

周运来, 张振华, 钱晓晴, 等. 施肥方式对土壤 CO₂ 释放的影响及其机理研究进展[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(2): 472-480.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2016.02.036

施肥方式对土壤 CO₂ 释放的影响及其机理研究进展

周运来^{1,2}, 张振华², 钱晓晴¹, 严少华², 罗佳², 卢信², 刘丽珠², 范如芹²
(1. 扬州大学环境科学与工程学院, 江苏 扬州 225100; 2. 江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014)

摘要: 采取有效的农艺措施降低农田土壤 CO₂ 释放是当前土壤固碳研究的重点之一。本文将施肥方式与土壤 CO₂ 释放的影响因子联系起来, 对不同施肥方式下土壤呼吸温度敏感性、土壤有机碳组分含量、土壤团聚体特征及土壤微生物多样性等因素的变化进行了综述, 讨论了施肥方式影响 CO₂ 释放的机理, 并对今后不同施肥方式影响 CO₂ 释放的研究重点进行了展望, 以为降低农田土壤 CO₂ 排放提供理论依据。

关键词: 施肥方式; 土壤 CO₂ 释放; 土壤固碳

中图分类号: S 147.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2016)02-0472-09

Research progress in soil CO₂ emission affected by fertilization modes and its mechanism

ZHOU Yun-lai^{1,2}, ZHANG Zhen-hua², QIAN Xiao-qing¹, YAN Shao-hua², LUO Jia², LU Xin²,
LIU Li-zhu², FAN Ru-qin²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225100, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: To effectively reduce soil CO₂ emission from farmland through soil management practices is one of the key focus in soil carbon sequestration research. In this paper, the relationship between fertilization modes and their influences on impacting factors of soil CO₂ emission was analyzed. The temperature sensitivity of soil respiration, soil aggregate characteristics, contents of soil organic carbon fractions, soil microbial community diversity, etc., were reviewed and the mechanism of fertilization effect on CO₂ emission were discussed. The development prospects in the research of farmland soil CO₂ reduction in the future were brought forward, which could provide theoretical guidance for soil carbon sequestration research.

Key words: fertilization mode; soil CO₂ emission; soil carbon sequestration

收稿日期: 2015-09-18

基金项目: 国家自然科学基金项目(41401259); 公益性行业(农业)科研专项(201203050-6); 江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(15)1003-5]; 国家博士后科学基金特别资助项目(2015T80521); 农业部农业环境重点实验室开放基金项目

作者简介: 周运来(1990-), 男, 安徽阜阳人, 硕士研究生, 研究方向为农田土壤环境与植物营养学。(E-mail) 1102279384@qq.com。张振华为共同第一作者。

通讯作者: 范如芹, (Tel) 025-84390581; (E-mail) fanruqin2007@126.com

全球气候变暖是当今国际社会普遍关注的问题, 也是人类面临的最为严峻的环境挑战之一。全球气候变化是温室气体浓度增加、土地与植被变化、地球的大气物理化学作用等各种因素综合作用的结果, 而人类活动所造成的大气中温室气体浓度急剧增加已成为全球气候变化的最主要因素之一。工业革命以来, 大气 CO₂ 浓度持续升高^[1-2]。研究结果表明, 陆地土壤是地球表面最大的碳库, 全球土壤碳库达到 $2.2 \times 10^3 \sim 3 \times 10^3$ Pg, 为植被碳库的 2~3 倍,

是全球大气碳库的 2 倍^[3-4]。

土壤呼吸是农田碳库向大气碳库输入的主要途径,土壤呼吸的变化对全球气候变暖存在较大的影响。农业土壤碳库储量的细微变化都将在很大程度上改变大气 CO₂ 浓度以及影响全球碳平衡。在陆地生态系统与大气交换的 CO₂ 中,土壤有机质分解释放的 CO₂ 约占 2/3 之多^[4]。农田生态系统是重要的 CO₂ 的源与汇^[5]。农田土壤面积占全球陆地面积的 10.5%,也是全球碳库中最活跃的部分,受自然和人为因素的影响比较大,这也使得在短期内通过人为干预来降低农田土壤碳释放成为可能^[6]。

土壤呼吸作为土壤碳库输出的一个关键性环节,易受到土壤理化性质的影响^[7-8],往往作为土壤生物活性和土壤肥力乃至透气性的指标,并且指示着生态系统演替的过程与方向^[9]。从土壤表面释放 CO₂ 是两个主要过程综合的结果:CO₂ 的产生以及气体形式在土壤中的传输^[10]。土壤呼吸通常可使土壤空气中 CO₂ 浓度迅速升高,达到大气中 CO₂ 含量的 10~45 倍^[11]。在全球碳循环研究中,对土壤呼吸作用所释放的碳量估计值约为每年 50~60 PgC,但该数值的准确度仍有待进一步探讨^[12]。尽管土壤呼吸释放 CO₂ 与大气温度、不同深度土壤温度和土壤水分均呈现正相关,而在不同施肥方式下,施肥效应则可以掩盖土壤的温度和水分效应,说明施肥对土壤呼吸有重要影响^[13]。不同的施肥方式对土壤温度敏感性、土壤有机碳、土壤团聚体、土壤微生物群落都有不同的影响,施肥带来的这些变化对土壤 CO₂ 释放的影响机理研究还没有得到广泛重视。本文将施肥方式与影响土壤 CO₂ 释放的环境因子联系起来,深入分析施肥方式对土壤 CO₂ 释放的影响及其机理,以期为选择合理的施肥方式、降低农田土壤 CO₂ 释放提供参考。

1 施肥方式对土壤呼吸温度敏感性 & CO₂ 释放的影响

1.1 施肥方式对土壤呼吸温度敏感性的影响

土壤有机碳、氮含量与土壤结构是影响土壤呼吸温度敏感性的重要因素^[14]。吴会军^[15]的研究结果表明土壤温度与土壤呼吸速率变化具有较高的一致性,并且在秸秆还田和施肥条件下,土壤呼吸对温度的升高更敏感,有机质降解受温度影响较大,随着温度升高,土壤呼吸速率增加也较快。随着施氮量

的增加土壤有机碳矿化的温度敏感性增加,氮肥施用和温度的共同作用可能使土壤向大气中释放的 CO₂ 增加^[16]。施加氮肥导致玉米根际呼吸温度敏感性(Q_{10})明显增强, Q_{10} 值增大,而土壤基础呼吸的温度敏感性则无明显变化,两种效应的叠加使得土壤总呼吸速率温度敏感性明显增加^[17]。对 Q_{10} 的认识,已逐渐从恒定 Q_{10} 转变为 Q_{10} 随温度升高而减小。同时,如果最优温度的存在能被广泛验证,则基于存在最优温度的 Gaissoam 方程将是比较合理的土壤呼吸与温度关系评价模型^[18]。张蛟蛟等^[19]在浙江省临安市典型板栗林样地的施肥试验结果表明施用化肥可以增加土壤呼吸底物,包括根系生物量和土壤有机碳的含量,导致土壤呼吸对温度的敏感系数增加。但是,施加有机肥处理尽管增加了土壤呼吸底物量,却没有增加 Q_{10} 值。可见与施用无机肥相比,施加有机肥在降低土壤呼吸速率温度敏感性方面具有一定的优势。

土壤呼吸是酶促的化学反应,因此其温度敏感性不仅取决于呼吸底物的质量,同样也取决于呼吸底物的有效性^[20]。土壤有机质的质量和水溶性碳含量、土壤微生物种群结构和酶活性等因素是影响土壤呼吸的温度敏感性和适应性的主要因素^[21]。杨庆朋等^[22]从土壤温度测定深度、时空尺度、土壤呼吸不同组分温度敏感性差异、激发效应以及采用方法的差异等方面分析了温度敏感性研究存在的不确定性。并在此基础上提出了未来重点研究方向:1. 土壤呼吸不同组分温度敏感性差异的机理;2. 底物质量和底物供应对温度敏感性的交互影响;3. 生物因子对土壤呼吸温度敏感性的影响。施肥方式影响土壤呼吸温度敏感性也表现在这几个方面。

1.2 土壤温度对土壤 CO₂ 释放的影响

土壤温度是影响土壤 CO₂ 释放的主要因子之一^[23]。时秀焕等^[24]把影响土壤 CO₂ 释放的因素分为非生物因素、生物因素以及人为因素 3 种。一般认为,土壤呼吸速率与土壤温度、土壤有机碳含量呈正相关,与土壤紧实度呈显著负相关,且土壤温度与土壤呼吸速率的相关系数最高^[25]。受太阳与大气及地球辐射、降水、土壤热传导等因素作用,土壤温度具有周期性的日变化和季节变化特征,这种变化特征尤其是表层土壤温度的变化显著影响着土壤生物的生命活动^[26],不但影响土壤中碳、氮等物质的化学和生物学过程,并且决定土壤资源质量高低,从

而影响植物的生长、种子的萌发和农作物的产量等^[27]。施肥对土壤 CO₂ 释放的季节性模式没有明显的影响,可能是因为土壤 CO₂ 释放季节性变化主要受土壤温度和湿度的影响^[28]。许多研究结果表明,温度升高一般会促进土壤 CO₂ 的释放^[29-32]。5 cm 深度土壤的温度与土壤呼吸速率呈指数关系,土壤温度可以解释土壤呼吸季节变化的 65% ~ 75%^[33-34]。同样质地的土壤,CO₂ 的释放量受土壤通气状态及土壤深度的影响,同时受所施有机物料的影响^[35]。也有研究认为土壤 15 cm 处的土层温度是影响土壤 CO₂ 释放的主要因素之一,且随温度的增加而升高^[36]。国内外学者一般采用线性模型、二次方程、指数模型等多种方法对土壤呼吸和温度关系进行拟合^[37-39]。

施肥通过改变土壤温度相关性状来影响土壤 CO₂ 释放的研究主要集中在施肥对土壤温度敏感性、土壤温度与土壤呼吸速率模型、呼吸速率随季节变化上。就施肥对土壤温度敏感性而言,包括施肥对微生物活性、酶活性、土壤有机碳的质量等的影响,这些可以作为解释“土壤温度-土壤呼吸速率”模型的机理;土壤呼吸速率随季节变化可以看作对这一模型的补充。施肥改变了耕作层的物质组成,改变了土壤对温度的感应,进而影响土壤 CO₂ 释放。

2 施肥方式对土壤有机碳及 CO₂ 释放的影响

2.1 施肥方式对土壤有机碳含量及形态的影响

施肥方式对土壤有机碳的影响首先表现在对土壤有机碳总量的影响上。有不少研究结果表明^[17, 40-42],单施化肥、化肥配施秸秆或化肥配施有机肥均能显著提高土壤有机碳含量,并且土壤总有机碳随有机肥投入量的增加而增加。需要说明的是,长期单独施用化肥虽然没直接提高土壤有机碳的含量,但可以促进农作物根系迅速生长,提高根际有机质输入,从而增加土壤总有机碳^[43]。土壤有机碳增加的幅度因种植的作物而不同。日益增多的研究结果表明,土壤有机碳的含量并不是无限增加的,土壤固碳量存在一个上限或者说是饱和水平^[44]。

不同施肥处理不仅能影响土壤总有机碳含量,而且能够改变有机碳各组分及其比例。典型的对比存在于有机无机配施与单施化肥之间。于维水

等^[17]研究了中国东部 13 年长期不同施肥制度下的黑土、潮土、红壤和 31 年水稻土共 4 类土壤的典型土样,结果表明,有机无机配施处理提高了旱地土壤易分解碳的含量,一是有机无机配施处理显著增加了土壤总有机碳含量^[45];二是有机肥为微生物提供充足的碳源,直接增加了根系生物量及根系分泌物^[46],也在很大程度上激发了微生物的活性,从而增加了微生物生物量^[47];再则有机肥本身含有一些与易分解碳组分相似的成分^[48],从而引起了土壤易分解碳组分的增加。张付申^[49]在壤土和黄绵土上的研究结果表明,单纯施用化肥对易分解碳及其占总有机碳的比例均无显著影响,长期施用化肥增加的主要是非活性有机碳含量,不利于土壤有机碳组分结构的优化。施肥措施影响土壤有机质主要是通过活性有机质的影响来实现的,汪吉东等^[50]在太湖地区进行连续 3 年的不同有机无机肥配合施用试验,结果表明,适量无机肥施用可增加土壤活性有机质含量,提高土壤碳库管理指数;有机无机肥配合施用对提高土壤活性有机碳含量的作用大于单独施用无机肥。

作为土壤有机质的主体,土壤腐殖质是土壤有机质在微生物作用下形成的复杂而较稳定的大分子有机化合物,是土壤结构与功能的基础。大量研究结果表明,长期施用有机肥或有机肥与化肥配施均能较好地促进土壤腐殖质的积累^[51-52],也有少数研究结果表明,施用有机肥对腐殖质积累的作用与不施肥及施用化肥相同^[53]。长期施用化肥对土壤腐殖质积累作用的研究结果也不尽相同。张夫道^[54]的研究结果表明,长期施用化肥可基本维持土壤腐殖质平衡,但会导致土壤腐植酸“老化”,分子缩合度增大;也有研究认为,长期施用化肥能够促进腐殖质的积累^[55];而张春霞等^[53]认为长期施用化肥会降低土壤腐殖质含量。此外,范如芹等^[56]以黑土为研究对象在加拿大安大略省西南部长期田间定位试验,研究结果表明,耕作扰动能提高土壤的腐殖化程度,加速土壤胡敏酸的缩合和氧化,使土壤胡敏酸老化,结构趋于复杂。说明肥料的施用方式也会影响土壤腐殖质的含量及形态结构。

2.2 土壤有机碳含量及形态对土壤 CO₂ 释放的影响

土壤总有机碳含量、有机碳各组分含量及其比例都对土壤 CO₂ 释放有不同程度的影响。如上所

述,施肥活动对两者都有影响。杨旭等^[57]通过玉米种植田间试验,研究了玉米秸秆直接还田和炭化还田对旱地棕壤 CO₂ 释放及土壤碳库管理指数的影响。结果表明:与单施化肥相比,秸秆直接还田和秸秆炭化还田均显著增加了土壤 CO₂ 的累积释放量;在同等化肥施用条件下,秸秆炭化还田比直接还田显著降低了土壤 CO₂ 的累积释放量。李玲等^[58]指出,土壤可溶性有机碳是土壤释放 CO₂ 的重要贡献者,其含量决定着土壤碳释放量。与秸秆直接还田相比,生物炭的施入起到良好的 CO₂ 减排效果。秸秆还田增加了冬小麦季的土壤呼吸速率,却显著降低了夏玉米季的土壤呼吸速率^[25]。不同施肥措施通过促进作物生长,调节土壤 C/N 值等,显著增加了土壤呼吸速率,作用大小顺序为:施有机肥>有机无机配施>施化肥^[59]。许咏梅等^[60]在比较了长期施用有机物料、不施用有机物料、单施有机肥以及秸秆还田处理的农田土壤呼吸速率之后,认为从农业固碳减排和土壤肥力培育的角度来讲,有机无机配合施用是实现新疆农田地力提升和环境友好双赢的重要措施。

土壤本体有机质以及外来有机质是土壤呼吸的底物,对土壤 CO₂ 的释放有显著影响。两者之间的相互作用,反映土壤不同形态有机质的转化。不同有机质形态对土壤 CO₂ 释放的影响不同,现有研究从形态结构以及生化性质来区分有机质。这使得施肥方式对土壤 CO₂ 释放的机理更加清晰,然而不同形态有机质的生物有效性及其对土壤 CO₂ 释放的贡献率还有待进一步研究。

3 施肥方式对土壤团聚体及土壤 CO₂ 释放的影响

3.1 施肥方式对土壤团聚体粒径及数量的影响

土壤团聚体是土壤结构的基本单元,其数量和质量直接决定土壤质量和肥力^[61],也是微生物活动以及土壤物质和能量的循环转化的主要场所^[62]。土壤团聚体是土壤有机碳保护的载体,其形成与周转的各个过程均与土壤呼吸(CO₂ 释放)息息相关^[63]。水稳性大团聚体是土壤有机碳、氮的主要载体。研究结果表明,有机肥的施用显著提高了水稳性大团聚体及其中有机碳、氮的含量,是改善土壤团粒结构、提高土壤生物功能和生产力的有效措施^[64]。土壤轻组有机碳主要集中在耕作层,秸秆还

田可以显著增加轻组有机碳含量^[65]。耕作方式与土地利用方式会影响微团聚体与大团聚体之间的转化与再分布,且大团聚体有机碳不稳定,是土壤有机碳损失的途径之一,且大粒径团聚体有机碳活性较强,更易于损失^[66]。

侯晓静等^[67]通过在苏北滩涂地区开展田间试验,研究不同施肥处理(不施肥、施农家肥、施商品有机肥、施无机肥)对滩涂地区围垦农田土壤有机碳及团聚体有机碳的影响,结果表明,与不施肥相比,不同施肥处理均能明显增加 0~30 cm 土层土壤有机碳含量和有机碳密度,施农家肥增加幅度最高。耿瑞林等^[68]在华北平原潮土中以及周萍等^[69]在太湖地区水稻田中的研究均发现,有机肥的施用能显著增加粒径稍大的团聚体(0.25~2.00 mm 或>2.00 mm)的含量,同时减少粒径较小的团聚体(<0.25 mm)的含量。顾鑫等^[70]的研究中也得出相似的结论,然而他们发现在培养过程中,随着培养时间的增加,在没有新的外源有机物质(如秸秆)加入条件下,棕壤的团聚能力逐渐减弱,水稳性大团聚体更容易破碎,转变成微团聚体,平均质量和直径呈现下降趋势。说明各级别团聚体有机碳也发生了明显的变化,大团聚体中总有机碳含量、新碳含量呈下降趋势,微团聚体中总有机碳含量、新碳含量呈上升趋势。

3.2 土壤团聚体特征对 CO₂ 释放的影响

不同粒级土壤团聚体具有不同的孔隙特征,导致不同粒级团聚体的有机碳储存及其矿化作用存在一定的差异^[71]。小粒级团聚体中有机碳以化学保护为主(微生物来源的腐殖物质较多,并与黏粒结合),分解慢,有利于长期保存^[72-75];而大粒级团聚体中有机碳以物理保护为主,植物来源的有机碳较多,周转较快,且对管理措施反应敏感^[74-75]。有研究表明,土壤团聚体有机碳矿化引起的 CO₂ 释放更多地来源于大团聚体中有机碳的分解^[76-77],预示着土壤团聚体组成不同土壤呼吸作用产生 CO₂ 的机制也不同,因此研究不同粒级土壤团聚体呼吸特征及其对土壤总呼吸的贡献是定量评价土壤碳平衡及能量平衡的重要基础。王菁等^[14]通过土盆培养试验研究了黄棕壤不同粒级团聚体呼吸特征及其对碳释放的贡献,结果表明:各粒级土壤团聚体及原状土在培养初期土壤呼吸速率较高,之后逐渐降低;在整个培养期间原状土保持了最大的土壤呼吸速

率;土壤团聚体粒级对土壤呼吸速率影响较大,3 种粒级团聚体土壤呼吸速率大小表现为($>5\text{ mm}$) $>$ ($<1\text{ mm}$) \approx ($1\sim5\text{ mm}$),即 $>5\text{ mm}$ 团聚体对土壤碳释放的贡献最大。

不同粒级团聚体有机碳的数量和稳定性存在差异,对微生物所表现出来的活性也有所不同,造成各粒级团聚体土壤呼吸或 CO_2 释放存在差异。Geobel 等^[78]分别以农田和草地土壤为对象研究团聚体对土壤有机质矿化速率的影响,结果显示,两种土地利用方式均表现为原状土 CO_2 释放速率高于 $2\sim4\text{ mm}$ 团聚体。而对于不同粒级团聚体,大团聚体中的粗颗粒有机碳主要是植物来源的、易矿化的新鲜有机碳;微团聚体中有机碳多为微生物来源的腐殖质,如胡敏酸和腐殖酸,难以被微生物分解利用^[79]。Fernández 等^[80]研究不同粒级团聚体土壤呼吸速率时也发现, $<1\text{ mm}$ 团聚体的有机碳及全氮含量高于 $>4\text{ mm}$ 团聚体,而呼吸速率变化趋势相反,即 $>4\text{ mm}$ 团聚体土壤呼吸速率高于 $<1\text{ mm}$ 团聚体,并将这种差异归因于大团聚体中含有更多的易被真菌分解的粗颗粒有机碳。此外,大团聚体较微团聚体存在更大的土壤孔隙,增加了物质和氧气的传输,有利于微生物活动,从而带动有机碳矿化分解,有利于 CO_2 的释放;而 $<1\text{ mm}$ 团聚体孔隙度小,氧气通过扩散进入其内部较少,抑制了该粒级团聚体内部微生物的活性,且较小的孔隙不利于 CO_2 的释放^[81]。也有研究认为,小粒径团聚体中总有机碳含量相对较多,而有机碳能为微生物的生长繁殖提供充足的碳源,释放出更多的 CO_2 ^[82]。

土壤团聚体结合了土壤的结构与性质,也结合了土壤微生物的群落,能很好地反映土壤 CO_2 的产生、释放及其机理。但土壤团聚体的分析方法还有待改进,相关的分析标准还没有建立,这使得不同的方法得出的结果有较大的差异。施肥对土壤团聚体的影响集中表现在其对土壤团聚体的破坏、重组、转化上,土壤团聚体在不停地变化,以致不同团聚体的 CO_2 贡献率还没得到很好的研究。

4 施肥方式对土壤微生物以及土壤 CO_2 释放的影响

4.1 施肥方式对土壤微生物的影响

施肥是土壤养分的调节过程,土壤微生物受施肥的影响十分明显。土壤微生物是土壤有机物质分

解与合成的参与者,并通过其自身新陈代谢控制着土壤中碳素等养分的转化与循环,土壤微生物量碳是土壤微生物躯体中所固定的碳素,是土壤碳素养分的源和库。同时土壤微生物量也是植物营养物质的源和库,并积极参加养分循环^[83]。土壤微生物量碳占土壤有机碳含量的百分比(SMBC/SOC)称为微生物商(qMB)^[84]。 qMB 的变化反映了土壤中输入的有机质向微生物量碳的转化效率、土壤中碳损失难易程度和土壤矿物对有机质的固定系数^[85]。增长的微生物商表明土壤中微生物对施用有机肥产生的环境干扰适应性逐渐增强。以往研究结果表明有机与无机肥料配合施用下潮土^[86]、黑土^[87]、灰漠土^[88]土壤微生物量(SMBC)含量都会显著提升。这与有机无机肥料配合施用土壤中既加入了土壤生物与作物所需的多种有机无机营养源、又改善了土壤本身的物理化学性状有密切的关系。虽然关于 SMBC 对单独施用化学肥料的响应效应的研究结论存在较大差异^[89-91],大多数研究认为长期高强度单施用化肥不利于土壤微生物多样性的保持,易导致土壤质量退化^[92]。土壤呼吸速率和微生物生物量碳的含量不仅受到作物生长和施肥的影响,也同样受土壤质地和类型的影响^[93]。孙瑞等^[94]的研究发现化肥处理的 SMBC/SMBN 值最高,而不施肥和撂荒处理最低,两组间差异显著,而其他处理之间均无显著差异。说明与不施肥和撂荒处理相比,长期农田施肥使土壤微生物种群结构发生了明显变化。

土壤微生物群落结构和数量受多种因素的影响,其中包括土壤理化性质、植被类型、土壤类型、农田管理制度等。袁红朝等^[95]研究了不施肥、施氮磷钾肥和氮磷钾肥+秸秆还田 3 种长期施肥制度对稻田土壤细菌和古菌群落结构及数量的影响,结果表明:长期施肥导致土壤细菌和古菌种群结构产生明显差异,与不施肥相比,施氮磷钾肥和氮磷钾肥+秸秆还田处理稻田土壤的变形菌、酸杆菌和泉古菌相对丰度增加。刘晶鑫等^[96]采用 Biolog-ECO 微平板培养法,对已经连续施肥 35 年的黑土微生物群落功能多样性进行研究,结果表明:在 $0\sim20\text{ cm}$ 土层,有机无机肥配施能够显著提高土壤微生物对碳源的利用能力以及群落代谢功能的丰富度、多样性和优势度,而在 $20\sim40\text{ cm}$ 土层则低于单施化肥处理,两个土层单施化肥均降低土壤微生物群落代谢均匀度。具体讲,施用化肥虽然没有改变土壤中细菌群落结

构,而在有机肥处理土壤中发现特异性微生物,可能是由于有机肥携带进入土壤或者有机肥施用刺激了土著微生物的生长。单施化肥或有机肥均能提高连作小麦土壤细菌多样性,以单施有机肥最明显,化肥配施后细菌多样性有所下降^[97]。施加生物炭的土壤中细菌丰度最高,细菌种群较多,其次为秸秆还田处理土壤,而空白对照处理土壤细菌群落丰富度最低^[98]。可见,不同的施肥方式对土壤微生物群落结构都有不同程度的影响。

4.2 土壤微生物对土壤 CO₂ 释放的影响

土壤呼吸的主要碳源来自土壤有机质,施有机肥增加了土壤中的有机质和养分含量从而刺激了微生物活性,所以通常有机肥的施用会增加土壤呼吸量^[99-101]。平衡的施用化肥和有机肥能够增加土壤的生物活性,有机肥通过增加土壤有机质含量来增加土壤微生物生物量和土壤呼吸强度^[102],施用无机肥与有机肥相比,对土壤微生物生物量和土壤呼吸的影响不是很明显^[103]。

土壤微生物生物量碳是土壤养分很重要的来源,微生物对有机碳的利用率越高,维持相同微生物量所需的能量就越少,说明土壤环境有利于微生物和作物的生长^[104]。通常是真菌首先分解凋落物,随着细菌数量的增加,细菌开始分解某些凋落物成分,也分解真菌死亡的菌丝,而放线菌则对土壤中腐殖酸的形成起着重要作用^[105]。相关性分析结果表明,土壤呼吸速率与土壤细菌、放线菌呈极显著正相关,与真菌极显著负相关,但由于土壤微生物细菌占绝对优势,其次就是放线菌,这表明土壤细菌和放线菌对土壤呼吸的影响较大^[106]。

近年来,磷脂脂肪酸分析法(PLFA)、微生物自动分析法(BIOLOG)、特别是分子生物学分析方法(PCR-TGGE、PCR-DGGE、T-RFLP、RISA)的发展为全面了解各种条件下微生物群落结构的变化提供了技术支撑。微生物群落多样性是间接反映群落结构和功能的重要指标,因而不同生理、生物技术广泛应用于施肥措施对土壤微生物群落结构和功能多样性的影响研究。土壤微生物群落结构和功能多样性也是施肥影响土壤 CO₂ 释放的一个机制参数。新技术的应用有助于揭示施肥影响土壤 CO₂ 释放的机理,然而现在大多研究往往把土壤 CO₂ 释放与土壤微生物群落结构分别看作两个受施肥影响的因素,在不同施肥条件下两者之间的关系还没有得到充分

的研究。

5 研究展望

关于施肥方式对土壤 CO₂ 释放的影响已有大量研究报道,但对其机理的研究还比较少。我们已经看到新技术、新方法的应用给土壤 CO₂ 释放机理研究带来了许多有益的变化,但这一过程还远没有结束。

基于现有研究成果,未来应加强以下几方面工作:

1. 基于土壤-植物-大气连续系统 (SPAC) 研究土壤 CO₂ 释放的机理。目前的研究重点在施肥之后土壤性状的改变对土壤 CO₂ 释放的影响,但作物作为全球碳循环的一个重要环节,不容忽视。从土壤-植物-大气连续系统角度全面地研究农田碳固定,这样才能更好地评价、调控农田土壤 CO₂ 的释放。

2. 对不同肥料性质的研究有待加强。目前的研究在讨论施肥对土壤 CO₂ 释放的影响时,针对不同的肥料只是简单地用“化学肥料”、“有机肥”、“有机无机配施”来表示。特别是有机肥,不同类型的有机肥因其自身性质、组成及稳定性等的不同,施入土壤后对土壤 CO₂ 的释放可产生截然不同甚至相反的影响,其影响机理尚未明晰。

3. 应加强不同碳组分对土壤 CO₂ 释放的贡献率研究。在基于土壤碳性质、团聚体以及新施入有机碳与土壤原有有机碳的分类中,目前的研究集中在分类概念的明晰上,对各组分的贡献率还有待进一步深入研究。

4. 加强土壤 CO₂ 释放的微生物生理学基础研究。土壤 CO₂ 释放是一个物理、化学、生物的综合过程,但其核心是生物学过程。近年来分子生物学的发展,促进了土壤微生物学的较大进步,给土壤 CO₂ 释放提供了深入的解释。由于土壤微生物纯培养只能培养极少一部分微生物,所以目前往往把土壤微生物种群之间的相互作用与土壤微生物的功能联系起来。但由于土壤微生物种类多样、种群间关系复杂,为清楚地解释土壤 CO₂ 释放的生物学机理,应该深入研究土壤微生物生理学过程。

参考文献:

- [1] STOCKER T F, QIN D, PLATTNER G K, et al. Climate change

- 2013; the physical science basis working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Switzerland: IPCC, 2013.
- [2] 谢军飞,李玉娥.农田土壤温室气体排放机理与影响因素研究进展[J]. 中国农业气象, 2002, 23(4): 47-52.
- [3] SCHIMMEL D S. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle[J]. Global Change Biology, 1995, 1(1): 77-91.
- [4] POST W M, EMANUEL W R, STANGENBERGER A G. Soil carbon pools and world life zones [J]. Nature, 1982, 298 (5870): 156-159.
- [5] 张玉铭,胡春胜,张佳宝,等. 农田土壤主要温室气体(CO_2 、 CH_4 、 N_2O)的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(4): 966-975.
- [6] 齐志勇.不同培肥模式对土壤呼吸和土壤养分变化的研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2003.
- [7] 彭少麟,李跃林,任海,等.全球变化条件下的土壤呼吸效应[J]. 地球科学进展, 2002, 17(5): 705-712.
- [8] 朱宏,赵成义,李君,等.柽柳和梭梭林地土壤呼吸研究[J]. 水土保持学报, 2007, 21(1): 148-151.
- [9] 赵吉.土壤健康的生物学监测与评价[J]. 土壤, 2006, 38(2): 136-142.
- [10] 秦耀东.土壤物理学[M]. 北京:高等教育出版社, 2003.
- [11] TANS P, FUNG I P, TAKAHASHI T. Observational constraints on the global atmospheric CO_2 budget[J]. Science, 1990, 247 (49): 1431-1438.
- [12] 高会议,郭胜利,刘文兆,等.黄土旱塬区冬小麦不同施肥处理的土壤呼吸及土壤碳动态[J]. 生态学报, 2009, 29(5): 2551-2559.
- [13] 董玉红,欧阳竹,李运生,等.肥料施用及环境因子对农田土壤 CO_2 和 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(5): 913-918.
- [14] 王菁,陈防,刘毅.不同粒级土壤团聚体呼吸特征及其对碳排放的贡献[J]. 植物科学学报, 2014, 32(6): 586-593.
- [15] 吴会军,蔡典雄,武雪萍,等.不同施肥条件下小麦田土壤呼吸特征研究[J]. 中国土壤与肥料, 2010(6): 70-74.
- [16] 王峰,王义祥,江福英,等.氮肥施用对柑橘果园土壤有机碳矿化的影响[J]. 中国农学通报, 2012, 28(1): 273-278.
- [17] 于维水,李桂花,王碧胜,等.不同施肥制度下我国东部典型土壤易分解与耐分解碳的组分特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(3): 675-683.
- [18] 沈征涛,施斌,王宝军,等.土壤有机质转化及 CO_2 释放的温度效应研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(10): 3011-3019.
- [19] 张蛟蛟,李永夫,姜培坤,等.施肥对板栗林土壤 CO_2 通量的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(9): 2431-2439.
- [20] 刘洪升,刘华杰,王智平,等.土壤呼吸的温度敏感性[J]. 地理科学进展, 2008, 27(4): 51-60.
- [21] 杨毅,黄玫,刘洪升,等.土壤呼吸的温度敏感性和适应性研究进展[J]. 自然资源学报, 2011, 26(10): 1811-1820.
- [22] 杨庆朋,徐明,刘洪升,等.土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性[J]. 生态学报, 2011, 31(8): 2301-2311.
- [23] 张宪洲,刘允芬.青藏高原农田生态系统土壤呼吸的日变化和季节变化特征[J]. 资源科学, 2003, 25(5): 103-107.
- [24] 时秀焕,张晓平,梁爱珍,等.土壤 CO_2 排放主要影响因素的研究进展[J]. 土壤通报, 2010, 41(3): 761-768.
- [25] 赵亚丽,薛志伟,郭海斌,等.耕作方式与秸秆还田对土壤呼吸的影响及机理[J]. 农业工程学报, 2014, 30(19): 155-165.
- [26] LAMBERTY B B, WANG C K, GOWER S T. Spatiotemporal measurement and modeling of stand-level boreal forest soil temperatures[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2005, 131(1): 27-40.
- [27] 程建峰,潘晓云,刘宜柏.土壤条件对陆稻根系生长的影响[J]. 土壤学报, 2002, 39(4): 590-598.
- [28] PENG Q, DONG Y, QI Y, et al. Effects of nitrogen fertilization on soil respiration in temperate grassland in Inner Mongolia, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 62(6): 1163-1171.
- [29] SCHLESINGER W H, ANDREWS J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. Biogeochemistry, 2000, 48(1): 7-20.
- [30] 郎红东,杨剑虹.土壤 CO_2 浓度变化及其影响因素的研究[J]. 西南农业大学学报:自然科学版, 2004, 26(6): 731-734-739.
- [31] 王玉英,胡春胜.施氮水平对太行山前平原冬小麦-夏玉米轮作体系土壤温室气体通量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(5): 1122-1128.
- [32] VICCA S, JANSSENS I A, WONG S C, et al. *Zea mays* rhizosphere respiration, but not soil organic matter decomposition was stable across a temperature gradient[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(11): 2030-2033.
- [33] 张俊丽,廖允成,曾爱,等.不同施氮水平下旱作玉米田土壤呼吸速率与土壤水热关系[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(7): 1382-1388.
- [34] 金皖豫,李铭,何杨辉,等.不同施氮水平对冬小麦生长期土壤呼吸的影响[J]. 植物生态学报, 2015, 39(3): 249-257.
- [35] 禄兴丽,廖允成.不同耕作措施对旱作夏玉米田土壤呼吸及根呼吸的影响[J]. 环境科学, 2015, 36(6): 2266-2273.
- [36] ROCHETTE P, DESJARDINS R L, PATTEY E, et al. Spatial and temporal variability of soil respiration in agricultural fields[J]. Canadian Journal of Soil Science, 1991, 71(2): 189-196.
- [37] VANT HOFF J H. Etudes de dynamique chimique[M]//FREDERIK M C. Studies of chemical dynamics. Netherland: Frederik Muller and Co, 1884.
- [38] O'CONNELL A M. Microbial decomposition(respiration) of litter in eucalypt forests of southwestern Australia: an empirical model based on laboratory incubations[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1990, 22(2): 153-160.
- [39] JENKINSON D S, ANDREW S P S, LYNCH J H, et al. The turnover of organic carbon and nitrogen in soil[J]. Phil Trans R Soc Lond B, 1990, 329(1225): 361-368.
- [40] 佟小刚,黄绍敏,徐明岗,等.长期不同施肥模式对潮土有机碳

- 组分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 16(4): 831-836.
- [41] 李新爱,童成立,蒋平,等.长期不同施肥对稻田土壤有机质和全氮的影响[J]. 土壤, 2006, 38(3): 298-303.
- [42] 龙攀,隋鹏,高旺盛,等.不同有机物料还田对农田土壤有机碳以及微生物量碳的影响[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20(3): 153-160.
- [43] 龚伟,颜晓元,王景燕,等.长期施肥对土壤肥力的影响[J]. 土壤, 2011, 43(3): 342-366.
- [44] 杜章留,张庆忠,任图生.农田土壤碳饱和和机制研究进展[J]. 土壤与作物, 2015, 4(2): 49-56.
- [45] DRINKWATER L E, WAGONER P, SARRANTONIO M. Legume-based cropping systems have reduced carbon and nitrogen losses[J]. *Nature*, 1998, 396(6708): 262-265.
- [46] 井大炜,邢上军.鸡粪与化肥不同配比对杨树苗木根际土微生物碳、氮变化的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 455-461.
- [47] LIANG B C, MACKENZIE A F, SCHNITZER M, et al. Management induced change in labile soil organic matter under continuous corn in eastern Canadian soils[J]. *Biology and Fertilizer Soils*, 1998, 26(2): 88-94.
- [48] 徐明岗,于荣,孙小凤,等.长期施肥对我国典型土壤活性有机质及碳库管理指数的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(4): 459-465.
- [49] 张付申.不同施肥处理对壤土和黄绵土有机质氧化稳定性的影响[J]. 河南农业大学学报, 1996, 30(1): 80-84.
- [50] 汪吉东,张永春,俞美香,等.不同有机无机肥配合施用对土壤活性有机质含量及 pH 值的影响[J]. 江苏农业学报, 2007, 23(6): 573-578.
- [51] 史吉平,张夫道.长期施肥对土壤有机质及生物学特性的影响[J]. 中国土壤与肥料, 1998(3): 7-11.
- [52] 王薇,李絮花.长期定位施肥对盐化潮土土壤腐殖质组分的影响[J]. 山东农业科学, 2008 40(3): 65-67.
- [53] 张春霞,郝明德.不同化肥用量对土壤碳库的影响[J]. 土壤通报, 2006, 37(5): 861-864.
- [54] 张夫道.长期施肥条件下土壤养分的动态和平衡对土壤腐殖质积累及其品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 1995, (Z1): 10-21.
- [55] LUNDEGARDH H. Carbon dioxide evolution of soil crop growth[J]. *Soil Science*, 1927, 23(6): 417-453.
- [56] 范如芹,罗佳,严少华,等.长期免耕及常规耕作对土壤胡敏酸含量及其结构的影响[J]. 江苏农业学报, 2015, 31(1): 80-86.
- [57] 杨旭,兰宇.秸秆不同还田方式对旱地棕壤 CO₂ 排放和土壤碳库管理指数的影响[J]. 生态学杂志, 2015, 34(3): 805-809.
- [58] 李玲,仇少君,刘京涛,等.土壤溶解性有机碳在陆地生态系统碳循环中的作用[J]. 应用生态学报, 2012, 23(5): 1407-1414.
- [59] 李焕春,严昌荣,赵沛义,等.不同施肥对阴山北麓旱作农田土壤呼吸的影响[J]. 华北农学报, 2012, 27(5): 224-229.
- [60] 许咏梅,刘骅,王西和.长期不同施肥下新疆灰漠土土壤呼吸特征研究[J]. 新疆农业科学, 2012, 49(7): 1294-1300.
- [61] 郑子成,刘敏英,李廷轩.不同植茶年限土壤团聚体有机碳的分布特征[J]. 中国农业科学, 2013, 46(9): 1827-1836.
- [62] 文倩,关欣.土壤团聚体形成的研究进展[J]. 干旱区研究, 2004, 21(4): 434-438.
- [63] SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture[J]. *Soil Biol Biochem*, 2000, 32(14): 2099-2103.
- [64] 陈晓芬,李忠佩,刘明,等.不同施肥处理对红壤水稻土团聚体有机碳、氮分布和微生物生物量的影响[J]. 中国农业科学, 2013, 46(5): 950-960.
- [65] 徐尚起,崔思远,陈阜,等.耕作方式对稻田土壤有机碳组分含量及其分布的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 31(1): 127-132.
- [66] 王清奎,汪思龙.土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J]. 土壤通报, 2005, 36(3): 415-421.
- [67] 侯晓静,杨劲松,王相平,等.不同施肥方式下滩涂围垦农田土壤有机碳及团聚体有机碳的分布[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 818-827.
- [68] 耿瑞林,郁红艳,丁维新,等.有机肥无机肥长期使用对潮土团聚体及其有机碳含量的影响[J]. 土壤, 2010, 42(6): 908-914.
- [69] 周萍,潘根兴.长期不同施肥对黄泥土水稳性团聚体颗粒态有机碳的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(2): 256-261.
- [70] 顾鑫,安婷婷,李双异,等. $\delta^{13}\text{C}$ 法研究秸秆添加对棕壤团聚体有机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 243-247, 312.
- [71] SIX J, PAUSTIAN K, ELLIOTT E T, et al. Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate associated carbon[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2000, 64(2): 681-698.
- [72] TISDALL J M, OADES J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. *Journal of Soil Science*, 1982, 33(2): 141-163.
- [73] MONREAL C M, SCHULTEN H R, KODAMA H. Age, turnover and molecular diversity of soil organic matter in aggregates of a Gley soil[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1997, 77: 379-388.
- [74] BESNARD E, CHENU C, BALESSENT J. Fate of particulate organic matter in soil aggregates during cultivation[J]. *European Journal of Soil Science*, 1996, 47(4): 495-503.
- [75] PUGET P, CHENU C, BALESSENT J. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates[J]. *European Journal of Soil Science*, 2000, 51(5): 595-605.
- [76] GRANDY A S, ROBERTSON G P. Aggregation and organic matter protection following tillage of a previously uncultivated soil

- [J]. *Soil Sci Soc Am J*, 2006, 70(4): 1398-1406.
- [77] WU H H, WIESMEIER M, YU Q, et al. Labile organic C and N mineralization of soil aggregate size classes in semiarid grasslands as affected by grazing management[J]. *Biol Fert Soils*, 2012, 48(3): 305-313.
- [78] GEOBEL M O, BACHMANN J, WOCHE S K, et al. Soil wettability, aggregate stability, and the decomposition of soil organic matter[J]. *Geoderma*, 2005, 128(1): 80-93.
- [79] SIX J, ELLIOTT E T, PAUSTIAN K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems[J]. *Soil Sci Soc Am J*, 1999, 63(5): 1350-1358.
- [80] FERNÁNDEZ R, QUIROGA A, ZORATI C, et al. Carbon contents and respiration rates of aggregate size fractions under no-till and conventional tillage[J]. *Soil Till Res*, 2010, 109(2): 103-109.
- [81] 王 君, 宋新山, 严登华, 等. 多重干湿交替格局下土壤 Birch 效应的响应机制[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(27): 120-125.
- [82] 李辉信, 袁颖红, 黄欠如, 等. 长期施肥对红壤性水稻土团聚体活性有机碳的影响[J]. *土壤学报*, 2008, 45(2): 259-266.
- [83] 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): 89-96.
- [84] 刘满强, 胡 锋, 何圆球, 等. 退化红壤不同植被恢复下土壤微生物量季节动态及其指示意义[J]. *土壤学报*, 2003, 40(6): 937-944.
- [85] 刘恩科, 赵秉强, 李秀英, 等. 不同施肥制度土壤微生物量碳氮变化及细菌群落 16S rDNA V3 片段 PCR 产物的 DGGE 分析[J]. *生态学报*, 2007, 27(3): 1079-1085.
- [86] 许月蓉. 不同施肥条件下潮土中微生物量及其活性[J]. *土壤学报*, 1995, 32(3): 349-352.
- [87] 王 晶, 解宏图, 张旭东, 等. 施肥对黑土土壤微生物生物量碳的作用研究[J]. *中国生态农业学报*, 2004, 12(2): 118-120.
- [88] 许咏梅, 杨金钰, 朱光辉, 等. 灰漠土农田长期碳投入与微生物商的关系[J]. *新疆农业科学*, 2014, 51(12): 2338-2346.
- [89] 张 明, 白 震, 张 威, 等. 长期施肥农田黑土微生物量碳、氮季节性变化[J]. *生态环境*, 2007, 16(5): 1498-1503.
- [90] 曹志平, 胡 诚, 叶钟年, 等. 不同土壤培肥措施对华北高产农田土壤微生物生物量碳的影响[J]. *生态学报*, 2006, 26(5): 1486-1493.
- [91] 蔡晓布. 不同培肥方式对西藏中部退化土壤的影响[J]. *水土保持学报*, 2002, 16(2): 12-15, 76.
- [92] 刘 骅, 林英华, 张云舒. 长期施肥对灰漠土生物群落和酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(8): 3898-3904.
- [93] 葛高飞, 梁永超. 玉米生长过程中施肥对土壤呼吸和微生物量碳的影响[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(18): 73-78.
- [94] 孙 瑞, 孙本华, 高明霞, 等. 长期不同土地利用方式下壤土壤微生物特性的变化[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(3): 655-663.
- [95] 袁红朝, 吴 昊, 葛体达, 等. 长期施肥对稻田土壤细菌、古菌多样性和群落结构的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(6): 1807-1813.
- [96] 刘晶鑫, 迟凤琴, 许修宏, 等. 长期施肥对农田黑土微生物群落功能多样性的影响[J]. *应用生态学报*, 2015, 26(10): 1-9.
- [97] 蔡 艳, 郝明德, 臧逸飞, 等. 不同轮作制下长期施肥旱地土壤微生物多样性特征[J]. *核农学报*, 2015, 29(2): 344-350.
- [98] 何莉莉, 杨慧敏, 钟哲科, 等. 生物炭对农田土壤细菌群落多样性影响的 PCR-DGGE 分析[J]. *生态学报*, 2014, 34(15): 4288-4294.
- [99] KAUR K, KAPOOR K K, GUPTA A P. Impact of organic manures with and without mineral fertilizers on soil chemical and biological properties under tropical condition[J]. *Journal of Plant Nutrition & Soil Science*, 2005, 168(1): 117-122.
- [100] SINGH J S, GUPTA S R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems[J]. *Botanical Review*, 1997, 43(4): 449-528.
- [101] EMMERLING C, LIEBNER C, HAUBOLD-ROSAR M, et al. Impact of application of organic waste materials on microbial and enzyme activities of mine soils in the Lusatian coal mining region[J]. *Plant & Soil*, 2000, 220(1): 129-138.
- [102] CRECCHIO C, CURCI M, MININNI R, et al. Short term effects of municipal solid waste compost, amendments on soil carbon and nitrogen content, some enzyme activities and genetic diversity[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, 34(5): 311-318.
- [103] PLAZA C, HERNANDEZ D, GARCIA-GIL J C, et al. Microbial activity in pig slurry-amended soils under semiarid conditions[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36(10): 1577-1585.
- [104] 赵庆龙, 宋宪亮, 孙学振, 等. 蒜棉麦棉套作对棉田土壤微生物生物量碳及活性的影响[J]. *山东农业科学*, 2011(10): 51-53, 69.
- [105] JIA B R, ZHOU G S, WANG F Y, et al. Partitioning root and microbial contributions to soil respiration in *Leymus chinensis* populations[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38(4): 653-660.
- [106] 屈 冉, 李俊生, 罗遵兰, 等. 土壤微生物和有机酸对土壤呼吸速率的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(4): 242-245.

(责任编辑:陈海霞)