

DOI: 10.5846/stxb202107262012

马进鹏, 庞丹波, 陈林, 万红云, 李学斌. 荒漠草原 4 种典型植物枯落物分解过程中土壤呼吸对短期氮、水变化的响应. 生态学报, 2023, 43(11): 4722-4733.

Ma J P, Pang D B, Chen L, Wan H Y, Li X B. Response of soil respiration to short-term changes of nitrogen and water during decomposition of four typical plant litter in desert steppe. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(11): 4722-4733.

荒漠草原 4 种典型植物枯落物分解过程中土壤呼吸对短期氮、水变化的响应

马进鹏^{1,2,3,4}, 庞丹波^{1,2,3}, 陈林^{1,2,3}, 万红云^{1,2,3}, 李学斌^{1,2,3,*}

1 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021

2 宁夏大学西北土地退化与生态恢复国家重点实验室培育基地, 银川 750021

3 宁夏大学生态环境学院, 银川 750021

4 宁夏大学农学院, 银川 750021

摘要: 土壤呼吸作为陆地生态系统碳循环的重要组成部分, 对研究干旱半干旱区荒漠草原碳平衡具有重要意义。选取荒漠草原 4 种典型植物枯落物进行裂区实验, 设置氮、水添加实验处理, 探讨不同的枯落物地表, 短期氮、水处理对荒漠草原土壤呼吸的影响。结果表明, 土壤呼吸日动态呈单峰曲线, 最大值出现在 10:00—12:00。相同处理间不同枯落物地表和相同枯落物地表不同处理间土壤呼吸在白天和夜间均有差异 ($P < 0.05$)。枯落物对土壤呼吸贡献表明, 短期不做任何处理的枯落物对土壤呼吸的贡献最大, 贡献率高达 68%—89%。多因素方差分析显示, 氮及氮和水交互作用对土壤呼吸的影响显著。呼吸在降水处理间存在显著差异 ($P < 0.05$), 表现为减雨 (P3) > 增雨 (P2) > 正常 (P1); 呼吸在氮素处理间存在极显著差异 ($P < 0.001$), 表现为添氮 (N1) > 不添氮 (N0)。土壤呼吸与土壤温度、土壤湿度拟合发现, 短期的氮、水处理下土壤温度与土壤呼吸显著相关 ($P < 0.05$), 可解释呼吸变化的 50.3%—69.9%; 土壤湿度对呼吸影响不显著 ($P > 0.05$), 温度、湿度的交互作用对土壤呼吸的影响显著 ($P < 0.05$), 可解释呼吸变化的 49.6%—72.8%。综上, 短期的氮、水处理下, 处理间土壤呼吸存在差异, 表现为减雨 > 增雨 > 正常, 添氮 > 不添氮, 另外土壤温度是影响土壤呼吸的主导因子, 研究可为荒漠草原土壤呼吸变化规律及呼吸对氮素和水分响应提供依据。

关键词: 氮沉降; 降水; 枯落物; 土壤呼吸

Response of soil respiration to short-term changes of nitrogen and water during decomposition of four typical plant litter in desert steppe

MA Jinpeng^{1,2,3,4}, PANG Danbo^{1,2,3}, CHEN Lin^{1,2,3}, WAN Hongyun^{1,2,3}, LI Xuebin^{1,2,3,*}

1 Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

2 Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in Northwest China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

3 College of Ecological Environment, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

4 School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

Abstract: As an important part of carbon cycle in terrestrial ecosystem, soil respiration is of great significance to study the carbon balance of desert steppe in arid and semi-arid areas. In this study, four typical plant litters in desert steppe were selected for splintering experiments, and nitrogen and water addition experiments were set up to explore the effects of short-

基金项目: 宁夏重点研发计划项目 (2018BFG02015, 2021BEG02005); 宁夏自然科学基金项目 (2020AAC03102); 国家自然科学基金项目 (31960359)

收稿日期: 2021-07-26; **网络出版日期:** 2023-02-07

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lixuebin@nxu.edu.cn

term nitrogen and water treatment on soil respiration under different litters on the surface of desert steppe. The results showed that the diurnal dynamics of soil respiration presented a single peak curve, and the maximum value appeared at 10:00—12:00. There were differences in soil respiration in day and night between different treatments of same litter surface and different treatments of same litter surface ($P < 0.05$). The contribution of litter to soil respiration showed that the litter without any short-term treatment contributed the most to soil respiration, with a contribution rate of 68%—89%. Multivariate analysis of variance showed that nitrogen and the interaction between nitrogen and water had significant effects on soil respiration. Respiration was significantly different between precipitation treatments ($P < 0.05$), showed as decrease precipitation > increased precipitation > normal; Respiration was significantly different between nitrogen treatments ($P < 0.001$), showed as nitrogen addition > no nitrogen addition. Soil respiration was fitted with soil temperature and soil moisture. Soil temperature was significantly correlated with soil respiration under short-term nitrogen and water treatment ($P < 0.05$). Soil temperature could explain 50.3%—69.9% of the effect on respiration. Soil moisture had no significant effect on respiration ($P > 0.05$). The interaction of temperature and humidity had significant effect on soil respiration ($P < 0.05$), which can explain 49.6%—72.8% of the effect on respiration. To sum up, there were differences in soil respiration between short-term nitrogen and water treatments, which were decrease precipitation > increased precipitation > normal, nitrogen addition > no nitrogen addition. In addition, soil temperature was the dominant factor affecting soil respiration. This study could provide a basis for the change of soil respiration and the response of soil respiration to nitrogen and water in desert steppe.

Key Words: nitrogen deposition; precipitation; litter; soil respiration

土壤呼吸作为陆地生态系统碳循环的重要过程,是土壤碳进入大气的主要途径,每年通过土壤呼吸向大气排放 83—108Pg C,是化石燃料排放的 10 倍多^[1]。土壤呼吸微小的变化显著影响着大气 CO₂ 浓度^[2],进而影响区域和全球碳平衡和气候变化^[3]。在干旱和半干旱生态系统中,土壤呼吸很大程度上造成了土壤碳库的损失^[4],有效的控制了碳平衡,很好的反应气候变化^[5-6]。同时,土壤呼吸的动态变化对理解碳循环及其对气候变化的响应至关重要^[7]。

近年来,氮沉降、降水变化和大气 CO₂ 浓度升高等全球变化问题日益严重^[8-9],而这些变化通常会影响到陆地生态系统的初级生产力,同时改变枯落物的分解状况,进而间接影响土壤呼吸^[10-11]。Zhao 等^[12]研究发现氮沉降和枯落物的输入对土壤呼吸有显著影响,氮素的增加会显著提高根系呼吸,但一定程度抑制了微生物呼吸,枯落物的去除会降低土壤呼吸而枯落物的增加对土壤呼吸影响不明显; Afreen 等^[13]研究不同降水强度下草地土壤呼吸的变化规律,发现降雨量大的土壤呼吸显著高,降雨量小的土壤呼吸显著低。枯落物是连接植物-土壤的重要纽带,土壤碳库的输入很大程度上取决于枯枝落叶分解释放 CO₂ 的速率^[14],因此,枯落物是土壤呼吸的重要组成部分,是土壤呼吸地上部分碳源的提供者^[15]。解欢欢等^[16]研究发现枯落物在森林生态系统土壤呼吸中起重要作用,枯落物的覆盖会改变土壤的微环境间接影响土壤呼吸;张彦军等^[17]通过 Meta 分析对国内外已发表的 30 篇论文分析发现枯落物是影响土壤呼吸的重要因素,枯落物的输入显著增加了土壤呼吸。

荒漠草原作为草原向荒漠的过渡形态,是典型的受水分和养分共同限制的脆弱生态系统类型^[3],处在干旱与半干旱地区边缘,极易受到环境变化和人类活动的干扰,因此在我国草地生态系统碳循环研究中具有重要的地位^[11]。土壤呼吸是草地生态系统碳循环的重要组成部分,对解释草地生态系统碳平衡具有重要意义^[12,18]。目前关于荒漠草原土壤呼吸的观测研究相对薄弱,大部分集中在植物群落进行养分添加对土壤呼吸的影响^[19-20],而对土壤呼吸的原位监测及枯落物对土壤呼吸的影响研究较少。基于此本研究对荒漠草原典型植物枯落物进行野外控制实验,分析短期的氮、水添加下植物枯落物对土壤呼吸的影响,有助于宏观上了解荒漠草原土壤呼吸的变化规律,旨在为荒漠草原草地生态系统碳循环的研究提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 实验区概况

位于宁夏回族自治区东部的盐池县(37°04'—38°10'N, 106°30'—107°47'E), 东接陕西省, 南至甘肃省, 北面为内蒙古自治区的鄂托克前旗, 该县是重要的农牧交界地带, 由东南至西北为广阔的干草原和荒漠草原, 北边与毛乌素沙地相连, 南部紧靠黄土高原, 是典型的过渡地带。平均海拔 1600m, 平均气温 8.4℃, 年降雨量 280mm, 属中温带大陆性季风气候, 是半干旱区向干旱区过渡带, 土壤类型以灰钙土为主, 植被类型主要以灌丛、沙生植被和荒漠植被为主^[21—22]。

1.2 实验设计

于盐池县杨寨子选取地势平整的区域作为试验样地进行裂区试验, 清除地上地下植被及根系, 主区为降雨处理: 设置正常(P1), 增雨 30%(P2), 减雨 30%(P3) 三个水平; 副区为施氮处理: 设置 N0(0), N1(10g m⁻² a⁻¹) 两个水平, 每个小区面积为 2m×6m。减雨区由自制减雨架实现减雨处理, 增雨区通过收集装置将减雨区收集的水量用喷壶均匀补增到增雨区; 施氮选用尿素在每季度初实施, 于 2020 年 8 月初进行初次氮添加, 添加尿素量为 5g/m²。将其溶于水均匀喷洒在对应小区, 为减少水分对分解的影响, 其他区喷洒等量清水。为了防止土壤水分和养分在处理间的水平交换, 将聚氯乙烯(pvc)板埋入土层 25cm 左右以作隔离作用(图 1)。

于 2020 年 7 月用信封分别收集猪毛蒿(*Artemisia scoparia*)(H)、苦豆子(*Sophora alopecuroides*)(K)、短花针茅(*Stipa breviflora*)(ZM)和蒙古冰草(*Agropyron mongolicum*)(BC)4 种植物(此 4 种植物群落在荒漠草原分布面积最大, 最具代表性和典型性, 其枯落物的化学性质存在显著差异^[23—27])的立枯体带回实验室处理, 105℃ 杀青 30min, 65℃ 烘干至恒重, 剪成 5cm 左右的小段, 装入孔径为 1mm, 大小 15cm×25cm 尼龙网袋中, 每袋 20g^[28], 处理完后放回样地, 用铁丝将其固定在小区土壤表面(网袋与土壤紧密接触)。

在每个对应小区(1m×3m)内布置三个呼吸环, 间距 1m, 规格: 直径 20cm, 高度 7—8cm, 呼吸环内有枯落物网袋; 另外在主区副区 6 个大区(2m×6m)处理下随机布置 3 个未放枯落物网袋的呼吸环作为对照。



图 1 试验小区

Fig.1 Experimental plot

1.3 测定方法

用土壤 CO₂ 通量自动测量系统(LI-8100A, 美国)测定所有位点的土壤呼吸速率, 有枯落物的呼吸(R_{s+L}), 去除枯落物(空白)的呼吸(R_s), 于 10 月中旬, 即枯落物网袋布置 3 个月左右, 选取晴朗天气对所有呼吸环进行连续测定 2—3d, 每次测定 24h, 每隔 2h 测定一个循环。不定期将处理内的地表活体植被清除, 减少地表植被对测量结果的影响。

1.4 数据处理

用 Excel 进行数据整理, 用 SPSS 24.0 进行方差分析: 选择 LSD(最小显著性差异比较), 用 Origin 制图。

2 结果与分析

2.1 土壤呼吸动态变化特征

分析相同处理不同枯落物地表土壤呼吸的日动态变化特征(图 2)与相同枯落物地表不同处理土壤呼吸的日动态变化特征(图 3),发现土壤呼吸的日变化剧烈均呈单峰曲线,最大值出现在 10:00—14:00,最小值出现在 0:00—4:00。土壤呼吸的变化范围 $-0.30—1.00\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,最大值 $0.96\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$,最小值 $-0.22\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$;相比较土壤呼吸最大值和最小值在不同处理不同枯落物地表间均存在差异。

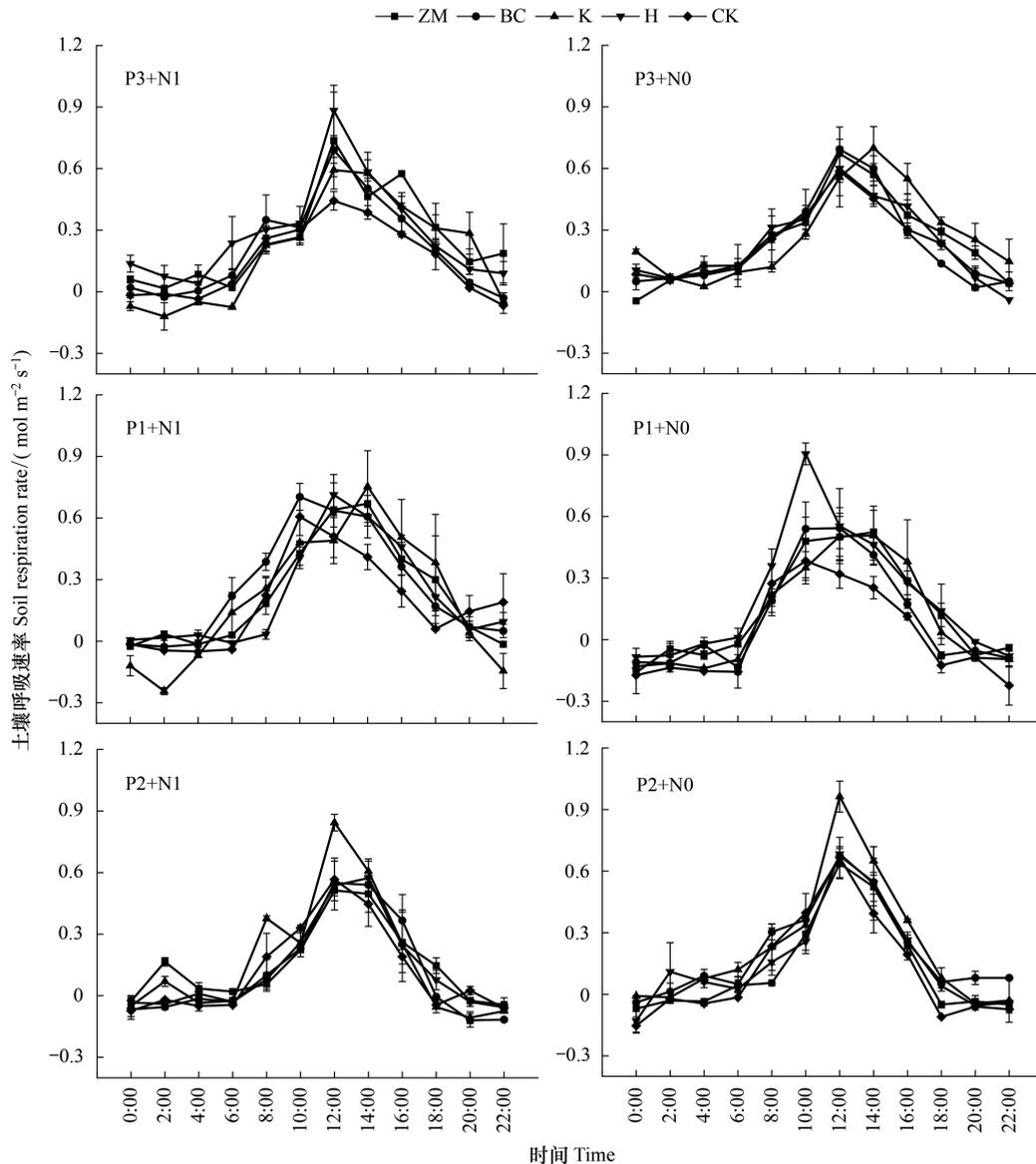


图 2 相同处理不同枯落物地表土壤呼吸动态特征

Fig.2 Dynamic characteristics of soil respiration of different litter under the same treatment

ZM: 短花针茅 *Stipa breviflora*; BC: 蒙古冰草 *Agropyron mongolicum*; K: 苦豆子 *Sophora alopecuroides*; H: 猪毛蒿 *Artemisia scoparia*; CK: 空白对照 Blank control; P1: 正常 Normal; P2: 增雨 Increased precipitation; P3: 减雨 Decrease precipitation; N1: 添氮 Nitrogen addition; N0: 不添氮 No nitrogen addition

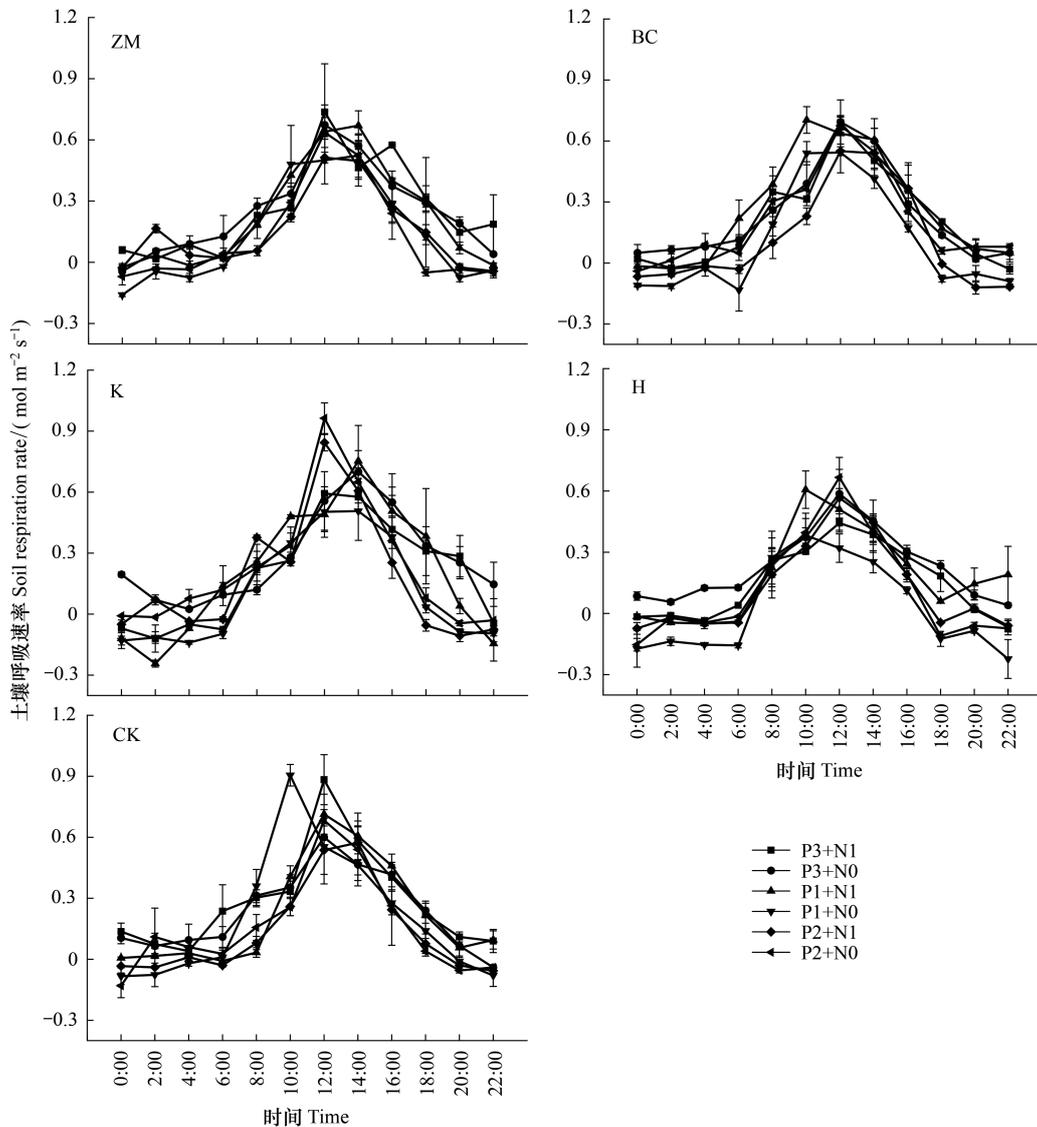


图3 相同枯落物地表不同处理土壤呼吸动态特征

Fig.3 Dynamic characteristics of soil respiration under the same litter and different treatments

2.2 土壤呼吸昼、夜变化特征

分析相同处理不同枯落物地表土壤呼吸昼、夜差异(图4)与相同枯落物地表不同处理土壤呼吸昼、夜差异(图5),发现相同处理间不同枯落物地表和相同枯落物地表不同处理间土壤呼吸在白天和夜间均有差异($P < 0.05$);同时白天土壤呼吸要远大于呼吸的日均值,其占呼吸日变化的主要部分。

2.3 土壤呼吸与枯落物分解的 CO_2 释放及其贡献率

分析有枯落物的土壤呼吸(R_{s+L})、去除枯落物的土壤呼吸(R_s)、枯落物分解的 CO_2 释放(R_L)日均值及贡献率(表1),发现相同处理不同枯落物地表和相同枯落物地表不同处理间土壤呼吸存在差异;从枯落物对土壤呼吸的贡献率来看,不做任何处理(P1+N0)枯落物对土壤呼吸的贡献率最大,为短花针茅73%、蒙古冰草73%、苦豆子68%、猪毛蒿89%。

2.4 短期氮、水变化对不同植物枯落物土壤呼吸的影响

多因素方差分析(表2)发现氮(N)和水(P)的交互作用($N \times P$)对土壤呼吸影响显著($P < 0.05$),短期氮和降水处理可以更直接的反映土壤呼吸的特征,一定程度上改变了土壤微环境,同时氮和降水处理影响枯落物

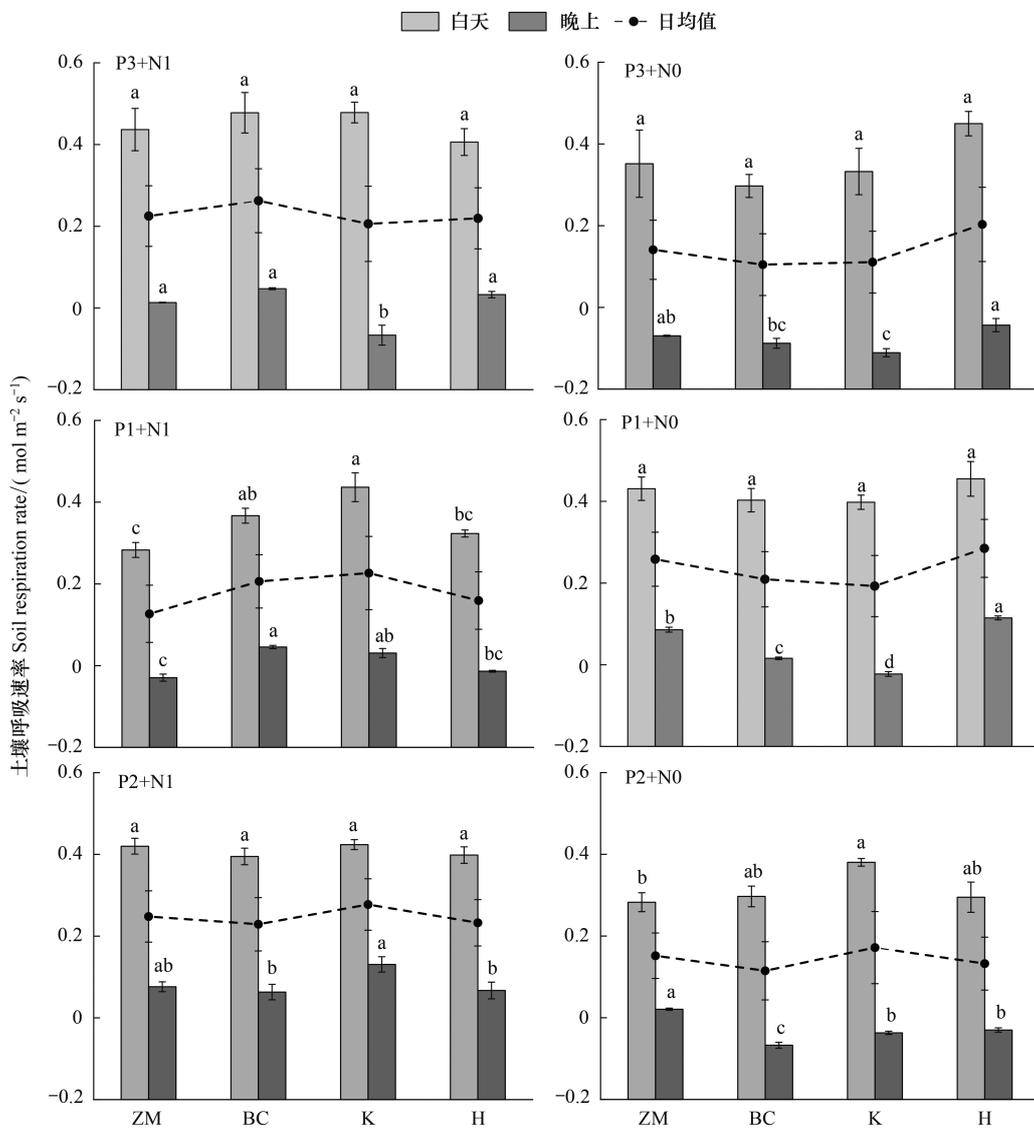


图 4 相同处理不同枯落物地表土壤呼吸昼、夜特征

Fig.4 Characteristics of soil respiration in day and night with the different litter and same treatments

不同小写字母表示相同处理不同枯落间差异显著性

的分解进而对呼吸产生影响,而这种效果在夜间表现得更明显。

2.5 土壤呼吸对短期氮、水变化的响应

分析短期氮、水处理对土壤呼吸的影响(图 6),发现不添加氮呼吸在降水处理间存在显著差异($P < 0.05$),表现为减雨(P3) > 增雨(P2) > 正常(P1);同理呼吸在氮素处理间存在极显著差异($P < 0.001$),表现为添氮(N1) > 不添氮(N0)。氮水交互作用发现,增雨添氮处理的土壤呼吸最小,这种交互作用一定程度上减弱了土壤中微生物活性,是呼吸变小的主要原因。

2.6 土壤呼吸与土壤温度、土壤湿度的关系

土壤呼吸与土壤温度拟合(图 7),发现短期氮水处理下,土壤温度对呼吸影响显著($P < 0.001$),其中短花针茅(ZM)和猪毛蒿(H)土壤呼吸与土壤温度呈指数关系,蒙古冰草(BC)、苦豆子(K)和未放置枯落物(CK)土壤呼吸与土壤温度成线性关系。 R^2 在 0.503—0.696 之间,温度可解释呼吸变化的 50.3%—69.9%。

土壤呼吸与土壤湿度线性拟合(图 8),发现短期氮水处理下,土壤湿度与土壤呼吸速率呈线性关系,对土壤呼吸速率影响不显著($P > 0.05$),仅解释呼吸变化的 1%—4%。

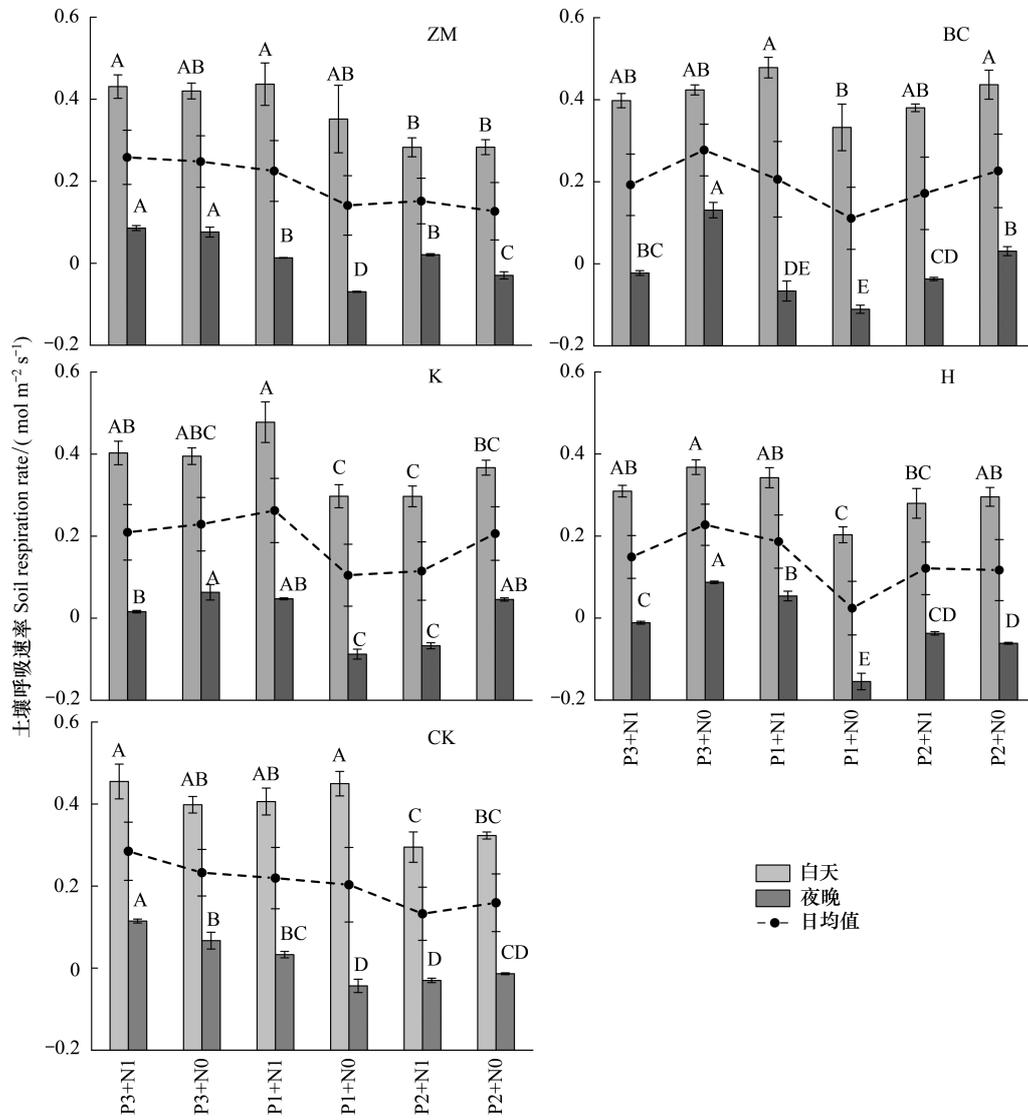


图 5 相同枯落物地表不同处理土壤呼吸昼、夜特征

Fig.5 Characteristics of soil respiration in day and night with the same litter and different treatments
不同大写字母表示相同枯落物不同处理间差异显著性

表 1 土壤呼吸与枯落物分解的 CO₂ 释放及其贡献的比较

Table 1 Comparison of CO₂ release and contribution between soil respiration and litter decomposition

枯落物类型 Litter types	处理 Treatment	土壤呼吸 Soil respiration/($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)			
		R_{S+L}	R_S	R_L	$R_L/R_{S+L}/\%$
短花针茅 ZM <i>Stipa breviflora</i>	P1+N1	0.225±0.026	0.187±0.015	0.038±0.038	19.789±10.401
	P1+N0	0.141±0.042	0.024±0.016	0.117±0.058	73.033±17.916
	P2+N1	0.152±0.012	0.121±0.016	0.031±0.004	20.786±4.129
	P2+N0	0.127±0.013	0.117±0.012	0.010±0.004	7.639±3.095
	P3+N1	0.258±0.012	0.149±0.007	0.109±0.011	42.155±2.947
	P3+N0	0.248±0.014	0.228±0.009	0.021±0.007	8.050±2.737
蒙古冰草 BC <i>Agropyron mongolicum</i>	P1+N1	0.263±0.024	0.187±0.015	0.076±0.036	27.125±10.876
	P1+N0	0.105±0.012	0.024±0.016	0.081±0.027	72.659±19.431
	P2+N1	0.115±0.013	0.121±0.016	-0.006±0.025	29.968±15.116

续表

枯落物类型 Litter types	处理 Treatment	土壤呼吸 Soil respiration/($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)			
		R_{S+L}	R_S	R_L	$R_L/R_{S+L}/\%$
苦豆子 K <i>Sophora alopecuroides</i>	P2+N0	0.206±0.008	0.117±0.012	0.089±0.020	42.671±7.836
	P3+N1	0.209±0.016	0.149±0.007	0.060±0.011	28.428±2.980
	P3+N0	0.229±0.012	0.228±0.009	0.002±0.020	10.118±4.872
	P1+N1	0.206±0.012	0.187±0.015	0.019±0.020	14.897±3.511
	P1+N0	0.111±0.027	0.024±0.016	0.087±0.038	68.082±25.980
	P2+N1	0.172±0.006	0.121±0.016	0.050±0.020	28.758±11.489
	P2+N0	0.227±0.011	0.117±0.012	0.110±0.022	47.618±7.748
	P3+N1	0.193±0.014	0.149±0.007	0.044±0.019	21.383±9.128
	P3+N0	0.277±0.013	0.228±0.009	0.050±0.022	17.286±7.271
猪毛蒿 H <i>Artemisia scoparia</i>	P1+N1	0.219±0.016	0.187±0.015	0.033±0.002	15.081±1.027
	P1+N0	0.203±0.022	0.024±0.016	0.179±0.007	89.534±7.096
	P2+N1	0.133±0.021	0.121±0.016	0.011±0.030	31.894±6.954
	P2+N0	0.159±0.007	0.117±0.012	0.042±0.017	25.915±9.927
	P3+N1	0.285±0.019	0.149±0.007	0.136±0.025	46.911±5.866
	P3+N0	0.233±0.019	0.228±0.009	0.005±0.027	16.834±4.074

P1: 正常 Normal; P2: 增雨 Increased precipitation; P3: 减雨 Decrease precipitation; N1: 添氮 Nitrogen addition; N0: 不添氮 No nitrogen addition; 平均值(土壤呼吸均值)±标准误; R_{S+L} : 有枯落物土壤呼吸; R_S : 去除枯落物土壤呼吸; R_L : 枯落物呼吸

表 2 不同处理对昼、夜土壤呼吸的方差分析

Table 2 Variance analysis of soil respiration at day and night under different treatments

处理 Treatment	项目 Item	土壤呼吸 Soil respiration					
		R_{S+L}		R_S		R_L	
		白天 Day	晚上 Night	白天 Day	晚上 Night	白天 Day	晚上 Night
N	F	13.511	188.236	4.316	52.690	5.168	2.575
	P	0.000**	0.000**	0.039*	0.000**	0.009*	0.087
P	F	2.434	0.829	1.271	30.722	0.052	3.974
	P	0.125	0.367	0.282	0.000**	0.820	0.052
L	F	1.705	11.467	—	—	0.993	0.753
	P	0.179	0.000**	—	—	0.404	0.526
N×P	F	7.387	81.388	9.750	122.309	3.685	14.753
	P	0.002*	0.000**	0.003*	0.000**	0.032*	0.000**
N×L	F	2.053	10.806	—	—	0.869	4.342
	P	0.077	0.000**	—	—	0.525	0.001*
P×L	F	0.484	29.388	—	—	0.526	3.448
	P	0.695	0.000**	—	—	0.666	0.024*
N×P×L	F	2.278	14.572	—	—	1.261	8.725
	P	0.051	0.000**	—	—	0.293	0.000**

F: 评估组间的差异; P: 评估差异显著性; N: 氮 Nitrogen; P: 降雨 Precipitation; L: 枯落物 Litter; *, P < 0.05; **, P < 0.001

土壤呼吸与土壤温度、湿度复合回归模型(表 3), 发现短期氮水处理下, 温度与湿度的交互作用对土壤呼吸速率影响显著 ($P < 0.001$), R^2 在 0.496—0.728 之间, 温度、湿度的交互作用可解释呼吸变化的 49.6%—72.8%, 比单个因子更好解释呼吸的变化。

表 3 土壤呼吸与土壤温度、湿度复合回归模型

Table 3 Compound regression model of soil respiration, soil temperature and soil humidity

类型 Types	回归方程 Regression equation	R^2	P
短花针茅 <i>Stipa breviflora</i>	$R_{S+L} = 0.033T - 0.014W - 0.016$	0.728	<0.001
蒙古冰草 <i>Agropyron mongolicum</i>	$R_{S+L} = 0.030T - 0.003W - 0.080$	0.576	<0.001
苦豆子 <i>Sophora alopecuroides</i>	$R_{S+L} = 0.037T - 0.003W - 0.138$	0.692	<0.001
猪毛蒿 <i>Artemisia scoparia</i>	$R_{S+L} = 0.033T - 0.015W + 0.003$	0.603	<0.001
空白对照 Blank control	$R_S = 0.025T - 0.004W - 0.099$	0.496	<0.001

T: 土壤温度 Soil temperature; W: 土壤湿度 Soil humidity; R_{S+L} : 有枯落物土壤呼吸; R_S : 去除枯落物土壤呼吸

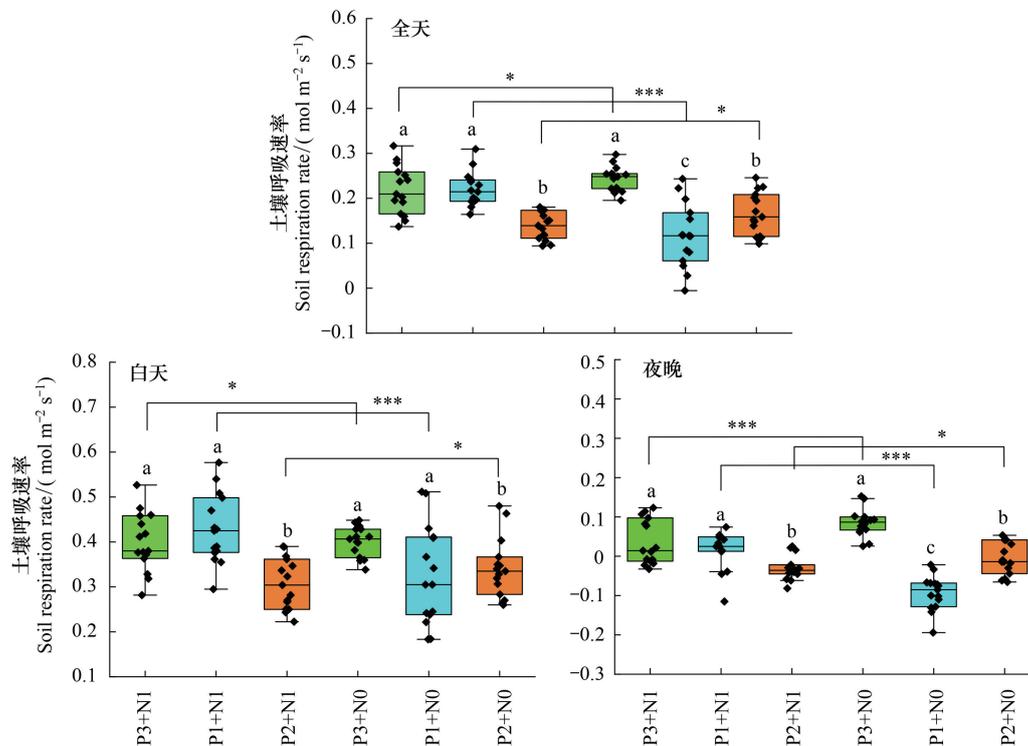


图 6 不同处理对土壤呼吸影响的比较

Fig.6 Comparison of effects of different treatments on soil respiration

小写字母表示不同降雨间差异显著性; *: 添氮处理间差异显著性 *: $P > 0.05$; **: $P < 0.05$; ***: $P < 0.001$

3 讨论

3.1 短期氮、水变化下土壤呼吸变化特征

有研究表明,受温度、降雨等气候因子的影响,土壤呼吸呈现明显的季节和年际变化规律^[29]。本研究发现不同处理下有枯落物的土壤呼吸(R_{s+L})和去除枯落物的土壤呼吸(R_s)日动态变化均呈单峰曲线,最大值出现在 10:00—14:00,最小值出现在 0:00—4:00,这与荒漠草原众多土壤呼吸动态变化研究结果一致^[30—31],可见氮添加和降水处理没有改变荒漠草原土壤呼吸速率的日变化规律。

王珍等^[31]研究增温和施氮对荒漠草原土壤呼吸的影响发现白天土壤呼吸远大于夜间土壤呼吸,吴夏等^[32]研究岩溶区土壤呼吸昼夜变化特征也发现土壤呼吸作用强度晚上小于白天,这些结果均与本研究结果一致,研究发现短期添氮和降水处理下,白天土壤呼吸是全天土壤呼吸的主要部分,晚上土壤呼吸对添氮和降水处理响应更加明显,可见白天温度升高一定程度上增加了微生物活性、加快了土壤有机质的分解从而促进了土壤呼吸^[31]。有研究表明^[33]晚上土壤呼吸比较稳定,夜晚温度降低,表层土壤含水量变化平稳,一定程度上降低了土壤酶活性,导致土壤呼吸速率下降;林力涛等^[34]研究了施氮处理下沙质草地土壤呼吸的调控作用,发现施氮处理会增加土壤呼吸速率,这与本研究结果相似,原因是添氮会增加土壤微生物生物量、脲酶和碱性磷酸酶活性^[35],影响枯落物的分解,进而对呼吸产生影响。研究发现^[36]夜晚土壤呼吸多为负值,表现为一个碳吸收过程,夜间土壤呼吸变化稳定,研究中在枯落物分解作用下白天土壤呼吸的差异性在夜间体现的更加明显,而枯落物的分解是土壤碳库输入的一种重要形式,因此夜间更大程度上表现出碳汇的过程。

3.2 短期氮、水变化下枯落物对土壤呼吸的影响

枯落物的分解会改变土壤微环境、土壤结构、土壤养分有效性来影响土壤呼吸^[37]。杨继松等^[38]研究湿地枯落物分解的 CO_2 释放,发现枯落物分解的 CO_2 释放占总呼吸的 35% 左右;也有研究^[28]表示有枯落物的土

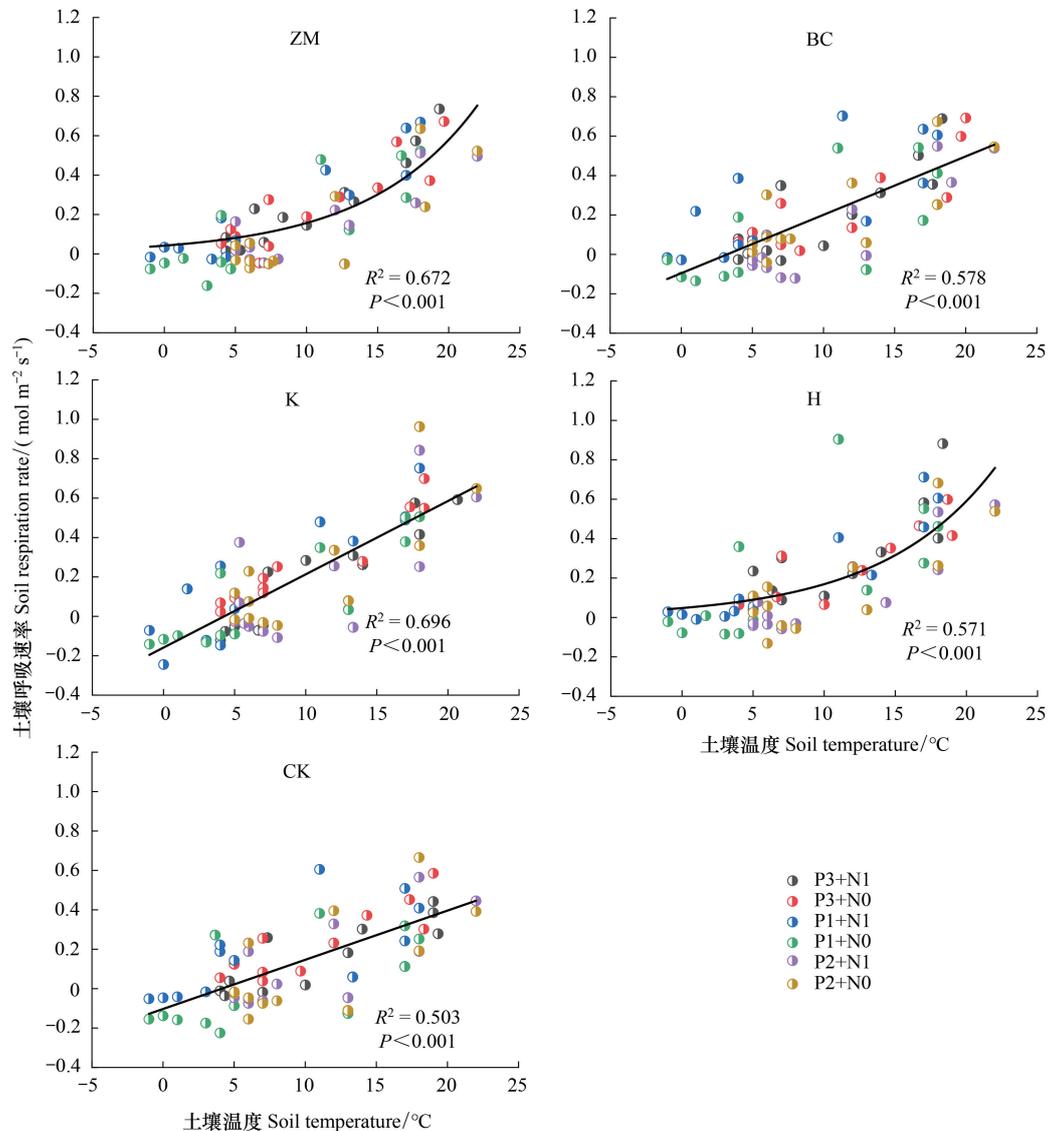


图7 土壤呼吸与土壤温度的关系

Fig.7 Relationship between soil respiration and soil temperature

壤呼吸速率要显著高于无枯落物的土壤呼吸速率,这与本研究结果一致,可见枯落物是植物碳库转向土壤碳库的中间载体,在碳收支研究中起重要作用,研究发现短期添氮和降水处理下枯落物对土壤呼吸的贡献不同,不做任何处理的枯落物对土壤呼吸的贡献最大,可达68%—89%。枯落物的分解是一个长时间周期性的过程,短期的处理更趋向于枯落物向土壤碳的输入^[39],而土壤呼吸是碳输出的过程,因为发现不做任何处理的 R_s 最小,其差值 R_L 会变大,这可能是各处理枯落物对土壤呼吸贡献率低的原因。

3.3 短期氮沉降和降水变化下土壤温度、湿度对土壤呼吸的影响

土壤温度和土壤湿度是调控土壤呼吸的两个主要环境因子,二者交互作用对土壤呼吸的影响更为复杂^[40]。本研究发现,短期添氮和降水处理下不同植物枯落物土壤温度对土壤呼吸的影响极为显著,而土壤湿度对土壤呼吸的影响不显著,二者交互作用对土壤呼吸的影响显著,由此可见土壤温度是土壤呼吸的主要调控因子。这与赵巴音那木拉等^[41]研究发现荒漠草原土壤湿度是制约土壤呼吸变化的主要环境因子的结果有所差异,也有研究^[42]表明宁夏荒漠草原土壤温度、湿度均对土壤呼吸有显著影响。土壤温度对大气温度响应敏感,温度升高会显著增加土壤微生物的活性,进而影响土壤呼吸速率显著^[43],另外,增加降雨对土壤呼吸的

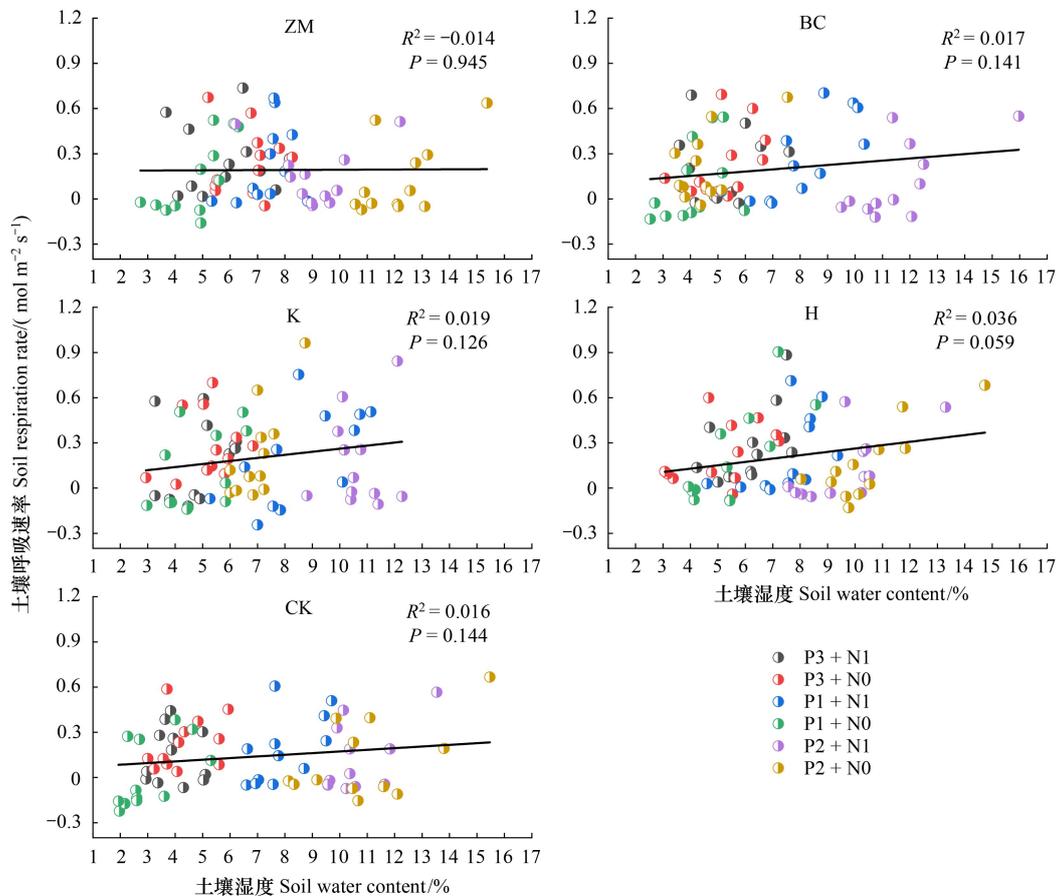


图8 土壤呼吸与土壤湿度的关系

Fig.8 Relationship between soil respiration and soil moisture

促进作用有限,甚至会抑制土壤呼吸,过量的水分会降低土壤通透性,导致土壤氧气供应不足^[20]。

4 结论

土壤呼吸日动态变化明显呈单峰曲线,最大值出现在 12:00—14:00,最小值出现在 0:00—4:00;短期的增雨处理减弱了土壤呼吸,而添氮处理促进了土壤呼吸;短期不做任何处理的枯落物对土壤呼吸的贡献率最大;短期氮沉降和降水变化下土壤温度是土壤呼吸的主导因子。

参考文献 (References):

- [1] Hursh A, Ballantyne A, Cooper L, Maneta M, Kimball J, Watts J. The sensitivity of soil respiration to soil temperature, moisture, and carbon supply at the global scale. *Global Change Biology*, 2017, 23(5): 2090-2103.
- [2] Giardina C P, Litton C M, Crow S E, Asner G P. Warming-related increases in soil CO₂ efflux are explained by increased below-ground carbon flux. *Nature Climate Change*, 2014, 4(9): 822-827.
- [3] 蒿廉伊, 张丽华, 谢忠奎, 赵锐锋, 王军锋, 郭亚飞, 高江平. 降水变化对荒漠草原土壤呼吸的影响. *环境科学*, 2021, 42(9): 4527-4537.
- [4] Castillo-Monroy A P, Maestre F T, Rey A, Soliveres S, García-Palacios P. Biological Soil Crust Microsites Are the Main Contributor to Soil Respiration in a Semiarid Ecosystem. *Ecosystems*, 2011, 14(5): 835-847.
- [5] Rey A, Pegoraro E, Oyonarte C, Were A, Escibano P, Raimundo J. Impact of land degradation on soil respiration in a steppe (*Stipa tenacissima* L) semi-arid ecosystem in the SE of Spain. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(2): 393-403.
- [6] Shi W Y, Yan M J, Zhang J G, Guan J H, Du S. Soil CO₂ emissions from five different types of land use on the semiarid Loess Plateau of China, with emphasis on the contribution of winter soil respiration. *Atmospheric Environment*, 2014, 88: 74-82.
- [7] Zhang R, Zhao X Y, Zuo X A, Degen A A, Shang Z H, Luo Y Q, Zhang Y G, Chen J L. Effect of manipulated precipitation during the growing season on soil respiration in the desert-grasslands in Inner Mongolia, China. *Catena*, 2019, 176: 73-80.

- [8] Wang Z, Mckenna T P, Schellenberg M P, Tang S M, Zhang Y J, Ta N, Na R S, Wang H. Soil respiration response to alterations in precipitation and nitrogen addition in a desert steppe in northern China. *Science of the Total Environment*, 2019, 688: 231-242.
- [9] LeBauer D S, Treseder K K. Nitrogen limitation of net primary productivity in terrestrial ecosystems is globally distributed. *Ecology*, 2008, 89(2): 371-379.
- [10] Xu X, Shi Z, Li D J, Zhou X H, Sherry R A, Luo Y Q. Plant community structure regulates responses of prairie soil respiration to decadal experimental warming. *Global change biology*, 2015, 21(10): 3846-3853.
- [11] King J S, Kubiske M E, Pregitzer K S, Hendrey G R, McDonald E P, Giardina C P, Quinn V S, Karnosky D F. Tropospheric O₃ compromises net primary production in young stands of trembling aspen, paper birch and sugar maple in response to elevated atmospheric CO₂. *New Phytologist*, 2005, 168(3): 623-636.
- [12] Zhao X X, Li Y L, Xie Z M, Li P. Effects of nitrogen deposition and plant litter alteration on soil respiration in a semiarid grassland. *Science of the Total Environment*, 2020, 740(6711): 139634.
- [13] Afreen T, Singh H. Does change in precipitation magnitude affect the soil respiration response? A study on constructed invaded and uninvaded tropical grassland ecosystem. *Ecological Indicators*, 2019, 102: 84-94.
- [14] Hou S L, Hättenschwiler S, Yang J J, Sistla S, Wei H W, Zhang Z W, Hu Y Y, Wang R Z, Cui S Y, Lü X T, Han X G. Increasing rates of long-term nitrogen deposition consistently increased litter decomposition in a semi-arid grassland. *New Phytologist*, 2021, 229(1): 296-307.
- [15] Ngao J, Epron D, Brechet C, Granier A. Estimating the contribution of leaf litter decomposition to soil CO₂ efflux in a beech forest using ¹³C-depleted litter. *Global Change Biology*, 2005, 11(10): 1768-1776.
- [16] 解欢欢, 马文瑛, 赵传燕, 高云飞, 王清涛, 葛红元, 林梅, 黄晖云. 苔藓和凋落物对祁连山青海云杉林土壤呼吸的影响. *生态学报*, 2017, 37(5): 1379-1390.
- [17] 张彦军, 党水纳, 任媛媛, 梁婷, 郁科科, 邹俊亮, 刘方. 基于 Meta 分析的土壤呼吸对凋落物输入的影响. *生态环境学报*, 2020, 29(3): 447-456.
- [18] Zhang Y Y, Zhao W Z, Fu L, Zhao C, Jia A Y. Land use conversion influences soil respiration across a desert-oasis ecoregion in Northwest China, with consideration of cold season CO₂ efflux and its significance. *Catena*, 2020, 188: 104460.
- [19] 王忠武, 宋晓辉, 王悦骅, 王占文, 闫宝龙, 韩国栋. 模拟降水对短花针茅荒漠草原土壤呼吸的影响. *中国草地学报*, 2020, 42(1): 111-116.
- [20] 温超, 单玉梅, 晔霁罕, 张璞进, 木兰, 常虹, 任婷婷, 陈世苹, 白永飞, 黄建辉, 孙海莲. 氮和水分添加对内蒙古荒漠草原放牧生态系统土壤呼吸的影响. *植物生态学报*, 2020, 44(1): 80-92.
- [21] 王响, 宋乃平, 肖绪培, 杨明秀, 谢腾腾, 王兴. 基于分室模型的农牧复合系统稳定性研究——以宁夏盐池县杨寨子村为例. *宁夏大学学报: 自然科学版*, 2016, 37(1): 112-117.
- [22] 王响. 农牧复合系统的结构及其物流过程的稳定性分析——以宁夏盐池县杨寨子村为例[D]. 银川: 宁夏大学, 2014.
- [23] 许爱云. 宁夏荒漠草原蒙古冰草种群小尺度空间格局研究[D]. 银川: 宁夏大学, 2019.
- [24] 刘金龙, 王国会, 许冬梅, 许爱云, 于双. 不同封育年限荒漠草原土壤有机碳矿化对枯落物添加的响应. *草业学报*, 2019, 28(4): 47-57.
- [25] 李学斌, 陈林, 樊瑞霞, 吴秀玲, 谢应忠. 围封条件下荒漠草原 4 种典型植物群落枯落物输入对土壤理化性质的影响. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2015, 41(1): 101-110.
- [26] 李学斌, 陈林, 吴秀玲, 宋乃平, 李昕. 荒漠草原 4 种典型植物群落枯落物分解速率及影响因素. *生态学报*, 2015, 35(12): 4105-4114.
- [27] 李学斌, 陈林, 张硕新, 谢应忠. 围封条件下荒漠草原 4 种典型植物群落枯落物枯落量及其蓄积动态. *生态学报* 2012, 32(20): 6575-6583.
- [28] 李学斌, 陈林, 吴秀玲, 张硕新, 谢应忠. 荒漠草原 4 种典型植物群落枯落物输入对土壤呼吸的影响. *北京林业大学学报*, 2012, 34(5): 80-85.
- [29] 韩广轩 周广胜. 土壤呼吸作用时空动态变化及其影响机制研究与展望. *植物生态学报*, 2009, 33(1): 197-205.
- [30] 阿木日吉日嘎拉, 红梅, 韩国栋, 高福光, 赵巴音那木拉, 刘超川. 不同放牧强度对短花针茅荒漠草原土壤呼吸的影响. *土壤通报*, 2013, 44(2): 321-327.
- [31] 王珍, 赵萌莉, 韩国栋, 高福光, 韩雄. 模拟增温及施氮对荒漠草原土壤呼吸的影响. *干旱区资源与环境*, 2012, 26(9): 98-103.
- [32] 吴夏, 潘谋成, 曹建华, 朱晓燕, 张美良, 杨会, 唐伟, 蓝高勇. 典型岩溶区土壤呼吸作用的昼夜变化特征及其影响因素. *中国岩溶*, 2019, 38(2): 157-163.
- [33] 翟常春. 夜间增温和降水变化对中国北方温带草原土壤微生物群落的影响[D]. 开封: 河南大学, 2020.
- [34] 林力涛, 韩潇潇, 于占源, 孙学凯, 黄月, 曾德慧. 施氮处理下植物光合对沙质草地土壤呼吸的调控作用. *应用生态学报*, 2019, 30(9): 3019-3027.
- [35] Fereidooni M, Raiesi F, Fallah S. Ecological restoration of soil respiration, microbial biomass and enzyme activities through broiler litter application in a calcareous soil cropped with silage maize. *Ecological Engineering*, 2013, 58: 266-277.
- [36] 付皓宇, 井长青, 郭文章, 陈宸, 邓小进. 准噶尔盆地荒漠灌丛草地土壤呼吸变化及其对土壤温、湿度的响应. *草地学报*, 2019, 27(6): 1677-1684.
- [37] Prescott C E. Do rates of litter decomposition tell us anything we really need to know? *Forest Ecology and Management*, 2005, 220(1): 66-74.
- [38] 杨继松, 刘景双, 孙丽娜. 三江平原草甸湿地土壤呼吸和枯落物分解的 CO₂ 释放. *生态学报*, 2008, 28(2): 805-810.
- [39] 吕富成 王小丹. 凋落物对土壤呼吸的贡献研究进展. *土壤*, 2017, 49(2): 225-231.
- [40] Davidson E A, Verchot L V, Cattáneo J H, Ackerman I L, Carvalho J E M. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 53-69.
- [41] 赵巴音那木拉, 红梅, 梁存柱, 包乌云, 张佳鑫. 施肥对内蒙古短花针茅荒漠草原土壤呼吸的影响. *应用生态学报*, 2014, 25(3): 687-694.
- [42] 王科鑫, 沈艳. 宁夏荒漠草原不同植物群落土壤呼吸季节动态及其影响因子//2018 中国草学会年会论文集. 成都: 中国草学会, 2018.
- [43] 陈林, 李学斌, 王磊, 刘秉儒, 王新云. 荒漠草原 4 种典型植物群落夏季土壤呼吸及枯枝落叶分解释放 CO₂ 贡献量. *生态环境学报*, 2012, 21(4): 629-634.