

# 碳磷添加对黄土区农田土壤呼吸及温度敏感性的影响

薛美瑛<sup>1</sup>, 李春越<sup>1</sup>, 党廷辉<sup>2</sup>, 刘津<sup>1</sup>, 邢亚薇<sup>1</sup>

1. 陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 西安 710119

2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 杨凌 712100

**摘要:** 黄土区耕地面积占全国耕地面积的 15% 以上, 该区域降水资源贫乏, 是我国土壤生产力和土壤有机碳储量最低的区域之一。营养的大量投入可以极大地提高土壤生产力, 但对于营养添加下土壤 CO<sub>2</sub> 排放有何变化以及是如何改变黄土区土壤环境, 进而影响土壤呼吸及温度敏感性还尚不清楚。本文以长武实验田的黑垆土作为研究对象, 分别对 N12 (施氮量 120 kg·hm<sup>-2</sup>) 土样设置不添加、添加磷源以及 CK (长期连作不施肥) 土样设置不添加、添加磷源、碳源、碳磷源 (共计 6 个处理), 比较分析在 15℃ 和 25℃ 培养下土壤呼吸速率的变化, 以及培养周期内土壤温度敏感性 Q<sub>10</sub> (即温度每升高 10℃, 温室气体排放速率变化的倍数) 的变化趋势。通过对呼吸前后土壤 pH 值、全碳全磷、有机碳、速效磷、硝态氮、铵态氮以及微生物生物量碳磷 (MBC、MBP) 的测定, 分析其影响因素。碳磷添加在一定程度上提高了土壤的呼吸速率, 其中碳源的添加明显增强了土壤呼吸速率以及土壤 Q<sub>10</sub> 值。碳磷添加大幅度提高了土壤全碳、速效磷含量以及微生物活性, 15℃ 条件培养后, 土壤微生物生物量最高。碳磷添加后, 土壤呼吸速率与土壤 pH、全碳、铵态氮、MBC 呈极显著相关关系。该研究为黄土区土壤生产力的提高以及降低温室气体的排放、恢复和改善生态环境提供理论依据。

**关键词:** 碳磷添加; 土壤呼吸; 温度敏感性; 微生物生物量

## Effects of carbon and phosphorus additions on soil respiration and temperature sensitivity of farmland in the loess region

XUE Meiyi<sup>1</sup>, LI Chunyue<sup>1</sup>, DANG Tinghui<sup>2</sup>, LIU Jin<sup>1</sup>, XING Yawei<sup>1</sup>

1. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China

2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

**Abstract: Background, aim, and scope** The cultivated land area in the loess area accounts for more than 15% of the total cultivated land area in China. The rainfall resources in this area are poor, soil erosion and desertification are serious, and productivity is low. Agricultural operation and management in dry land is relatively backward; it

收稿日期: 2018-02-10; 录用日期: 2018-03-29; 网络出版: 2018-05-18

Received Date: 2018-02-10; Accepted Date: 2018-03-29; Online first: 2018-05-18

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41501255); 中央高校基本科研业务费专项资金 (GK201603073); 国家重点研发计划项目 (2016YFD0800105)

Foundation Item: National Natural Science Foundation of China (41501225); Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (GK201603073); National Key R & D Program of China (2016YFD0800105)

通信作者: 李春越, E-mail: chunyue\_li@snnu.edu.cn

Corresponding Author: LI Chunyue, E-mail: chunyue\_li@snnu.edu.cn

引用格式: 薛美瑛, 李春越, 党廷辉, 等. 2019. 碳磷添加对黄土区农田土壤呼吸及温度敏感性的影响 [J]. 地球环境学报, 10(1): 69-78.

Citation: Xue M Y, Li C Y, Dang T H, et al. 2019. Effects of carbon and phosphorus additions on soil respiration and temperature sensitivity of farmland in the loess region [J]. Journal of Earth Environment, 10(1): 69-78.

is one of the lowest areas of productivity and soil organic carbon storage in China. In recent years, there are many researches on loess area. Studies have found that a large amount of nutrition can greatly increase soil productivity. However, it is not clear about the change in CO<sub>2</sub> emissions after nutrition is added, and how nutrient additions change the soil environment in loess area, and then affect soil respiration and temperature sensitivity. **Materials and methods** In this paper, the N12 soil samples are divided into two treatments: black and phosphorus addition, and CK soil samples are divided into four treatments: black, phosphorus addition, carbon addition, and carbon and phosphorus addition (6 treatments in total), soil basic respiration rate at 15°C and 25°C is compared and analyzed as well as the change trend of  $Q_{10}$  during the period of culture. Influencing factors are analyzed by comparing the changes of soil pH, total carbon and total phosphorus, organic carbon, available phosphorus, nitrate nitrogen and microbial biomass carbon and phosphorus (MBC and MBP) around respiration. **Results** Carbon and phosphorus increase the respiration rate of soil to a certain extent, the addition of carbon source significantly enhance soil respiration rate and  $Q_{10}$ . The addition of carbon and phosphorus has increase effect on the total carbon, available phosphorus content and microbial activity, the soil microbial biomass is the highest after 15°C. After the addition of carbon and phosphorus, the soil respiration rate has a very significant correlation with soil pH, total carbon, ammonium nitrogen content and MBC. **Discussion** Soil respiration is an important biological indicator of soil quality and fertility, in particular, the basic soil respiration partly reacts the biological activity of the soil and the strength of soil material metabolism, which reflects the transformation and supply of soil nutrients. The addition of nutrients changes the soil environment and fertility, and then increases the respiration rate and  $Q_{10}$ . Carbon content in soil is a quick-acting substrate for microbial growth, so the addition of carbon promotes the activity and growth of microbes and then increases the respiration. In addition, soil pH also affects soil carbon, nitrogen and other nutrients then influences CO<sub>2</sub> emissions. **Conclusions** To sum up, the addition of carbon and phosphorus changes soil environment, such as soil pH, total carbon, ammonium nitrogen and MBC, which changes soil respiration rate and  $Q_{10}$ . **Recommendations and perspectives** The sensitivity of soil respiration rate to temperature change directly affects the estimation of carbon cycling and carbon accumulation, and predicts the carbon balance and global warming degree of the terrestrial ecosystem in the future. Therefore, the study provides a theoretical basis for the improvement of soil productivity and the reduction of greenhouse gas emissions, recovery and improvement of the ecological environment in the loess region.

**Key words:** carbon and phosphorus addition; soil respiration; temperature sensitivity; microbial biomass

土壤呼吸是陆地植物吸收的 CO<sub>2</sub> 释放到大气的主要途径, 主要包括三个生物学过程 (植物的根系呼吸、土壤微生物呼吸以及土壤动物呼吸) 和一个非生物学过程 (少量的土壤有机物氧化产生 CO<sub>2</sub>) (张东秋等, 2005), 其中最重要的阶段是根系呼吸和土壤微生物呼吸, 所以土壤呼吸可以作为衡量土壤微生物总活性或评价土壤肥力的指标。土壤呼吸不仅与水分、土壤温度 (韩广轩等, 2008; 张宇等, 2009; 杨玲等, 2011)、有机质 (李晓莎等, 2015)、全氮 (王立刚等, 2002; 刘爽等, 2010)、pH 值等基本性质有关, 而且在一定程度上受微生物生物量碳的影响 (Tang et al, 2005)。农业管理措施 (如施肥) 直接改变了土壤环境, 如土壤温度、土壤水分、pH、通气

性和土壤有机碳等 (姜继韶等, 2015), 而且还能改变微生物生物量、微生物高等因素 (张俊丽等, 2012)。这些因素显著影响微生物呼吸和根系呼吸过程, 最终影响土壤呼吸和温度敏感性。

土壤呼吸是影响大气 CO<sub>2</sub> 浓度变化的关键因素, 是陆地生态系统碳收支的重要环节 (Davidson et al, 2006)。土壤呼吸温度敏感性在很大程度上决定着全球气候变化与碳循环之间的反馈关系, 研究土壤呼吸排放特征 (Liu et al, 2011) 以及各影响因素对土壤呼吸的贡献是评价作物和土壤碳平衡和能量平衡的基础。对土壤呼吸及其温度敏感性的深刻理解不仅可以揭示地下生态过程对气候变化的响应和适应, 还有助于改进全球碳循环模型 (杨庆朋等, 2011)。

黄土高原是我国典型的雨养农业区和生态脆弱区, 该区域降水资源贫乏、土壤侵蚀与荒漠化严重、土壤生产力低下。旱地农业经营与管理上相对落后; 土地利用结构与农林牧产业结构不合理; 土地垦殖率高, 但生产力低下。该地区是我国土壤生产力和土壤有机碳储量最低的区域之一。自 1980 年以来, 肥料大量投入和新品种的改良应用, 极大地提高了土壤生产力和土壤有机碳储量 (张春霞等, 2006; 郭胜利等, 2008), 但是施肥条件下土壤  $\text{CO}_2$  排放有何变化, 土壤生产力提高对土壤呼吸有何影响尚不清楚, 而且从土壤呼吸及温度敏感性角度入手分析施肥对黄土区土壤作用的研究较少。土壤呼吸及温度敏感性综合土壤性质以及微生物生物量的变化, 可以较好地评价碳磷添加对于土壤肥力的影响。本文选取黄土区土壤作为研究对象, 探讨碳磷添加对土壤呼吸速率及其温度敏感性的影响, 并分析土壤基本性质 (pH、全磷、有机碳等) 和微生物生物量的相应变化。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验地概况

研究样地位于中国科学院长武生态试验站 ( $35^{\circ}12'N$ ,  $107^{\circ}40'E$ ), 海拔 1200 m, 气候属于半干旱半湿润大陆季风气候, 夏秋多雨, 冬春季干旱少雨, 多风沙, 年平均降雨量为 580 mm, 最

低降雨量 296 mm, 最高为 594 mm, 7—9 月的降雨量占全年降雨量的 57%。年平均气温  $9.4^{\circ}\text{C}$ , 大于  $10^{\circ}\text{C}$  的活动积温为  $3029^{\circ}\text{C}$ , 年日照时数 2230 h, 日照率为 51%, 无霜期 171 d, 年辐射总量  $484\text{ kJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ , 年平均蒸发量为 1565 mm。研究区主要土壤类型为黑垆土, 其母质为深厚的中壤质马兰土。1 m 土层的土壤容重为  $1.30\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。土壤全氮、全磷、有机质含量分别为  $0.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $1.26\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $10.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。土壤 pH 值为 8.15。

### 1.2 取样方法及样本设置

土壤样品采好后, 马上带回实验室, 分成两份: 一部分过 2 mm 筛后  $4^{\circ}\text{C}$  保存, 用于测定速效磷、铵态氮、硝态氮、微生物生物量碳、微生物生物量磷以及土壤呼吸; 另一部分风干过筛, 用于测定土壤 pH 值、有机碳、全碳以及全磷的含量。

土样过筛后, 先测定其含水量以及最大持水量, 调整土壤含水量为其最大持水量的 40%, 对两份土样分别进行以下处理: 将 CK (长期连作不施肥) 土样分为四份, 分别做不添加、加碳源、加磷源、加碳磷源处理; N12 (施氮量  $120\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ) 土样分为两份, 分别做不添加、加磷源处理。其中磷源由磷酸二氢钾提供, 碳源由葡萄糖提供。将试剂按照所需量 (表 1) 称好后, 均匀地洒在土壤上, 混匀, 用锡箔纸及塑料密封 24 h 后打开并保存。

表 1 土壤样本设置及碳磷添加量

Tab.1 Soil sample setting and carbon and phosphorus additions

土样 Soil samples	营养成分 Nutrients	土样质量 Soil mass/g	营养梯度 Nutrition gradient	试剂名称 Reagents	加入试剂量 Reagent mass/g
N12	不添加 Black	1000			
	添加磷源 Phosphorus addition	1000	$\text{P}_2\text{O}_5/150\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$\text{KH}_2\text{PO}_4$	0.30
CK	不添加 Black	750			
	添加磷源 Phosphorus addition	750	$\text{P}_2\text{O}_5/150\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$\text{KH}_2\text{PO}_4$	0.22
	添加碳源 Carbon addition	750	$\text{C}/5000\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$	9.375
	添加碳磷源 Carbon and phosphorus addition	750	$\text{C}/5000\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ $\text{P}_2\text{O}_5/150\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$ $\text{KH}_2\text{PO}_4$	9.375 0.22

### 1.3 土壤基本性质测定

土壤含水量用烘干法测定; 土壤 pH 值采用 PHS-3C 型酸度计进行测定; 土壤全碳、有机碳采用元素分析仪测定; 土壤速效磷采用碳酸氢钠浸提, 比色法测定 (鲍士旦, 2000); 土壤硝态氮和

铵态氮采用硫酸钾溶液浸提—流动分析仪测定; 土壤微生物生物量碳采用氯仿熏蒸—硫酸钾浸提法测定, 土壤微生物生物量磷采用氯仿熏蒸—碳酸氢钠浸提法测定, 土壤微生物生物量碳磷的换算系数分别为 0.45、0.4, 测量结果均以干土重计 (Brookes

et al, 1985; Vance et al, 1987)。

#### 1.4 土壤呼吸的测定

室内培养试验：把 25 g 新鲜土样放入到 25 mL 的小烧杯中，置于 250 mL 培养瓶中，将培养瓶分别置于 15℃、25℃ 温度水平下培养 63 d，每个温度水平设 3 个重复。在培养的第 1 d、7 d、14 d、21 d、28 d、35 d、42 d、49 d、56 d、63 d，测定一次 CO<sub>2</sub> 产生量。在测样前 24 h，需要将装有 5 mL 0.5 mol·L<sup>-1</sup> NaOH 溶液的小烧杯也放入到培养瓶中，并密闭培养。待 NaOH 溶液吸收 CO<sub>2</sub> 24 h 后，将装有 NaOH 溶液的小烧杯取出，立即加入 5 mL 0.5 mol·L<sup>-1</sup> 的 BaCl<sub>2</sub> 溶液并密封，用滴定法测定 CO<sub>2</sub> 产生量。每次采样后，培养瓶与周围空气通气 10 min，再进行培养。培养过程中，每周用称重法调节土壤含水量。

#### 1.5 数据分析

土壤呼吸速率计算方法：

$$R_t = \frac{(V_0 - V_t) \cdot \rho \cdot 44 \cdot 10^3}{2 \cdot 1000 \cdot t \cdot m} \quad (1)$$

式中： $R_t$  为土壤呼吸速率 (mg·g<sup>-1</sup>·d<sup>-1</sup>)， $t$  为时间 (d)， $V_0$  为滴定空白组盐酸使用量 (mL)； $V_t$  为滴定盐酸使用量 (mL)； $\rho$  为盐酸浓度 (mol·L<sup>-1</sup>)； $m$  为称取土壤质量 (g)。

用  $Q_{10}$  值来表示土壤呼吸速率对温度变化的敏感程度，并通过下式确定  $Q_{10}$  值：

$$Q_{10} = \left( \frac{R_{t_2}}{R_{t_1}} \right)^{\frac{10}{(t_2 - t_1)}} \quad (2)$$

式中： $R_{t_2}$  为 25℃ 土壤呼吸速率， $R_{t_1}$  为 15℃ 土壤呼吸速率。 $t_2$ 、 $t_1$  分别为 25℃、15℃ 培养箱的实际温度。用 SPSS 20.0 以及 Excel 2016 分析处理数据。

## 2 结果分析

### 2.1 碳磷添加对土壤呼吸速率的影响

与长期连作不施肥处理 (CK) 相比，碳源的添加对于提高土壤呼吸有明显的作用 (图 1)，单添加碳源和碳磷源配合添加的增长幅度分别为 92.81%、94.35%，磷源对土壤呼吸的促进作用不明显。开始培养后，土壤呼吸速率随着时间的增加而降低，CK 和施加磷源土壤的呼吸速率变化趋势基本相同，单添加碳源的土样呼吸速率呈现缓慢下降的趋势，碳磷源共同添加的土样呼吸速率直线下降，之后保持稳定；N12 土样不添加与

添加磷源后的土壤呼吸速率变化趋势基本相同，添加磷源后的土壤呼吸速率略有增长，从图中可以看出，CK 土样的土壤呼吸速率整体高于 N12 土样。

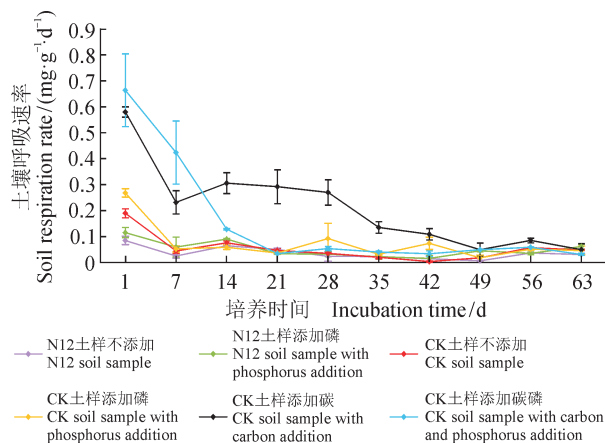


图 1 15℃ 不同土样碳磷源添加对土壤呼吸的影响  
Fig.1 Effects of carbon and phosphorus additions of different soil samples on soil respiration at 15℃

与 15℃ 培养条件相比，CK 土样不添加以及添加磷源后在 25℃ 的土壤呼吸速率要低于 15℃ (图 2)，而添加碳源和同时施加碳磷源的土样要比 15℃ 时高，其峰值分别比 15℃ 时增加了 26.04%、39.35%；N12 土样在两个温度下没有明显差异。

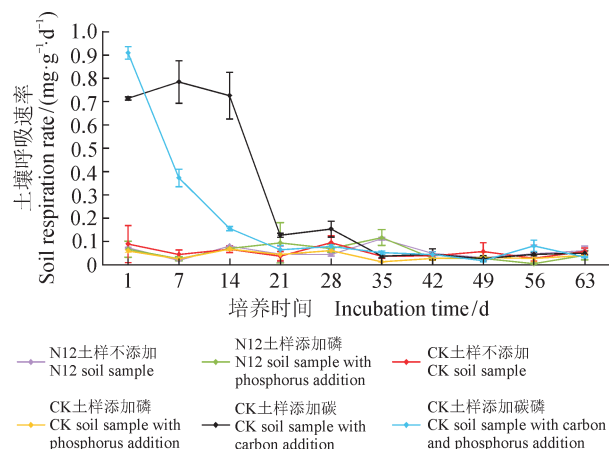


图 2 25℃ 不同土样碳磷源添加对土壤呼吸的影响  
Fig.2 Effects of carbon and phosphorus additions of different soil samples on soil respiration at 25℃

### 2.2 碳磷添加对土壤温度敏感性的影响

土壤呼吸温度敏感性 ( $Q_{10}$ ) 的变化随着营养

添加的不同而不同。从表 2 中可以看出: 相比于不添加, 添加磷源后的两种土样  $Q_{10}$  值均有所降低, 添加碳源后的土样, 在培养一周后  $Q_{10}$  值达到了峰值, 之后大幅度下降, 并在 21 d 后趋于稳定;

相较于单一碳源添加, 碳磷源共同添加的土样  $Q_{10}$  值波动幅度相对较小。从整体上看, 碳磷的添加降低了土样的  $Q_{10}$  值, CK 土样  $Q_{10}$  值整体低于 N12 土样。

表 2 碳磷添加对土壤呼吸温度敏感性的影响  
Tab.2 Effects of carbon and phosphorus additions on the temperature sensitivity of soil respiration

培养时间 Incubation time /d	$Q_{10}$					
	N12 土样 N12 soil sample	N12 土样加磷 N12 soil sample with phosphorus addition	CK 土样 CK soil sample	CK 土样加磷 CK soil sample with phosphorus addition	CK 土样加碳 CK soil sample with carbon addition	CK 土样加碳磷 CK soil sample with carbon and phosphorus addition
1	0.87	0.58	0.47	0.22	1.23	1.37
7	0.73	0.43	0.99	0.47	3.39	0.88
14	1.25	0.78	0.89	1.16	2.37	1.21
21	0.92	2.84	0.80	1.22	0.43	1.88
28	1.92	2.21	2.71	0.67	0.57	1.46
35	4.99	5.36	1.86	0.41	0.28	1.31
42	3.41	1.73	0.89	0.38	0.41	1.34
49	5.03	0.61	3.17	1.79	0.54	0.36
56	1.29	0.13	0.49	0.54	0.53	1.39
63	2.01	0.67	1.22	0.89	1.02	1.07
平均值 Average	2.24	1.53	1.35	0.78	1.08	1.23

### 2.3 不同处理呼吸前后土壤基本化学性质的变化

与不添加相比, 磷源添加后的土壤呼吸前后 pH 值变化不大 (表 3), 添加碳源的土壤呼吸后 pH 值略有升高, 而且 25℃ 培养的 pH 值要比 15℃ 的大。添加磷源后的土壤全碳含量在呼吸前后变化不大, 添加碳源的土壤全碳含量明显增加, 比 CK 土样增加了 21.21%, 呼吸后全碳含量明显减少。土壤总有机碳含量呼吸后比呼吸前低, 15℃ 培养的有明显的降低, 值得一提的是, N12 土样的总有机碳含量呼吸前后略高于 CK 土样。

呼吸前后土壤全磷变化不大, 添加磷源的土壤全磷含量稍高。土壤速效磷含量在磷源添加后有大幅提升, 而且在单一添加时含量最高。值得一提的是, 磷源添加后的土壤在呼吸后速效磷含量均降低, 而且 15℃ 培养的略高于 25℃ 培养的土壤; 而不添加磷源的土壤呼吸后速效磷含量不仅增加, 而且 25℃ 条件下培养的增加幅度更明显。与不添加相比, 单一添加碳源的土样呼吸后速效磷含量有所增加, 15℃ 和 25℃ 条件下培养的速度

磷含量没有明显差异。

### 2.4 不同处理呼吸前后土壤铵态氮、硝态氮的变化

从图 3 中可以看出: 与 N12 土样相比, 磷源添加后的土样呼吸后土壤铵态氮含量降低; 而 CK 土样则相反, 碳磷源添加后, 土样呼吸后的含量有大幅增加, 其中碳磷同时添加的增加幅度最为明显。两种土样在 15℃ 和 25℃ 不同培养条件下, 铵态氮含量并没有明显差异。

相较于铵态氮, 土壤硝态氮的变化更为显著, 呼吸后各土样硝态氮含量均增加。从图 3 可以看出: 添加磷源后, 两种土样呼吸后的硝态氮含量均高于呼吸前, 其中 25℃ 条件下培养的含量更高, 且与不添加相比, 两种土样添加磷源后在呼吸前后含量基本一致; 碳源的添加大幅降低了土壤硝态氮含量, 其中单一添加碳源后的土样呼吸前后没有明显变化, 而碳磷源共同添加的土样呼吸后的硝态氮含量有大幅提升, 而且 25℃ 条件下培养的土样提升幅度非常明显。

表 3 培养前后土样基本性质  
Tab.3 Basic properties of soil samples around culture

处理方式 Treatment	土样 Soil sample	pH	全碳 Total carbon ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	总有机碳 Total organic carbon ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	全磷 Total phosphorus ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )	速效磷 Available phosphorus ( $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )
培养前 Before culture	N12 土样 N12 soil sample	8.08±0.16	17.58±0.68	11.41±0.95	0.85±0.01	2.54±0.97
	N12 土样加磷 N12 soil sample with phosphorus addition	8.16±0.06	16.86±1.03	13.28±0.09	0.96±0.01	44.87±2.26
	CK 土样 CK soil sample	8.19±0.02	16.70±0.31	11.67±0.11	0.78±0.02	4.66±0.77
	CK 土样加磷 CK soil sample with phosphorus addition	8.17±0.06	16.29±0.54	11.96±0.04	0.88±0.02	43.40±1.84
	CK 土样加碳 CK soil sample with carbon addition	7.91±0.05	21.31±1.60	1.19±0.30	0.79±0.03	2.68±0.02
	CK 土样加碳磷 CK soil sample with carbon and phosphorus addition	7.85±0.09	22.05±1.74	11.97±0.48	0.88±0.01	36.19±0.70
	15℃培养 后 After 15℃ culture	N12 土样 N12 soil sample	8.14±0.10	17.21±0.15	11.21±0.10	0.88±0.01
N12 土样加磷 N12 soil sample with phosphorus addition		8.13±0.10	17.12±0.16	11.94±0.16	0.98±0.01	38.52±1.13
CK 土样 CK soil sample		8.13±0.11	16.43±0.39	7.59±0.03	0.80±0.01	6.40±0.80
CK 土样加磷 CK soil sample with phosphorus addition		8.15±0.11	16.55±0.58	8.22±0.29	0.90±0.01	36.19±2.01
CK 土样加碳 CK soil sample with carbon addition		8.09±0.16	18.19±0.32	10.32±0.74	0.80±0.01	7.55±5.78
CK 土样加碳磷 CK soil sample with carbon and phosphorus addition		8.08±0.11	18.23±1.06	10.25±0.10	0.91±0.01	23.29±0.47
25℃培养 后 After 25℃ culture	N12 土样 N12 soil sample	7.98±0.06	17.07±1.32	11.52±0.35	0.87±0.01	10.46±0.91
	N12 土样加磷 N12 soil sample with phosphorus addition	8.12±0.02	17.26±0.49	12.52±0.05	0.99±0.01	41.28±3.98
	CK 土样 CK soil sample	8.09±0.01	15.45±0.65	11.48±0.04	0.79±0.02	10.26±0.88
	CK 土样加磷 CK soil sample with phosphorus addition	8.12±0.08	16.55±0.53	10.73±0.27	0.91±0.02	37.10±0.47
	CK 土样加碳 CK soil sample with carbon addition	8.23±0.06	16.77±0.17	11.14±0.20	0.79±0.01	7.05±0.48
	CK 土样加碳磷 CK soil sample with carbon and phosphorus addition	8.17±0.03	19.05±1.50	11.91±1.09	0.92±0.02	24.88±2.48

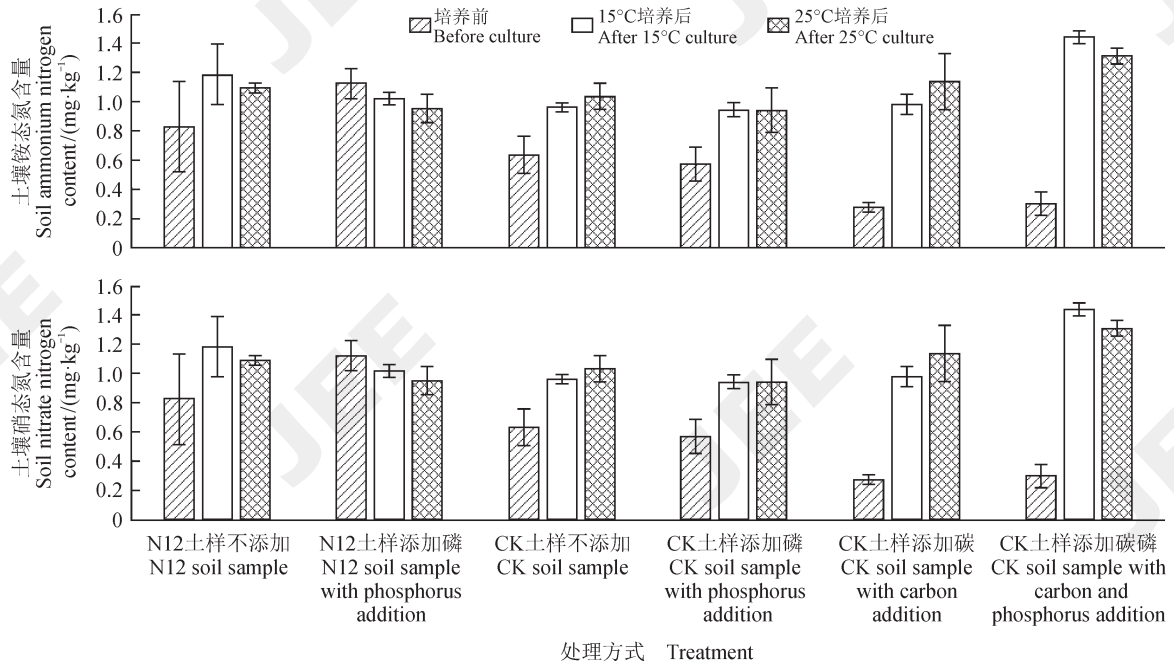


图 3 呼吸前后土壤铵态氮、硝态氮含量变化

Fig.3 Changes of soil ammonium and nitrate nitrogen in soil around respiration

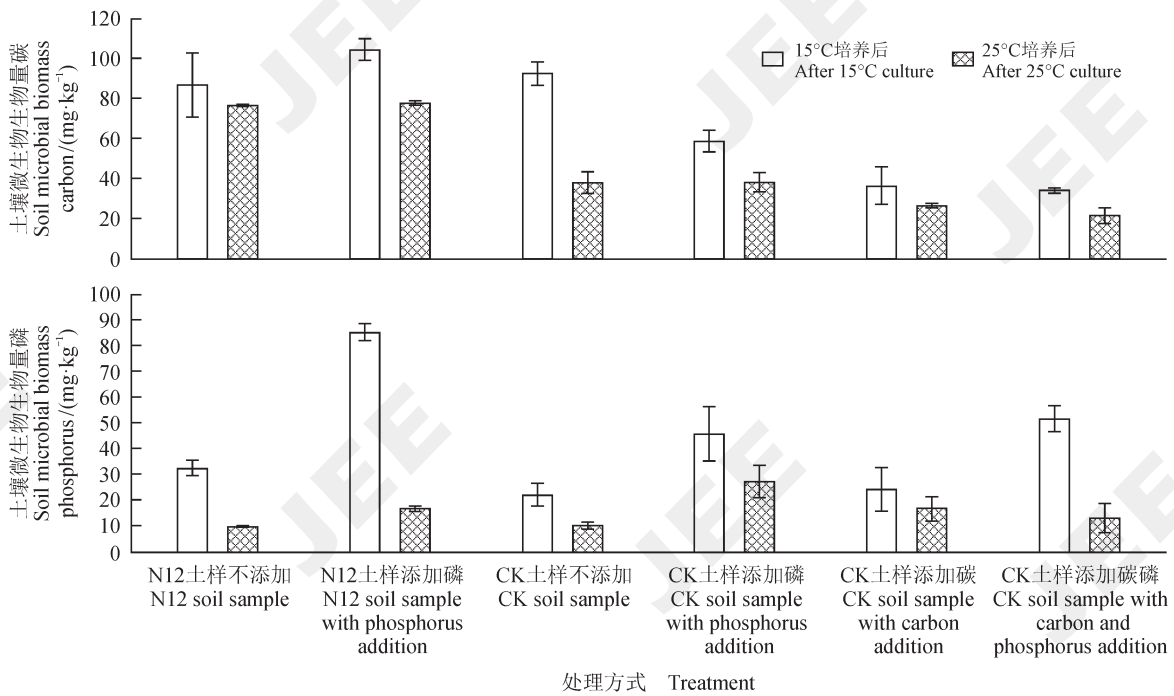


图 4 不同温度培养下土壤微生物量碳磷含量对比

Tab.4 Comparison of soil microbial biomass carbon and phosphorus under different temperatures

### 2.5 不同温度培养下土壤微生物生物量的变化

不同温度下呼吸后微生物生物量碳磷有显著差异 (图 4), 温度与微生物生物量碳磷含量呈负相关关系。N12 土样中, 磷源的添加增加了呼吸

后 MBC 的含量, 而 CK 土样则相反, 并且呼吸后碳源添加的土壤 MBC 要比不添加以及磷源添加的小; 磷源的添加可以显著提高土壤呼吸后 MBP 的含量, 并且 N12 土样尤为明显; 添加碳源对土壤

MBP 影响不大；值得一提的是，N12 土样添加磷源后，不同培养温度下 MBP 的差异显著。

## 2.6 各影响因素与土壤呼吸速率的相关性分析

相关分析结果表明：土壤呼吸速率与土壤 pH、全碳、铵态氮、MBC 呈极显著相关关系（表 4），这些土壤性质的改变对土壤呼吸速率有很大影响，是土壤呼吸速率改变的相关因素。

## 3 讨论与结论

### 3.1 碳磷添加对土壤呼吸速率及温度敏感性的影响

土壤呼吸往往作为土壤生物活性和土壤肥

力乃至透气性的指标，并且指示生态系统演替的过程与方向（赵吉，2006）。CK 土样和 N12 土样呼吸速率差异不大，但碳源添加的土壤呼吸明显高于其他处理，其中碳磷源共同添加的最高，为  $0.9087 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ ，这是因为碳源的加入促进土壤微生物的活动和生长繁殖，从而提高土壤微生物数量并增加了土壤微生物活性，储存和循环更多的养分，提高了土壤呼吸速率。另外，添加碳源的土壤呼吸速率在前 28 d 内下降幅度很大，这是由于提供碳源的葡萄糖能够很快被降解。

表 4 土壤各理化性质及土壤呼吸速率的相关性分析  
Tab.4 Correlation of soil physical chemical properties and soil respiration rate

	pH	全碳 Total carbon	有机碳 Total organic carbon	硝态氮 Nitrate nitrogen	铵态氮 Ammonium nitrogen	全磷 Total phosphorus	速效磷 Available phosphorus	MBC	呼吸速率 Respiratory rate
pH	1								
全碳 Total carbon	0.930**	1							
有机碳 Total organic carbon	-0.444	-0.341	1						
硝态氮 Nitrate nitrogen	0.211	-0.086	-0.145	1					
铵态氮 Ammonium nitrogen	0.891**	0.906**	-0.185	0.155	1				
全磷 Total phosphorus	0.128	0.001	-0.226	0.402	0.204	1			
速效磷 Available phosphorus	0.452	0.396	-0.184	0.407	0.618*	0.724**	1		
MBC	0.916**	0.959**	-0.278	0.024	0.923**	0.117	0.466	1	
呼吸速率 Respiration rate	0.891**	0.943**	-0.274	-0.087	0.798**	-0.137	0.224	0.934**	1

土壤呼吸的温度敏感性在很大程度上决定着全球气候变化与碳循环之间的反馈关系。相较于磷源的添加，碳源的添加对  $Q_{10}$  值的影响更为显著，这一点也与土壤呼吸速率的改变相吻合。磷源的添加对  $Q_{10}$  值的影响略小，其中 N12 土样波动趋势要明显大于 CK 土样，这是由于土壤呼吸包括根系呼吸和微生物呼吸，而根系呼吸和微生物呼吸

本身具有不同的温度敏感性（杨毅等，2011；姜继韶等，2015），氮源的存在可能同时降低两者的呼吸温度敏感性，或是降低其中一者的呼吸温度敏感性（杨毅等，2011），所以导致 N12 土样的  $Q_{10}$  不稳定。

### 3.2 碳磷添加对土壤基本化学性质的影响

不同营养添加方式显著地影响了土壤的基本



化学性质(pH值、全碳、全磷、有机碳、速效磷)。添加碳源显著增加了土壤的含碳量, 土壤呼吸对于有机碳有着明显的影响。

磷源添加对于土壤全磷和速效磷含量都有提高, 其中速效磷的提升更为显著, 这是由于在向土壤投加磷肥时, 土壤中所含的磷素增加, 虽然一大部分的磷肥会经过转化变成不能被植物吸收利用的难溶解的磷形态(翁伯琦等, 2013), 但也有一小部分的磷素还是有本身的有效性, 易溶或者微溶于土壤包含的溶液中, 这一部分就会被种植的作物直接利用。

土壤的氮素形态转化有两条基本途径, 它们是好气条件的硝化过程和厌气条件下的反硝化过程。土壤中铵态氮和硝态氮的含量与土壤微生物的活性有很大的关系, 碳磷添加降低了土壤铵态氮含量, 磷源添加对土壤硝态氮的提高有促进作用, 而碳源添加则降低了土壤硝态氮的含量, 这是由于硝化过程是在自由氧存在的条件下, 氢氧化微生物把 $\text{NH}_4^+$ 氧化成 $\text{NO}_3^-$ 的过程, 有机碳的存在不利于氢氧化细菌的活性, 从而抑制了硝态氮的转化(蔡祖聪, 2001)。

### 3.3 碳磷添加对土壤微生物生物量的影响

土壤微生物是陆地生态系统中最活跃的组分, 在物质循环和能量流动中起着重要作用。微生物生物量是衡量土壤微生物活性的重要指标, 土壤微生物生物量碳是土壤有机碳的灵敏指示因子。本研究发现: 营养添加对于土壤微生物生物量碳磷有明显提升作用, 并且相较于 $25^\circ\text{C}$ 培养条件,  $15^\circ\text{C}$ 培养条件下微生物生物量更高。

### 3.4 土壤呼吸速率的影响因素

土壤呼吸不仅与土壤温度和水分有关, 碳磷添加后, 直接改变了土壤环境, 如pH、土壤有机碳、全碳, 而且还能改变微生物的活性和种类, 最终影响土壤呼吸。土壤pH值主要是通过酸化积累过程, 导致土壤碳、氮及其他养分含量产生差异从而影响 $\text{CO}_2$ 的排放; 土壤全碳和有机碳是微生物生长的速效基质, 其含量的高低直接影响土壤微生物的活性, 从而影响土壤呼吸; 土壤微生物生物量作为评价土壤质量的生物学性状, 代表了土壤中微生物的活性程度, 土壤呼吸主要包括微生物呼吸和根系呼吸, 微生物生物量的大小也会对土壤呼吸产生显著影响。

综上所述, 碳磷添加可以增强土壤的呼吸速

率, 其中碳磷源共同添加效果最为显著, 碳源的添加对土壤呼吸温度敏感性的影响相对明显, 不同营养的添加对于土壤的基本化学性质以及微生物生物量有提升作用, 适当的温度可以加快土壤微生物活性, 从而对微生物生物量起到促进作用。土壤呼吸速率主要与土壤pH、全碳、MBC有关。黄土高原作为我国典型的雨养农业区和生态脆弱区, 养分的投入成为保证本地区土壤质量的主导因素。本文通过添加碳磷两种营养成分, 监测土壤呼吸及温度敏感性的变化, 不仅能表征土壤质量和肥力, 反映土壤的生物活性、土壤物质代谢的强度以及土壤养分的转化及供应能力, 而且土壤呼吸作为碳循环中重要的通量, 其大小对气候变化和温室效应也具有重要的影响。此外, 土壤呼吸速率对温度变化的敏感性直接影响对当前陆地生态系统碳循环和碳蓄积的估算, 以及对未来陆地生态系统碳平衡和全球气候变暖程度的预测。本研究对黄土区土壤质量和生产力的提高以及调控土壤碳循环、降低土壤温室气体的排放、恢复和改善生态环境具有较强的意义。

### 参考文献

- 鲍士旦. 2000. 土壤农化分析 [M]. 第三版. 北京: 中国农业出版社: 25–108. [Bao S D. 2000. Soil agrochemical analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press: 25–108.]
- 蔡祖聪. 2001. 氮形态转化途径研究的新进展——厌气铵氧化及其应用前景 [J]. *应用生态学报*, 12(5): 795–798. [Cai Z C. 2001. A research progress in nitrogen conversion — anammox and prospects of its application [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 12(5): 795–798.]
- 郭胜利, 吴金水, 党廷辉. 2008. 轮作和施肥对半干旱区作物地上部生物量与土壤有机碳的影响 [J]. *中国农业科学*, 41(3): 744–751. [Guo S L, Wu J S, Dang T H. 2008. Effects of crop rotation and fertilization on aboveground biomass and soil organic C in semi-arid region [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 41(3): 744–751.]
- 韩广轩, 周广胜, 许振柱. 2008. 玉米生长季土壤呼吸的时间变异性及其影响因素 [J]. *生态学杂志*, 7(10): 1698–1705. [Han G X, Zhou G S, Xu Z Z. 2008. Temporal variation of soil respiration and its affecting factors in a maize field during maize growth season [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 27(10): 1698–1705.]
- 姜继韶, 郭胜利, 王蕊, 等. 2015. 施氮对黄土旱塬区春玉米土壤呼吸和温度敏感性的影响 [J]. *环境科学*,

- 36(5): 1802–1809. [Jiang J S, Guo S L, Wang R, et al. 2015. Effects of nitrogen fertilization on soil respiration and temperature sensitivity in spring maize field in semi-arid regions on Loess Plateau [J]. *Environmental Science*, 36(5): 1802–1809.]
- 李晓莎, 武宁, 刘玲, 等. 2015. 不同秸秆还田和耕作方式对夏玉米农田土壤呼吸及微生物活性的影响 [J]. *应用生态学报*, 26(6): 1765–1771. [Li X S, Wu N, Liu L, et al. 2015. Effects of different straw recycling and tillage methods on soil respiration and microbial activity [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 26(6): 1765–1771.]
- 刘爽, 严昌荣, 何文清, 等. 2010. 不同耕作措施下旱地农田土壤呼吸及其影响因素 [J]. *生态学报*, 30(11): 2919–2924. [Liu S, Yan C R, He W Q, et al. 2010. Soil respiration and its affected factors under different tillage systems in dryland production systems [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 30(11): 2919–2924.]
- 王立刚, 邱建军, 李维炯. 2002. 黄淮海平原地区夏玉米农田土壤呼吸的动态研究 [J]. *土壤肥料*, (6): 13–17. [Wang L G, Qiu J J, Li W J. 2002. Study on the dynamics of soil respiration in the field of summer-corn in Huanghuaihai region in China [J]. *Soils and Fertilizers*, (6): 13–17.]
- 翁伯琦, 郑祥洲, 丁洪, 等. 2013. 植被恢复对土壤碳氮循环的影响研究进展 [J]. *应用生态学报*, 24(12): 3610–3616. [Weng B Q, Zheng X Z, Ding H, et al. 2013. Effects of vegetation restoration on soil carbon and nitrogen cycles [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 24(12): 3610–3616.]
- 杨玲, 廖允成, 高茂盛, 等. 2011. 不同耕作措施下旱作麦田 CO<sub>2</sub> 排放速率与土壤水热关系分析 [J]. *西北农业学报*, 20(1): 70–75. [Yang L, Liao Y C, Gao M S, et al. 2011. Relationship analysis of CO<sub>2</sub> emission fluxes and soil temperature and moisture in rainfed wheat field with different tillage [J]. *Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica*, 20(1): 70–75.]
- 杨庆朋, 徐明, 刘洪升, 等. 2011. 土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性 [J]. *生态学报*, 31(8): 2301–2311. [Yang Q P, Xu M, Liu H S, et al. 2011. Impact factors and uncertainties of the temperature sensitivity of soil respiration [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 31(8): 2301–2311.]
- 杨毅, 黄玫, 刘洪升, 等. 2011. 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*, 26(10): 1811–1822. [Yang Y, Huang M, Liu H S, et al. 2011. The interrelation between temperature sensitivity and adaptability of soil respiration [J]. *Journal of Natural Resources*, 26(10): 1811–1822.]
- 张春霞, 郝明德, 谢佰承. 2006. 不同化肥用量对土壤碳库的影响 [J]. *土壤通报*, 37(5): 861–864. [Zhang C X, Hao M D, Xie B C. 2006. Effect of application amounts of different chemical fertilizers on soil carbon pool [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 37(5): 861–864.]
- 张东秋, 石培礼, 张宪洲. 2005. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展 [J]. *地理科学进展*, 20(7): 778–785. [Zhang D Q, Shi P L, Zhang X Z. 2005. Some advance in the main factors controlling soil respiration [J]. *Advances in Earth Science*, 20(7): 778–785.]
- 张俊丽, Sikander Khan Tanveer, 温晓霞, 等. 2012. 不同耕作方式下旱作玉米田土壤呼吸及其影响因素 [J]. *农业工程学报*, 28(18): 192–199. [Zhang J L, Sikander Khan Tanveer, Wen X X, et al. 2012. Soil respiration and its affecting factors in dry-land maize field under different tillage systems [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 28(18): 192–199.]
- 张宇, 张海林, 陈继康, 等. 2009. 耕作措施对华北农田 CO<sub>2</sub> 排放影响及水热关系分析 [J]. *农业工程学报*, 25(4): 47–52. [Zhang Y, Zhang H L, Chen J K, et al. 2009. Effects of different tillage practices on CO<sub>2</sub> emission fluxes from farmland in North China Plain and the analysis of soil temperature and moisture [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 25(4): 47–53.]
- 赵吉. 2006. 土壤健康的生物学监测与评价 [J]. *土壤*, 38(2): 136–142. [Zhao J. 2006. Biological monitoring and assessment of soil health [J]. *Soils*, 38(2): 136–142.]
- Brookes P C, Landman A, Pruden G, et al. 1985. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 17(6): 837–842.
- Davidson E A, Janssens I A, Luo Y Q. 2006. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q<sub>10</sub> [J]. *Global Change Biology*, 12(2): 154–164.
- Liu Z P, Shao M A, Wang Y Q. 2011. Effect of environmental factors on regional soil organic carbon stocks across the Loess Plateau region, China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 142(3/4): 184–194.
- Tang J W, Baldocchi D D, Xu L K. 2005. Tree photosynthesis modulates soil respiration on a diurnal time scale [J]. *Global Change Biology*, 11(8): 1298–1304.
- Vance E D, Brookes P C, Jenkinson D S. 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 19(6): 703–707.