

DOI: 10.5846/stxb201211141599

花可可, 王小国, 朱波. 施肥方式对紫色土土壤异养呼吸的影响. 生态学报, 2014, 34(13): 3602-3611.

Hua K K, Wang X G, Zhu B. Impacts of fertilization regimes on soil heterotrophic respiration of purple soil. Acta Ecologica Sinica, 2014, 34(13): 3602-3611.

施肥方式对紫色土土壤异养呼吸的影响

花可可^{1,2,3}, 王小国^{1,2}, 朱 波^{1,2,*}

(1. 中国科学院成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041; 2. 中国科学院山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610041;

3. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100039)

摘要: 采用静态暗箱-气相色谱法于 2010 年 12 月至 2011 年 10 月对不同施肥方式下的紫色土土壤呼吸进行了研究, 以揭示施肥方式对紫色土异养呼吸的影响。结果表明: 施肥可对土壤异养呼吸产生激发效应。施肥后第 5 天出现峰值, 猪厩肥处理的异养呼吸峰值为 $2356.8 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, 显著高于秸秆配施氮磷钾 ($970.1 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) 和常规氮磷钾处理 ($406.8 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) ($P < 0.01$); 小麦季常规氮磷钾、猪厩肥和秸秆配施氮磷钾处理的平均土壤异养呼吸速率为 212.9 、 285.8 和 $305.8 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, CO_2 排放量为 255.1 、 342.3 和 369.5 gC/m^2 , 玉米季为 408.2 、 642.8 和 $446.4 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, CO_2 排放量为 344.7 、 542.8 和 376.9 gC/m^2 , 玉米季土壤异养呼吸平均速率及 CO_2 排放量均高于小麦季。全年平均土壤异养呼吸速率分别为 310.6 、 446.3 和 $377.4 \text{ mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, CO_2 排放总量分别为 599.8 、 885.1 和 746.4 gC/m^2 。猪厩肥对土壤异养呼吸速率和 CO_2 排放量的影响最大, 秸秆配施氮磷钾肥次之, 氮磷钾肥最小, 说明有机物料的投入是紫色土土壤异养呼吸速率的主要调控措施, 低碳氮比的有机物料能促进土壤异养呼吸和 CO_2 的排放。猪厩肥和秸秆配施氮磷钾肥处理相应地表和地下 5 cm 温度的 Q_{10} 值分别为 2.64 、 1.88 和 2.77 、 1.99 , 表明低碳氮比的有机物料还能增加土壤异养呼吸 Q_{10} 值, 使土壤异养呼吸速率对温度的敏感性加强。

关键词: 土壤异养呼吸; 土壤温度; 碳氮比; 施肥方式; 紫色土

Impacts of fertilization regimes on soil heterotrophic respiration of purple soil

HUA Keke^{1,2,3}, WANG Xiaoguo^{1,2}, ZHU Bo^{1,2,*}

1 Institute of Maintain Hazards and Environment, Chinese Academy of Science, Chengdu 610041, China

2 Key Laboratory of Mountain Surface Process and Ecological Regulation, Chinese Academy of Science, Chengdu 610041, China

3 College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China

Abstract: Recent studies have shown that soil respiration is the critical importance in determining the carbon balance of terrestrial ecosystems. Respiration from soils is comprised of both the heterotrophic respiration of microorganisms (soil bacteria, fungi, and fauna) and autotrophic respiration from roots and mycorrhizae. Precise assessment of these components is important for calculating the carbon budgets of vegetation and the turnover rate of soil organic matter, as well as for understanding sources and sinks of carbon in terrestrial ecosystems in the face of global climate change. Although soil heterotrophic respirations have received considerable attention in recent decades, much less is known about the effects of various natural or artificial factors such as temperature, precipitation or fertilization etc. on it. The field study was conducted at a sloping cropland in Yanting Agro-ecological Station of Purple Soil, Chinese Academy of Science under Chinese Ecosystem Research Network (CERN), situated at $\text{N}31^\circ 16'$, $\text{E}105^\circ 28'$, with the altitude of 400 to 600 meters in the middle of Sichuan Basin, where a set of long-term research plots is located. Three plots were randomly assigned to one of the following treatments: conventional chemical fertilizer (NPK), organic manure (pig slurry, OM) and crop residue with

基金项目: 中国科学院战略先导专项子课题 (XDA05050506); 国家重点基础发展研究计划资助 (2012CB417101); 国家自然科学基金项目 (40901134)

收稿日期: 2012-11-14; 网络出版日期: 2014-02-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: bzhu@imde.ac.cn

chemical fertilizer (RSDNPK). Total nitrogen for each fertilization treatment was applied at the same rate with 130 and 150 kgN/hm² for wheat and maize seasons, respectively. The results showed that soil heterotrophic respiration exhibited pronounced seasonal variations that clearly reflected those of soil temperature, with minimum values in winter and maximum values in summer. There was a pulse of soil heterotrophic respiration induced by fertilization at the 5th day after fertilization. The peak rate for OM treatment was 2356.8 mgCO₂m⁻²h⁻¹ and it was significantly higher than that for both RSDNPK and NPK treatments ($P<0.01$). Meanwhile, the respiration rate and the annual cumulative CO₂ emission in OM and RSDNPK treatments were higher than those in NPK treatment. During wheat growing season, average respiration rate for NPK, OM and RSDNPK treatments were 212.9, 285.8 and 305.8 mgCO₂m⁻²h⁻¹, respectively, which were all lower than that in maize growing season. The cumulative soil CO₂ emissions from NPK, OM and RSDNPK were 255.1, 342.3 and 369.5 gC/m² for wheat season, and 344.7, 542.8 and 376.9 gC/m² for maize season, while 599.8, 885.1 and 746.4 gCm⁻² for the whole year, respectively. The results implied that lower C/N ratio organic material was the primary driving force for increasing soil heterotrophic rate and cumulative soil CO₂ emissions. The values of temperature sensitivity (Q_{10}) for soil heterotrophic respiration in wheat season and maize season were also measured. The results showed that Q_{10} values in wheat season always higher than that in maize season at all plots. During the whole experiment time, the magnitudes of Q_{10} both followed the order of OM > NPK > RSDNPK, which was clearly reflected that Q_{10} was sensitive to lower C/N organic materials. Q_{10} values obtained from soil temperature at soil surface (0 cm) and soil 5 cm depth in OM and RSDNPK were 2.64, 2.77 and 1.88, 1.99, respectively. It indicated that the Q_{10} values for soil heterotrophic respiration rates were higher at lower temperatures and lower at higher temperature.

Key Words: soil heterotrophic respiration; soil temperature; C/N ratio; fertilizer; purple soil

土壤呼吸是土壤碳库向大气输入碳的主要途径,其变化将显著改变大气二氧化碳浓度和土壤有机碳的累积速率^[1-2],土壤呼吸排放速率的高低及动态过程是反映土壤有机碳分解快慢的重要指标^[3]。农田土壤碳库不仅是全球碳库的一个重要组成部分,而且是其中最活跃的部分,特别是在人类耕种、施肥、灌溉等管理活动影响下,农田生态系统土壤碳库在较短的时间尺度上受到强烈的人为干扰^[4]。因此,阐明农田土壤呼吸特征及影响因素对于评价土壤碳收支及缓解全球气候变化均具有重要的现实意义。

土壤呼吸主要包括根系呼吸和微生物呼吸^[5],从土壤呼吸的生理机制来说,前者主要是自养呼吸,后者为异养呼吸。相关研究表明,根系呼吸不是土壤本身有机碳的损失,在研究土壤有机碳的碳收支平衡时必须将其从土壤总呼吸中扣除^[6],而土壤异养呼吸排放的二氧化碳是土壤有机碳的气态损失的直接途径,其是评价土壤碳收支的关键环节。目前,国内外对土壤呼吸的研究较为活跃,研究范围涉及林地、草地、湿地及农田^[7-9],且多是以土壤-植物系统为研究对象,而对土壤异养呼吸研究相对缺乏。

较多研究表明土壤温度、水分状况、土地利用变化及施肥方式等均会对土壤呼吸造成重要影响^[10-12]。Ding 等^[12]通过河南封丘长期定位试验,研究了不同施肥方式下土壤-植物系统的土壤呼吸过程,认为施肥方式的改变对土壤呼吸的季节及年际变化均有显著影响,施用有机肥可显著增加土壤呼吸年二氧化碳释放总量,与常规施肥相比,增幅可达 16%,然而,这些研究结论多是以土壤-植物为系统为研究对象,未能对土壤异养呼吸变化规律及影响因素进行阐述。土壤温度、水分状况及施肥方式的改变除对根系呼吸产生影响外,还会对土壤微生物活性造成一定的影响,进而影响土壤异养呼吸^[13-14]。土壤温度、水分状况等环境因子与土壤异养呼吸速率之间的相互关系及施肥方式对土壤异养呼吸的影响仍需进一步阐明。

紫色土作为长江中上游主要的耕作性土壤类型之一,有机质含量低^[15-16]。土壤异养呼吸过程排放的二氧化碳可能是土壤有机碳含量较低的一个重要因素。本文通过一年的定位试验,研究紫色土不同施肥方式下土壤异养呼吸速率日、季节动态变化,并探讨温度、湿度与土壤异养呼吸速率的相互作用关

系,旨在全面了解紫色土土壤异养呼吸的特征及影响因素,以期为调控紫色土土壤有机碳气态支出过程,增强土壤固碳能力提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验点位于中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站内(105° 27'E,31°16'N)。该站位于四川盆地中北部的盐亭县林山乡,地处涪江支流弥江、湍江的分水岭上。属中亚热带湿润季风气候,年均气温 17.3℃,极端最高气温 42℃,极端最低气温-5.1℃,多年平均降雨量 826 mm。土壤为蓬莱镇组石灰性紫色土,质地为中壤,田间持水量为 28.1%—37.8%,凋萎系数为 5.4%—7.7%,土层厚度为 20—60 cm,土壤剖面下层泥页岩透水较弱。

1.2 试验设计

试验小区海拔 420 m,坡向西北-东南,坡度 6.5°,坡长 8 m,宽度为 4 m,面积为 32 m²,整个土层厚度约为 60 cm,种植制度为冬小麦-夏玉米。试验

共设置 3 种施肥处理:常规氮磷钾肥(简称 NPK)、单施猪厩肥(简称 OM)、秸秆配施氮磷钾肥(简称 RSDNPK),每种施肥处理分别设置 3 个重复。小麦季施氮肥总量 130 kg/hm²(以纯 N 计)、磷肥 90 kg P₂O₅/hm²、钾肥 36 kg K₂O/hm²;玉米季施氮肥 150 kg/hm²(以纯 N 计)、磷肥和钾肥同小麦季。各施肥处理的施氮量(总氮)维持在同一水平,即小麦季 130 kg N/hm²,玉米季 150 kg N/hm²,全年共 280 kg N/hm²。施肥前,提前测定猪厩肥(新鲜猪粪)和当季秸秆中全氮含量,并按纯氮总量进行换算。其中猪厩肥处理(OM)所需氮肥量全部来自于新鲜猪粪,秸秆配施氮磷钾肥(RSDNPK)氮磷钾肥氮肥占 60%,秸秆占 40%。施肥的方式采用基肥一次性于播种前人工施入,耕作和施肥同步,耕作方式为人工锄耕,深度为 20 cm。冬小麦采取撒施的方式,夏玉米为穴施,冬小麦施肥时间为 2010 年 11 月 30 日,夏玉米为 2011 年 6 月 9 日。氮磷钾肥氮肥为碳酸氢铵,磷肥为过磷酸钙,钾肥为氯化钾。小麦和玉米季各处理施肥设计方案见表 1。

表 1 施肥处理的肥料类型与用肥量

Table 1 Fertilization types and application rates of pig slurry, crop residue and mineral fertilizers						
生长季 Growing season	处理 Regime	猪厩肥/(T/hm ²) Pig slurry	秸秆/(T/hm ²) Crop residue	化肥 Mineral fertilizer/(kg/hm ²)		
				N	P ₂ O ₅	K ₂ O
小麦 Wheat	NPK	—	—	130	90	36
	OM	81	—	—	—	—
	RSDNPK	—	7	78	90	36
玉米 Maize	NPK	—	—	150	90	36
	OM	83	—	—	—	—
	RSDNPK	—	10	90	90	36

NPK:氮磷钾肥;OM:猪厩肥(新鲜猪粪,碳氮比 C/N 值为 15);RSDNPK:秸秆配施氮磷钾肥;小麦季和玉米季新鲜猪粪全氮含量分别为 0.16%和 0.18%;小麦和玉米秸秆 C/N 值分别为 32:1 和 45:1

于 2010 年 9 月 17 日玉米收获后采集各处理 0—20 cm 表层土壤样品用于测试基本理化性质(表 2),测定参考土壤农业化学分析方法^[17]。土壤有机碳重铬酸钾容量法;土壤全氮采用凯氏定氮法;土壤

全磷采用酸溶-钼锑抗比色法;土壤硝态氮紫外可见分光光度双波长法;pH 电位法、容重环刀法、土壤机械组成采用吸管法。

表 2 各施肥处理试验小区 0—20 cm 土壤基本理化性质

Table 2 Physicochemical properties of the experimental soil under different fertilizer regimes at 0—20cm soil depth									
处理 Regime	有机碳 Soil organic C /(g/kg)	全氮 Total N /(g/kg)	全磷 Total P /(g/kg)	硝态氮 NO ₃ -N /(mg/kg)	pH(水土比 Water soil ratio 2.5:1)	容重 Soil bulk /(g/cm ³)	砂粒 Sand/%	粉粒 Slit/%	粘粒 Clay/%
NPK	7.54	0.56	1.05	3.5	8.2	1.30	31.6	29.6	38.8
OM	10.21	0.86	0.69	6.5	8.1	1.31	26.1	42.7	31.2
RSDNPK	10.89	0.79	0.98	4.8	8.1	1.26	36.2	38.4	25.4

1.3 土壤异养呼吸速率测定

土壤异养呼吸速率测定采用根去除法^[18-19],其排放速率测定采用静态暗箱-气相色谱法^[12,20]。用于静态箱采样底座布置于试验小区中植株之间的空地上,布置采样底座以前,手工剔除杂草和植物地上部分和根系,同时为避免采样时对样地的踩踏,搭载木制栈桥。底座夯入土壤深度为 20 cm,并用附近土壤将底座四周小心围起,使其与整个田面相平。为消除底座周围植物的根系干扰,底座无孔,确保无植物根系进入采样区,此外底座四周各留 50 cm 的保护行,并定期去除保护行及底座内杂草。底座大小为 50 cm × 50 cm × 20 cm (长×宽×高),材料为不锈钢。种植时各底座内单独施肥,不播撒种子,施肥比例与试验小区相同;气体采样顶箱的大小为 50 cm × 50 cm × 50 cm (长×宽×高),采样箱内装 2 个轴流混气扇、1 个采样管和 1 个温度探头,实验设置 3 个重复。观测时间为 2010 年 12 月至 2011 年 10 月,观测频率为每周 1—2 次,为减少土壤异养呼吸日变化差异的影响,观测时间固定在每天 9:00—11:00 进行,气体采集时间间隔为 7 min,共采集 4 个样品^[12,21]。采集的气样保存在 50 mL 医用注射器内,并放入整理箱,避光保存,24h 内分析完成。气体 CO₂ 浓度分析用安捷伦 7890 气相色谱仪(GC)FID 检测器进行,高纯氮(99.9999%)做载气,通过标准气体和待测气体的峰面积来计算待测气体中 CO₂ 的浓度,土壤异养呼吸 CO₂ 排放速率用单位时间单位面积观测箱内该气体质量的变化,计算公式如下:

$$F = \frac{1.2 \times 10^{-4} \times P \times H}{273.15 + t} \times \frac{dc}{dt}$$

式中, F 为土壤异养呼吸速率($\text{mgCO}_2\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}$); P 为采样点气压(bar); H 为采样箱的高度(cm),本文为 50 cm; t 为每次采样 21 min 内箱内温度的平均值; $\frac{dc}{dt}$ 为箱内 CO₂ 气体浓度的变化速率。

1.4 环境因子测定

在采集气体的同时,同步测定地表(0—10 cm)体积含水量、地表及地下 5 cm 处土壤温度。土壤体积含水量用便携式测墒计(MPKit-B, 杭州托普仪器有限公司)测定,土壤温度使用便携式温度计(JM624 Digital Thermometer 公司)测定,并用盒式气压计读取当日气压并记录天气状况,采样日降雨量

数据从中科院盐亭紫色土农业生态试验站人工气象站降雨观测平台获取,观测仪器为虹吸式雨量计。

1.5 数据处理与计算

土壤中水分含量用总孔隙含水率(water-filled pore space, WFPS)表示:

$$\text{WFPS} = \frac{\text{SWM}}{1 - (\text{BD}/\text{PD})}$$

式中, SWM 为土壤体积含水率(%); BD 为土壤容重(g/cm^3); PD 为土壤密度,取 $2.65 \text{ g}/\text{cm}^3$; 采用 $R_s = ae^{bt}$ (a, b 为常数, T 为土壤温度)拟合土壤温度和土壤异养呼吸速率的关系,土壤呼吸温度敏感性参数用 Q_{10} 表示($Q_{10} = e^{10b}$)。采用一元线性回归方程拟合土壤湿度和土壤异养呼吸速率的相关关系。土壤温度、土壤湿度、土壤异养呼吸速率日变化、季节性变化以及平均呼吸速率均在 Sigmaplot10.0 下绘制,单因素方差分析及相关性分析均在 SPSS17.0 下进行,多重比较采用 LSD 法。

2 结果与分析

2.1 试验土壤环境因子的季节变化

土壤湿度和温度季节变化如图 1 所示。图 1 中各处理土壤湿度(WFPS)变化趋势基本相似,其中从 2011 年 8 月 5 日至 2011 年 9 月 3 日土壤湿度有大幅度下降,主要是由于该时段内无降雨造成的长期干旱,而后随着降雨的补给土壤湿度逐渐上升。NPK、OM、RSDNPK 处理土壤湿度平均值分别为 52.2%、50.6% 和 53.7%,三者之间无显著性差异($P > 0.05$)。地表和地下 5 cm 土壤温度变化趋势基本相同,总体为冬季温度低,春季温度缓慢回升至夏季达到最大(图 1)。地表及地下 5 cm 土壤温度 11 月份最低,7 月份达到最高。NPK、OM、RSDNPK 处理地表及地下 5 cm 平均温度分别为 20.3、19.2、19.9 和 19.5、19.1、19.9 °C,地表温度稍高于地下 5 cm 温度。方差分析表明,3 种处理地表和地下 5 cm 温度平均值均无显著性差异($P > 0.05$)。

2.2 土壤异养呼吸日变化

图 2 列举了 2011 年 7 月 23—24 日和 9 月 11—12 日土壤异养呼吸的两次日变化过程特征(24 h)。各处理呼吸速率日变化过程基本相似。最大值出现在 13:00,最低值为 05:00。7 月 23—24 日 NPK、OM 和 RSDNPK 处理土壤异养呼吸速率平均值分别为

520.1、736.6 和 689.0 mgCO_2/m^2 , 09:00—11:00 呼吸速率平均值为 528.6、792.9 和 678.6 mgCO_2/m^2 (图

2a、b)。9 月 11—12 日 NPK、OM 和 RSDNPK 处理土壤异养呼吸速率平均值达 345.5、461.8 和 420.4

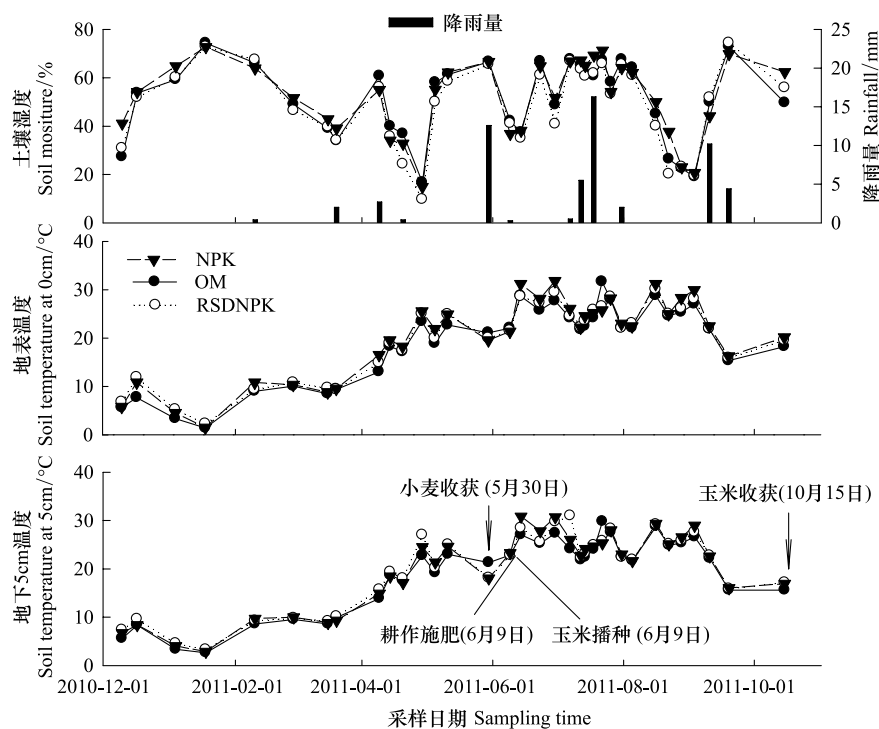


图 1 土壤湿度、降雨量和土壤温度季节变化

Fig.1 Seasonal patterns of soil moisture, rainfall and soil temperature during the whole experiment period

NPK、OM、RSDNPK 分别表示常规氮磷钾肥、单施猪廐肥和秸秆配施氮磷钾肥

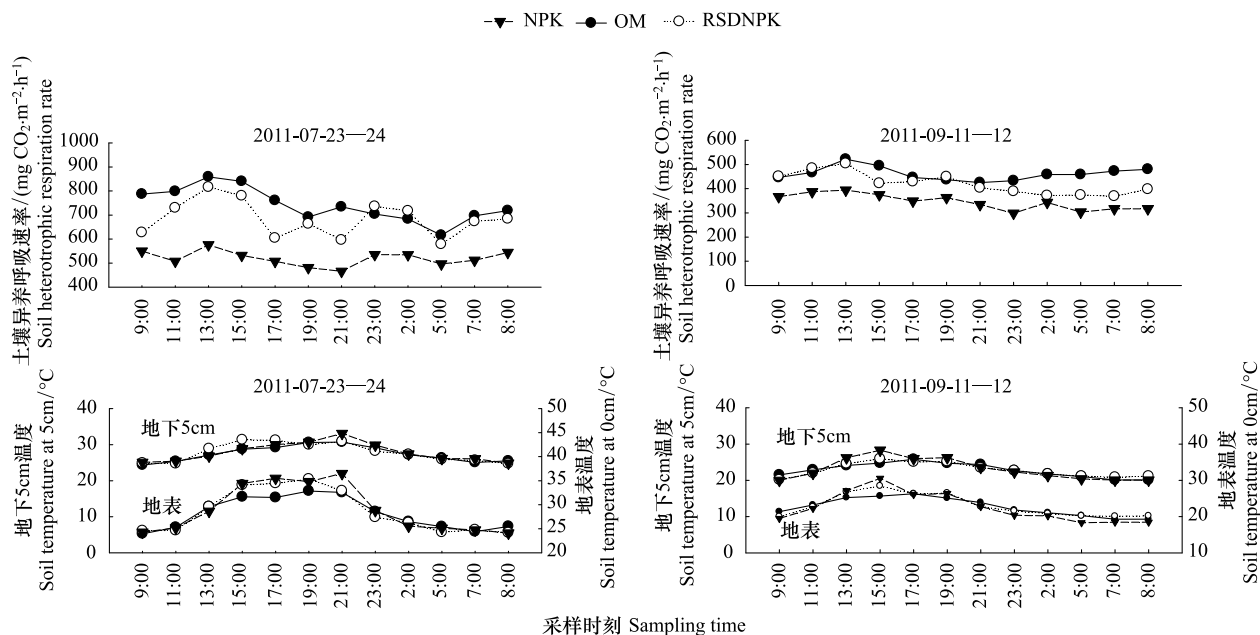


图 2 土壤温度和土壤异养呼吸日变化

Fig.2 Diurnal variations of soil temperature and soil heterotrophic respiration rate under different fertilization regimes

NPK、OM、RSDNPK 分别表示常规氮磷钾肥、单施猪廐肥和秸秆配施氮磷钾肥

mgCO_2/m^2 , 相应 09:00—11:00 呼吸速率平均值分别为 456.9、467.8 和 376.9 mgCO_2/m^2 (图 2)。可见用 09:00—11:00 时段内土壤异养呼吸速率的测定值来代表全天的土壤异养呼吸速率的平均值是可行的, 这与韩广轩等^[22]对该地区的日变化研究结果相似。

2.3 土壤异养呼吸季节变化

土壤异养呼吸速率的季节性变化趋势基本与土壤温度同步, 冬季呼吸速率低, 春季缓慢抬升至夏季达到最大 (图 3)。施肥后第 5 天 (2011 年 6 月 14 日) 土壤异养呼吸速率达到峰值, 其中 OM 处理在施肥后第 5 天土壤异养呼吸速率峰值为 2356.8 $\text{mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, 其呼吸速率峰值显著高于 RSDNPK 和 NPK ($P < 0.01$); 小麦季, NPK、OM 和 RSDNPK 处理土壤异养呼吸速率平均值分别为 212.9、285.8 和 305.8 $\text{mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$, OM 和 RSDNPK 处理均显著高于 NPK 处理 ($P < 0.05$), OM 和 RSDNPK 处理之间无显著差异。玉米季 NPK、OM 和 RSDNPK 处理呼吸速率平均值分别为 408.2、642.8 和 446.4 $\text{mgCO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ 。全年, 3 种施肥处理呼吸速率平均值以 OM 最大, RSDNPK 次之, NPK 最小, 呈现突出的 $\text{OM} > \text{RSDNPK} > \text{NPK}$ 特征 ($P < 0.01$)。

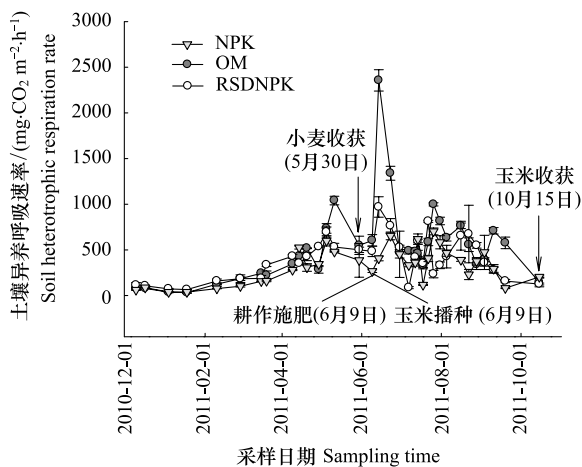


图 3 土壤异养呼吸速率季节变化

Fig. 3 Seasonal variation of soil heterotrophic respiration during the whole experiment period

NPK、OM、RSDNPK 分别表示常规氮磷钾肥、单施猪厩肥和秸秆配施氮磷钾肥

通过对小麦季 (2010 年 11 月 30 日至 2011 年 5 月 31, 共计 18d) 和玉米季 (2011 年 6 月 9 日至 2011 年 10 月 15 日, 共计 129d) 内各处理土壤异养呼吸

CO_2 排放量计算可知 (图 4), NPK、OM 和 RSDNPK 3 种施肥处理小麦季土壤异养呼吸 CO_2 排放量为 255.1、342.3 和 369.5 gC/m^2 , 玉米季为 344.7、542.8、376.9 gC/m^2 , 玉米季高于小麦季。全年 CO_2 排放总量分别为 599.8、885.1 和 746.4 gC/m^2 , 与 NPK 处理相比, 全年 OM 和 RSDNPK 处理 CO_2 排放总量分别增加了 47.6% 和 24.4%。由以上分析可归纳出, 施用猪厩肥和秸秆配施氮磷钾肥均可增加土壤异养呼吸速率和 CO_2 排放量, 其中以猪厩肥这种施肥管理模式最为突出。

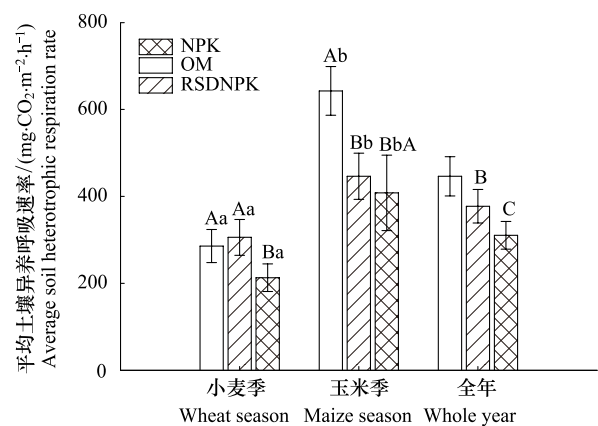


图 4 平均土壤异养呼吸速率

Fig. 4 Average soil heterotrophic respiration rate under different fertilization regimes during the whole growing seasons

NPK、OM、RSDNPK 分别表示常规氮磷钾肥、单施猪厩肥和秸秆配施氮磷钾肥; 不同大写字母不同施肥处理差异性显著; 不同小写字母表示不同生长期差异性显著; 检验水平为 $P < 0.05$; 误差线为 3 个重复的标准偏差

2.4 土壤温度和湿度对土壤异养呼吸的影响

目前研究者多使用 Q_{10} 来描述土壤呼吸与温度之间的关系, Q_{10} 指温度每升高 10 $^{\circ}\text{C}$ 土壤呼吸速率增加的倍数, 表示一个生态系统类型土壤呼吸作用对温度的敏感性。本文土壤温度与土壤异养呼吸速率的相关性及 Q_{10} 统计结果如表 3 所示。3 种施肥处理小麦季 Q_{10} 值均大于玉米季, 全年地表和地下 5 cm 温度 OM 处理土壤异养呼吸 Q_{10} 值最高, 分别为 2.64 和 2.77, RSDNPK 处理最低, Q_{10} 值为 1.88 和 1.99, 可见施用猪厩肥有使土壤异养呼吸敏感性增加的趋势。采用一元线性回归方程拟合土壤湿度对土壤异养呼吸速率的相互关系, 结果表明各处理土壤湿度对土壤异养呼吸速率均无显著影响 ($P > 0.05$)。

表3 土壤异养呼吸速率与土壤温度、土壤湿度的相关性及温度敏感性系数 Q_{10} Table 3 Relationships between soil heterotrophic respiration rate and soil temperature (T) measured 0 and 5 cm depths, soil moisture and the rate of soil respiration for each 10°C increase in soil temperature (Q_{10})

处理 Regime	生长季 Growing season	参数 Parameter	a	b	拟合方程 Model	相关系数 R^2	P	Q_{10}
NPK	小麦	地表	33.698	0.116	$R_s = 33.698e^{0.116T}$	0.856 **	0.000	3.19
		地下 5 cm	38.893	0.117	$R_s = 38.893e^{0.117T}$	0.692 **	0.000	3.22
		WFPS	—	—	—	0.057	0.41	—
	玉米	地表	49.787	0.076	$R_s = 49.787e^{0.076T}$	0.321 **	0.011	2.14
		地下 5 cm	45.502	0.081	$R_s = 45.502e^{0.081T}$	0.344 **	0.008	2.25
		WFPS	—	—	—	0.003	0.79	—
	全年	地表	55.251	0.078	$R_s = 55.251e^{0.078T}$	0.596 **	0.000	2.18
		地下 5 cm	46.385	0.083	$R_s = 46.385e^{0.083T}$	0.685 **	0.000	2.29
		WFPS	—	—	—	0.012	0.55	—
OM	小麦	地表	40.94	0.131	$R_s = 40.94e^{0.131T}$	0.80 **	0.000	3.71
		地下 5 cm	38.141	0.134	$R_s = 38.141e^{0.134T}$	0.81 **	0.000	3.82
		WFPS	—	—	—	0.003	0.85	—
	玉米	地表	140.282	0.058	$R_s = 140.282e^{0.058T}$	0.158 *	0.042	1.79
		地下 5 cm	118.571	0.066	$R_s = 118.571e^{0.066T}$	0.192 *	0.048	1.93
		WFPS	—	—	—	0.000	0.95	—
	全年	地表	58.081	0.097	$R_s = 58.081e^{0.097T}$	0.680 **	0.000	2.64
		地下 5 cm	53.319	0.102	$R_s = 53.319e^{0.102T}$	0.700 **	0.000	2.77
		WFPS	—	—	—	0.004	0.75	—
RSDNPK	小麦	地表	63.803	0.098	$R_s = 63.803e^{0.098T}$	0.783 **	0.000	2.66
		地下 5 cm	65.531	0.096	$R_s = 65.531e^{0.096T}$	0.800 **	0.000	2.61
		WFPS	—	—	—	0.067	0.35	—
	玉米	地表	39.444	0.093	$R_s = 39.444e^{0.093T}$	0.282 *	0.020	2.53
		地下 5 cm	43.29	0.093	$R_s = 43.29e^{0.093T}$	0.283 *	0.025	2.53
		WFPS	—	—	—	0.102	0.19	—
	全年	地表	91.481	0.063	$R_s = 91.481e^{0.063T}$	0.448 **	0.000	1.88
		地下 5 cm	81.262	0.069	$R_s = 81.262e^{0.069T}$	0.515 **	0.000	1.99
		WFPS	—	—	—	0.084	0.09	—

* * 表示 $P < 0.01$; R_s 表示土壤异养呼吸速率, 拟合方程为 $R_s = ae^{bT}$; $Q_{10} = e^{10b}$; WFPS = $ax + b$, x 表示土壤异养呼吸速率

3 讨论

3.1 施肥方式对土壤异养呼吸速率的影响

肥料的施用对土壤异养呼吸速率的影响会因肥料的总类、施肥量的不同而差异显著。主要因施肥会直接影响土壤的外源有机物的投入和土壤微生物活性从而影响土壤异养呼吸速率^[9,23]。本研究中常规氮磷钾肥处理的土壤异养呼吸速率显著低于猪厩肥和秸秆配施氮磷钾肥, 主要因常规氮磷钾肥处理中土壤外源有机物输入量较少, 加之紫色土自身有机质含量相对较低, 土壤微生物活性不高。而在猪厩肥和施入秸秆的施肥方式下, 外源有机物料的施

入能显著提高土壤有机碳含量和土壤微生物活性, 进而增加土壤有机碳的矿化分解能力^[24-25], 提高土壤异养呼吸速率。同时, 猪厩肥处理的土壤异养呼吸速率显著高于秸秆配施氮磷钾肥处理, 这主要与外源有机物料的碳氮比 (C/N) 值有关。研究表明, 低 C/N 值的有机物料更能促进土壤微生物活性而加快土壤有机碳周转^[26]。本研究的猪厩肥为新鲜的猪粪, 其 C/N 值为 15:1 (表 1 注释), C/N 值较低, 加之新鲜猪粪本身带入一定数量的鲜活微生物和酶^[27], 而小麦和玉米的秸秆 C/N 分别为 32:1 和 45:1, 比值相对较高, 不易被微生物迅速分解利用, 土壤微生物数量组成相对稳定, 从而使得猪厩肥土

壤异养呼吸速率显著高于秸秆配施氮磷钾肥。总之,施肥方式能明显改变土壤异养呼吸速率,以猪厩肥最大,秸秆配施氮磷钾肥次之,氮磷钾肥最小,说明有机物料投入是紫色土土壤异养呼吸速率的主要调控措施,在等氮量的施肥条件下,低碳氮比的有机物料明显促进土壤异养呼吸。但由于农田土壤对碳吸存的贡献大小是土壤碳源汇平衡的结果,猪厩肥和秸秆配施氮磷钾施肥方式是否因促进土壤异养呼吸反而不利于大气二氧化碳的吸存,还有待于进一步研究。

3.2 施肥方式对土壤呼吸温度敏感性参数 Q_{10} 值的影响

各施肥处理小麦季的土壤异养呼吸 Q_{10} 高于玉米季,说明土壤异养呼吸 Q_{10} 值存在一定的时间变异性,并随季节而改变^[28-30],主要因小麦季土壤温度低且变化大,土壤异养呼吸对温度的变化较为敏感,而夏玉米季土壤温度相对较高,土壤异养呼吸速率对温度的响应相对迟缓。在其它环境因子不受限制的情况下,土壤呼吸 Q_{10} 值随温度升高而降低。Kirschbaum 等^[31]认为 Q_{10} 值在低温下较高,而在高温下较低。Chen 和 Tian^[32]通过对寒温带、温带和热带、亚热带的土壤呼吸研究发现,土壤呼吸 Q_{10} 值随着土壤温度的升高而降低。长期施用猪厩肥处理的地表和地下土壤异养呼吸 Q_{10} 值分别为 2.64 和 2.77,均高于秸秆配施氮磷钾肥(1.88 和 1.99)。相关研究表明土壤中底物的有效性对土壤微生物呼吸的限制作用是影响土壤异养呼吸 Q_{10} 值的另一重要因素^[33-34],土壤底物的有效性增强,土壤呼吸对温度的敏感性会升高^[35]。长期施用猪厩肥尤其是新鲜的猪粪,能够显著增加土壤中可溶性有机碳氮和微生物量碳氮的数量^[36-37],加之猪厩肥本身 C/N 值较低,极易被土壤微生物利用从而为微生物的呼吸作用提供了大量的有效活性底物,因此,施用猪厩肥处理土壤异养呼吸 Q_{10} 值高于秸秆配施氮磷钾肥,也进一步说明 C/N 值低的有机物料能够提高土壤呼吸 Q_{10} 值,使土壤异养呼吸对温度的敏感性加强。

4 结论

有机物料的投入是紫色土土壤异养呼吸速率的主要调控措施,低碳氮比的有机物料更能促进土壤异养呼吸速率和 CO_2 排放量。土壤异养呼吸 Q_{10} 值

受季节和有机物料碳氮比的双重影响。小麦季土壤异养呼吸 Q_{10} 值大于玉米季,施用猪厩肥土壤异养呼吸 Q_{10} 值高于秸秆配施氮磷钾肥,说明碳氮比值低的有机物料还能够提高土壤异养呼吸 Q_{10} 值,使呼吸速率对温度的敏感性加强。

致谢: 华中农业大学胡荣桂教授和美国 New Hampshire 大学李长生教授对写作给予帮助,特此致谢。

References:

- [1] Grace J, Rayment M. Respiration in the balance. *Nature*, 2000, 404(6780): 819-820.
- [2] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 7-20.
- [3] Li Z P, Zhang T L, Chen B Y. Dynamics of soluble organic carbon and its relation to mineralization of soil organic carbon. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(4): 544-552.
- [4] Pan G X, Zhao Q G. Study on evolution of organic carbon stock in agricultural soils of china: facing the challenge of global change and food security. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(4): 384-393.
- [5] Macfadyen A. Simple methods for measuring and maintaining the proportion of carbon dioxide in air, for use in ecological studies of soil respiration. *Soil Biology and Biochemistry*, 1970, 2: 9-18.
- [6] Kuzyakov Y, Cheng W. Photosynthesis controls of rhizosphere respiration and organic matter decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(14): 1915-1925.
- [7] Dixon R K, Solomon A M, Brown S, Houghton R A, Trexler M C, Wisniewski J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. *Science*, 1994, 263(5144): 185-190.
- [8] Wang X G, Zhu B, Gao M R, Wang Y Q, Zheng X H. Soil CO_2 efflux and simulation of Forest-DNDC model in the mixed plantation of alder and cypress in hilly areas of the central Sichuan Basin. *Journal of Beijing Forestry University*, 2008, 30(2): 27-32.
- [9] Han G X, Zhou G S, Xu Z Z. Seasonal dynamics of soil respiration and carbon budget of maize (*Zea mays* L.) farmland ecosystem. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2009, 17(5): 874-879.
- [10] Bowden, R D, Newkirk K M, Rullo G M. Carbon dioxide and methane fluxes by a forest soil under laboratory-controlled moisture and temperature conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(12): 1591-1597.
- [11] Bowden R D, Davidson E, Savage K, Arabia C, Steudler, P. Chronic nitrogen additions reduce total soil respiration and microbial respiration in temperate forest soils at the Harvard Forest. *Forest Ecology and Management*, 2004, 196(1): 43-56.

- [12] Ding W X, Lei M, Yun Y F, Cai Z C, Zheng X H. CO₂ emission in an intensively cultivated loam as affected by long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(2): 669-679.
- [13] Gao H Y, Guo S L, Liu W Z. Characteristics of soil respiration in fallow and its influencing factors at arid-highland of Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(18): 5217-5224.
- [14] Gao X, Hao W P, Gu F X, Guo R, Xia X, Mei X R, Li J. The impact of rainfall on soil respiration in a rain-fed maize cropland. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(24): 7883-7893.
- [15] Zhong X H. *Montology Outline and Mountain Research in China*. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 2000: 1-3.
- [16] Li Z M. *Purple Soil in China(A)*. Beijing: Science Press, 1991: 1-11.
- [17] Lu R K. *Methods of Soil and Agro-Chemical Analysis*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999: 13-52.
- [18] Cai Y, Ding W X, Cai Z C. Soil respiration in a maize-soil ecosystem and contribution of rhizosphere respiration. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12): 4274-4278.
- [19] Rochette P, Angers D A, Flanagan L B. Maize residue decomposition measurement using soil surface Carbon dioxide fluxes and natural abundance of Carbon-13. *Soil Science Society of America Journal*, 1999, 63(5): 1385-1396.
- [20] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH₄, CO₂ and N₂ O emissions from a short-plant ecosystem. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20(5): 842-844.
- [21] Zhou M H, Zhu B, Klaus B B, Zheng X H, Wang T, Wang Y Q. Nitrous oxide emissions and nitrate leaching from a rain-fed wheat-maize rotation in the Sichuan Basin, China. *Plant and Soil*, 2012, 362(1/2): 149-159.
- [22] Han G X, Zhu B, Jiang C S. Soil respiration and its controlling factors in rice fields in the hill region of the central Sichuan basin. *Journal of Plant Ecology*, 2006, 30(3): 450-456.
- [23] Zhang Q Z, Wu W L, Wang M X, Zhou Z R, Chen S F. The effects of crop residue amendment and N rate on soil respiration. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(11): 2883-2887.
- [24] Dai W H, Wang Y Q, Huang Y, Liu J, Zhao L. Study on soil CO₂ emission in agri-ecosystems. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forest: Nature Science Edition*, 2004, 32(12): 1-7.
- [25] Qiao Y F, Miao S J, Wang S Q, Han X Z, Li H B. Soil respiration affected by fertilization in black soil. *Acta Pedologica Sinica*, 2010, 44(6): 1027-1035.
- [26] Saetre P, Stark J M. Microbial dynamics and carbon and nitrogen cycling following re-wetting of soils beneath two semi-arid plant species. *Oecologia*, 2005, 142(2): 247-260.
- [27] Liu E K, Zhao B Q, Li X Y, Jiang R B, Li Y T, Hwat B S. Biological properties and enzymatic activity of arable soils affected by long-term different fertilization systems. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(1): 126-182.
- [28] Yuste J C, Janssens I A, Carrara A, Ceulemans R. Annual Q₁₀ of soil respiration reflects plant phenological patterns as well as temperature sensitivity. *Global Change Biology*, 2004, 10(2): 161-169.
- [29] Xu M, Qi Y. Spatial and seasonal variations of Q₁₀ determined by soil respiration measurements at a Sierra Nevada forest. *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, 15(3): 687-696.
- [30] Wang X G, Zhu B, Wang Y Q, Zheng X H. Soil respiration and its sensitivity to temperature under different land use conditions. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5): 1960-1968.
- [31] Kirschbaum M U F. The temperature dependence of organic-matter decomposition-still a topic of debate. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(9): 2510-2518.
- [32] Chen H, Tian H Q. Does a general temperature-dependent Q₁₀ model of soil respiration exist at biome and global scale? *Journal of Integrative Plant Biology*, 2005, 47(11): 1288-1302.
- [33] Knorr W, Prentice I C, House J I, Holland E A. Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming. *Nature*, 2005, 433(7023): 298-301.
- [34] Gershenson A, Bader N E, Cheng W X. Effects of substrate availability on the temperature sensitivity of soil organic matter decomposition. *Global Change Biology*, 2009, 15(1): 176-183.
- [35] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, 2006, 440(7081): 165-173.
- [36] Zheng Y, Gao Y S, Zhang L M, He Y Q, He J S. Effects of long-term fertilization on soil microorganisms and enzyme activities in an upland red soil. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(2): 316-321.
- [37] Zhang Q C, Wang X Q, Shi Y N, Wang G H. Effects of different fertilizer treatments on ecological characteristics of microorganism in chemical fertilizer omission paddy soil. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, 16(1): 118-123.

参考文献:

- [3] 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. *土壤学报*, 2004, 41(4): 544-552.
- [4] 潘根兴, 赵其国. 我国农田土壤碳库演变研究: 全球变化和国家安全. *地球科学进展*, 2005, 20(4): 384-393.
- [8] 王小国, 朱波, 高美荣, 王艳强, 郑循华. 川中丘陵区桉柏混交林地土壤 CO₂ 释放与 Forest-DNDC 模型模拟. *北京林业大学学报*, 2008, 30(2): 27-32.
- [9] 韩广轩, 周广胜, 许振柱. 玉米农田生态系统土壤呼吸作用季节动态与碳收支初步估算. *中国生态农业学报*, 2009, 17(5): 874-879.
- [13] 高会议, 郭胜利, 刘文兆. 黄土旱塬裸地土壤呼吸特征及其影响因子. *生态学报*, 2011, 31(18): 5217-5224.
- [14] 高翔, 郝卫平, 顾峰雪, 郭瑞, 夏旭, 梅旭荣, 李洁. 降雨对

- 旱作春玉米农田土壤呼吸动态的影响. 生态学报, 2012, 32 (24): 7883-7893.
- [15] 钟祥浩. 山地学概论与中国山地研究. 成都: 四川科学技术出版社, 2000: 1-3.
- [16] 李仲明. 中国紫色土(上篇). 北京: 科学出版社, 1991: 1-11.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业出版社, 1999: 13-52.
- [18] 蔡艳, 丁维新, 蔡祖聪. 土壤-玉米系统中土壤呼吸强度及各组分贡献. 生态学报, 2006, 26(12): 4274-4278.
- [22] 韩广轩, 朱波, 江长胜. 川中丘陵区水稻田土壤呼吸及其影响因素. 植物生态学报 2006, 30(3) 450-456.
- [23] 张庆忠, 吴文良, 王明新, 周中仁, 陈淑峰. 秸秆还田和施氮对农田土壤呼吸的影响. 生态学报, 2005, 25 (11): 2883-2887.
- [24] 戴万宏, 王益权, 黄耀, 刘军, 赵磊. 农田生态系统土壤 CO₂ 释放研究. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2004, 32 (12): 1-7.
- [25] 乔云发, 苗淑杰, 王树起, 韩晓增, 李海波. 不同施肥处理对黑土土壤呼吸的影响. 土壤学报, 2010, 44(6): 1027-1035.
- [27] 刘恩科, 赵秉强, 李秀英, 姜瑞波, 李燕婷, Hwat B S. 长期施肥对土壤微生物量及土壤酶活性的影响. 植物生态学报, 2008, 32(1): 126-182.
- [30] 王小国, 朱波, 王艳强, 郑循华. 不同土地利用方式下土壤呼吸及其温度敏感性. 生态学报, 2007, 27(5): 1960-1968.
- [36] 郑勇, 高勇生, 张丽梅, 何园球, 贺纪正. 长期施肥对旱地红壤微生物和酶活性的影响. 植物营养与肥料学报, 2008, 14 (2): 316-321.
- [37] 张奇春, 王雪芹, 时亚南, 王光火. 不同施肥处理对长期不施肥区稻田土壤微生物生态特性的影响. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(1): 118-123.