

## 磷添加对陇中黄土高原旱作农田土壤呼吸组分特征与碳平衡的影响

甘润, 齐鹏, 郭高文, 王晓娇, 蔡立群, 海龙, 张仁陟

### 引用本文:

甘润, 齐鹏, 郭高文, 王晓娇, 蔡立群, 海龙, 张仁陟. 磷添加对陇中黄土高原旱作农田土壤呼吸组分特征与碳平衡的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(3): 599-611.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0807>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 低磷红壤的玉米磷肥农学效应与农学阈值

苏丽珍, 张连娅, 王思睿, 曹卉敏, 肖靖秀, 郑毅, 汤利

农业环境科学学报. 2022, 41(9): 2004-2010 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0068>

#### 生物炭折流湿地对生活污水的净化效果

王若凡, 汪文飞, 王煜钧, 孙鹤洲, 刘傲展

农业环境科学学报. 2020, 39(9): 2001-2007 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0258>

#### 2009—2019年红壤典型区水稻土有机碳组分库时空变化

王玺洋, 李亮, 李晓晖, 辛在军, 何石福, 孙小艳

农业环境科学学报. 2023, 42(3): 589-598 <https://doi.org/10.11654/jaes.2022-0745>

#### 小麦和玉米生长对土壤碳输入和输出的贡献

孙昭安, 朱彪, 张译文, 李梦雨, 孟凡乔

农业环境科学学报. 2021, 40(10): 2257-2265 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0295>

#### 不同改良剂对旱地苹果园温室气体排放的影响

李钊, 刘帅, 丁艳宏, 孙文浩, 高晓东, 赵西宁

农业环境科学学报. 2021, 40(1): 227-236 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0846>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

甘润, 齐鹏, 郭高文, 等. 磷添加对陇中黄土高原旱作农田土壤呼吸组分特征与碳平衡的影响[J]. 农业环境科学学报, 2023, 42(3): 599-611.

GAN R, QI P, GUO G W, et al. Effects of phosphorus addition on soil respiration component characteristics and carbon balance in dry farmlands of the Loess Plateau, Longzhong, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2023, 42(3): 599-611.

# 磷添加对陇中黄土高原旱作农田土壤呼吸组分特征与碳平衡的影响

甘润<sup>1,2</sup>, 齐鹏<sup>1,2,3\*</sup>, 郭高文<sup>1,2</sup>, 王晓娇<sup>4</sup>, 蔡立群<sup>1,2,3</sup>, 海龙<sup>1</sup>, 张仁陟<sup>1,2,3</sup>

(1. 甘肃农业大学资源与环境学院, 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学干旱生境作物学国家重点实验室, 兰州 730070; 3. 甘肃省节水农业工程技术研究中心, 兰州 730070; 4. 甘肃农业大学管理学院, 兰州 730070)

**摘要:** 磷素的大量输入, 将显著影响陆地生态系统的碳平衡和碳固存, 为探究陇中黄土高原旱作农田土壤呼吸及其组分动态变化特征与碳平衡对磷添加的响应, 采用完全随机区组设计, 设不施磷肥(CK)、低磷(P<sub>1</sub>)、中磷(P<sub>2</sub>)、高磷(P<sub>3</sub>)4个施磷水平, 测定春小麦生育期各处理土壤呼吸及其组分与环境因子, 计算土壤呼吸温度敏感性指数、净生态系统生产力与碳平衡。研究表明, 磷添加增加了土壤呼吸及其组分的CO<sub>2</sub>排放量。与CK处理相比, P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub>处理和P<sub>3</sub>处理土壤呼吸CO<sub>2</sub>累计排放量分别显著增加13.85%、24.86%和26.47% ( $P < 0.05$ ); 土壤异养呼吸显著提高了9.09%、9.4%和14.52% ( $P < 0.05$ ); 土壤自养呼吸分别提高了18.96%、39.98%和38.33% ( $P < 0.05$ )。土壤呼吸及其组分受到多因素的共同作用, 拟合分析结果表明, 土壤水分和温度分别可解释土壤呼吸及其组分速率变异的37.0%~49.7%和69.4%~76.8%。逐步回归和方差分解结果表明, 土壤呼吸的主要影响因素为0~5 cm土壤碱性磷酸酶和0~10 cm土壤有机碳; 异养呼吸的主要影响因素为0~5 cm土壤 $\beta$ -1,4-葡萄糖苷酶、0~5 cm土壤纤维素二糖水解酶和5~10 cm土壤碱性磷酸酶; 自养呼吸的主要影响因素为0~5 cm土壤碱性磷酸酶、0~5 cm土壤速效磷、0~5 cm土壤有机碳和5~10 cm土壤纤维素二糖水解酶。CK、P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub>处理和P<sub>3</sub>处理的净生态系统生产力均为正值, 其数值分别为2 640.10、3 412.91、3 579.83 kg·hm<sup>-2</sup>和3 790.74 kg·hm<sup>-2</sup>, 均表现为土壤碳的“汇”。因此, 在陇中黄土高原旱作农田生态系统管理中, 应合理地增施磷肥(建议施用115 kg·hm<sup>-2</sup>), 提高土壤固碳效率, 科学合理地构建环境保护与经济高效并重的现代化农业生产管理体系。

**关键词:** 磷添加; 土壤呼吸; 碳平衡; 土壤酶; 黄土高原

中图分类号: S154.1 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2023)03-0599-13 doi:10.11654/jaes.2022-0807

## Effects of phosphorus addition on soil respiration component characteristics and carbon balance in dry farmlands of the Loess Plateau, Longzhong, China

GAN Run<sup>1,2</sup>, QI Peng<sup>1,2,3\*</sup>, GUO Gaowen<sup>1,2</sup>, WANG Xiaojiao<sup>4</sup>, CAI Liqun<sup>1,2,3</sup>, HAI Long<sup>1</sup>, ZHANG Renzhi<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 2. State Key Laboratory of Aridland Crop Science, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 3. Gansu Engineering Research Center for Agriculture Water-Saving, Lanzhou 730070, China; 4. College of Management, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** The balance and sequestration of carbon in terrestrial ecosystems can be significantly affected by a large input of phosphorus. Here, we investigated dynamic changes in soil respiration and its components and the response of carbon balance to phosphorus addition in the dry farming areas of central Gansu Province. A completely randomized block design was used Dingxi city, with four levels of

收稿日期: 2022-08-10 录用日期: 2022-11-07

作者简介: 甘润(1997—), 男, 甘肃张掖人, 硕士研究生, 研究方向为土壤生态。E-mail: 1320230990@qq.com

\*通信作者: 齐鹏 E-mail: gsauqip@163.com

基金项目: 甘肃农业大学青年导师扶持基金项目(GAU-QDFC-2021-20); 甘肃省高校创新基金项目(2020B-135); 甘肃省自然科学基金项目(21JR7RA830)

Project supported: The Gansu Agricultural University of Young Mentor Foundation (GAU-QDFC-2021-20); The Project of Innovation in Higher Education of Gansu Province, China(2020B-135); The Natural Science Foundation of Gansu Province, China(21JR7RA830)

phosphorus application: no phosphorus (CK), low phosphorus ( $P_1$ ), medium phosphorus ( $P_2$ ), and high phosphorus ( $P_3$ ). Soil respiration, its components, and other environmental factors were measured in each treatment during the spring wheat growth period. The soil respiration temperature sensitivity index, net ecosystem productivity, and carbon balance were calculated. The results of the study showed that phosphorus addition increased the amount of  $CO_2$  emitted by soil respiration and its components. Compared with CK, the cumulative  $CO_2$  emissions of soil respiration increased significantly in the  $P_1$ ,  $P_2$ , and  $P_3$  treatments by 13.85%, 24.86% and 26.47%, respectively ( $P < 0.05$ ). Soil heterotrophic respiration increased significantly by 9.09%, 9.4%, and 14.52% ( $P < 0.05$ ), while autotrophic respiration increased by 18.96%, 39.98%, and 38.33%, respectively ( $P < 0.05$ ). Soil respiration and its components were affected by multiple factors, with fitting analysis showing that soil moisture and temperature accounted for 37.0%–49.7% and 69.4%–76.8% of the variation, respectively. Stepwise regression and variance decomposition showed that the main influences on soil respiration were alkaline phosphatase content in the 0–5 cm soil and 0–10 cm soil organic carbon layers. The main factors influencing soil heterotrophic respiration were 0–5 cm soil  $\beta$ -1, 4-glucosidase, 0–5 cm soil cellulose disaccharide hydrolase and 5–10 cm soil alkaline phosphatase. The main factors influencing soil autotrophic respiration were 0–5 cm soil alkaline phosphatase, 0–5 cm available phosphorus and 5–10 cm soil cellulose disaccharide hydrolase. All treatments showed a positive net ecosystem productivity, with values of 2 640.10  $kg \cdot hm^{-2}$ , 3 412.91  $kg \cdot hm^{-2}$ , 3 579.83  $kg \cdot hm^{-2}$ , and 3 790.74  $kg \cdot hm^{-2}$  for CK,  $P_1$ ,  $P_2$ , and  $P_3$  respectively. These values indicate that each treatment formed a ‘sink’ of soil carbon. Therefore, in the management of dry farmland ecosystems on the Loess Plateau of Longzhong, the application of phosphorus fertilizer should be suitably increased (115  $kg \cdot hm^{-2}$  is recommended) to improve soil carbon sequestration efficiency and to build a scientific and rational modern agricultural production management system that places equal emphasis on environmental protection and economic efficiency.

**Keywords:** phosphorus addition; soil respiration; carbon balance; soil enzyme; Loess Plateau

磷(P)被认为是植物生长和陆地生态系统最受限制的营养元素之一<sup>[1]</sup>。农田生态系统中的磷肥和自然生态系统中的大气磷沉降对植物生长和生物量生产、土壤碳储存和微生物碳等陆地碳循环过程有很大影响<sup>[2]</sup>。土壤是陆地生态系统中最大的有机碳库,是陆地植物碳储量的2~3倍,在全球碳循环中占据重要地位<sup>[3-5]</sup>。相关研究表明<sup>[6-7]</sup>,外源磷输入增大了土壤碳库的消耗,提高活性有机碳库和碳降解酶活性,推动土壤碳库由稳定状态转变为不稳定状态,加快碳库的周转速率,最终导致土壤碳损耗风险增加。而土壤呼吸( $R_s$ )作为土壤与大气 $CO_2$ 交换的重要途径,在驱动陆地碳循环和调节大气 $CO_2$ 浓度方面发挥着至关重要的作用<sup>[8-9]</sup>。土壤呼吸主要由土壤自养呼吸( $R_A$ )和土壤异养呼吸( $R_H$ )两部分组成<sup>[10]</sup>,相关研究表明, $R_A$ 和 $R_H$ 与土壤水热因子、耕作方式和养分添加等因素密切相关<sup>[11-13]</sup>,这些研究增加了本研究对驱动因素的认识,但是忽略了对酶活性、土壤有机碳和土壤磷素有效性这些关键因子的研究。

土壤呼吸是农田碳平衡研究的基础,常用净生态系统生产力( $NEP-C$ )来衡量<sup>[14]</sup>。但农田生态系统的碳平衡受到许多因素的影响<sup>[15-17]</sup>,如温度、水分、植被类型、土地利用类型和氮磷养分添加等。近年来,已有许多学者针对磷添加对土壤呼吸的影响机制与碳平衡做出了研究,但多集中于受磷限制较大的热带森林生态系统中<sup>[18-20]</sup>,对于农田生态系统土壤呼吸的研

究相对较少,且大多研究仍以土壤总呼吸为主,对土壤总呼吸以及异养呼吸和自养呼吸组分的观测较少,同时因其主导机制不同,试验结果也有很大差异,并没有得出较为一致的结论。

黄土高原是我国典型的雨养农业区和生态脆弱区,陇中黄土高原是甘肃省重要的生态安全屏障之一<sup>[15]</sup>。该区域植被覆盖度低、土壤保水保肥能力差、有机碳储存能力弱。为增加陇中黄土高原半旱区土壤固碳能力,探索磷添加对土壤呼吸及其组分的影响因素,本研究设不同施磷水平,采用静态箱-气相色谱仪法对陇中黄土高原春小麦农田土壤呼吸进行监测,探明磷添加下土壤呼吸及其组分的动态变化特征,查明土壤呼吸组分的影响因素,以为陇中黄土高原土壤固碳增“汇”和碳平衡评估提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验区位于甘肃省定西市李家堡镇甘肃农业大学旱作农业试验站(104°44'E, 35°28'N),该区位于陇中黄土高原半干旱丘陵沟壑区。试验区农田土壤为典型的黄绵土,质地均匀、土质绵软。平均海拔2 000 m,无霜期140 d,年均日照时数2 476.6 h,年均太阳辐射594.7  $kJ \cdot cm^{-2}$ ,年均气温6.4  $^{\circ}C$ ,大于等于0  $^{\circ}C$ 积温2 933.5  $^{\circ}C$ ,大于等于10  $^{\circ}C$ 积温2 239.1  $^{\circ}C$ ,属中温带半干旱区;多年平均降水400 mm,2021年春小麦

生育期内降水量 168.6 mm (图 1), 年蒸发量 1 531 mm, 80% 保证率的年降水量为 365 mm, 变异系数为 24.3%, 为典型的雨养农业区。试验区土壤基本理化性质: pH 8.45、有机碳  $8.32 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全氮  $0.86 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全磷  $0.82 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、全钾  $28.00 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、碱解氮  $51.10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有效磷  $21.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

## 1.2 试验设计

试验布设于 2017 年, 设不施磷肥 (CK)、低磷 ( $P_1$ ,  $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )、中磷 ( $P_2$ ,  $115 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ )、高磷 ( $P_3$ ,  $190 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ) 4 个施磷水平, 每个处理设 3 次重复, 共 12 个小区, 采用完全随机区组设计, 小区面积为  $27 \text{ m}^2$  ( $4.5 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ ), 播种行长 5 m, 留 1 m 不播种 (正常施肥, 用于测定土壤异养呼吸)。试验水平的设置考虑了当地常规施磷量并进行了增减。

磷肥为过磷酸钙 (含  $P_2O_5$  12%), 于播种前一次性施入。供试作物为春小麦 (定西 40 号), 每年 3 月中旬播种, 行距 20 cm, 播深 7 cm, 播种量  $187.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ; 为满足春小麦营养需求, 各小区均在播种前施纯氮  $115 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$  (尿素, 含 N 46%) 作为基肥。前茬作物收获后三耕两耨, 其他管理同大田。

## 1.3 测定项目与方法

试验于 2021 年 3 月至 8 月进行。收集土壤  $CO_2$  气体, 测算其排放通量和累计排放量, 采集土壤、植物地上和地下部分, 分别测定土壤指标 (理化性质和土壤酶活性)、地上和地下生物量。

### 1.3.1 $CO_2$ 气体采集与计算

土壤  $CO_2$  气体采用静态箱-气相色谱仪法进行测定。在小麦生育期内每隔 15 d 采集一次 (遇雨雪天气适当调整), 气体采集均在上午 9:00—11:00 内完成。取样装置由顶箱和底座构成, 顶箱高 35 cm, 直径 38

cm, 侧边设小型风扇口和取样口, 顶端设温度计口; 底座高 22 cm (17 cm 埋入地下, 地上部 5 cm), 地上部外径 41 cm, 内径 36 cm。

采样底座在春小麦播种后分别在种植区与未种植区内埋入, 生育期内不再移动, 种植区与未种植区连接处埋入 40 cm 深细网棉纱隔开根系。气体采集时在底座地上部内外径间隔内注水, 密封顶箱和底座间隙, 并在采集同时打开顶箱内小型风扇使气体充分混匀。在静态箱封闭时立刻开始记时, 分别在 0、10、20 min 用 100 mL 注射器采集  $CO_2$  气体, 分别注入 0.2 L 铝塑复合气袋中, 并在采集同时记录桶内温度后迅速带回实验室用安捷伦 (7890B) 气相色谱仪测定分析。

### 1.3.2 土壤温度 and 水分

在气体采集同时分层测定 0~5、5~10 cm 土壤温度 (直角地温计), 并在采样地周围用五点取样法, 分层采集 0~5、5~10 cm 土壤样品, 然后用烘干法 ( $105 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 测定土壤含水率。

### 1.3.3 土壤样品采集与分析

在春小麦收获后采用五点法分层采集 0~5、5~10 cm 土壤样品, 混匀挑出土壤中动植物残体后过 2 mm 筛, 一部分样品低温 ( $4 \text{ }^\circ\text{C}$ ) 贮藏, 用于测定土壤酶活性等指标, 剩余部分风干备用。

土壤有机碳 (SOC) 采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法测定<sup>[21]</sup>, 土壤有效磷 (AP) 含量采用  $NaHCO_3$  浸提, 钼锑抗比色法测定<sup>[21]</sup>。土壤碱性磷酸酶 (ALP) 采用磷酸苯二钠比色法测定<sup>[22]</sup>, 土壤多酚氧化酶、 $\beta$ -1, 4-葡萄糖苷酶 (BG) 和纤维素二糖水解酶 (CBH) 采用 96 微孔酶标板荧光分析法测定<sup>[23]</sup>。

### 1.3.4 籽粒产量

于春小麦成熟后, 每小区收获  $1 \text{ m}^2$ , 脱粒晒干后

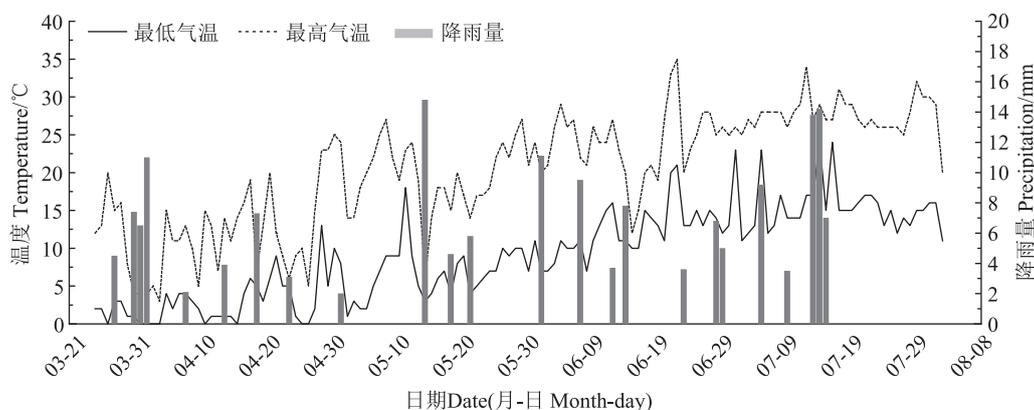


图 1 2021 年研究区小麦生育期气温和降雨量分布

Figure 1 Distribution of temperature and precipitation during the growth period of wheat in the study area in 2021

计产。

### 1.3.5 气体数据计算

CO<sub>2</sub>气体分析采用安捷伦(7890B)气相色谱仪。采用FID检测器,色谱柱为Porapak Q,载气为高纯N<sub>2</sub>。气体排放通量计算公式为<sup>[24]</sup>:

$$F = \frac{M_c}{22.4 \times \Delta t} \times H \times 273 \times \left( \frac{C_2}{T_2} - \frac{C_1}{T_1} \right) \quad (1)$$

式中: $F$ 为CO<sub>2</sub>排放通量,mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>; $H$ 为采样暗箱高度,m; $M_c$ 为CO<sub>2</sub>相对分子质量; $C_1$ 、 $C_2$ 分别为静态箱关闭时(0 min)和测定结束时(20 min)箱内气体的体积浓度,μmol·mol<sup>-1</sup>; $T_1$ 、 $T_2$ 分别为静态暗箱关闭和开启时暗箱内温度,K; $\Delta t$ 为第20分钟和第0分钟时间之差(h)。土壤呼吸累积排放量计算公式为:

$$M = \sum [(F_{N+1} + F_N) \times 0.5 \times (L_{N+1} - L_N) \times 24 \times 10^{-2}] \quad (2)$$

式中: $M$ 为测定时期内CO<sub>2</sub>气体累积排放量,kg·hm<sup>-2</sup>; $F$ 为CO<sub>2</sub>排放通量,mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>; $N$ 为采样次数; $L_{N+1} - L_N$ 为两次采样之间的间隔天数,d。

### 1.3.6 春小麦生育期碳平衡测算

采用净生态系统生产力(NEP-C)衡量生态系统碳平衡<sup>[15,25-26]</sup>,其计算公式如下:

$$NEP-C = NPP-C - R_H-C \quad (3)$$

式中: $NEP-C$ 表示生态系统碳平衡,kg·hm<sup>-2</sup>; $NPP-C$ 表示净初级生产力固碳量,kg·hm<sup>-2</sup>; $R_H-C$ 表示土壤异氧呼吸碳释放量,kg·hm<sup>-2</sup>。 $NEP-C > 0$ 表明土壤碳的吸收“汇”, $NEP-C < 0$ 表明土壤碳的排放“源”。

$$NPP-C = C_{ANPP} + C_{UNPP} + C_E \quad (4)$$

$$C_E = C_{UNPP} \times Y_E \quad (5)$$

式中: $C_{ANPP}$ 为地上部分生物量碳,kg·hm<sup>-2</sup>; $C_{UNPP}$ 为地下(根系)生物量碳,kg·hm<sup>-2</sup>; $C_E$ 为根际沉积碳,kg·hm<sup>-2</sup>。作物地上部各器官和根的碳含量一般取45%,即作物光合过程中合成1g有机质需要吸收0.45g C。 $Y_E$ 为换算系数,取0.65。

$$R_H-C = M_{RH} \times 12/44 \quad (6)$$

式中: $M_{RH}$ 为土壤异养呼吸累计CO<sub>2</sub>排放量,kg·hm<sup>-2</sup>。12/44为CO<sub>2</sub>中C相对分子质量换算系数,下同。

作物碳排放效率(CEE)<sup>[27]</sup>,计算公式如下:

$$CEE = M_{RS} / Y \times 12/44 \quad (7)$$

式中: $M_{RS}$ 为土壤呼吸累计CO<sub>2</sub>排放量,kg·hm<sup>-2</sup>; $CEE$ 为碳排放效率,kg·kg<sup>-1</sup>; $Y$ 为作物籽粒产量,kg·hm<sup>-2</sup>。

## 1.4 数据处理

检验数据的残差正态性和方差齐性,必要时对数据进行非参数检验或对数转换。首先,采用重复测量

方差分析(Repeated Measures ANOVA)检验磷添加和测定时间对土壤呼吸及其组分的影响;其次,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)的最小显著差异法(LSD)检验磷添加下土壤呼吸速率、环境因子、生物量、净初级生产力和净生态系统生产力的差异;最后用一元二次模型、指数模型、逐步回归和方差分解分析土壤CO<sub>2</sub>排放量和影响因素的相关性。其中,方差分解<sup>[28]</sup>中使用R软件MuMIn包中的函数‘dredge’,来选择基于修正的Akaike信息准则(AICc, ΔAICc < 2)作为模型保留的依据,当筛选结果为多个模型时,基于AICc权重进行模型平均。所有的预测因子和反应变量在分析之前消除共线性和标准化(Z-score),通过比较类别因子的参数估计值与模型中所有参数估计值评估所考虑的预测因子的相对重要性。所有数据统计与分析均用SPSS 25.0和R软件完成,绘图用Origin 2021软件完成。

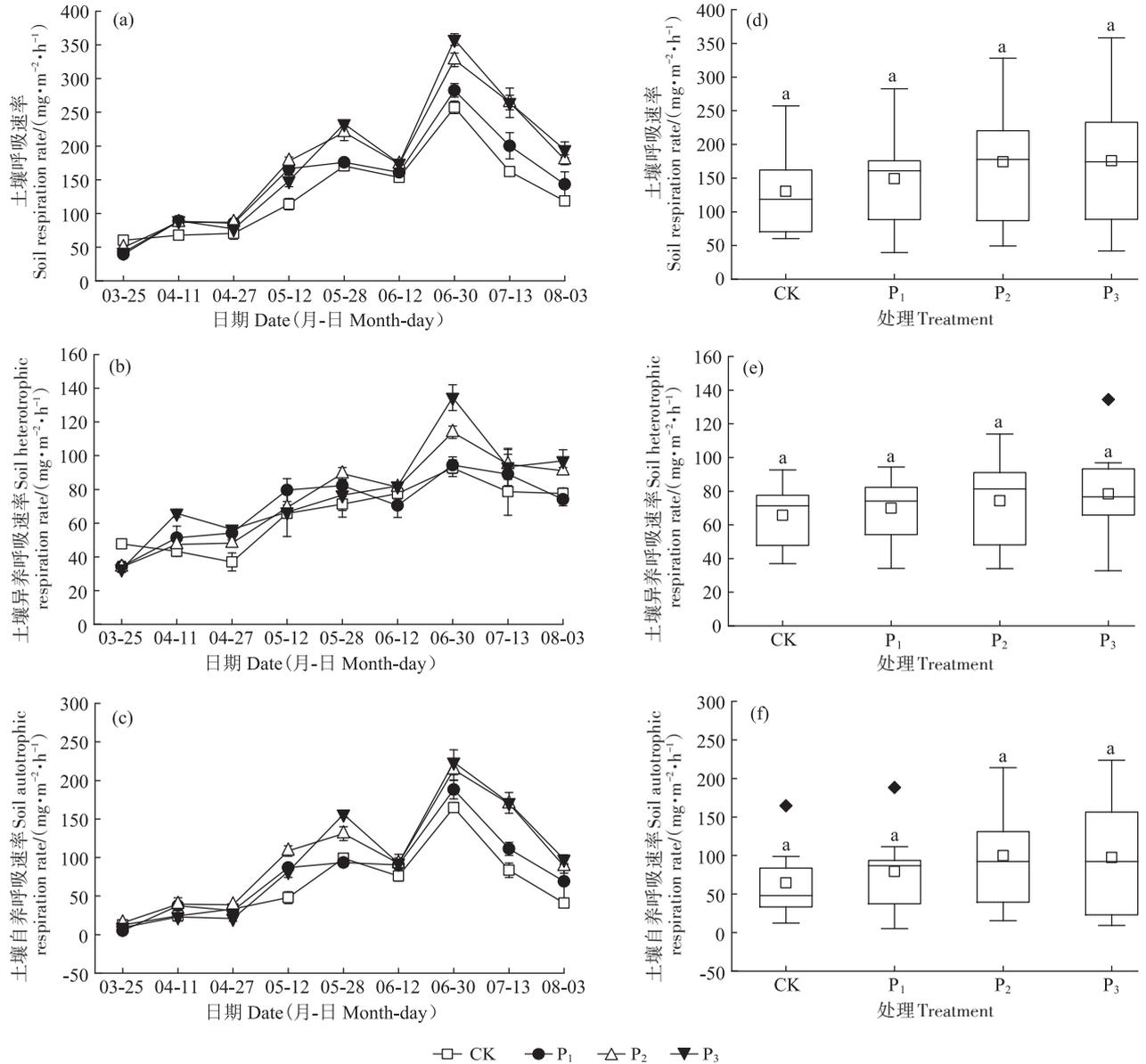
## 2 结果与分析

### 2.1 磷添加对春小麦田呼吸速率及其组分的影响

土壤总呼吸速率(R<sub>s</sub>)和土壤自养呼吸速率(R<sub>A</sub>)随时间呈双峰趋势(图2a至图2c),土壤异养呼吸速率随时间呈单峰趋势(图2b)。生育期内,所有处理R<sub>s</sub>在39.41~358.02 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>范围内波动变化,均在春小麦拔节期(5月28日)出现第一个排放峰,相较CK处理(170.22 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>)P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub>和P<sub>3</sub>处理分别增加3.33%、29.36%和36.82%。在开花期(6月30日)达到最大,CK处理最大值为257.28 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,相较于CK处理,P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub>处理和P<sub>3</sub>处理分别增加9.83%、27.44%和39.15%。

R<sub>A</sub>在5.17~223.55 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>范围内波动变化,均在拔节期出现第一个排放峰,相较CK处理(98.89 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>),P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub>处理和P<sub>3</sub>处理分别降低5.31%、增加32.38%和57.95%。在开花期达到最大,CK处理最大值为164.64 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,相较于CK处理P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub>处理和P<sub>3</sub>处理分别增加14.29%、29.99%和35.79%。R<sub>H</sub>变化范围为32.69~134.46 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,均在开花期出现峰值,相较于CK处理(92.45 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>),P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub>处理和P<sub>3</sub>处理分别增加1.90%、22.90%和45.14%。

非参数检验结果表明,相较于CK处理,磷添加处理土壤呼吸速率、土壤异养呼吸速率和土壤自养呼吸速率均提高,但各处理间均无显著差异(图2d至图2f)。重复测量方差分析表明,磷添加和时间显著影响土壤呼吸及其组分( $P < 0.001$ ,表1),磷添加和时间的交互作用也显著影响了土壤呼吸及其组分( $P <$



不同小写字母表示处理间差异显著( $P < 0.05$ )。下同。

Different lowercase letters indicate significant differences among treatments ( $P < 0.05$ ). The same below.

图2 磷添加下土壤呼吸速率动态变化

Figure 2 Dynamic changes of soil respiration rate under different phosphorus treatments

0.001, 表1)。

## 2.2 磷添加对土壤呼吸CO<sub>2</sub>累积排放量和碳平衡的影响

磷添加显著提高了土壤呼吸、土壤异养呼吸与土壤自养呼吸CO<sub>2</sub>累积排放量(图3a,  $P < 0.05$ )。土壤总呼吸与土壤异养呼吸CO<sub>2</sub>累积排放量均随施磷量的增加而提升。土壤自养呼吸CO<sub>2</sub>累积排放量则表现为 $P_2 > P_3 > P_1 > CK$ , 随施磷量的增加呈现先增加后减少的趋势。从小麦生育期内呼吸组分的贡献来看(图3b), 土壤自养呼吸CO<sub>2</sub>累积排放量对土壤呼吸CO<sub>2</sub>累

表1 土壤呼吸速率重复测量方差分析( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )

Table 1 Results of repeated measures ANOVA of soil respiration rate ( $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ )

项目 Item	土壤呼吸速率		异养呼吸速率		自养呼吸速率	
	F	P	F	P	F	P
时间t	924.882	<0.001	161.689	<0.001	567.817	<0.001
磷添加P	189.609	<0.001	15.915	<0.001	155.586	<0.001
时间×磷添加t×P	16.402	<0.001	6.355	<0.001	12.721	<0.001

计排放量的贡献表现为 $P_2 > P_3 > P_1 > CK$ , 其贡献量依次

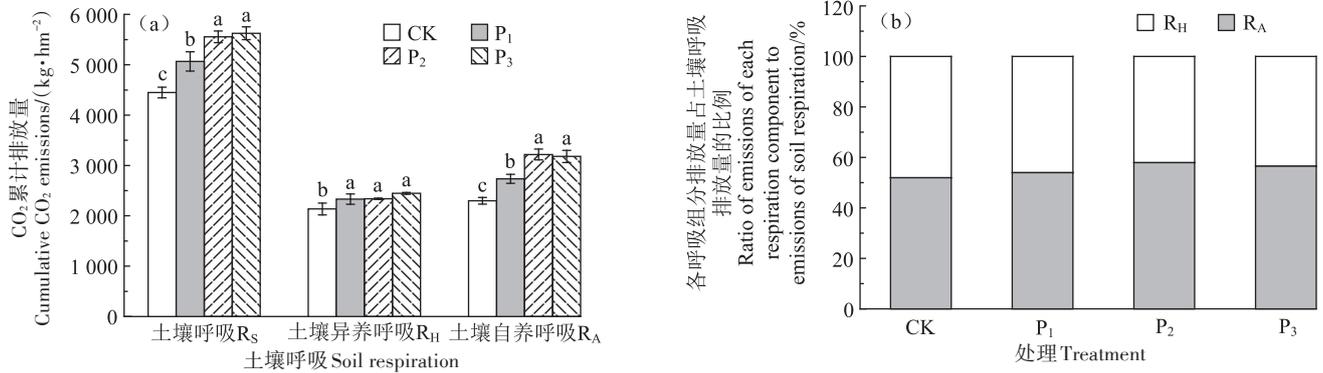


图3 磷添加下土壤呼吸及其组分 CO<sub>2</sub> 累计排放量(a)与各呼吸组分排放量占土壤呼吸排放量的比例(b)

Figure 3 Cumulative CO<sub>2</sub> emissions of soil respiration and its components under phosphorus addition treatments(a) and the ratio of the each respiration component to the soil respiration(b)

为 57.93%、56.51%、53.99% 和 51.98%，施磷增加了土壤自养呼吸在土壤总呼吸中的贡献度。

磷添加下农田系统碳平衡测算结果(表2)表明,陇中黄土高原春小麦农田生育期内表现为土壤的碳“汇”。各处理碳排放效率排序为 P<sub>1</sub>>P<sub>2</sub>>P<sub>3</sub>>CK(P<0.05),分别为 1.78、1.67、1.58 kg·kg<sup>-1</sup>和 1.53 kg·kg<sup>-1</sup>。净初级生产力固碳量(NPP-C)表现为 P<sub>3</sub>>P<sub>2</sub>>P<sub>1</sub>>CK,分别为 4 458.00、4 217.25、4 048.50 kg·hm<sup>-2</sup>和 3 222.75 kg·hm<sup>-2</sup>。净生态系统生产力固碳(NEP-C)表现为 P<sub>3</sub>>P<sub>2</sub>>P<sub>1</sub>>CK(P<0.05),分别为 3 790.74、3 579.83、3 412.91 kg·hm<sup>-2</sup>和 2 640.10 kg·hm<sup>-2</sup>。以上均为正值,说明为土壤碳“汇”。且 NEP-C 随磷添加量的增加而增加,表明磷添加可以增加土壤碳汇功能。

### 2.3 环境因子

#### 2.3.1 水热因子

春小麦生育期内各处理土壤含水量(体积分数)变化趋势较为一致,呈单峰型变化特征(图4)。种植作物与未种植作物 0~5 cm 土壤含水量分别在 4.54%~17.55% 和 5.51%~16.93% 范围内波动,5~10 cm 土壤含水量分别在 8.13%~17.43% 和 8.11%~17.59% 范围内波动。土壤温度呈双峰变化趋势(图5),种植作物

与未种植作物 0~5 cm 土壤温度变化范围为 5~30.1 °C 和 5~31.8 °C,5~10 cm 土壤温度变化范围为 6.1~27.6 °C 和 6~28.6 °C。

#### 2.3.2 土壤因子

磷添加下 0~10 cm 土壤性质如表3所示,种植作物区,除 0~5 cm 土壤多酚氧化酶(POD)外,其他因子组间均呈现显著差异(P<0.05)。未种植作物区,除 0~5 cm 土壤多酚氧化酶(POD)与有机碳(SOC)外,其他因子组间均呈现显著差异(P<0.05)。种植作物区除土壤有效磷(AP)含量低于未种植作物区外,其他因子含量均高于未种植作物区。

### 2.4 土壤呼吸速率及其组分的影响因素

对 0~10 cm 土壤水分(SWC)和温度(T<sub>s</sub>)与土壤呼吸及其组分进行回归分析(表4),结果显示,SWC 可解释 R<sub>s</sub> 变化量的 38.8%~41.3%,R<sub>H</sub> 变化量的 45.4%~49.7%,R<sub>A</sub> 变化量的 37.0%~38.0%。T<sub>s</sub> 可解释 R<sub>s</sub> 变化量的 75.1%~76.8%,R<sub>H</sub> 变化量的 69.4%~75.3%,R<sub>A</sub> 变化量的 72.0%~72.3%。这说明 SWC 和 T<sub>s</sub> 是土壤呼吸的主要影响因素。从不同土层来看,0~5 cm 土壤水分可解释土壤呼吸及其组分变化量的 37.0%~45.4%,5~10 cm 土壤水分可解释土壤呼吸及其组分变化量

表2 磷添加下农田系统碳平衡

Table 2 Carbon balance in crop seasons under phosphorus addition

处理 Treatment	地上生物量碳 C <sub>ANPP</sub> /(kg·hm <sup>-2</sup> )	地下生物量碳 C <sub>UNPP</sub> /(kg·hm <sup>-2</sup> )	籽粒产量 C <sub>l</sub> /(kg·hm <sup>-2</sup> )	碳排放效率 CEE/(kg·kg <sup>-1</sup> )	土壤异养呼吸释放碳 R <sub>H</sub> -C/(kg·hm <sup>-2</sup> )	净初级生产力固碳量 NPP-C/(kg·hm <sup>-2</sup> )	净生态系统生产力固碳 NEP-C/(kg·hm <sup>-2</sup> )
CK	2 010±68.73c	735±68.73b	1 866.66±57.73b	1.53±0.08b	582.64±31.97b	3 222.75±73.05d	2 640.10±99.13d
P <sub>1</sub>	2 415±93.67b	990±77.94a	2 466.66±152.75a	1.78±0.11a	635.58±27.87a	4 048.50±92.77c	3 412.91±74.41c
P <sub>2</sub>	2 460±93.67b	1 065±25.98a	2 533.33±208.16a	1.67±0.11ab	637.41±3.59a	4 217.25±53.07b	3 579.83±49.63b
P <sub>3</sub>	2 775±93.67a	1 020±51.96a	2 433.33±57.73a	1.58±0.01b	667.25±5.13a	4 458.00±70.62a	3 790.74±74.67a

注:不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences among treatments(P<0.05). The same below.

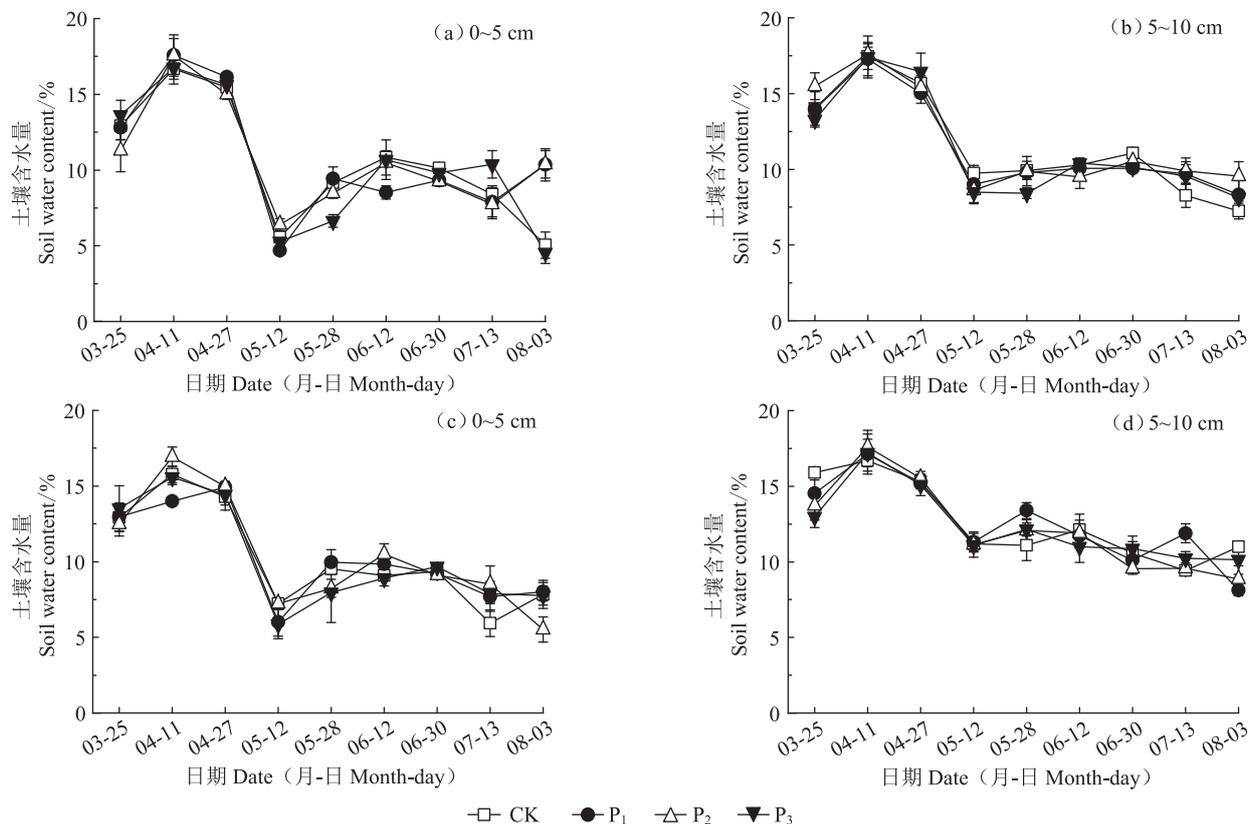


图4 磷添加下0~10 cm土壤含水量(a~b. 种植作物;c~d. 未种植作物)

Figure 4 Soil water content in 0-10 cm soil layer under the phosphorus treatments(a-b. Planting crops;c-d. Unplanting crops)

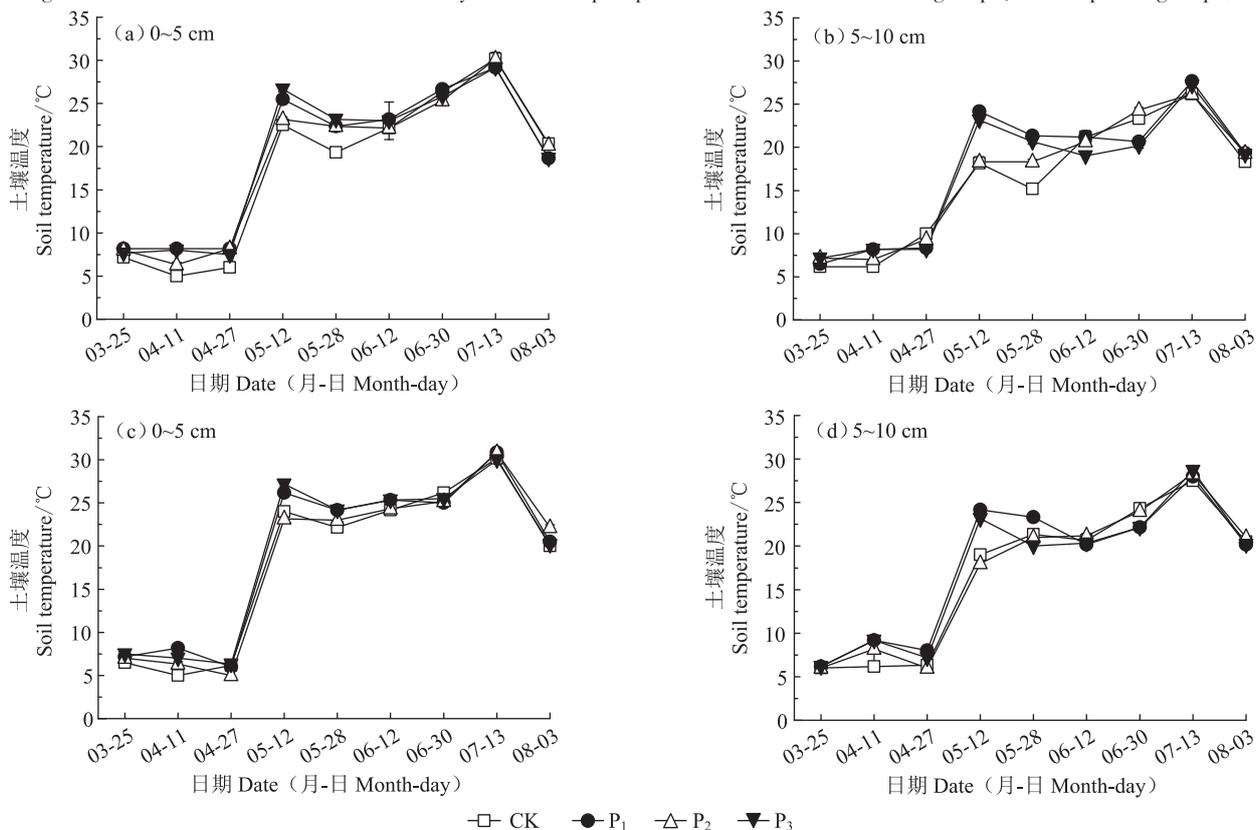


图5 磷添加下0~10 cm土壤温度(a~b. 种植作物;c~d. 未种植作物)

Figure 5 Soil temperature in 0-10 cm soil layer under the phosphorus treatments(a-b. Planting crops;c-d. Unplanting crops)

表3 磷添加下0~10 cm土壤性质

Table 3 Soil properties in 0-10 cm soil layer under the phosphorus treatments

耕地利用方式 Arable land use pattern	土层 Soil layer/ cm	处理 Treatment	多酚氧化酶 POD/ (mg·g <sup>-1</sup> ·2h <sup>-1</sup> )	β-1,4-葡萄糖 苷酶BG/ (nmol·g <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )	纤维素二糖水解酶 CBH/ (nmol·g <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )	碱性磷酸酶 ALP/(mg·g <sup>-1</sup> )	土壤有机碳 SOC/(g·kg <sup>-1</sup> )	土壤速效磷 AP/(mg·kg <sup>-1</sup> )
种植作物 Planting crops	0~5	CK	0.65±0.03a	11.87±0.82c	5.97±0.58b	3.83±0.08d	8.32±0.61c	5.39±0.51c
		P <sub>1</sub>	0.68±0.11a	13.27±0.78b	6.43±0.12ab	4.20±0.13c	9.39±0.59b	10.71±0.10b
		P <sub>2</sub>	0.76±0.04a	14.59±0.23ab	7.15±0.61a	5.56±0.29a	10.04±0.58ab	13.65±3.02b
	5~10	CK	0.70±0.10a	15.25±0.85a	7.19±0.52a	4.82±0.21b	10.99±0.27a	20.25±0.72a
		P <sub>1</sub>	0.68±0.03b	12.51±0.39b	5.15±0.16b	3.15±0.12b	7.80±0.46c	5.25±0.31d
		P <sub>2</sub>	0.81±0.02a	13.63±0.45b	5.51±0.23b	3.59±0.35b	8.20±0.26c	6.70±0.27c
未种作物 Unplanting crops	0~5	P <sub>2</sub>	0.63±0.01b	15.16±0.65a	6.15±0.23a	4.49±0.35a	10.47±1.16b	8.15±0.64b
		P <sub>3</sub>	0.63±0.05b	15.03±0.86a	6.33±0.17a	4.43±0.29a	12.85±0.70a	14.82±0.63a
		CK	0.60±0.05a	9.58±0.30b	4.05±0.59b	3.03±0.30b	7.31±0.94a	7.18±0.88c
	5~10	P <sub>1</sub>	0.64±0.02a	10.48±1.40b	4.35±0.15b	4.43±0.53a	7.62±0.28a	13.36±1.47b
		P <sub>2</sub>	0.67±0.06a	12.21±0.37a	4.65±0.31b	4.44±0.17a	7.76±1.14a	18.41±2.46a
		P <sub>3</sub>	0.58±0.04a	10.00±0.44b	5.86±0.17a	4.48±0.32a	8.23±0.13a	20.33±2.76a
	5~10	CK	0.59±0.04a	9.24±0.54b	3.38±0.14c	4.12±0.16c	7.58±0.17b	4.42±0.31c
		P <sub>1</sub>	0.61±0.03a	9.23±1.50b	3.48±0.19c	4.84±0.11b	7.70±0.35b	8.36±0.55b
		P <sub>2</sub>	0.59±0.02a	11.67±1.19a	4.33±0.34b	5.59±0.31a	7.89±0.15b	17.58±0.55a
		P <sub>3</sub>	0.51±0.04b	10.39±0.38ab	4.99±0.35a	4.53±0.24bc	9.05±0.20a	18.15±0.80a

表4 磷添加下土壤呼吸与不同土层土壤水分和土壤温度的回归方程

Table 4 Regression equations of soil respiration with soil moisture and soil temperature of different soil layers under phosphorus addition

项目 Item	土层 Soil layer/cm	土壤含水量 Soil water content			土壤温度 Soil temperature			
		回归方程	R <sup>2</sup>	P	回归方程	R <sup>2</sup>	P	Q <sub>10</sub>
土壤呼吸 R <sub>s</sub>	0~5	y=-1.929x <sup>2</sup> +31.468x+67.021	0.388	<0.001	y=44.881e <sup>0.0617x</sup>	0.768	<0.001	1.84
	5~10	y=-1.643x <sup>2</sup> +25.965x+93.121	0.413	<0.001	y=41.300e <sup>0.0717x</sup>	0.751	<0.001	2.03
土壤异养呼吸 R <sub>h</sub>	0~5	y=-0.466x <sup>2</sup> +5.641x+68.038	0.454	<0.001	y=37.478e <sup>0.0327x</sup>	0.694	<0.001	1.37
	5~10	y=0.264x <sup>2</sup> -13.237x+194.080	0.497	<0.001	y=35.026e <sup>0.0397x</sup>	0.753	<0.001	1.48
土壤自养呼吸 R <sub>a</sub>	0~5	y=-1.509x <sup>2</sup> +25.620x+4.021	0.370	<0.001	y=11.060e <sup>0.0947x</sup>	0.720	<0.001	2.56
	5~10	y=-1.518x <sup>2</sup> +27.621x-16.034	0.380	<0.001	y=9.493e <sup>0.1127x</sup>	0.723	<0.001	3.06

的38.0%~49.7%，说明5~10 cm土壤水分对土壤呼吸的影响大于0~5 cm土壤水分。温度敏感性(Q<sub>10</sub>)可以反映T<sub>s</sub>对土壤呼吸速率的影响大小。从不同土层来看，0~5 cm的Q<sub>10</sub>变化范围为1.37~2.56，5~10 cm的Q<sub>10</sub>变化范围为1.48~3.06，各组分Q<sub>10</sub>均表现为0~5 cm<5~10 cm的规律，说明土壤温度对土壤呼吸的影响随土层的加深而变大。从不同呼吸组分来看，R<sub>s</sub>、R<sub>h</sub>和R<sub>a</sub>的Q<sub>10</sub>变化范围分别为1.84~2.03、1.37~1.48和2.56~3.06，表现为R<sub>a</sub>>R<sub>s</sub>>R<sub>h</sub>。

利用逐步回归分析法建立0~10 cm土壤因子与土壤呼吸及其组分CO<sub>2</sub>排放量的最优回归模型(表5)，结果显示，R<sub>s</sub>的主要影响因子是0~5 cm土壤碱性磷酸酶和0~5 cm土壤有机碳；R<sub>h</sub>的主要影响因子是0~5 cm土壤β-1,4-葡萄糖苷酶和0~5 cm土壤纤维

素二糖水解酶；R<sub>a</sub>的主要影响因子是0~5 cm土壤碱性磷酸酶和5~10 cm土壤纤维素二糖水解酶。同时建立方差分解模型(图6)，结果显示全因子模型共解释了R<sub>s</sub>变异的61.00%(调整后R<sup>2</sup>，下同)，化学因子和土壤酶分别占解释变异的33.95%和66.05%，其中显著性因子是0~5 cm土壤碱性磷酸酶、0~5 cm土壤有机碳和5~10 cm土壤有机碳(P<0.05)。全因子模型共解释了R<sub>h</sub>变异的55.00%，化学因子和土壤酶分别占解释变异的29.99%和70.01%，其中显著性因子是0~5 cm土壤β-1,4-葡萄糖苷酶、0~5 cm土壤纤维素二糖水解酶和5~10 cm土壤碱性磷酸酶。全因子模型共解释了R<sub>a</sub>变异的55.00%，化学因子和土壤酶分别占解释变异的35.42%和64.53%，其中显著性因子是0~5 cm土壤有效磷、0~5 cm土壤有机碳、0~5 cm土

表5 0~10 cm土壤因子与CO<sub>2</sub>排放量的逐步回归分析Table 5 Multiple stepwise liner analysis between soil factors of 0~10 cm and CO<sub>2</sub> emissions

项目 Item	最优回归模型 Optimal regression model	R <sup>2</sup>	P
土壤呼吸	$Y_{R_s}=280.755X_7+297.638X_9+995.159$	0.917	<0.001
土壤异养呼吸	$Y_{R_h}=40.818X_3+139.282X_5+1\ 222.072$	0.775	0.001
土壤自养呼吸	$Y_{R_a}=263.064X_6+393.923X_7-635.630$	0.857	<0.001

注:Y<sub>R<sub>s</sub></sub>、Y<sub>R<sub>h</sub></sub>、Y<sub>R<sub>a</sub></sub>分别是土壤呼吸、土壤异养呼吸、土壤自养呼吸CO<sub>2</sub>累计排放量;X<sub>3</sub>、X<sub>5</sub>、X<sub>6</sub>、X<sub>7</sub>、X<sub>9</sub>分别是0~5 cm β-1,4-葡萄糖苷酶、0~5 cm纤维素二糖水解酶、5~10 cm纤维素二糖水解酶、0~5 cm碱性磷酸酶、0~5 cm土壤有机碳。

Note: Y<sub>R<sub>s</sub></sub>, Y<sub>R<sub>h</sub></sub> and Y<sub>R<sub>a</sub></sub> are cumulative CO<sub>2</sub> emissions from soil respiration, soil heterotrophic respiration and soil autotrophic respiration respectively; X<sub>3</sub>, X<sub>5</sub>, X<sub>6</sub>, X<sub>7</sub>, X<sub>9</sub> are 0~5 cm β-1,4-glucosidase, 0~5 cm cellulose disaccharide hydrolase, 5~10 cm cellulose disaccharide hydrolase, 0~5 cm alkaline phosphatase, 0~5 cm soil organic carbon.

壤碱性磷酸酶和5~10 cm土壤纤维素二糖水解酶。这说明土壤呼吸是多种因素共同作用的结果,其主导因素也不尽相同。

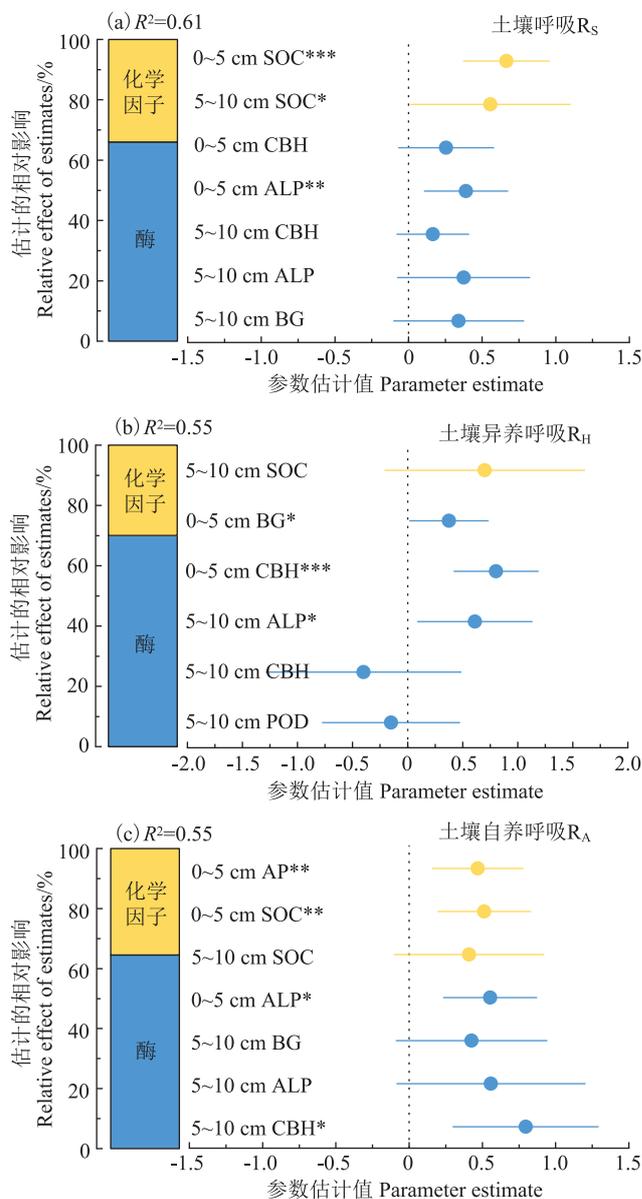
### 3 讨论

#### 3.1 磷添加对土壤呼吸速率及其组分的影响

春小麦整个生育期,R<sub>s</sub>和R<sub>A</sub>呈现双峰排放趋势。生长初期土壤呼吸保持在较低水平,随生育期推进,气温升高,呼吸速率逐渐提升。第一次排放峰出现在春小麦拔节期(5月28日),此时期为春小麦营养生长旺盛时期,春小麦根系活性增加,故R<sub>A</sub>增大。第二次排放峰出现在春小麦开花期(6月30日),此时期春小麦生殖生长旺盛,光合作用较强,有机碳产物增加,为保证光合作用的顺利进行,作物根系增加光合作用底物的合成,从而使R<sub>s</sub>、R<sub>A</sub>保持较高的水平<sup>[29]</sup>。而6月12日处于小麦孕穗期,此时期为春小麦营养生长到生殖生长过渡时期,大量的碳为生殖生长中物质的合成与转运提供碳源和能量;该时期小麦根系活性也在逐渐降低,根系分泌物含量降低,因此降低了根际微生物活性、土壤酶的激发效应和活性,从而降低了土壤呼吸和土壤自养呼吸速率<sup>[30]</sup>。R<sub>h</sub>随生育期温度的升高逐步升高,仅P<sub>2</sub>、P<sub>3</sub>处理在春小麦开花期出现较明显峰值,可能因为磷肥施入土壤后极易被固定,肥效具有一定的滞后性,在生育期后期逐渐被释放<sup>[31]</sup>。且大量的磷素投入使微生物群落和功能发生改变,土壤酶活性增加<sup>[32]</sup>,因此相较CK处理与P<sub>1</sub>处理,P<sub>2</sub>处理和P<sub>3</sub>处理R<sub>h</sub>较高。

#### 3.2 磷添加下环境因子对土壤呼吸及其组分的影响

关于磷添加对于土壤呼吸的影响,国内外已进行了大量研究,结果有增加、降低和无显著影响<sup>[33-35]</sup>。



模型预测因子的平均参数估计值(标准化回归系数)、95%置信区间和各因子的相对重要性,以解释方差的百分比表示。调整后的平均模型的R<sup>2</sup>和P值为:\*P<0.05;\*\*P<0.01;\*\*\*P<0.001

Average parameter estimates (standardized regression coefficients) of model predictors, associated 95% confidence intervals and relative importance of each factor, expressed as the percentage of explained variance. The adjusted R<sup>2</sup> of the averaged model and the P values of each predictor are given as: \*P<0.05; \*\*P<0.01; \*\*\*P<0.001

图6 0~10 cm土壤因子对土壤呼吸的影响

Figure 6 Effects of 0-10 cm soil factors on soil respiration

本研究表明,磷添加显著提高土壤呼吸及其组分CO<sub>2</sub>累计排放量(P<0.05)。磷添加对于土壤CO<sub>2</sub>累计排放的影响主要取决于R<sub>h</sub>和R<sub>A</sub>对磷添加的积极响应。而土壤呼吸是个极其复杂的过程,受到众多生物因子、非生物因子和人为因子的影响<sup>[36]</sup>。土壤温度、水分和酶可以较好地解释土壤呼吸速率变异<sup>[37-38]</sup>。本

研究采用一元二次模型和指数模型分别对土壤水分和土壤温度进行拟合。结果表明,土壤呼吸及其组分都与0~10 cm土壤水分和温度呈显著正相关关系。从土壤水分来看,5~10 cm比0~5 cm有更好的解释度,土壤异养呼吸比土壤呼吸和土壤自养呼吸有更好的解释度。这可能是因为0~5 cm土壤水分更易被蒸发流失,土壤含水量低于5~10 cm,土壤异养呼吸对水分含量更为敏感,适宜的土壤含水量可以为土壤微生物和动物提供更好的生存环境,使之拥有较强的呼吸。从土壤温度来看,本研究中土壤自养呼吸的 $Q_{10}$ 最大,说明土壤温度主要通过影响作物根系及根源微生物的活性来调节土壤总呼吸的变化。前人研究结果表明,农田生态系统土壤呼吸 $Q_{10}$ 在1.28~4.75的范围内波动<sup>[39]</sup>,与本试验结果一致,并且 $Q_{10}$ 随着土层的加深而增大,这可能是因为表层温度易受到太阳辐射以及大气温度变化的影响,而下层土壤温度受到的影响相较表层更小,因此深层土壤温度轻微的改变就能引起土壤呼吸的强烈变化。

通过逐步回归和方差分解发现, $R_s$ 主要受到0~5 cm土壤碱性磷酸酶和0~10 cm土壤有机碳的影响。这可能是因为磷添加后直接提高了土壤有效磷含量,而0~5 cm土壤中的碱性磷酸酶与土壤有效磷含量呈正相关关系,进一步导致根系新陈代谢加快,从而增加了土壤呼吸;而土壤中有有机碳含量的增加使活性碳组分含量上升,土壤中活性碳组分与土壤呼吸呈极显著正相关关系<sup>[40]</sup>,同时土壤有机碳含量的上升为土壤中的动物和微生物提供了更多的“碳源”,从而增加了土壤呼吸;而由于土壤中C、N、P紧密耦合<sup>[41]</sup>,土壤中0~5 cm碱性磷酸酶的增加使土壤中磷酸盐含量升高,与土壤有机碳竞争活性位点,从而间接影响土壤呼吸<sup>[42]</sup>。

$R_H$ 主要受到0~5 cm土壤 $\beta$ -1,4-葡萄糖苷酶、0~5 cm土壤纤维素二糖水解酶和5~10 cm土壤碱性磷酸酶的影响。这可能是因为磷添加使0~5 cm土壤 $\beta$ -1,4-葡萄糖苷酶和0~5 cm土壤纤维素二糖水解酶的活性显著增加,使碳降解微生物数量和呼吸保持较高水平<sup>[43]</sup>,同时使土壤有机碳含量上升,进而使异养呼吸 $CO_2$ 累计排放量增加;5~10 cm土壤碱性磷酸酶含量影响 $R_H$ 可能是因为碱性磷酸酶含量的上升,增加了5~10 cm土壤中的磷素含量,为下层微生物提供更多生命活动所需的底物,提高了微生物数量以及活性<sup>[44]</sup>。

$R_A$ 主要受到0~5 cm土壤碱性磷酸酶、0~5 cm土壤有效磷、0~5 cm土壤有机碳和5~10 cm土壤纤维素

二糖水解酶的影响。磷添加后0~5 cm土壤碱性磷酸酶和0~5 cm土壤有效磷含量显著增加,大量的磷素被作物吸收利用,增加了作物根系生物量和根系活性,从而增加了根系呼吸。根系生物量和活性的大量增加,增加了根系分泌物,间接增加了激发效应和根源微生物呼吸。而5~10 cm土壤中春小麦根系含量较多,根际沉积碳较多,同时根系的存在增加了土壤孔隙度,为根际分解纤维素微生物提供了更好的生存环境,从而影响自养呼吸。同时磷添加对土壤自养呼吸 $CO_2$ 累计排放量的影响呈现先增加后减少的趋势,这可能是因为磷添加增加了植物地下生物量从而使呼吸增加,而低、中磷添加土壤中的磷有效性已达到一定水平,高磷添加影响了植物光合产物向植物根系的分配<sup>[45]</sup>;而由于氮磷具有很强的耦合关系,高磷处理改变了土壤N/P,引起植物的氮限制<sup>[46-47]</sup>,刺激植物将更多的光合产物向地下部分配,进而影响植物根系呼吸。

土壤自养呼吸对土壤总呼吸的贡献在不同的生态系统中具有较大的差别<sup>[48]</sup>,在农田生态系统的研究中,相关研究表明小麦农田土壤自养呼吸对土壤总呼吸的贡献率为30%~41%<sup>[49]</sup>,而本研究土壤自养呼吸对土壤总呼吸的贡献率为51.98%~57.93%,高于上述研究,其原因可能是磷添加增加了春小麦地下生物量,从而增加了土壤自养呼吸;其次本研究在陇中黄土高原半干旱雨养区进行,土壤含水量、肥力等较低,而土壤水分和土壤碳对土壤异养呼吸有较强的解释度<sup>[4]</sup>,因此本研究区中土壤异养呼吸强度相较其他区域占比较低。

### 3.3 磷添加对土壤碳汇强度的影响

近年来,净生态系统生产力固碳( $NEP-C$ )被多数学者用来评价农田生态系统碳平衡,而施用化肥也会增加土壤碳汇<sup>[50-51]</sup>。本试验结果表明,各处理在春小麦生育期内均表现为土壤碳的“汇”,说明在春小麦生长中土壤异养呼吸所释放的 $CO_2$ 低于春小麦通过光合作用所固定的 $CO_2$ ,与陈邵民等<sup>[52]</sup>的研究结果一致。且 $NEP-C$ 随磷添加的增加而增加,主要因为磷添加大幅增加了春小麦地上、地下生物量,其次是磷添加增加了土壤微生物活性,从而增加根际沉积碳。因此磷添加后土壤 $CO_2$ 排放量也显著增加,但其 $NEP-C$ 也较高。同时,磷添加增加了土壤中碳降解酶活性( $\beta$ -1,4-葡萄糖苷酶和纤维素二糖水解酶),这对土壤碳汇也有积极的正效应<sup>[53]</sup>。因此,在农田生产过程中,可合理地施用化肥,高效经济的实现“增汇减排”。

## 4 结论

(1)磷添加后各处理土壤呼吸及其组分CO<sub>2</sub>排放量变化基本一致,均在开花期达到最大。且磷添加显著增加了土壤呼吸CO<sub>2</sub>累计排放量,其中高磷处理土壤呼吸和土壤异养呼吸CO<sub>2</sub>累计排放量最大,中磷处理土壤自养呼吸CO<sub>2</sub>累计排放量最大。

(2)土壤呼吸受到土壤温度、土壤水分和土壤酶等环境因子的共同作用。其中土壤β-1,4-葡萄糖苷酶、土壤碱性磷酸酶、土壤纤维素二糖水解酶是自养呼吸和异养呼吸的共同影响因子。

(3)各处理净生态系统生产力均为正值,表现为土壤碳的吸收“汇”,且磷添加的固碳增汇效果显著。

### 参考文献:

- [1] VITOUSEK P M, PORDER S, HOULTON B Z, et al. Terrestrial phosphorus limitation: Mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions[J]. *Ecological Applications*, 2010, 20(1):5-15.
- [2] YUE K, FORNARA D A, YANG W, et al. Influence of multiple global change drivers on terrestrial carbon storage: Additive effects are common[J]. *Ecology Letters*, 2017, 20(5):663-672.
- [3] 肖春旺, 杨帆, 柳隽瑶, 等. 陆地生态系统地下碳输入与输出过程研究进展[J]. 植物学报, 2017, 52(5):652-668. XIAO C W, YANG F, LIU J Y, et al. Advances in input and output processes of below-ground carbon of terrestrial ecosystems[J]. *Bulletin of Botany*, 2017, 52(5):652-668.
- [4] 王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. 地理学报, 2000(5):533-544. WANG S Q, ZHOU C H, LI K R, et al. Analysis on spatial distribution characteristics of soil organic carbon reservoir in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2000(5):533-544.
- [5] 汪业勤, 赵士洞, 牛栋. 陆地土壤碳循环的研究动态[J]. 生态学杂志, 1999(5):29-35. WANG Y X, ZHAO S D, NIU D. Research state of soil carbon cycling in terrestrial ecosystem[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 1999(5):29-35.
- [6] 孙星照, 沈建国, 王忠, 等. 外源磷输入对农区湿地土壤碳库有效性及周转特性的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(10):1433-1443. SUN X Z, SHEN J G, WANG Z, et al. Effect of exogenous phosphorus input on the availability and turnover characteristics of soil carbon pool in agro-riparian wetlands[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(10):1433-1443.
- [7] 姚易寒, 张少博, 周家树, 等. 氮磷添加对毛竹林土壤有机碳矿化及其激发效应的影响[J/OL]. 土壤学报:1-15[2022-11-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20220923.0835.002.html>. YAO Y H, ZHANG S B, ZHOU J S, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on organic carbon mineralization and priming effect in a moso bamboo plantation soil[J/OL]. *Acta Pedologica Sinica*, 1-15[2022-11-14]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1119.P.20220923.0835.002.html>.
- [8] FENG J, ZHU B. A global meta-analysis of soil respiration and its components in response to phosphorus addition[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 135:38-47.
- [9] 马志良, 赵文强, 刘美, 等. 土壤呼吸组分对气候变暖的响应研究进展[J]. 应用生态学报, 2018, 29(10):3477-3486. MA Z L, ZHAO W Q, LIU M, et al. Research progress on the responses of soil respiration components to climatic warming[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(10):3477-3486.
- [10] GOMEZ C N, MATAMALA R, COOK D R, et al. Net ecosystem exchange modifies the relationship between the autotrophic and heterotrophic components of soil respiration with abiotic factors in prairie grasslands[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(8):2532-2545.
- [11] 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. ZHANG J L, LIAO Y C, ZENG A, et al. Effects of different levels of N fertilizer on soil respiration, and its relation to soil moisture and soil temperature under rainfed land of summer maize[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(7):1382-1388.
- [12] 吕梦凡, 马向成, 蔡铁, 等. 生物炭施用对冬麦田土壤水热环境及土壤呼吸的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, 40(3):197-206. LÜ M F, MA X C, CAI T, et al. Effects of biochar application on soil hydrothermal environment and soil respiration in winter wheat field[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2022, 40(3):197-206.
- [13] 安崇霄, 张永杰, 杜孝敬, 等. 不同耕作措施对伊犁河谷夏大豆农田土壤碳排放、碳平衡及经济效益的影响[J]. 生态学杂志, 2020, 39(3):812-821. AN C X, ZHANG Y J, DU X J, et al. Effects of different tillage measures on soil carbon emission, carbon balance and economic benefits of summer soybean cropland in Ili River valley[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(3):812-821.
- [14] 岳雪萍, 王淘, 吕天星, 等. 川中丘陵区冬水田种植模式转旱作过程的土壤呼吸组分特征及碳平衡[J]. 生态学报, 2022(15):1-11. YUE X P, WANG T, LÜ T X, et al. Carbon balance and characteristics of soil respiration components during the transition from paddy field to upland in the hilly region of central Sichuan[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022(15):1-11.
- [15] 王晓娇. 不同施肥措施下陇中黄土高原旱作玉米农田生态系统碳平衡及其土壤碳库稳定性研究[D]. 兰州:甘肃农业大学, 2021. WANG X J. Study on ecosystem carbon balance and stability of soil organic carbon pool in dryland corn farmland of the Loess Plateau of central Gansu Province under different fertilization measures[D]. Lanzhou:Gansu Agricultural University, 2021.
- [16] 吴建平, 刘占锋. 环境因子对森林净生态系统生产力的影响[J]. 植物科学学报, 2014, 32(1):97-105. WU J P, LIU Z F. Effects of abiotic factors on forest net ecosystem production[J]. *Plant Science Journal*, 2014, 32(1):97-105.
- [17] 周立峰, 冯浩. 不同灌水下复合肥对冬小麦产量及农田净生态系统生产力的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(7):31-36. ZHOU L F, FENG H. Effects of irrigation and compound fertilizer on yield of winter wheat and net ecosystem productivity of farmland[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(7):31-36.
- [18] 王玄, 熊鑫, 张慧玲, 等. 模拟酸雨对南亚热带森林凋落物分解和

- 土壤呼吸的影响[J]. 生态环境学报, 2021, 30(9): 1805–1813. WANG X, XIONG X, ZHANG H L, et al. Effects of simulated acid rain on litter decomposition and soil respiration in a low subtropical forest[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(9): 1805–1813.
- [19] 王传华, 陈芳清, 王愿, 等. 鄂东南低丘马尾松林和枫香林土壤异养呼吸及温湿度敏感性[J]. 应用生态学报, 2011, 22(3): 600–606. WANG C H, CHEN F Q, WANG Y, et al. Soil heterotrophic respiration and its sensitivity to soil temperature and moisture in *Liquidambar formosana* and *Pinus massoniana* forests in hilly areas of south-east Hubei Province[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(3): 600–606.
- [20] YU S, WANG D, DAI W, et al. Soil carbon budget in different-aged Chinese fir plantations in south China[J]. *Journal of Forestry Research*, 2014, 25(3): 621–626.
- [21] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25–86. BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 25–86.
- [22] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 309–313. GUAN S Y. Soil enzymes and research methods[M]. Beijing: Agriculture Press, 1986: 309–313.
- [23] BELL C W, FRICKS B E, ROCCA J D, et al. High-throughput fluorometric measurement of potential soil extracellular enzyme activities [J]. *Journal of Visualized Experiments Jove*, 2013(81): 1–16.
- [24] 潘占东. 添加生物质炭对黄土高原旱作农田土壤温室气体排放及土壤理化性质的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2021. PAN Z D. Effects of biochar addition on soil greenhouse gas emission and soil physical and chemical properties in dryland farmland of Loess Plateau [D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2021.
- [25] 李银坤, 陈敏鹏, 夏旭, 等. 不同氮水平下夏玉米农田土壤呼吸动态变化及碳平衡研究[J]. 生态环境学报, 2013, 22(1): 18–24. LI Y K, CHEN M P, XIA X, et al. Dynamics of soil respiration and carbon balance of summer-maize field under different nitrogen addition [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(1): 18–24.
- [26] 齐鹏, 王晓娇, 姚一铭, 等. 不同耕作方法和施氮量对旱作农田土壤 CO<sub>2</sub> 排放及碳平衡的影响[J]. 草业学报, 2021, 30(1): 96–106. QI P, WANG X J, YAO Y M, et al. Effects of different tillage practices and nitrogen application rate on carbon dioxide emissions and carbon balance in rain-fed maize crops[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2021, 30(1): 96–106.
- [27] 胡发龙, 柴强, 甘延太, 等. 少免耕及秸秆还田小麦间作玉米的碳排放与水分利用特征[J]. 中国农业科学, 2016, 49(1): 120–131. HU F L, CHAI Q, GAN Y T, et al. Characteristics of soil carbon emission and water utilization in wheat/maize intercropping with minimal/zero tillage and straw retention[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(1): 120–131.
- [28] GROSS N, BAGOUSSE Y L, LIANCOURT P, et al. Functional trait diversity maximizes ecosystem multifunctionality[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2017, 1(5): 1–9.
- [29] 程万莉, 雷康宁, 王淑英, 等. 长期施肥对春玉米田土壤呼吸及碳平衡的影响研究[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(2): 108–113. CHENG W L, LEI K N, WANG S Y, et al. Effects of long-term fertilization on soil respiration and carbon balance in spring corn fields[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(2): 108–113.
- [30] 王凡坤, 薛珂, 付为国. 土壤氮磷状况对小麦叶片养分生态化学计量特征的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(1): 60–71. WANG F K, XUE K, FU W G. Effects of soil nitrogen and phosphorus contents on ecological stoichiometry of wheat leaf[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, 27(1): 60–71.
- [31] 冯国瑞, 刘小龙, 王祥斌, 等. 启动磷肥不同施用方式对玉米养分吸收及生长和产量的影响[J]. 核农学报, 2022, 36(5): 1052–1060. FENG G R, LIU X L, WANG X B, et al. Effect of different fertilization pattern of starter phosphate fertilizer on nutrient absorption, growth and yield of maize[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2022, 36(5): 1052–1060.
- [32] 胡洋, 丛孟菲, 马雯琪, 等. 化肥减施对冬小麦土壤呼吸的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(2): 1–8. HU Y, CONG M F, MA W Q, et al. Effect of fertilizer reduction on soil respiration of winter wheat[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(2): 1–8.
- [33] MORI T, OHTA S, SHIGEHIR O, et al. Effects of phosphorus addition on N<sub>2</sub>O emission in an Acacia mangium plantation with and without root exclusion: 19th World Congress of Soil Science[C]. Brisbane: International Union of Soil Sciences, 2010: 63–66.
- [34] OUYANG X, ZHOU G, HUANG Z, et al. Effect of N and P addition on soil organic C potential mineralization in forest soils in South China [J]. *J Environ Sci (China)*, 2008, 20(9): 1082–1089.
- [35] 敖小蔓, 孟倩, 徐智超, 等. 氮、磷添加对呼伦贝尔草原生态系统净 CO<sub>2</sub> 交换的影响[J]. 草业科学, 2020, 37(8): 1428–1439. AO X M, MENG Q, XU Z C, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on the net ecosystem CO<sub>2</sub> exchange of meadow steppe in Hulunbuir, Inner Mongolia[J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(8): 1428–1439.
- [36] 李元, 时伟宇, 闫美杰, 等. 土壤呼吸影响因素概述及展望[J]. 水土保持研究, 2013, 20(5): 311–316. LI Y, SHI W Y, YAN M J, et al. Review and prospect on impact factors of soil respiration[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2013, 20(5): 311–316.
- [37] WANG R, SUN Q, WANG Y, et al. Temperature sensitivity of soil respiration: Synthetic effects of nitrogen and phosphorus fertilization on Chinese Loess Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 1665–1673.
- [38] 张耀全, 邓长芳, 罗珠珠, 等. 黄土高原不同种植年限苜蓿地土壤温室气体排放特征[J]. 草业科学, 2020, 37(1): 30–40. ZHANG Y Q, DENG C F, LUO Z Z, et al. Characterization of greenhouse gas emissions from the alfalfa field in Loess Plateau during different planting years[J]. *Pratacultural Science*, 2020, 37(1): 30–40.
- [39] ZHENG Z, YU G, FU Y, et al. Temperature sensitivity of soil respiration is affected by prevailing climatic conditions and soil organic carbon content: A trans-China based case study[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2009, 41(7): 1531–1540.
- [40] 贺美, 王立刚, 王迎春, 等. 长期定位施肥下黑土呼吸的变化特征及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2018, 34(4): 151–161. HE M, WANG L G, WANG Y C, et al. Characteristic of black soil respiration

- and its influencing factors under long-term fertilization regimes[J]. *Transactions of the CSAE*, 2018, 34(4):151-161.
- [41] GAO X L, LI X G, ZHAO L, et al. Regulation of soil phosphorus cycling in grasslands by shrubs[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 133:1-13.
- [42] CHEN F S, YAVITT J, HU X F. Phosphorus enrichment helps increase soil carbon mineralization in vegetation along an urban-to-rural gradient, Nanchang, China[J]. *Applied Soil Ecology*, 2014, 75:181-188.
- [43] 冯继广, 张秋芳, 袁霞, 等. 氮磷添加对土壤有机碳的影响:进展与展望[J]. *植物生态学报*, 2022, 46(8):855-870. FENG J G, ZHANG Q F, YUAN X, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil organic carbon: Review and prospects[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2022, 46(8):855-870.
- [44] JOHNSTON E R, KIM M, HATT J K, et al. Phosphate addition increases tropical forest soil respiration primarily by deconstraining microbial population growth[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2019, 130:43-54.
- [45] LOHILA A, AURELA M, REGINA K, et al. Soil and total ecosystem respiration in agricultural fields: Effect of soil and crop type[J]. *Plant and Soil*, 2003, 251(2):303-317.
- [46] PENG Y, PENG Z, ZENG X, et al. Effects of nitrogen-phosphorus imbalance on plant biomass production: A global perspective[J]. *Plant and Soil*, 2019, 436(1/2):245-252.
- [47] GUSEWELL S. N:P ratios in terrestrial plants: Variation and functional significance[J]. *New Phytologist*, 2004, 164(2):243-266.
- [48] SKOPP J, JAWSON M D, DORAN J W. Steady-state aerobic microbial activity as a function of soil water content[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1990, 54(6):1619-1625.
- [49] 张宇, 张海林, 陈继康, 等. 耕作方式对冬小麦田土壤呼吸及各组分贡献的影响[J]. *中国农业科学*, 2009, 42(9):3354-3360. ZHANG Y, ZHANG H L, CHEN J K, et al. Tillage effects on soil respiration and contributions of its components in winter wheat field[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42(9):3354-3360.
- [50] 张忠学, 李铁成, 齐智娟, 等. 水氮耦合对黑土稻田土壤呼吸与碳平衡的影响[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(6):301-308. ZHANG Z X, LI T C, QI Z J, et al. Effects of water and nitrogen coupling on soil respiration and carbon balance in black soil paddy field[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2020, 51(6):301-308.
- [51] 梁尧, 韩晓增, 乔云发, 等. 小麦-玉米-大豆轮作下黑土农田土壤呼吸与碳平衡[J]. *中国生态农业学报*, 2012, 20(4):395-401. LIANG Y, HAN X Z, QIAO Y F, et al. Soil respiration and carbon budget in black soils of wheat maize-soybean rotation system[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(4):395-401.
- [52] 陈绍民, 杨硕欢, 张保成, 等. 不同水肥条件下夏玉米/冬小麦农田生态系统碳平衡研究[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(5):229-238. CHEN S M, YANG S H, ZHANG B C, et al. Carbon balance in summer maize/winter wheat farmland ecosystem under different water and fertilizer conditions[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(5):229-238.
- [53] 李文杰, 张祯皎, 赵雅萍, 等. 刺槐林恢复过程中土壤微生物碳降解酶的变化及与碳库组分的关系[J]. *环境科学*, 2022, 43(2):1050-1058. LI W J, ZHANG Z J, ZHAO Y P, et al. Changes in soil microbial carbon-degrading enzymes and their relationships with carbon pool components during the restoration process of robinia pseudo-acacia[J]. *Environmental Science*, 2022, 43(2):1050-1058.

(责任编辑:叶飞)