

黄土丘陵区退耕草地土壤呼吸及其组分对氮磷添加的响应

周俊杰¹, 陈志飞¹, 杨全², 赖帅彬¹, 王智^{1,2}, 徐炳成^{1,2*}

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

摘要: 为探究不同氮磷添加水平对黄土丘陵区退耕草地土壤呼吸及其组分的影响, 于2018年5~9月采用田间试验的方法, 设置3个施氮(以N计)主区[0、50和100 kg·(hm²·a)⁻¹]和3个施磷(以P₂O₅计)副区[0、40和80 kg·(hm²·a)⁻¹]. 测定每月各处理下土壤总呼吸和异养呼吸速率, 以及土壤温度和土壤含水量. 结果表明, 氮磷添加对土壤温度和土壤水分的影响均不显著($P > 0.05$). 土壤呼吸速率具明显月份变化特征, 在7月达到峰值. 未施肥处理的月平均土壤总呼吸、异养呼吸和自养呼吸分别为0.69、0.39和0.29 g·(m²·h)⁻¹. 未施氮条件下, 施磷对土壤呼吸及其组分无显著影响($P > 0.05$). 施氮条件下, 磷添加显著提高土壤呼吸及其组分的呼吸速率($P < 0.05$). 氮磷施肥后月平均土壤总呼吸、异养呼吸和自养呼吸最大值分别为0.93、0.50和0.47 g·(m²·h)⁻¹. 未施肥的土壤总呼吸、异养呼吸和自养呼吸的 Q_{10} 值分别为1.86、2.36和2.24; 氮磷添加降低了土壤呼吸及其组分的 Q_{10} 值. 总体上, 氮磷添加对黄土丘陵区退耕草地土壤呼吸及其组分的影响与施氮磷量有关.

关键词: 土壤呼吸; 自养呼吸; 异养呼吸; 氮磷添加; 温度敏感性

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)01-0479-10 DOI: 10.13227/j.hjck.201906010

Response of Soil Respiration and Its Components to Nitrogen and Phosphorus Addition in Farming-Withdrawn Grassland in the Semiarid Loess Hilly-Gully Region

ZHOU Jun-jie¹, CHEN Zhi-fei¹, YANG Quan², LAI Shuai-bin¹, WANG Zhi^{1,2}, XU Bing-cheng^{1,2*}

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

Abstract: Understanding the soil respiration characteristics in response to nitrogen and phosphorus addition in farming-withdrawn grasslands within semi-arid loess hilly-gully regions is of great importance for providing a theoretical basis for evaluating the effects of artificial regulation approaches on carbon cycling. We report on a field experiment that was undertaken from May to September 2018 in a farming-withdrawn grassland ecosystem in China, which is dominated by *Stipa bungeana* and *Lespedeza davurica*. Three different levels of nitrogen and phosphorus additions were used, including three main plots of N [0, 50, and 100 kg·(hm²·a)⁻¹] and three subplots of P (P₂O₅) [0, 40, and 80 kg·(hm²·a)⁻¹]. The soil respiration rate, heterotrophic respiration rate, soil temperature, and soil moisture were measured monthly in each treatment. Results showed that N and P addition had no effect on soil temperature or moisture content ($P > 0.05$). The soil respiration rate showed an obvious monthly variation and peaked in July. In the treatment without fertilizer addition, the monthly mean soil respiration rate, heterotrophic respiration rate, and autotrophic respiration rate were 0.69, 0.39, and 0.29 g·(m²·h)⁻¹, respectively. P addition had no significant effect on the soil respiration rate and its components without N addition ($P > 0.05$). Under conditions of N addition, P addition significantly increased the soil respiration rate and its component ($P < 0.05$). The monthly mean soil respiration rate, heterotrophic respiration rate, and autotrophic respiration rate were 0.93, 0.50, and 0.47 g·(m²·h)⁻¹, respectively. The Q_{10} (i.e., temperature sensitivity) values for soil respiration, heterotrophic respiration, and autotrophic respiration in unfertilized soil were 1.86, 2.36, and 2.24, respectively. The addition of N and P reduced the Q_{10} value of soil respiration and its components. Our findings suggest that the response of soil respiration and its two components to N and P addition in studied farming-withdrawn grassland in the semiarid loess hilly-gully region were closely related to their addition amounts.

Key words: soil respiration; autotrophic respiration; heterotrophic respiration; N and P addition; temperature sensitivity

土壤是陆地生态系统最大的碳库, 其碳含量约是大气中的2~3倍, 因此土壤碳库的微小变化会对陆地碳通量产生巨大影响^[1]. 土壤呼吸(soil respiration, R_s)是大气和陆地生态系统中仅次于植物光合作用的第二大碳通量过程^[1,2], 主要由活根及其相关根际(即菌根和根际细菌)产生的自养呼吸(soil

autotrophic respiration, R_a)和土壤有机质经微生物分解产生的异养呼吸(soil heterotrophic respiration, R_h)

收稿日期: 2019-06-03; 修订日期: 2019-07-23

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0501703)

作者简介: 周俊杰(1995~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为水土保持植被. E-mail: zjj9598@126.com

* 通信作者. E-mail: Bcxu@ms.iswc.ac.cn

组成^[3,4]. 土壤呼吸是土壤碳库向大气输出碳的主要途径,也是大气 CO₂ 重要的源^[2],其大小不仅受降水、土壤温度、土壤含水量、土壤养分以及土壤理化性质等非生物因子的影响,也受植被类型、物种种类、凋落物和地上生物量大小等生物因子的影响^[5,6]. 其中,土壤温度(soil temperature, T_s)^[2,7]和土壤含水量(soil water content, W_s)^[8-10]是最直接的影响因子. 土壤呼吸在植物生长季主要受土壤含水量的影响,而在非生长季土壤温度起主导作用^[7].

在土壤养分较亏缺的地区,施氮和磷肥可促进植物生长,从而提高生态系统固碳能力,也可以通过影响植物根系分泌物、土壤微生物活性和群落组成,以及土壤理化性质等来影响土壤呼吸,因而对土壤和大气间碳交换具有重要影响^[11-13]. 关于施肥对土壤呼吸的影响已有很多研究,但具体影响仍存在争议,有认为施肥可显著促进土壤呼吸^[14,15],也有指出施肥会显著降低土壤呼吸^[16,17]或者对土壤呼吸无显著影响^[18],这可能与地理位置、环境因子、植被特征和试验方法差异等有关. 外源氮添加能显著增加土壤无机氮库,加速硝化作用和 NO₃⁻ 的淋溶作用,导致土壤 pH 值降低和土壤酸化等土壤性质改变,从而显著影响土壤微生物的群落结构和数量^[16,19]. 磷添加可提高植物生长速率和增加土壤微生物生物量,通过增加土壤微生物活动,增加植物对土壤的碳输入^[11,20]. 因此,氮磷添加对土壤呼吸的影响途径不同,有必要就独特条件下土壤呼吸对施肥的响应开展针对性研究^[4,15].

自工业革命以来,化石燃料和合成肥料的大量使用,加速了全球氮沉降,导致向陆地生态系统输入氮显著增加,对区域乃至全球氮循环产生了重要影响^[21,22]. 草地碳储量约占全球陆地生态系统总碳储量的 1/3,草地碳交换对全球碳收支贡献显著^[1,23]. 由于长期的粗放管理和严重的土壤侵蚀,半干旱黄土丘陵区土壤养分贫瘠,尤其是氮磷含量均偏低. 适当施氮虽有利于提高草地生态系统生产力和土壤碳储存能力,但不合理地人为氮磷添加可能会打破土壤养分含量的内在平衡关系,影响土壤功能和植物正常生长及生态效益^[24]. 为此,本文选择黄土丘陵区退耕草地为研究对象,通过氮磷添加试验,分析退耕草地土壤呼吸及其组分对短期氮磷添加的响应特征,以期为该退耕草地的施肥调控管理及其环境效应评价提供依据和参考.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究地点位于陕西省延安市安塞区纸坊沟流域

(109°13'46" ~ 109°16'03"E, 36°42'42" ~ 36°46'28"N), 其是中国科学院安塞水土保持综合试验站水土保持与生态恢复长期研究试验示范流域. 流域面积 8.27 km²,海拔 1 000 ~ 1 400 m. 年均气温 8.8°C,无霜期 160 d 左右,平均降水量 529 mm,但分布不均,7~9 月降雨量占全年降雨量的 61.1%,且多暴雨. 该区在气候区划上属暖温带半湿润气候向半干旱气候过渡的地区,植被属于暖温带落叶阔叶林区向暖温带草原区过渡的森林草原带. 经过几十年的综合治理,流域植被恢复良好. 天然草地主要为灌木草丛、干旱草原及低湿草甸等;典型地带性草本植物有白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)、达乌里胡枝子(*Lepedeza davurica*)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、长芒草(*Stipa bungeana*)和芨蒿(*Artemisia giraldii*)等. 土壤类型为黄绵土,土壤 0~10 cm 处土壤容重为 1.18 g·cm⁻³,pH 值为 8.51,有机质含量 11.1 g·kg⁻¹,全氮含量 0.94 g·kg⁻¹,全磷含量 0.61 g·kg⁻¹.

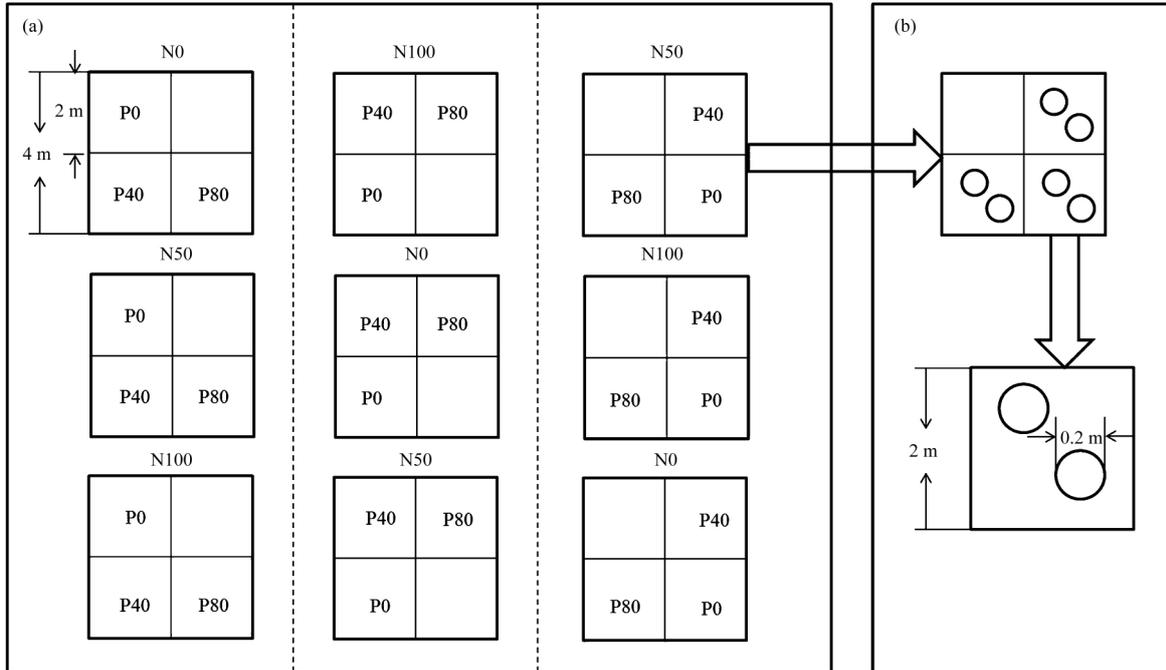
1.2 研究方法

1.2.1 试验设计

选择以达乌里胡枝子和长芒草为优势种的退耕草地为试验样地,坡度为 15°,坡向为东偏南 21°. 为防止干扰,将样地围成一个 20 m × 30 m 的试验区. 采用裂区试验设计,分别在样地沿坡面设置 3 个 5 m × 15 m 的区组,区组间走道为 1 m,每个区组沿坡面设置 3 个 4 m × 4 m 的主区,主区间由 1 m 宽的未施肥缓冲区隔开,每个主区再划分为 4 个 2 m × 2 m 的副区. 氮肥处理为主区,选其中 3 个副区进行施磷处理. 根据黄土丘陵区年平均氮沉降量[以 N 计,下同,21.76 kg·(hm²·a)⁻¹]^[25],本研究设置约 2 倍和 4 倍的年均氮沉降水平,即 N50 [50 kg·(hm²·a)⁻¹]和 N100 [100 kg·(hm²·a)⁻¹]. 参考刘海威等^[26]在纸坊沟流域退耕草地的施磷标准[以 P₂O₅ 计,下同,32.55 kg·(hm²·a)⁻¹],本研究设置约一倍和两倍的年施磷水平,即 P40 [40 kg·(hm²·a)⁻¹]和 P80 [80 kg·(hm²·a)⁻¹]. 3 个 N 添加分别为 N0 (不施 N)、N50 [50 kg·(hm²·a)⁻¹]和 N100 [100 kg·(hm²·a)⁻¹],3 个 P 添加分别为 P0 (不施 P)、P40 [40 kg·(hm²·a)⁻¹]和 P80 [80 kg·(hm²·a)⁻¹],NOPO 为对照,试验布设如图 1(a)所示. 氮肥为硝酸铵钙 [5Ca(NO₃)₂·NH₄NO₃·10H₂O],磷肥为重过磷酸钙 [Ca(H₂PO₄)₂·H₂O]. 肥料分别于 2017 年 6 月 4 日和 2018 年 5 月 21 日雨前均匀撒入地表. 在距离研究场地 20 km 的中国科学院安塞水土保持研究站气象站,记录了气温和降雨量.

本试验于2018年4月20日布置。在每个2 m × 2 m 样方中随机放置2个直径20 cm的PVC管,两根PVC管间距约50 cm,分别用于测量土壤总呼吸(R_s)和土壤微生物呼吸(R_m) [图1(b)]。测定土壤总呼吸的PVC管高度为10 cm,嵌入土壤7 cm;测定土壤异养呼吸的PVC管高50 cm,嵌入土壤45

cm。为准确测定土壤异养呼吸速率,将PVC管沿周长四等分,在管壁四周5~50 cm处钻孔,钻孔由距管口5 cm处开始,沿管壁从上到下每隔10 cm钻孔,便于环内外土壤水分和养分交换且隔绝根系进入,在孔上覆盖100 μm尼龙网膜^[4, 12]。试验期间不定期清理异养呼吸测定PVC管内活体植物。



(a) N、P 添加处理组合分布; (b) PVC 环布置示意

图1 退耕草地氮磷添加试验设计示意

Fig. 1 Experimental design of nitrogen and phosphorus addition in farming-withdrawn grassland

1.2.2 测定项目和方法

本试验采用美国 PP System 公司生产 EGM-4 便携式 CO₂ 分析仪测定土壤呼吸速率,测定前一天将基座内植物齐地剪除,测定时尽量不扰动土壤和枯落物。测定时使用一个20 cm 转 10 cm 的PVC 异径直接管连接基座与土壤呼吸仪,重复3次。样地布置一月后,开始对土壤呼吸速率、土壤温度和土壤含水量进行测定。选择晴朗天气的上午09:00~11:00进行土壤呼吸速率和异养呼吸速率的测定,该时段土壤呼吸速率可代表全天平均呼吸速率^[10]。本试验测定期间,一个PVC环测定时间约2 min,所有处理在2 h之内完成测定。测定于5~9月每月中下旬进行,第一次测定在5月26日。测定期间如遇降雨事件,测定在雨后第4 d进行^[14]。在测定土壤呼吸速率的同时,分别采用TP 101地温计(衡水市创新仪器仪表有限公司,精度±1℃)和美国Spectrum TDR 100便携式水分测定仪测定各小区内5 cm处土壤温度和土壤体积含水量。

1.3 数据处理

以当日上午09:00~11:00测定土壤呼吸速率

代表当日的土壤呼吸速率平均值,以当日呼吸速率平均值作为该月土壤呼吸速率的平均值^[27]。以每日测得的土壤呼吸速率均值计算日土壤呼吸通量、月土壤呼吸通量以及生长季5~9月的土壤呼吸通量[以CO₂计, g·m⁻²]^[28]。采用SPSS 20.0软件对数据进行统计分析,采用多因素方差分析(Three-way ANOVA)检验测定:月份、氮和磷添加处理对土壤呼吸及其组分、土壤温度和土壤含水量的影响,采用单因素方差分析(One-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)检验各氮磷添加间土壤呼吸速率、土壤温度和水分差异(P=0.05)。用SigmaPlot 12.5软件绘图。

土壤呼吸及其组分速率与土壤温度的关系采用指数模型进行拟合:

$$R_s = ae^{bT_s}$$

式中, R_s 为土壤呼吸速率[以CO₂计, g·(m²·h)⁻¹], T_s 为5 cm处土壤温度(℃), a 为基础土壤呼吸速率[以CO₂计, g·(m²·h)⁻¹], b 为土壤呼吸温度敏感性的参数。

土壤温度敏感性系数:

$$Q_{10} = e^{10b}$$

式中 Q_{10} 为土壤呼吸温度敏感性系数,表示土壤温度每升高 10°C 时土壤呼吸速率所增加的倍数 b 为土壤呼吸温度敏感性的参数.

2 结果与分析

2.1 环境因子

2018年5~9月的日气温为 $11.5 \sim 26.0^{\circ}\text{C}$,呈单峰曲线变化,最高值出现在8月,最低出现在5月(图2). 2018年全年降雨量为 464.4 mm ,低于1951~2017年间年均降雨量(528.8 mm). 2018年5~9月

降雨量为 399.8 mm ,低于多年平均(434.8 mm). 除7月降雨量高于多年平均外,其他月降雨量分配比例与1951~2017年间相似(图2).

2018年5~9月土壤含水量(体积分数)为 $2.4\% \sim 5.5\%$ 随月份呈先降低后升高趋势,最低值出现在8月(图3). 土壤温度的范围是 $14.1 \sim 31.5^{\circ}\text{C}$,呈双峰型的月变化特征,其中6月和8月高于其它月(图3).

土壤温度和土壤含水量的月变化差异明显,除氮添加对土壤温度的影响显著外,月份、氮和磷添加对土壤温度和土壤含水量的交互作用均不显著(表1).

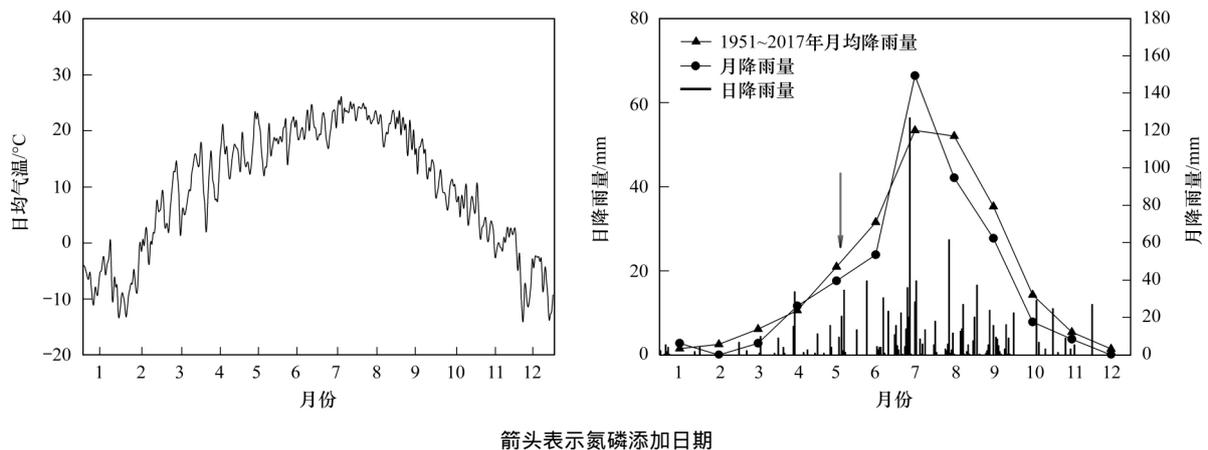


图2 2018年试验地日平均温度、日降雨量、月降雨量和1951~2017年月平均降雨量
Fig. 2 Mean daily temperature, daily and monthly precipitation in 2018, and mean monthly precipitation from 1951 to 2017 at the experimental site

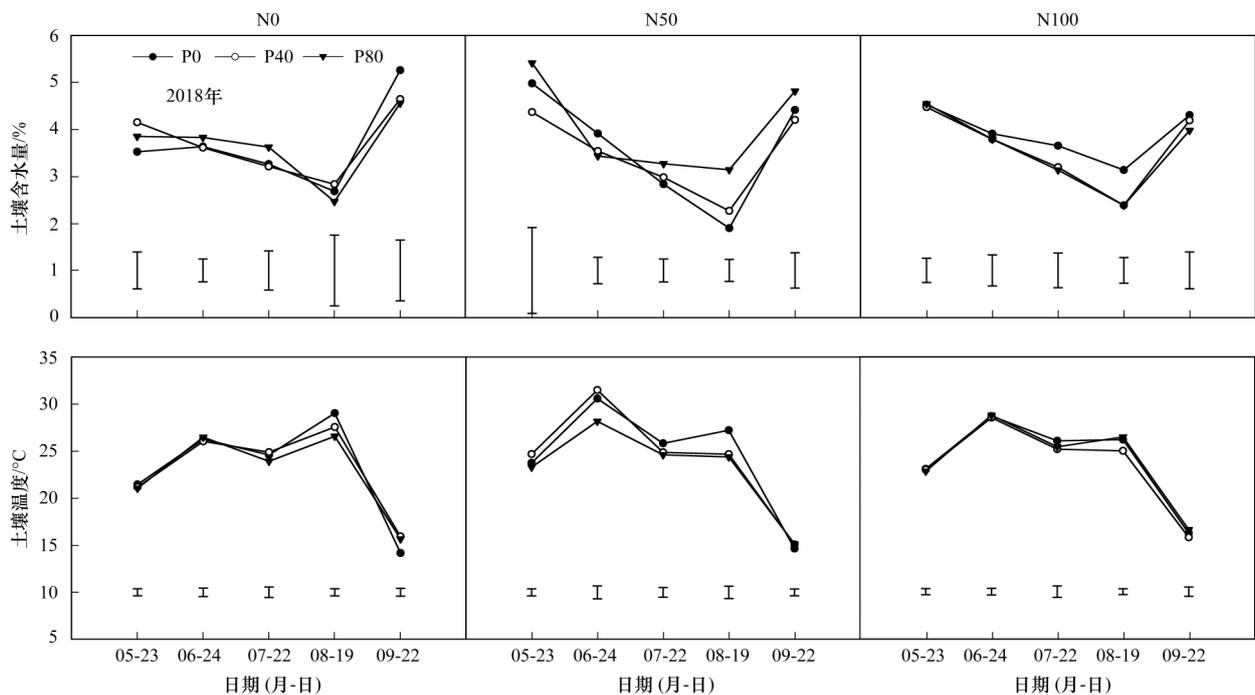


图3 不同氮磷添加处理下土壤温度和土壤水分含量月变化
误差线表示各施氮处理间的LSD值差异 ($P < 0.05$)

Fig. 3 Monthly changes of soil temperature and soil moisture content under different nitrogen and phosphorus addition treatments

表 1 月份、氮和磷添加对土壤温度 (T_s) 和土壤含水量 (W_s) 的影响¹⁾Table 1 Effects of month, nitrogen, and phosphorus on soil temperature (T_s) and soil moisture content (W_s)

因素	df	土壤温度/°C		土壤含水量/%	
		F	P	F	P
月份 (M)	4	70.18	<0.001	25.40	<0.001
氮添加 (NT)	2	3.25	0.043	0.59	ns
磷添加 (PT)	2	0.43	ns	0.34	ns
月份 × 氮添加 (M × NT)	8	0.72	ns	2.00	ns
月份 × 磷添加 (M × PT)	8	0.08	ns	0.38	ns
氮添加 × 磷添加 (NT × PT)	4	0.05	ns	0.64	ns
月份 × 氮添加 × 磷添加 (M × NT × PT)	16	0.13	ns	0.21	ns

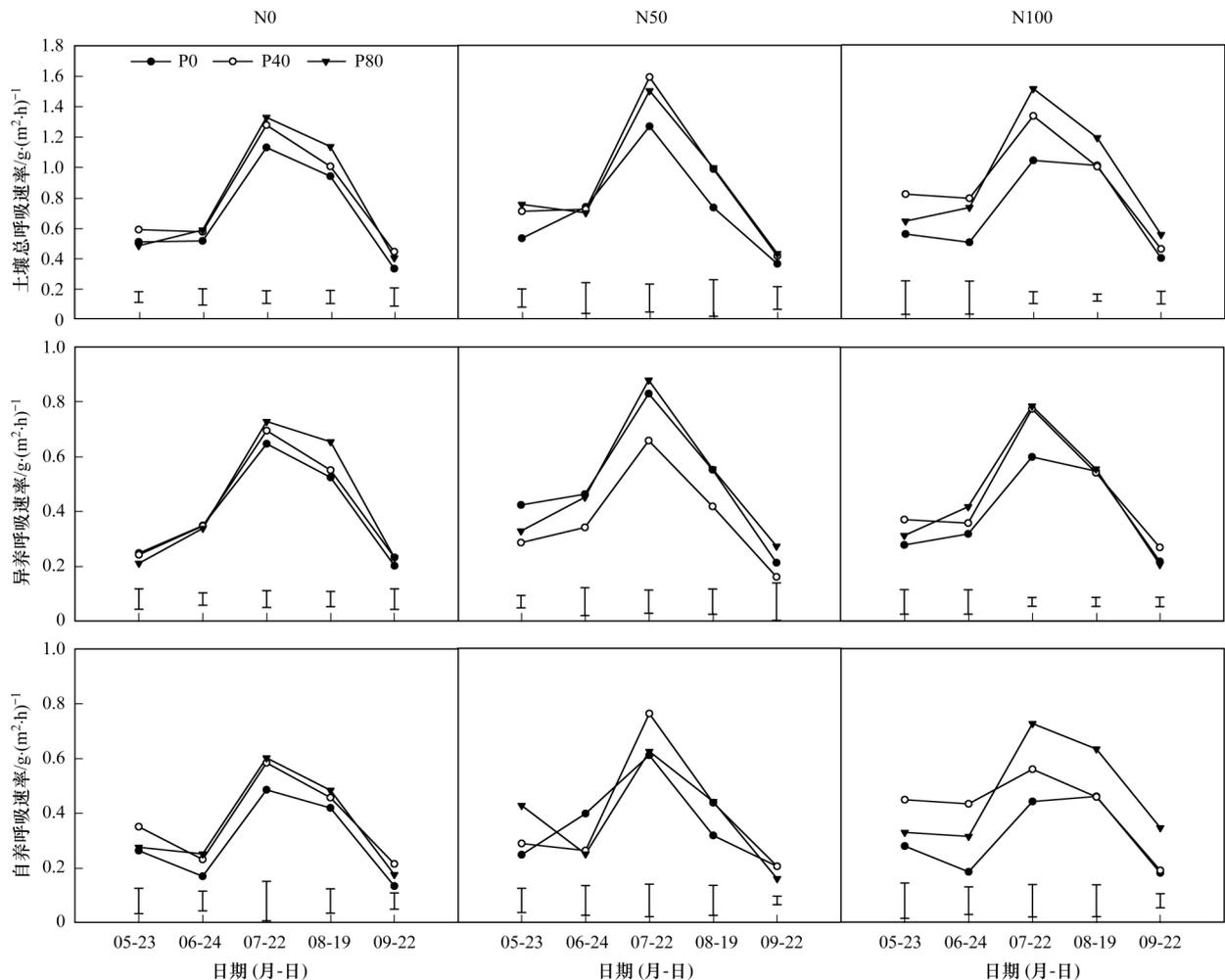
1) ns 表示无显著影响, F 表示方差分析的统计量, 下同

2.2 氮磷添加对土壤呼吸速率及其组分的影响

各处理下, 土壤总呼吸速率及其组分月变化呈单峰曲线, 峰值均出现在 7 月, 最小值在 9 月 (图 4). 在研究期间, 施氮 (N50 和 N100) 的土壤总呼吸速率均显著大于不施氮 (N0) ($P < 0.05$). 施氮和磷均显著影响草地生态系统土壤呼吸速率及其组分, 二者交互作用对土壤呼吸及其组分也有显著影响 (表 2). 未施肥处理的月平均土壤总呼吸速率、异

养呼吸速率和自养呼吸速率分别为 0.69 、 0.39 和 $0.29 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$, 在生长季中期的 7 月达到最大值 [$1.13 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$], 在生长季末期的 9 月土壤呼吸速率较低 [$0.34 \text{ g} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{h})^{-1}$].

施肥对土壤总呼吸、异养呼吸和自养呼吸速率均有影响, 但各处理对土壤呼吸组分间影响不一致 (图 4). N0 条件下, 5 月 P40 处理的土壤总呼吸速率显著大于 P0 和 P80 处理; 而各磷处理间异养呼吸



误差线表示各施氮处理间的 LSD 值差异 ($P < 0.05$)

图 4 不同氮磷添加处理下土壤呼吸速率及其组分月变化

Fig. 4 Monthly changes in the soil respiration rate and its components under different nitrogen and phosphorus addition treatments

表2 月份、氮和磷添加对土壤呼吸速率(R_s)、异养呼吸速率(R_h)和自养呼吸速率(R_a)的影响Table 2 Effects of month, nitrogen and phosphorus on the soil respiration rate (R_s), heterotrophic respiration rate (R_h), and autotrophic respiration rate (R_a)

因素	df	土壤呼吸速率/ $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$		异养呼吸速率/ $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$		自养呼吸速率/ $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$	
		F	P	F	P	F	P
月份(M)	4	636.03	<0.001	784.70	<0.001	101.67	<0.001
氮添加(NT)	2	20.34	<0.001	18.55	<0.001	6.00	0.004
磷添加(PT)	2	62.55	<0.001	17.51	<0.001	13.90	<0.001
月份×氮添加(M×NT)	8	9.37	<0.001	10.23	<0.001	2.41	0.021
月份×磷添加(M×PT)	8	5.26	<0.001	5.30	<0.001	1.22	ns
氮添加×磷添加(NT×PT)	4	2.95	0.024	27.39	<0.001	2.83	0.029
月份×氮添加×磷添加(M×NT×PT)	16	3.03	<0.001	2.86	0.001	2.68	0.002

和自养呼吸均无显著差异;6~8月P80处理的自养呼吸显著大于P0处理($P<0.05$),而土壤总呼吸和异养呼吸仅7月和8月间存在显著差异;9月各磷处理间土壤呼吸及其组分差异均不显著.N50条件下,5~8月P80处理的土壤总呼吸和异养呼吸显著大于P0处理($P<0.05$).N100条件下,5月和6月P40处理的土壤总呼吸显著大于P0,7~9月P80处理的显著大于P0处理($P<0.05$);自养呼吸的变化与土壤总呼吸相似;5月和9月P40处理的异养呼吸是显著大于P0处理,6月和7月P80显著大于P0处理,8月所有施磷处理间无显著差异.

氮磷配施土壤总呼吸及其组分均大于对应的单施氮或施磷处理.除N100P0处理外,在相同施氮条件下,土壤总呼吸及其组分随施磷量的增加而增加.不同氮磷添加处理下,土壤异养呼吸速率(R_h)在总呼吸速率(R_s)中的占比不同.NOPO处理下, R_h 平均占比为57.7%.未施氮(N0)条件下,P40和P80处理的 R_h 占比分别为52.3%和53.9%;N50水平下,P0、P40和P80处理的 R_h 占比分别为51.1%、56.8%和57.4%;N100水平下,P0、P40和P80处理的 R_h 占比分别是56.4%、52.6%和48.8%(图4).

表3 不同氮磷添加下土壤呼吸速率(R_s)、异养呼吸速率(R_h)和自养呼吸速率(R_a)与土壤温度(T_s)间拟合关系Table 3 Fitting relationship between soil respiration rate (R_s), heterotrophic respiration rate (R_h), and autotrophic respiration rate (R_a) and soil temperature (T_s) under different nitrogen and phosphorus additions

施肥处理	土壤总呼吸速率/ $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$				异养呼吸速率/ $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$				自养呼吸速率/ $\text{g}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$				
	回归方程	R^2	P	Q_{10}	回归方程	R^2	P	Q_{10}	回归方程	R^2	P	Q_{10}	
N0	P0	$R_s = 0.127e^{0.062T_s}$	0.68	<0.001	1.86	$R_h = 0.062e^{0.086T_s}$	0.46	0.022	2.36	$R_a = 0.046e^{0.081T_s}$	0.43	0.023	2.24
	P40	$R_s = 0.234e^{0.043T_s}$	0.48	0.006	1.58	$R_h = 0.065e^{0.083T_s}$	0.55	0.004	2.29	$R_a = 0.075e^{0.073T_s}$	0.52	0.008	2.07
	P80	$R_s = 0.117e^{0.070T_s}$	0.56	0.002	1.82	$R_h = 0.058e^{0.091T_s}$	0.53	0.005	2.48	$R_a = 0.065e^{0.076T_s}$	0.44	0.034	2.14
N50	P0	$R_s = 0.167e^{0.055T_s}$	0.59	0.001	1.73	$R_h = 0.065e^{0.072T_s}$	0.60	0.001	2.05	$R_a = 0.062e^{0.075T_s}$	0.61	0.014	2.11
	P40	$R_s = 0.245e^{0.047T_s}$	0.45	0.013	1.48	$R_h = 0.091e^{0.073T_s}$	0.58	0.003	2.08	$R_a = 0.048e^{0.095T_s}$	0.66	0.010	2.59
	P80	$R_s = 0.246e^{0.049T_s}$	0.50	0.003	1.63	$R_h = 0.084e^{0.079T_s}$	0.56	0.003	2.20	$R_a = 0.046e^{0.093T_s}$	0.62	0.006	2.54
N100	P0	$R_s = 0.182e^{0.054T_s}$	0.51	0.006	1.46	$R_h = 0.093e^{0.059T_s}$	0.48	0.006	1.80	$R_a = 0.072e^{0.062T_s}$	0.48	0.014	1.86
	P40	$R_s = 0.242e^{0.051T_s}$	0.54	0.002	1.67	$R_h = 0.088e^{0.073T_s}$	0.64	0.002	2.08	$R_a = 0.091e^{0.063T_s}$	0.53	0.023	1.87
	P80	$R_s = 0.212e^{0.061T_s}$	0.52	0.008	1.44	$R_h = 0.075e^{0.078T_s}$	0.54	0.007	2.18	$R_a = 0.126e^{0.060T_s}$	0.45	0.014	1.83

土壤温度解释土壤异养呼吸变化的46%~64%(表3).N0条件下,P0、P40和P80处理的土壤异养

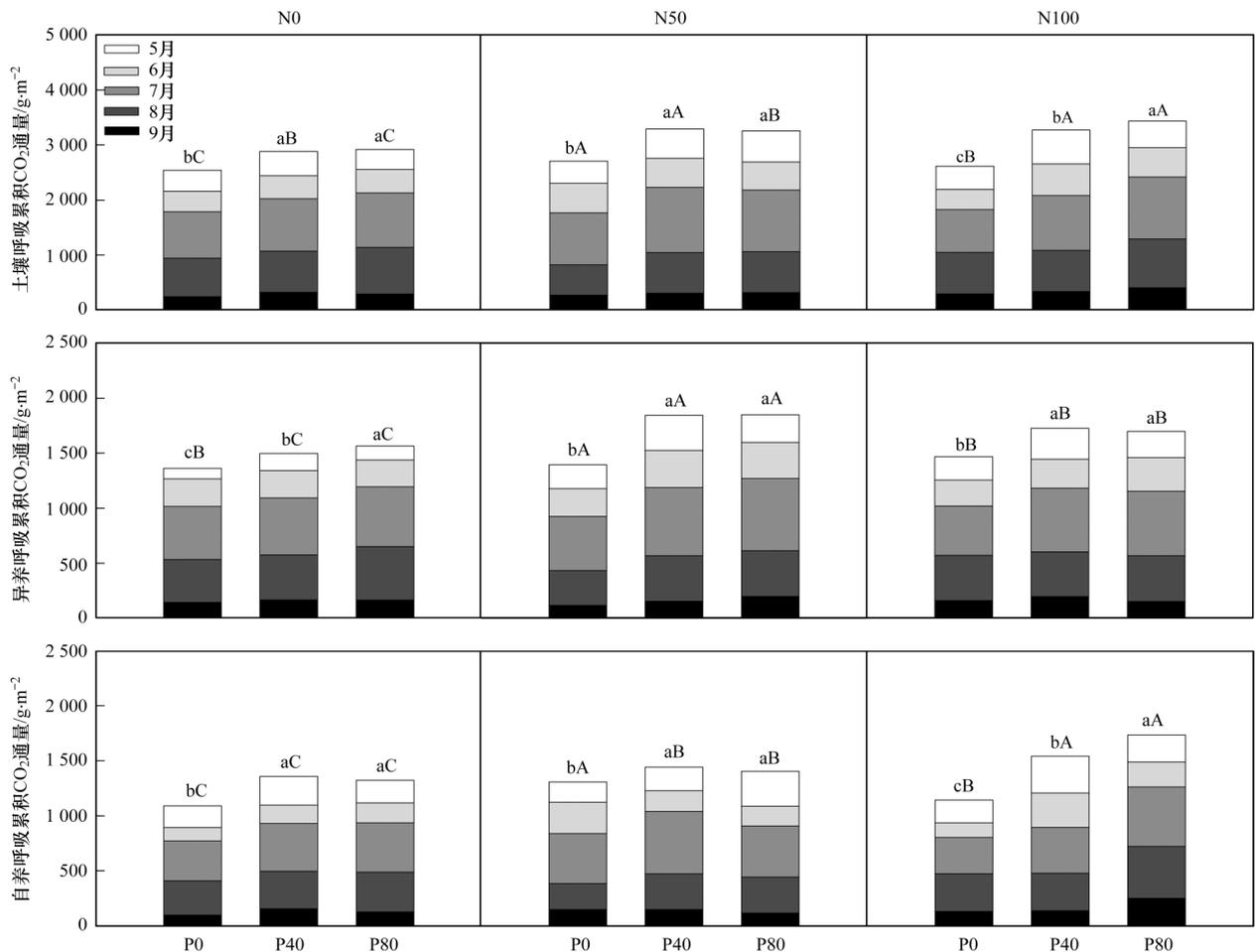
2.3 氮磷添加对土壤呼吸累积 CO_2 通量的影响

N50和N100条件下,生长季的土壤总呼吸及其组分通量均显著大于N0条件($P<0.05$).氮磷添加处理后,土壤总呼吸、异养呼吸和自养呼吸通量生长季最大值的处理分别为:N100P80($3433.32\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)、N50P40($1850.29\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)和N100P80($1732.40\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$);最小通量值的处理分别为NOPO($2540.36\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)、N50P0($1398.75\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)和NOPO($1086.49\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$).在5~9月期间,土壤异养呼吸和自养呼吸通量分别占土壤总呼吸通量的49.5%~57.2%和42.8%~50.5%.在5~9月中,各处理的土壤呼吸及其组分通量均在7月占比最大,为27.0%~39.3%(图5).

2.4 土壤呼吸及其组分与土壤温度的关系

土壤总呼吸、异养呼吸和自养呼吸与土壤温度呈显著正相关关系,指数模型模拟结果显示,土壤温度可解释土壤总呼吸变化的44%~68%(表3).N0条件下,P0、P40和P80处理的 Q_{10} 值分别为1.86、1.58和1.82;N50条件下,P0、P40和P80处理的 Q_{10} 值分别为1.73、1.48和1.63;N100条件下,P0、P40和P80处理的 Q_{10} 值分别为1.46、1.67和1.44(表3).

呼吸 Q_{10} 值分别为2.36、2.29和2.48;N50条件下,P0、P40和P80处理的土壤异养呼吸 Q_{10} 值分别为



不同大写字母表示施氮处理间差异显著, 不同小写字母表示施磷处理间差异显著

图5 不同氮磷添加处理下土壤呼吸及其组分累积 CO_2 通量

Fig. 5 Cumulative CO_2 fluxes of soil respiration and its components under different nitrogen and phosphorus addition treatments

2.05、2.08和2.20; N100条件下, P0、P40和P80处理的土壤异养呼吸 Q_{10} 值分别为1.80、2.08和2.18. 同一施P处理下, N100水平下土壤异养呼吸的 Q_{10} 值低于N0和N50.

土壤温度解释土壤自养呼吸变化的50%~58% (表3). N0条件下, P0、P40和P80处理的土壤自养呼吸 Q_{10} 值分别为2.24、2.07和2.14; N50条件下, P0、P40和P80处理的土壤自养呼吸 Q_{10} 值分别为2.11、2.59和2.54; N100条件下, P0、P40和P80处理的土壤自养呼吸 Q_{10} 值分别为1.86、1.87和1.83. 同一施P处理下, N100水平下土壤自养呼吸的 Q_{10} 值显著低于N0和N50.

3 讨论

3.1 氮磷添加对土壤呼吸速率及其组分的影响

土壤呼吸主要受土壤温度、土壤水分有效性和基质供应等影响^[9, 13, 29]. 氮添加通过改变土壤呼吸的温度敏感性、土壤水分有效性或土壤碳的供应(如地下生物量和凋落物投入)影响土壤呼

吸^[4, 30, 31]. 本研究中结果明确显示, 氮添加后退耕草地各月份的土壤呼吸总量均显著增加(图5), 与其他植被生态系统的研究结果一致^[14, 30, 31]. 氮添加对土壤呼吸的影响取决于自养呼吸和异养呼吸对氮添加的响应^[4]. 植物生长和微生物活性普遍受氮的限制, 但植物对土壤无机氮的捕捉能力远远强于土壤微生物^[11]. 与不施氮磷(N0P0)相比, 施氮处理下(N50P0和N100P0)土壤呼吸速率分别提高了17.5%和13.4%, 异养呼吸速率分别提高了19.3%和22.1%, 自养呼吸速率分别提高了44.2%和25.8%. 随着氮添加, 氮素利用率的增加导致植物生长、微生物活性和植物生物量的增加^[4, 14]. 氮添加提高土壤呼吸及其组分速率的原因可能是因为氮添加促进了植物根系的生长, 土壤自养呼吸速率增加, 同时根系生物量的增加也导致根系分泌物增加, 为微生物提供更多的底物供应, 提高微生物的数量和活性, 进而增加土壤异养呼吸速率^[31]. 氮添加后会提高植物初级生产力以及凋落物量, 为根系和土壤微生物活动提供更多的碳底物供应^[30, 32]. 在氮限制

生态系统中,土壤有效氮的增加会刺激根系生长,其中细根生物量的数量和自养呼吸显著相关,氮添加后细根生物量的迅速增加有利于促进自养呼吸^[14]。异养呼吸主要取决于土壤基质的质量和数量、细胞外酶活性、土壤温度和湿度,以及微生物的生物量和活性^[33]。因此,氮添加通过提高土壤氮有效性进而增加微生物数量和活性以及植物根系生长,同时促进异养呼吸和自养呼吸,进而提高土壤总呼吸速率^[14, 33]。

虽然研究土壤呼吸对磷添加的响应要比氮添加少,但有研究认为磷添加对土壤呼吸具有明显效应^[13, 34]。本研究结果表明,磷添加对黄土丘陵退耕草地土壤呼吸速率的影响与氮添加类似,土壤异养呼吸和自养呼吸对磷添加均呈现积极响应(图4)。由于长期的严重土壤侵蚀和缺乏抚育管理,黄土丘陵区退耕草地植物生长受到氮磷共同限制,因此,施氮和氮磷配施后地上生物量均显著增加,且氮磷配施的地上生物量增量大于单独施氮^[26]。Wang等^[13]的研究指出,磷添加会提高黄土高原植物地上和地下生物量。由于磷在所有物理过程中,尤其是核酸合成、膜合成、能量生成和酶活化或失活过程中所起的重要作用,在磷添加之后,根系和微生物可以通过吸收更多磷素用于根系生长和微生物繁殖,进而维持较高的呼吸作用^[4]。因此,磷素添加后,根系尤其是细根生物量的提高会促进自养呼吸,增加微生物的碳底物和减少微生物的磷限制,可促进微生物生长而促进异养呼吸^[4, 20, 35]。

在陆地生态系统中,大气氮、磷沉降的不平衡输入会加剧系统的磷限制^[26]。在半干旱黄土丘陵区,土壤磷素有效性低且长期无投入,因此单施氮并不能解除该地区的土壤养分平衡限制。氮磷配施土壤呼吸及其组分累积CO₂通量显著高于单施氮或单施磷(图5)^[13]。氮磷配施后土壤微生物碳、土壤有机质、土壤磷有效性的提高和植物光合速率的增强,有利于提高根系氮吸收和光合产物的地下分配,促进植物地上和地下部分的生长,均有利于促进土壤呼吸^[11, 13, 26, 36]。本研究中,同一施氮条件下,随磷添加量的提高土壤总呼吸及其组分均增加,但在不同氮磷配比情况下,如土壤呼吸和自养呼吸在N50P40处理下达到最大值,而异养呼吸在N50P80处理达到最大值,说明氮磷配施有利于加速草地群落土壤碳循环,但对土壤呼吸及其组分的影响与氮磷供应水平有关(图4)。

3.2 氮磷添加对土壤呼吸及其组分温度敏感性的影响

土壤温度是影响土壤呼吸及其组分变化的重要

因素^[13]。本研究中,不同氮磷添加处理下的土壤呼吸及其组分均与土壤温度呈指数关系(表3)^[12, 28]。与不施肥相比,氮添加和氮磷配施的 Q_{10} 值均下降,说明施氮会降低土壤呼吸对土壤温度变化的敏感性(表3)。姜继韶等^[37]在研究黄土旱塬区施肥对春玉米土壤呼吸影响时也发现,施氮显著降低了 Q_{10} 值,降幅为20%左右。氮磷添加后土壤呼吸和异养呼吸的 Q_{10} 值也降低,可能是由于土壤温度升高和土壤干旱导致根系和微生物活性降低,以及土壤微生物群落结构发生变化^[13, 44]。土壤自养呼吸和异养呼吸的 Q_{10} 值都高于土壤总呼吸,其原因可能是因为土壤呼吸组分本身对温度敏感程度的内在差异以及各自所占的比例差异导致的^[38]。本试验中各处理对土壤温度和土壤含水量均无显著影响($P > 0.05$,图3)。因此,土壤呼吸和异养呼吸的温度敏感性的降低是由于氮磷添加,不是由土壤干旱和土壤温度升高引起的。微生物对土壤养分有效性改善或植物凋落物质量的增加可能是导致 Q_{10} 下降的重要原因^[36]。本研究中改变土壤呼吸温度敏感性的原因可能是氮磷添加影响土壤底物质量^[37],降低了土壤自养呼吸和异养呼吸的温度敏感性,从而改变土壤总呼吸温度敏感性。

4 结论

(1) 氮磷添加显著提高了黄土丘陵区退耕草地土壤总呼吸及其组分的速率,其中氮磷同时添加比单独添加氮或磷的效应更明显。

(2) 氮磷添加下草地群落土壤呼吸及其组分显示出明显的月变化特征,其中N100 [100 kg·(hm²·a)⁻¹]和P80 [80 kg·(hm²·a)⁻¹]配施处理下的平均土壤总呼吸和自养呼吸最大,N50 [50 kg·(hm²·a)⁻¹]和P40 [40 kg·(hm²·a)⁻¹]配施处理下的平均异养呼吸最大。

(3) 与未施肥相比,氮磷添加处理后草地群落土壤总呼吸和异养呼吸的温度敏感性(Q_{10} 值)均下降。氮磷添加会增加黄土丘陵区退耕草地碳排放通量,其大小与氮磷添加的量及氮磷配比有关。

(4) 综上所述,黄土丘陵区退耕草地土壤总呼吸及其组分的速率主要受氮磷浓度的影响,随着氮磷添加浓度的改变,土壤呼吸及其组分的速率和温度敏感性系数也会随之改变。

参考文献:

- [1] Bond-Lamberty B, Thomson A. A global database of soil respiration data[J]. *Biogeosciences*, 2010, 7(6): 1915-1926.
- [2] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 1992, 44(2):

- 81-99.
- [3] Högberg P, Bhupinderpal-Singh, Löfvenius M O, *et al.* Partitioning of soil respiration into its autotrophic and heterotrophic components by means of tree-girdling in old boreal spruce forest[J]. *Forest Ecology and Management*, 2009, **257**(8): 1764-1767.
- [4] Ren F, Yang X X, Zhou H K, *et al.* Contrasting effects of nitrogen and phosphorus addition on soil respiration in an alpine grassland on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 34786.
- [5] Tang J W, Baldocchi D D. Spatial-temporal variation in soil respiration in an oak-grass savanna ecosystem in California and its partitioning into autotrophic and heterotrophic components[J]. *Biogeochemistry*, 2005, **73**(1): 183-207.
- [6] 周小刚, 张彦军, 南雅芳, 等. 黄土区农田和草地生态系统土壤呼吸差异及其影响因素[J]. *环境科学*, 2013, **34**(3): 1026-1033.
Zhou X G, Zhang Y J, Nan Y F, *et al.* Differences in soil respiration between cropland and grassland ecosystems and factors influencing soil respiration on the Loess Plateau [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(3): 1026-1033.
- [7] 严俊霞, 秦作栋, 张义辉, 等. 土壤温度和水分对油松林土壤呼吸的影响[J]. *生态学报*, 2009, **29**(12): 6366-6376.
Yan J X, Qin Z D, Zhang Y H, *et al.* Effect of soil temperature and moisture on soil CO₂ efflux in a *Pinus tabulaeformis* forest [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, **29**(12): 6366-6376.
- [8] Moyano F E, Manzoni S, Chenu C. Responses of soil heterotrophic respiration to moisture availability: an exploration of processes and models[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **59**: 72-85.
- [9] Niu F R, Chen J, Xiong P F, *et al.* Responses of soil respiration to rainfall pulses in a natural grassland community on the semi-arid Loess Plateau of China [J]. *CATENA*, 2019, **178**: 199-208.
- [10] 张鹤, 陈吉, 熊沛枫, 等. 黄土丘陵区 3 种典型天然草地群落土壤呼吸对模拟降雨的响应[J]. *环境科学学报*, 2017, **37**(8): 3139-3148.
Zhang H, Chen J, Xiong P F, *et al.* Soil respiration response to simulated rainfall pulses in natural grassland communities in loess hilly-gully region [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, **37**(8): 3139-3148.
- [11] Li J, Li Z A, Wang F M, *et al.* Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil microbial community in a secondary tropical forest of China [J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2015, **51**(2): 207-215.
- [12] Zhong Y Q W, Yan W M, Zong Y Z, *et al.* Biotic and abiotic controls on the diel and seasonal variation in soil respiration and its components in a wheat field under long-term nitrogen fertilization [J]. *Field Crops Research*, 2016, **199**: 1-9.
- [13] Wang R, Sun Q 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.
- [14] Zhang C P, Niu D C, Hall S J, *et al.* Effects of simulated nitrogen deposition on soil respiration components and their temperature sensitivities in a semiarid grassland [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, **75**: 113-123.
- [15] Jia X X, Shao M A, Wei X R. Responses of soil respiration to N addition, burning and clipping in temperate semiarid grassland in northern China [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012, **166-167**: 32-40.
- [16] Ramirez K S, Craine J M, Fierer N. Nitrogen fertilization inhibits soil microbial respiration regardless of the form of nitrogen applied [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2010, **42**(12): 2336-2338.
- [17] Janssens I A, Dieleman W, Luyssaert S, *et al.* Reduction of forest soil respiration in response to nitrogen deposition [J]. *Nature Geoscience*, 2010, **3**(5): 315-322.
- [18] Deng Q, Zhou G, Liu J, *et al.* Responses of soil respiration to elevated carbon dioxide and nitrogen addition in young subtropical forest ecosystems in China [J]. *Biogeosciences*, 2010, **7**(1): 315-328.
- [19] Wallenstein M D, McNulty S, Fernandez I J, *et al.* Nitrogen fertilization decreases forest soil fungal and bacterial biomass in three long-term experiments [J]. *Forest Ecology and Management*, 2006, **222**(1-3): 459-468.
- [20] Li J H, Yang Y J, Li B W, *et al.* Effects of nitrogen and phosphorus fertilization on soil carbon fractions in Alpine Meadows on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *PLoS One*, 2014, **9**(7): e103266.
- [21] Niu S L, Classen A T, Dukes J S, *et al.* Global patterns and substrate-based mechanisms of the terrestrial nitrogen cycle [J]. *Ecology Letters*, 2016, **19**(6): 697-709.
- [22] 贺云龙, 齐玉春, 彭琴, 等. 外源碳氮添加对草地碳循环关键过程的影响 [J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(3): 1133-1141.
He Y L, Qi Y C, Peng Q, *et al.* Effects of exogenous carbon and nitrogen addition on the key process of carbon cycle in grassland ecosystem: a review [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(3): 1133-1141.
- [23] Schuman G E, Janzen H H, Herrick J E. Soil carbon dynamics and potential carbon sequestration by rangelands [J]. *Environmental Pollution*, 2002, **116**(3): 391-396.
- [24] 文海燕, 傅华, 郭丁. 黄土高原典型草原优势植物凋落物分解及养分释放对氮添加的响应 [J]. *生态学报*, 2017, **37**(6): 2014-2022.
Wen H Y, Fu H, Guo D. Influence of nitrogen addition on *Stipa bungeana* and *Heteropappus altaicus* litter decomposition and nutrient release in a steppe located on the Loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, **37**(6): 2014-2022.
- [25] Liang T, Tong Y A, Xu W, *et al.* Atmospheric nitrogen deposition in the Loess area of China [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2016, **7**(3): 447-453.
- [26] 刘海威, 张少康, 焦峰. 氮磷添加对不同退耕年限草本植被群落及土壤化学计量特征的影响 [J]. *水土保持学报*, 2017, **31**(2): 333-338.
Liu H W, Zhang S H, Jiao F. Effects of nitrogen and phosphorus addition on community and soil stoichiometric characteristics of abandoned farmlands of different vegetation restoration years [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, **31**(2): 333-338.
- [27] 田祥宇, 涂利华, 胡庭兴, 等. 华西雨屏区苦竹人工林土壤呼吸各组分特征及其温度敏感性 [J]. *应用生态学报*, 2012, **23**(2): 293-300.
Tian X Y, Tu L H, Hu T X, *et al.* Characteristics of soil respiration components and their temperature sensitivity in a *Pleioblastus amarus* plantation in Rainy Area of West China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, **23**(2): 293-300.
- [28] 吴君君, 杨智杰, 刘小飞, 等. 米槠和杉木人工林土壤呼吸及其组分分析 [J]. *植物生态学报*, 2014, **38**(1): 45-53.
Wu J J, Yang Z J, Liu X F, *et al.* Analysis of soil respiration and components in *Castanopsis carlesii* and *Cunninghamia lanceolata* plantations [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*,

- 2014 ,**38**(1) : 45-53.
- [29] Fang H J , Cheng S L , Yu G R , *et al.* Responses of CO₂ efflux from an alpine meadow soil on the Qinghai Tibetan Plateau to multi-form and low-level N addition [J]. *Plant and Soil* , 2012 , **351**(1-2) : 177-190.
- [30] Xu W H , Wan S Q. Water-and plant-mediated responses of soil respiration to topography , fire , and nitrogen fertilization in a semiarid grassland in northern China [J]. *Soil Biology and Biochemistry* , 2008 , **40**(3) : 679-687.
- [31] 胡伟 , 张亚红 , 李鹏 , 等. 不同施氮水平对紫花苜蓿草地土壤呼吸和土壤生化性质的影响 [J]. *环境科学* , 2019 , **40**(6) : 2858-2868.
Hu W , Zhang Y H , Li P , *et al.* Effects of different levels of nitrogen fertilization on soil respiration rates and soil biochemical properties in an Alfalfa Grassland [J]. *Environmental Science* , 2019 , **40**(6) : 2858-2868.
- [32] Yan L M , Chen S P , Huang J H , *et al.* Differential responses of auto-and heterotrophic soil respiration to water and nitrogen addition in a semiarid temperate steppe [J]. *Global Change Biology* , 2010 , **16**(8) : 2345-2357.
- [33] Zhang Q , Lei H M , Yang D W. Seasonal variations in soil respiration , heterotrophic respiration and autotrophic respiration of a wheat and maize rotation cropland in the North China Plain [J]. *Agricultural and Forest Meteorology* , 2013 , **180**: 34-43.
- [34] Wang X Y , Zhao X Y , Li Y L , *et al.* Responses of soil respiration to simulated precipitation and nitrogen , phosphorus additions in Horqin sandy land of northeastern China [J]. *Fresenius Environmental Bulletin* , 2013 , **22**(5) : 1463-1471.
- [35] Liu L , Gundersen P , Zhang T , *et al.* Effects of phosphorus addition on soil microbial biomass and community composition in three forest types in tropical China [J]. *Soil Biology and Biochemistry* , 2012 , **44**(1) : 31-38.
- [36] Sun Q Q , Wang R , Wang Y , *et al.* Temperature sensitivity of soil respiration to nitrogen and phosphorous fertilization: does soil initial fertility matter? [J]. *Geoderma* , 2018 , **325**: 172-182.
- [37] 姜继韶 , 郭胜利 , 王蕊 , 等. 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* . 2015. **36**(5) : 1802-1809.
Jiang J S , Guo S L , Wang R , *et al.* Effects of nitrogen fertilization on soil respiration and temperature sensitivity in spring maize field in semi-arid regions on Loess Plateau [J]. *Environmental Science* , 2015 , **36**(5) : 1802-1809.
- [38] 陈忠 , 林成芳 , 张星星 , 等. 干扰强度对亚热带米槠人促更新林土壤呼吸及其组分的影响 [J]. *应用生态学报* , 2017 , **28**(1) : 19-27.
Chen Z , Lin C F , Zhang X X , *et al.* Effects of interference intensity on soil respiration and its components in *Castanopsis carlesii* forest with artificially assisted regeneration in subtropical China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* , 2017 , **28**(1) : 19-27.