Aa	82.33±3.29Aa	7.11±0.27Aa	3.59±0.23Aa	3.13±0.09Aa
	20~40	201.52±4.75Ab	161.99±1.94Ab	39.53±4.40Ab	5.01±0.18Ab	2.80±0.03Ab	2.21±0.19Ab
中地力 MSF	0~20	334.75±3.25Ba	281.35±4.19Ba	53.40±0.95Ba	5.00±0.45Ba	3.09±0.03Ba	1.92±0.42Ba
	20~40	165.79±2.28Bb	140.66±2.81Bb	25.13±2.02Bb	3.45±0.21Bb	2.28±0.02Bb	1.17±0.22Ba
低地力 LSF	0~20	156.82±0.96Ca	112.57±0.82Ca	44.25±1.76Ca	3.41±0.41Ca	2.25±0.20Ca	1.15±0.21Ca
	20~40	70.44±2.33Cb	56.14±1.26Cb	14.29±1.75Cb	2.40±0.13Cb	1.79±0.12Cb	0.61±0.03Ca

表5 土壤 C_p 、 k 与理化性质的相关性分析

Table 5 Correlation analysis of soil C_p , k and soil physicochemical properties

项目 Items	pH(H ₂ O)	含水量	TN	SOC	NH_4^+-N	NO_3^--N	DOC	MBC
C_p	0.301	0.030	0.935**	0.930**	0.788**	0.869**	0.863**	0.941**
k	0.230	0.455	-0.205	-0.231	-0.061	-0.052	-0.002	-0.189

不同,致使活性有机碳所占的比例也不相同。在影响土壤有机碳矿化强度的众多因素中,土壤全氮含量对其矿化的影响也很大,其含量与土壤有机碳的矿化累积量呈极显著正相关,供试土壤的 C_p 值与土壤有机碳和全氮均呈显著正相关关系,这与李英臣等^[25]研究的土壤有机碳矿化速率和矿化累积量与初始的土壤有机碳和全氮含量等呈显著正相关关系的结论相一致。

对玉米田土壤有机碳的矿化特征进行研究,能够在一定程度上为土壤有机碳的稳定性评价提供科学依据^[19]。 C_p /SOC为土壤易分解有机碳占总有机碳的比例,能够直观地显示土壤有机碳的相对稳定性^[36]。不同地力间土壤有机碳矿化强度高低可以有效反映土壤碳库的源汇作用,从本研究中 C_p /SOC值来看,低地力与其他等级地力土壤相比,其矿化能力最强,有机碳的固存量最小;高地力土壤与中地力土壤相比,在0~20 cm土层高地力土壤矿化能力较强,固存量较小,而在20~40 cm土层则相反。低地力土壤加剧了土壤有机碳的矿化,从而导致土壤有机碳稳定性降低。在土壤有机碳含量保持一定的前提下,有机碳矿化能力越高,则土壤有机碳稳定性越差,不利于土壤有机碳的固持,固碳能力较高地力和中地力土壤差。这可能与低地力土壤长期持续耕种导致的土壤养分含量降低有关系。高地力土壤的固碳能力较中地力弱,尽管高地力土壤的有机碳含量较高,但其矿化作用较强,消耗的有机碳也很多,因此其固碳能力相对较差。不同地力土壤矿化强度总体上随土层加深呈降低趋势,即0~20 cm土层相较于20~40 cm土层有机碳矿化能力高,说明土壤表层的有机碳活性较高,底层的土壤有机碳更为稳定。0~20 cm土层土壤固存能力较20~40 cm土层较差,不利于土壤有机碳的固定。这可能是由于20~40 cm土层土壤较表层土壤更稳定,短期内变化较小。除有机碳矿化过程的影响外,土壤固碳能力的影响因素还有很多,包括土地利用方式、植被类型以及人为干扰等^[37]。因此,关于不同地力等级对土壤固碳能力影响因素亟需进一步深入研究。

此外,不同地力等级玉米田土壤蔗糖酶、脲酶、纤维素酶等也存在显著差异(未发表),王娇月等^[38]通过研究发现土壤蔗糖酶、纤维素酶活性对土壤有机碳矿化量的影响较大,与土壤有机碳矿化量存在显著相关性,低的酶活性能够抑制土壤有机碳矿化,而高地力土壤酶活性相对较高,可能也是促进其有机碳矿化的

原因。不同地力等级的差异会造成土壤理化性质,尤其是土壤有机碳含量的改变,加之其他因素的影响,从而对土壤有机碳的矿化速率和矿化过程产生影响。

3.2 土层深度对土壤有机碳矿化的影响

不同土层土壤有机碳的矿化也不相同。李顺姬等^[20]研究证明,土壤表层有机碳的累积矿化量比下层高,土壤有机碳矿化速率也呈减少的趋势,本研究也得到相同的结论。不同地力等级0~20 cm和20~40 cm土层土壤有机碳矿化累积量差异显著($P<0.05$),且20~40 cm土层土壤有机碳矿化速率和矿化累积量均显著低于0~20 cm土层,这一现象在培养初期尤为明显。这与土壤有机碳含量的变化趋势基本一致,此外,0~20 cm土层土壤的全氮、铵态氮和硝态氮含量也均显著高于20~40 cm土层。这一结论证实,土壤的理化性质可能导致土层间土壤有机碳矿化差异显著。通常表层土壤含有较多简单易分解的有机化合物,同时能够积累大量的外源有机质残体,更有利于微生物的生长和繁殖,能够为微生物分解、利用提供丰富的底物,从而影响土壤有机碳的矿化量。此外,表层土壤还具有发达的草根分布,与有机质腐殖化程度相关^[39],加之0~20 cm土层土壤的通气状况较20~40 cm土层好,这也是导致土壤有机碳矿化速率较高的原因之一。因此,表层土壤相对于下层土壤分解释放的 CO_2 较多,有机碳矿化能力也随土壤深度的增加而呈现降低的趋势。

3.3 MBC和DOC对土壤有机碳矿化的影响

土壤有机碳是微生物矿化的底物,而活性有机碳是影响土壤有机碳矿化的重要因素。王清奎等^[40]研究表明,土壤有机碳中活性较高的部分易被微生物分解利用,即潜在的可矿化碳,受其初始含量的影响,与本研究结果一致。MBC和DOC与土壤累积矿化量密切相关,土壤 C_p 值与MBC和DOC呈极显著正相关($P<0.01$)。这是由于DOC较易被微生物分解利用,有机碳的解聚和溶解是其矿化的先决条件,一般认为有机碳在转化生成 CO_2 、 CH_4 前必须先进入溶液^[13]。李忠佩等^[41]研究也发现DOC与土壤有机碳矿化密切相关,并提出对于原土DOC含量较高的土壤,淹水提高了土壤中DOC,增加土壤微生物可利用的底物,从而促进了土壤有机碳的矿化。因此,DOC含量动态和周转与土壤有机碳矿化密切相关。MBC是组成土壤腐殖质的重要碳源,对土壤有机碳的周转及生态环境有着重要的意义^[42]。随着培养时间的延长,不同基础地力、各个土层的MBC和DOC均有不同程度的下降,这

一现象表明,在培养过程中,土壤活性有机碳作为有机碳矿化的碳源,被微生物分解利用,以呼吸的方式释放CO₂,导致土壤活性有机碳含量降低,从而直接影响不同地力等级及土层深度CO₂累积释放量。这与张杰等^[43]的研究结果相同。

综上所述,土壤有机碳矿化受地力等级、土层深度和活性有机碳的综合影响,在这些因子的共同作用下发生变化。其中,低地力在土壤有机碳含量和稳定性方面都表现出明显劣势,因此未来该区域的农田管理应采取相应措施,如秸秆还田、添加生物炭等提升土壤地力。

4 结论

(1)随地力等级的降低,土壤有机碳矿化速率和累积矿化量均降低。低地力土壤有机碳矿化能力最强,土壤稳定性最差,不利于土壤有机碳的固定。不同地力等级,土壤矿化强度总体上随土层加深而降低,且深层的土壤有机碳更为稳定。

(2)不同地力等级玉米田土壤有机碳矿化受初始土壤理化性质和活性有机碳的影响。土壤有机碳的潜在矿化势与初始土壤有机碳、全氮、铵态氮、硝态氮以及微生物生物量碳和可溶性有机碳含量均呈现显著正相关。伴随土壤有机碳矿化过程,不同地力玉米田土壤微生物生物量碳和可溶性有机碳均较初始含量呈现降低趋势。

参考文献:

- [1] 余健,房莉,卞正富,等.土壤碳库构成研究进展[J].生态学报,2014,34(17):4829-4838.
YU Jian, FANG Li, BIAN Zheng-fu, et al. A review of the composition of soil carbon pool[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(17): 4829-4838.
- [2] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623-1627.
- [3] 袁红朝,秦红灵,刘守龙,等.固碳微生物分子生态学研究[J].中国农业科学,2011,44(14):2951-2958.
YUAN Hong-zhao, QIN Hong-ling, LIU Shou-long, et al. Advances in research of molecular ecology of carbon fixation microorganism[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(14): 2951-2958.
- [4] 范大莎,杨旭,吴相利,等.东北三省农田生态系统碳排放时空分异特征及驱动因素研究[J].环境科学学报,2017,37(7):2797-2804.
FAN Da-sha, YANG Xu, WU Xiang-li, et al. Spatial-temporal differentiation of agro-ecosystem carbon emissions in northeast China and its driving factors[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(7): 2797-2804.
- [5] Power A G. Ecosystem services and agriculture: Tradeoffs and synergies[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2010, 365(1554): 2959-2971.
- [6] 谢高地,肖玉.农田生态系统服务及其价值的研究进展[J].中国生态农业学报,2013,21(6):645-651.
XIE Gao-di, XIAO Yu. Review of agro-ecosystem services and their values[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(6): 645-651.
- [7] 韩长赋.玉米论略[J].农业经济问题,2012,33(6):4-9,110.
HAN Chang-fu. Theory of corn slightly[J]. *Agricultural Economics*, 2012, 33(6): 4-9, 110.
- [8] 李少昆,王崇桃.中国玉米生产技术的演变与发展[J].中国农业科学,2009,42(6):1941-1951.
LI Shao-kun, WANG Chong-tao. Evolution and development of maize production techniques in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(6): 1941-1951.
- [9] 黄耀,刘世梁,沈其荣,等.环境因子对农业土壤有机碳分解的影响[J].应用生态学报,2002,13(6):709-714.
HUANG Yao, LIU Shi-liang, SHEN Qi-rong, et al. Influence of environmental factors on the decomposition of organic carbon in agricultural soils[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(6): 709-714.
- [10] 聂阳意,王海华,李晓杰,等.武夷山低海拔和高海拔森林土壤有机碳的矿化特征[J].应用生态学报,2018,29(3):748-756.
NIE Yang-yi, WANG Hai-hua, LI Xiao-jie, et al. Characteristics of soil organic carbon mineralization in low altitude and high altitude forests in Wuyi Mountains, southeastern China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(3): 748-756.
- [11] 贾曼莉,郭宏,李会科.渭北生草果园土壤有机碳矿化及其与土壤酶活性的关系[J].环境科学,2014,35(7):2777-2784.
JIA Man-li, GUO Hong, LI Hui-ke. Mineralization of soil organic carbon and its relationship with soil enzyme activities in apple orchard in Weibei[J]. *Environmental Sciences*, 2014, 35(7): 2777-2784.
- [12] Cayuela M L, Sinicco T, Mondini C. Mineralization dynamics and biochemical properties during initial decomposition of plant and animal residues in soil[J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, 41(1): 118-127.
- [13] 吴健利,刘梦云,赵国庆,等.黄土台塬土地利用方式对土壤有机碳矿化及温室气体排放的影响[J].农业环境科学学报,2016,35(5):1006-1015.
WU Jian-li, LIU Meng-yun, ZHAO Guo-qing, et al. Effects of land-use types on soil organic carbon mineralization and greenhouse gas emissions in Loess tableland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(5): 1006-1015.
- [14] 廖洪凯,龙健,李娟.不同小生境对喀斯特山区花椒林表团聚体有机碳和活性有机碳分布的影响[J].水土保持学报,2012,26(1):156-160.
LIAO Hong-kai, LONG Jian, LI Juan. Effects of micro-habitats types on organic carbon and labile organic carbon distribution in surface soil aggregates in Chinese prickly ash orchard of karst mountain area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(1): 156-160.
- [15] 沈宏,曹志洪,胡正义.土壤活性有机碳的表征及其生态效应[J].生态学报,1999,18(3):32-38.
SHEN Hong, CAO Zhi-hong, HU Zheng-yi. Characteristics and ecological effects of the active organic carbon in soil[J]. *Chinese Journal*

- of Ecology, 1999, 18(3):32-38.
- [16] Haynes R J. Labile organic matter as an indicator of organic matter quality in arable and pastoral soils in New Zealand[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2000, 32(2):211-219.
- [17] 杨开军, 杨万勤, 贺若阳, 等. 川西亚高山3种典型森林土壤碳矿化特征[J]. 应用与环境生物学报, 2017, 23(5):851-856.
- YANG Kai-jun, YANG Wan-qin, HE Ruo-yang, et al. Soil organic carbon mineralization characteristics of three dominant subalpine forests in western Sichuan, China[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2017, 23(5):851-856.
- [18] 李忠佩, 吴晓晨, 陈碧云. 不同利用方式下土壤有机碳转化及微生物群落功能多样性变化[J]. 中国农业科学, 2007, 40(8):1712-1721.
- LI Zhong-pei, WU Xiao-chen, CHEN Bi-yun. Changes in transformation of soil organic carbon and functional diversity of soil microbial community under different land use patterns[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2007, 40(8):1712-1721.
- [19] 邬建红, 潘剑君, 葛序娟, 等. 不同土地利用方式下土壤有机碳矿化及其温度敏感性[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3):130-135.
- WU Jian-hong, PAN Jian-jun, GE Xu-juan, et al. Variations of soil organic carbon mineralization and temperature sensitivity under different land use types[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(3):130-135.
- [20] 李顺姬, 邱莉萍, 张兴昌. 黄土高原土壤有机碳矿化及其与土壤理化性质的关系[J]. 生态学报, 2010, 30(5):1217-1226.
- LI Shun-ji, QIU Li-ping, ZHANG Xing-chang. Mineralization of soil organic carbon and its relationship with soil physical and chemical properties on the Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(5):1217-1226.
- [21] 葛序娟, 潘剑君, 尹正宇, 等. 不同土层水稻土培养条件下有机碳矿化规律研究[J]. 土壤通报, 2015, 46(3):570-577.
- GE Xu-juan, PAN Jian-jun, YIN Zheng-yu, et al. Study on characters of soil organic carbon mineralization in different layers of paddy soil under the condition of incubation[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(3):570-577.
- [22] 郭振, 王小利, 段建军, 等. 长期施肥对黄壤性水稻土有机碳矿化的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(1):225-235.
- GUO Zhen, WANG Xiao-li, DUAN Jian-jun, et al. Long-term fertilization and mineralization of soil organic carbon in paddy soil from yellow earth[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55(1):225-235.
- [23] 刘德燕, 宋长春. 磷输入对湿地土壤有机碳矿化及可溶性碳组分的影响[J]. 中国环境科学, 2008, 28(9):769-774.
- LIU De-yan, SONG Chang-chun. Effects of phosphorus enrichment on mineralization of organic carbon and contents of dissolved carbon in a freshwater marsh soil[J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(9):769-774.
- [24] 刘燕萍, 高 人, 杨玉盛, 等. 黑碳添加对土壤有机碳矿化的影响[J]. 土壤, 2011, 43(5):763-768.
- LIU Yan-ping, GAO Ren, YANG Yu-sheng, et al. Effect of black carbon addition on soil organic carbon mineralization[J]. *Soils*, 2011, 43(5):763-768.
- [25] 李英臣, 宋长春, 侯翠翠, 等. 氮可利用性对东北不同类型湿地土壤有机碳矿化的影响[J]. 地理科学, 2011, 31(12):1480-1486.
- LI Ying-chen, SONG Chang-chun, HOU Cui-cui, et al. Effects of exogenous nitrogen availability on carbon mineralization of different wetlands soil types in northeast China[J]. *Scientia Geographical Science*, 2011, 31(12):1480-1486.
- [26] 农业部. NY/T 1634—2008 耕地地力调查与质量评价技术规程[S]. 北京:中国农业出版社, 2008.
- Ministry of Agriculture. NY/T 1634—2008 Technical regulations for soil fertility investigation and quality evaluation[S]. Beijing:China Agriculture Press, 2008.
- [27] 曾祥明, 韩宝吉, 徐芳森, 等. 不同基础地力土壤优化施肥对水稻产量和氮肥利用率的影响[J]. 中国农业科学, 2012, 45(14):2886-2894.
- ZENG Xiang-ming, HAN Bao-ji, XU Fang-sen, et al. Effects of optimized fertilization on grain yield of rice and nitrogen use efficiency in paddy fields with different basic soil fertilities[J]. *Chinese Agricultural Science*, 2012, 45(14):2886-2894.
- [28] 张洪森. 齐河耕作[M]. 天津:科学技术出版社, 2015.
- ZHANG Hong-sen, Qi He Farming[M]. Tianjin:Science and Technology Press, 2015.
- [29] 鲍士旦, 土壤农化分析[M]. 三版. 北京:中国农业出版社, 2013.
- BAO Shi-dan, Soil agrochemical analysis[M]. Third Edition. Beijing:China Agriculture Press, 2013.
- [30] Ghani A, Dexter M, Perrott K W. Hot-water extractable carbon in soils: A sensitive measurement for determining impacts of fertilization, grazing and cultivation[J]. *Soil Biol and Biochem*, 2003, 35(9):1231-1243.
- [31] 刘德燕, 宋长春, 王 丽, 等. 外源氮输入对湿地土壤有机碳矿化及可溶性有机碳的影响[J]. 环境科学, 2008, 29(12):3525-3530.
- LIU De-yan, SONG Chang-chun, WANG Li, et al. Exogenous nitrogen enrichment impact on the carbon mineralization and DOC of the freshwater marsh soil[J]. *Environmental Sciences*, 2008, 29(12):3525-3530.
- [32] 李隽永, 窦晓琳, 胡印红, 等. 城市不同地表覆盖类型下土壤有机碳矿化的差异[J]. 生态学报, 2018, 38(1):112-121.
- LI Juan-yong, DOU Xiao-lin, HU Yin-hong, et al. Variation in soil organic carbon mineralization under various land cover types in urban areas[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(1):112-121.
- [33] Schimel J P, Gullledge J M, Clein-Curley J S, et al. Moisture effects on microbial activity and community structure in decomposing birch litter in the Alaskan taiga[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 1999, 31(6):831-838.
- [34] 梁 涛, 廖敦秀, 陈新平, 等. 重庆稻田基础地力水平对水稻养分利用效率的影响[J]. 中国农业科学, 2018, 51(16):3106-3116.
- LIANG Tao, LIAO Dun-xiu, CHEN Xin-ping, et al. Effect of paddy inherent soil productivity on nutrient utilization efficiency of rice in Chongqing[J]. *Scientia Agricultural Science*, 2018, 51(16):3106-3116.
- [35] Zha Y, Wu X P, He X H, et al. Basic soil productivity of spring maize in black soil under long-term fertilization based on DSSAT model[J].

- Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(3):577-587.
- [36] 陈仕奇, 吕 盛, 高 明, 等. 缙云山不同林分下土壤有机碳及矿化特征[J]. 环境科学, 2019, 40(2): 953-960.
- CHEN Shi-qi, LÜ Sheng, GAO Ming, et al. Characteristics of soil organic carbon and mineralization with different stands in Jinyun mountain[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(2): 953-960.
- [37] 戴 慧, 王希华, 阎恩荣. 浙江天童土地利用方式对土壤有机碳矿化的影响[J]. 生态学杂志, 2007, 26(7): 1021-1026.
- DAI Hui, WANG Xi-hua, YAN En-rong. Effects of land use type on soil organic carbon mineralization in Tiantong, Zhejiang Province[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(7): 1021-1026.
- [38] 王娇月, 韩耀鹏, 宋长春, 等. 冻融作用对大兴安岭多年冻土区泥炭地土壤有机碳矿化的影响研究[J]. 气候变化研究进展, 2018, 14(1): 59-66.
- WANG Jiao-yue, HAN Yao-peng, SONG Chang-chun, et al. Effects of freezing-thawing cycles on soil organic carbon mineralization in the peatland ecosystems from continuous permafrost zone, Great Hinggan Mountains[J]. *Climate change research*, 2018, 14(1): 59-66.
- [39] 肖 颖, 杨继松. 辽河口滨海湿地土壤有机碳矿化及其与盐分的关系[J]. 生态学杂志, 2015, 34(10): 2792-2798.
- XIAO Ying, YANG Ji-song. Soil organic carbon mineralization and its relation with salinity in coastal wetland of Liao-he estuary[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(10): 2792-2798.
- [40] 王清奎, 汪思龙, 于小军, 等. 常绿阔叶林与杉木林的土壤碳矿化潜力及其对土壤活性有机碳的影响[J]. 生态学杂志, 2007, 26(12): 1918-1923.
- WANG Qing-kui, WANG Si-long, YU Xiao-jun, et al. Soil carbon mineralization potential and its effect on soil active organic carbon in evergreen broad-leaved forest and Chinese fir plantation[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(12): 1918-1923.
- [41] 李忠佩, 张桃林, 陈碧云. 可溶性有机碳的含量动态及其与土壤有机碳矿化的关系[J]. 土壤学报, 2004, 41(4): 544-552.
- LI Zhong-pei, ZHANG Tao-lin, CHEN Bi-yun. Dynamics of soluble organic carbon and its relation to mineralization of soil organic carbon [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4): 544-552.
- [42] 韩 琳, 张玉龙, 金 烁, 等. 灌溉模式对保护地土壤可溶性有机碳与微生物量碳的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(8): 1625-1633.
- HAN Lin, ZHANG Yu-long, JIN Shuo, et al. Effect of different irrigation patterns on soil dissolved organic carbon and microbial biomass carbon in protected field[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(8): 1625-1633.
- [43] 张 杰, 黄金生, 刘 佳, 等. 秸秆、木质素及其生物炭对潮土CO₂释放及有机碳含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(2): 401-408.
- ZHANG Jie, HUANG Jin-sheng, LIU Jia, et al. Carbon dioxide emissions and organic carbon contents of fluvo-aquic soil as influenced by straw and lignin and their biochars[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2015, 34(2): 401-408.