

陇东黄土高原农田土壤微生物量碳 和颗粒有机碳剖面分布特征

李玉进¹, 王百群^{1,2,3}, 丁婷婷²

(1. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100;
2. 西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 3. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:采用野外调查采样与室内分析相结合的方法,对陇东黄土高原农田黑垆土微生物量碳(MBC)和颗粒有机碳(POC)的剖面分布特征进行了研究。结果表明:不同剖面土壤微生物量碳和颗粒有机碳含量随土层变化差异显著或极显著,主要集中在0—20 cm和20—40 cm土层,呈明显的表聚现象;0—60 cm土层MBC含量随着土层深度增加而减小;随着海拔高度增加,0—20 cm土层MBC含量整体呈增加趋势,变化范围为180.92~282.53 mg/kg;POC含量在0—20 cm和20—40 cm土层的变化范围分别为1.02~1.68 g/kg和0.25~0.96 g/kg,40 cm以下土层颗粒有机碳含量较低;剖面中不同土层深度微生物量碳、颗粒有机碳占总有机碳(SOC)的比例在0—20 cm和20—40 cm土层均显著或极显著高于其它土层,MBC/SOC变化范围分别为2.29%~3.70%和1.00%~2.11%,POC/SOC的变化范围分别为13.46%~19.13%和5.08%~16.16%,剖面MBC/SOC与MBC、POC/SOC与POC随土层的变化规律均一致,MBC/SOC和POC/SOC可以作为反映土壤剖面质量变化的指标。

关键词:黄土高原;黑垆土;微生物量碳;颗粒有机碳;分布特征

中图分类号:S153.6⁺2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2013)06-0001-05

Profile Distribution Characteristics of Microbial Biomass Carbon and Particulate Organic Carbon of Farmland Soil in East Gansu Province of Loess Plateau

LI Yu-jin¹, WANG Bai-qun^{1,2,3}, DING Ting-ting²

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: Combining field sampling with laboratory analysis, we studied the soil profile distribution of microbial biomass carbon (MBC) and particulate organic carbon (POC) of dark loessial soil in farmland in East Gansu Province of Loess Plateau. The results showed that the contents of MBC and contents of POC were significantly different with the soil layer changes, which mainly distributed in 0—20 cm and 20—40 cm soil layers, mostly distributed in the top soil layer. The contents of MBC decreased with the soil depth increase in 0—60 cm soil layer. With the altitude increase, the contents of MBC had the relative increase tendency in 0—20 cm soil layer with the range of 180.92~282.53 mg/kg. The contents of POC were in the range of 1.02~1.68 g/kg and 0.25~0.96 g/kg in the of 0—20 cm and 20—40 cm soil layers, respectively, which were lower below 40 cm soil layer than those in the upper layers; with respect to the proportion MBC and POC to soil organic carbon(SOC), the percentages of MBC/SOC and POC/SOC in the 0—20 cm and 20—40 cm soil layers were significantly higher than the others, MBC/SOC varied from 2.29% to 3.70% and 1.00% to 2.11%, respectively, POC/SOC varied from 13.46%~19.13% and 5.08%~16.16% in these two layers, respectively. With

收稿日期:2013-09-20

修回日期:2013-10-28

资助项目:中国科学院战略性先导科技专项“应对气候变化的碳收支认证及相关问题”(XDA05050504);国家自然科学基金项目(40301024);黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室自主课题(10502-T2)

作者简介:李玉进(1988—),男,山东菏泽人,硕士研究生,主要从事土壤生态研究。E-mail:sdlijy2008@126.com

通信作者:王百群(1968—),男,陕西渭南人,博士,副研究员,主要从事土壤有机碳氮循环研究。E-mail:bqwang@ms.iswc.ac.cn

the soil layer increase, the trends of MBC/SOC and POC/SOC were consistent with that of MBC and POC. MBC/SOC and POC/SOC can be served as indexes to reflect the soil quality changes along profile.

Key words: Loess Plateau; dark loessial soil; microbial biomass carbon; particulate organic carbon; distribution characteristics

农田生态系统有机碳变化是陆地生态系统碳循环研究的重要方面之一。农田土壤有机碳的含量和组成不仅反映了土壤有机质含量水平,而且还与农田的可持续利用密切相关^[1]。Parton 等^[2]将土壤有机碳分为活性库(active pool)、缓性库(slow pool)和钝性库(passive pool)。依据物理分散方法,颗粒分组中的联合分组方法和生物学分组方法分别将土壤有机碳组别划分为颗粒有机碳(POC)和土壤微生物量碳(MBC)^[3]。土壤颗粒有机质(POM)是指粒径大小为 53~2 000 μm 土壤颗粒中的有机质,主要由不同分解阶段植物残体和微生物分解产物组成,具有比重小、C/N 高、易被微生物分解等特征^[4],是一个能够有效反映土壤整体质量的指标^[5]。土壤微生物量碳作为土壤有机碳中最活跃的部分,参与土壤中有机质的分解、腐殖质的形成、养分转化和循环等过程,是更具敏感性的土壤质量指标^[6]。

陇东黄土高原沟壑区地貌主要由塬面和沟壑构成,塬面地形平坦,土地利用方式以农田为主,主要种植粮食作物,对于区域粮食生产和食物安全起着重要的作用。但是,由于该区降水分布不均,水分条件是限制塬面农田作物产量的重要因素之一。在塬面以外的沟壑区,地形支离破碎,千沟万壑,土壤侵蚀严重,对生态环境和农业生产造成明显的影响。合理利用当地有限的农业土壤资源,提高土壤质量,增加作物产量成为重要目标。陇东塬面农田具有悠久的农耕历史,该区农田土壤有机碳库变化对于区域有机碳循环具有重要的影响。土壤微生物量碳和颗粒有机碳是土壤有机碳库的重要组成部分,也可作为反映土壤质量的重要指标,在研究农田土壤质量动态变化方面起重要作用。本研究选取陇东黄土高原塬面农田土壤的典型剖面,通过研究土壤微生物量碳和颗粒有机碳的剖面分布特征,为评价区域农田土壤质量状况

和探求适合区域农业可持续发展的农田管理措施提供基础依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

选取地处陇东黄土高原沟壑区的宁县为研究区域,宁县位于东经 107°40′—109°34′,北纬 35°15′—35°52′,地势表现为东北高,西南低,海拔高度为 885~1 687 m,总土地面积 2 633 km²。宁县年平均气温 8.0~9.0℃,气温年际变化明显,年均降水量 500~625 mm,降雨时空分布不均,降水东多西少,主要集中在 7—9 月,占年降水量的 54.8%,属温带和半湿润气候。表层土壤温度的变化比较剧烈,深层比较稳定。宁县境内的黄土塬区主要有早胜塬、和盛塬、盘克塬、南义塬、春荣塬和一些小的残塬,塬面平坦开阔,土壤侵蚀微弱,是地带性黑垆土的主要分布区域,种植的作物主要有小麦、玉米、谷子、糜子、大豆等。

1.2 样品采集与分析

在不同的塬面上分别选取有代表性的 1~2 个田块,每一个田块挖取 1 个 1 m 深土壤剖面,基本情况如表 1 所示。土壤类型为黑垆土,共选取 5 个采样剖面,每个剖面分层取样,每 20 cm 土层作为采样层,在采样土层中,多点取样,样品充分混匀并剔除土壤中的植物根系及植物残体,土壤样品带回实验室风干,过 2 mm 筛备用。

在测定风干土壤微生物量碳(Microbial biomass carbon, MBC)时,为了消除采样时温度和水分对土壤微生物量碳的影响,对土壤进行预培养^[7],称取 120 g 风干土样,加入去离子水,使土壤含水量保持在田间持水量的 40%左右,置于 150 ml 烧杯中,在 25℃下培养 7 d 后,充分混匀,用于测定土壤 MBC。采用氯仿熏蒸浸提法测定土壤 MBC^[8]。

表 1 土壤剖面采样点基本情况

地点及代号	经度	纬度	海拔/m	作物
和盛塬(新庄镇店头赵村)H1	107°55.41′	35°19.72′	1181	大豆
和盛塬(和盛镇新村)H2	107°50.81	35°24.85′	1193	玉米
早胜塬(中村镇平定村)Z1	107°58.52′	35°22.06′	1206	大豆
早胜塬(早胜镇谭腊村)Z2	107°59.19′	35°24.75′	1219	糜子
盘克塬(盘克镇萝卜咀村)P	108°11.81′	35°42.59′	1388	玉米

依据 Wander 等^[9]提供的方法测定土壤颗粒有机碳(Particulate organic carbon, POC)。称取过 2 mm 筛

的风干土样 20 g,放入塑料瓶,加入 50 ml 的 5 g/L 的六偏磷酸钠溶液,手摇 5 min,再在往复式震荡机上振

荡1 h。然后将分散的土样过 $53 \mu\text{m}$ 筛,不断用蒸馏水冲洗,直到获得澄清溶液,收集通过筛的泥水样品。然后将筛上物转移到蒸发皿中,在 80°C 条件下,将筛上物和泥水样烘干,分别称重烘干样品,分别计算其占土壤的百分含量。原状风干土和泥水样烘干土样磨碎并过 0.25 mm 筛,用重铬酸钾外加热法分别测定有机碳含量,差减法即得土壤颗粒有机碳含量。

1.3 数据分析

采用 SPSS 16.0 对测定数据进行统计分析,采用 Excel 2007 进行作图。

2 结果与分析

2.1 土壤微生物量碳的分布特征

从图 1 可以看出,各剖面 0—20 cm 和 20—40 cm 土层土壤微生物量碳含量均显著高于其它土层,呈明显表聚现象;0—60 cm 土层,随着土层深度增加, MBC 含量降低,这与党亚爱等的研究结果一致^[7];随海拔高度升高,0—20 cm 土层 MBC 含量整体呈增加趋势,变化范围为 $180.92 \sim 282.53 \text{ mg/kg}$ 。对于各个塬面,和盛塬 H1 和 H2 两个剖面点 MBC 含量在 0—80 cm 土层随着土层深度增加呈递减趋势,80—100 cm 土层含量又增加;100 cm 深度内,早胜塬 Z1 剖面点 MBC 含量随土层深度增加呈现先减后增再减的变化趋势,但 40—60 cm 和 60—80 cm 土层 MBC 含量相差不大;0—80 cm 土层,Z2 剖面点 MBC 含量随土层深度增加而减小,在 80—100 cm 含量又增加;100 cm 深度内,盘克塬 P 剖面点 MBC 含量随土层深度增加而减小,40—60 cm 和 60—80 cm 相差不大。

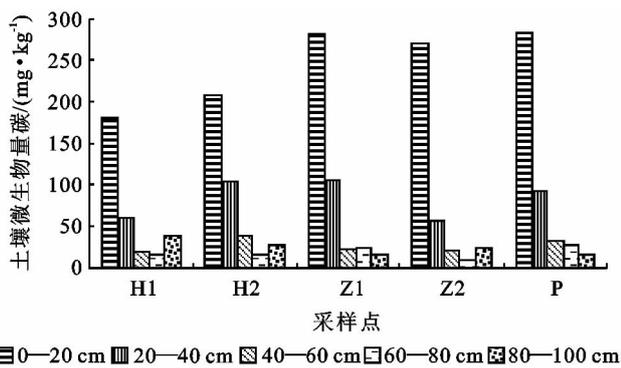


图 1 不同剖面土壤微生物量碳含量随土层的变化

由图 2 可以看出,0—20 cm 和 20—40 cm 土层 MBC/SOC 均显著或极显著高于其它土层,其变化范围分别为 $2.29\% \sim 3.70\%$ 和 $1.00\% \sim 2.11\%$,其它土层 MBC/SOC 为 $0.17\% \sim 0.63\%$ 。从图 1 和图 2 可以看出各剖面 MBC/SOC 与 MBC 随土层的变化规律一致,说明 MBC/SOC 可以作为反映土壤剖面质量变化的指标。

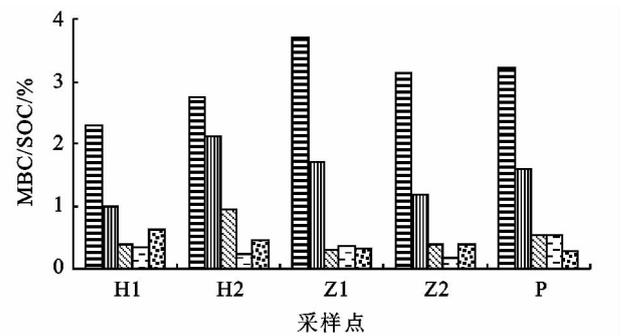


图 2 不同剖面 MBC/SOC 随土层的变化

土壤微生物量碳是比土壤有机碳更敏感的指标,可用来指示土壤肥力的动态变化和反映土壤质量状况^[10,13]。土壤微生物量碳含量和分布受到气候(温度和降雨)和农田管理措施(施肥措施、耕作措施)的影响,表层土壤受人为干扰作用最强,土壤有机碳和土壤微生物量碳含量受到的影响作用较其它土层强烈。土壤温度的变化可以直接影响微生物的生长、矿化速率和酶的活性以及群落组成,尤其是对表层土壤微生物的影响更为明显^[11]。Schimel 等^[12]研究表明经历长时间干旱的土壤降雨后,土壤微生物量和土壤呼吸瞬间激增。陇东黄土高原宁县黄土塬区土壤温度的变化表层比较剧烈,深层比较稳定,一年中降水主要集中在夏秋之间,春冬干旱少雨,同时降雨的时空分布不均,从地域上看,降雨东多西少,土壤有机碳和土壤微生物量碳含量极易受到土壤温度和降雨的影响,影响土壤碳的活性和存储。大量研究表明^[6,11,13-15],施肥可提高土壤微生物量碳含量,而长期有机无机肥料配施提高土壤微生物量碳含量的效果更显著,同时不同秸秆还田方式对土壤微生物量碳含量也影响较大。宁县黄土塬区作为陇东黄土高原重要的农作区,长期以来主要以传统的增施化肥来提高土壤质量和保证作物的产量,施肥对土壤有机碳和土壤微生物量碳含量的影响主要集中在耕层。保护性耕作对土壤微生物量有重要影响,且集中在土壤表层。徐阳春等^[16]研究表明与常规耕翻相比长期免耕处理表土层土壤微生物量碳、氮含量分别增加了 25.4% 和 45.4% 。高云超等^[17]研究表明秸秆覆盖免耕能提高表土层土壤微生物量,0—7.5 cm 土层比翻耕处理年平均增高 51.7% 。干旱是宁县黄土塬区固有的气候特点,加上黄土高原土壤侵蚀严重,保水、保肥和提高作物产量成为重中之重,巩杰等^[18]研究表明秸秆覆盖对表层(0—10 cm)土温变化有明显的调节作用,覆盖对 0—40 cm 土层可抑蒸保墒、保水和增加土壤有机质含量,同时形成了不同时期新的土壤微生物区系,改变了土壤生物学活性,严昌荣等^[19]通过实施

5 a 的耕作措施研究表明不同耕作措施对土壤有机碳的影响主要集中在 0—40 cm 土层。在 0—5 cm 土层中,免耕覆盖处理的颗粒有机碳、可溶性有机碳和微生物碳含量最高,其次为秸秆还田、浅旋耕和常规耕作处理。与常规耕作处理相比,秸秆还田处理 20—40 cm 土层的颗粒有机碳、可溶性有机碳和微生物碳含量提高。从图 1 可以看出,各剖面 0—40 cm 土层微生物含量相对较高,这与长期施肥和作物残茬在土壤中的分解密切相关,而 40 cm 以下各土层土壤微生物量碳含量较低,一方面说明土壤微生物数量相对较少和微生物活性较低,另一方面说明 40 cm 以下土层有机碳基本处于一种稳定状态。

2.2 土壤颗粒有机碳分布特征

从图 3 可以看出,各剖面 100 cm 深度内随土层深度增加土壤颗粒有机碳含量减小,0—20 cm 和 20—40 cm 颗粒有机碳含量与其它土层差异均极显著 ($P < 0.01$);各剖面土壤颗粒(53~2 000 μm)质量百分含量为 2.13%~5.76%,其中 0—20 cm 和 20—40 cm 土层百分含量较高;0—20 cm 和 20—40 cm 土层土壤颗粒有机碳含量变化范围分别为 $(1.02 \pm 0.05) \sim (1.68 \pm 0.01)$ g/kg, $(0.25 \pm 0.02) \sim (0.96 \pm 0.03)$ g/kg,40 cm 以下土层颗粒有机碳含量较低。

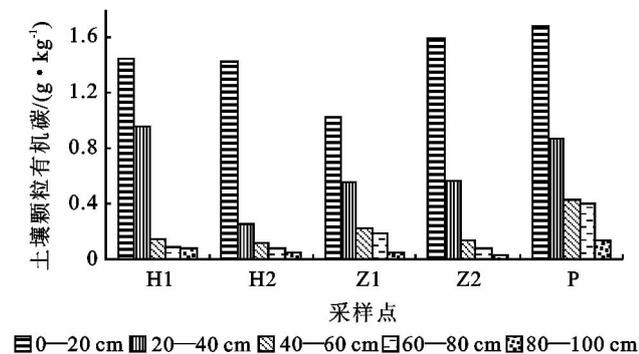


图 3 不同剖面土壤颗粒有机碳含量随土层的变化

由图 4 可以看出,各个剖面 POC/SOC 与 POC 的整体变化规律一致,说明 POC/SOC 也可作为反映土壤剖面质量变化的指标。0—20 cm 和 20—40 cm 土层 POC/SOC 相对于其它土层较高,变化范围分别为 13.46%~19.13%和 5.08%~16.16%。Franzuebbers 等^[20]研究表明寒冷和半干旱地区起源于森林的农业土壤的 POC 占总 SOC 的比例为 16%~44%,本研究 POC/SOC 相对较低,这可能与农田土壤类型、农田管理措施及耕种年限有关。由于 POM 在温暖湿润的气候条件下更容易分解,因此 POM 含量一般在寒冷和半干旱地区较高^[4]。陇东黄土高原属于干旱、半干旱区,土壤颗粒有机碳的累积具有极大潜力。Cambardella 等^[21]研究表明免耕处理的

POC 占总有机碳的比例比休闲的 18%和留茬覆盖的 19%更高,达到 25%。Wander 等^[9]研究表明免耕土壤表层(0—5 cm)的有机碳和 POC 含量比传统耕作增加了 25%和 70%,但在 5—17.5 cm 土层深度却分别减少了 4%和 18%,孟凡乔等^[22]研究表明秸秆还田使得 0—20 cm 土壤颗粒有机碳含量明显增加,且整株还田比粉碎还田更能增加 10—20 cm 土壤颗粒的有机碳含量,而免耕对土壤颗粒有机碳的增加主要表现在 0—10 cm,进一步表明免耕或秸秆覆盖对 POC 含量有重要影响,同时也影响了 POC 在土壤剖面中的分布。陇东黄土高原土壤侵蚀严重,严重影响农田土壤质量,推广免耕或秸秆覆盖等保护性耕作措施一方面可以减少土壤的扰动,提高了土壤颗粒有机碳的物理保护机制和维持了土壤微生物的活性,另一方面隔离降雨对土壤的直接接触,增加土壤入渗,减少土壤养分的流失。施肥措施对 POC 有重要作用,从而影响其在土壤剖面中的分布,大量研究表明^[23-25],施用化肥、有机肥或者有机肥配合化肥均能增加土壤 POC 含量,但有机肥或者有机肥配施化肥效果更佳。从图 3 可以看出,以传统耕作为主的陇东黄土高原农田土壤,长期的施肥和作物残茬在土壤中的分解明显增加了 0—20 cm 和 20—40 cm 土层 POC 含量,表聚现象也非常明显。

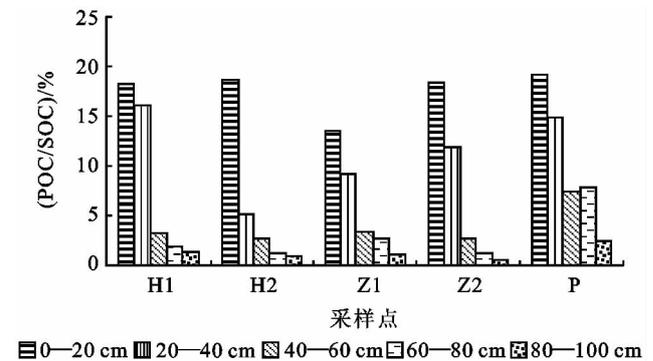


图 4 不同剖面 POC/SOC 随土层的变化

3 结论

不同剖面土层土壤微生物量碳差异显著,主要集中在 0—20 cm 和 20—40 cm;在 0—60 cm 土层,随着土层深度增加,MBC 含量降低;随着海拔高度增加,0—20 cm 土层 MBC 含量整体呈增加趋势,变化范围为 180.92~282.53 mg/kg;在 0—20 cm 和 20—40 cm 土层,MBC/SOC 均显著或极显著高于其它土层,其变化范围分别为 2.29%~3.70%和 1.00%~2.11%,40 cm 以下土层 MBC/SOC 为 0.17%~0.63%。剖面 MBC/SOC 与 MBC 随土层的变化规律一致,说明 MBC/SOC 可以作为反映土壤剖面质量变化的指标。

各剖面随着土层深度增加,POC含量下降,0—20 cm和20—40 cm土层POC含量与其它土层差异极显著;0—20 cm和20—40 cm土层POC变化范围分别为1.02~1.681 g/kg和0.25~0.96 g/kg,40 cm以下土层颗粒有机碳含量较低;各个剖面POC/SOC与POC的变化规律一致,其中0—20 cm和20—40 cm土层POC/SOC相对于其它土层较高,变化范围分别为13.46%~19.13%和5.08%~16.16%;POC/SOC也可以作为反映土壤剖面质量变化的指标。

气候(温度和降雨)、施肥制度和耕作措施是影响土壤微生物量碳和颗粒有机碳剖面分布特征的重要因素。探求合理的农业管理措施,如有机或有机无机配施的施肥制度、免耕或秸秆覆盖等保护性耕作措施对增加作物产量,促进陇东黄土高原农田土壤有机碳储量和土壤质量的提高,保障农业的可持续发展具有重要的意义。

参考文献:

- [1] 姜勇,庄秋丽,梁文举. 农田生态系统土壤有机碳库及其影响因子[J]. 生态学杂志,2007,26(2):278-285.
- [2] Parton W J, Schimel D S, Cole C V, et al. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains grassland[J]. Soil Science Society of America Journal,1987,51(5):1173-1179.
- [3] 张国,曹志平,胡婵娟. 土壤有机碳分组方法及其在农田生态系统研究中的应用[J]. 应用生态学报,2011,22(7):1921-1930.
- [4] 谢锦升,杨玉盛,陈光水,等. 土壤颗粒有机质研究进展[J]. 亚热带资源与环境学报,2009,4(4):43-52.
- [5] Gregorich E G, Monreal C M, Carter M R, et al. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils[J]. Canadian Journal of Soil Science,1994,74(4):367-385.
- [6] 芦思佳,韩晓增. 长期施肥对微生物量碳的影响[J]. 土壤通报,2011,42(6):1355-1358.
- [7] 党亚爱,李世清,王国栋,等. 黄土高原典型土壤有机碳和微生物碳分布特征的研究[J]. 自然资源学报,2007,26(2):936-945.
- [8] Wu J, Joergensen R G, Pommerening B, et al. Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction: an automated procedure[J]. Soil Biology and Biochemistry,1990,22(8):1167-1169.
- [9] Wander M M, Bidart M G, Aref S. Tillage impacts on depth distribution of total and particulate organic matter in three Illinois soils[J]. Soil Science Society of America Journal,1998,62(6):1704-1711.
- [10] 沈宏,曹志洪. 长期施肥对不同农田生态系统土壤有效碳库及碳素有效率的影响[J]. 热带亚热带土壤科学,1998,7(1):1-5.
- [11] Zogg G P, Zak D R, Ringelberg D B, et al. Compositional and functional shifts in microbial communities due to soil warming[J]. Soil Science Society of America Journal,1997,61(2):475-481.
- [12] 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 and Biochemistry,1999,31(6):831-838.
- [13] 李娟,赵秉强,李秀英,等. 长期有机无机肥料配施对土壤微生物学特性及土壤肥力的影响[J]. 中国农业科学,2008,41(1):144-152.
- [14] 樊军,郝明德. 长期轮作施肥对土壤微生物碳氮的影响[J]. 水土保持研究,2003,10(1):85-87.
- [15] 胡诚,曹志平,叶钟年,等. 不同的土壤培肥措施对低肥力农田土壤微生物生物量碳的影响[J]. 生态学报,2006,26(3):808-814.
- [16] 徐阳春,沈其荣,冉炜. 长期免耕与施用有机肥对土壤微生物生物量碳、氮、磷的影响[J]. 土壤学报,2002,39(1):89-94.
- [17] 高云超,朱文珊,陈文新. 秸秆覆盖免耕土壤微生物生物量与养分转化的研究[J]. 中国农业科学,1994,27(6):41-49.
- [18] 巩杰,黄高宝,陈利顶,等. 旱作麦田秸秆覆盖的生态综合效应研究[J]. 干旱地区农业研究,2003,21(3):69-74.
- [19] 严昌荣,刘恩科,何文清,等. 耕作措施对土壤有机碳和活性有机碳的影响[J]. 中国土壤与肥料,2010(6):58-63.
- [20] Franzluebbers A J, Arshad M A. Particulate organic carbon content and potential mineralization as affected by tillage and texture[J]. Soil Science Society of America Journal,1997,61(5):1382-1386.
- [21] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. Soil Science Society of America Journal,1992,56(3):777-783.
- [22] 孟凡乔,况星,张轩,等. 土地利用方式和栽培措施对农田土壤不同组分有机碳的影响[J]. 农业环境科学学报,2009,28(12):2512-2519.
- [23] 杨长明,欧阳竹,董玉红. 不同施肥模式对潮土有机碳组分及团聚体稳定性的影响[J]. 生态学杂志,2005,24(8):887-892.
- [24] 韩晓日,王玲莉,杨劲峰,等. 长期施肥对土壤颗粒有机碳和酶活性的影响[J]. 土壤通报,2008(2):266-269.
- [25] 龚伟,颜晓元,蔡祖聪,等. 长期施肥对小麦、玉米作物系统土壤颗粒有机碳和氮的影响[J]. 应用生态学报,2008,19(11):2375-2381.