

氮沉降增加和人类干扰对半干旱草地土壤呼吸的影响

赵欣鑫¹, 李玉霖^{2*}, 李有文³, 巨天珍⁴

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院奈曼沙漠化研究站, 兰州 730000;
3. 喀什大学化学与环境科学学院, 喀什 844000; 4. 西北师范大学地球与环境科学学院, 兰州 730000)

摘要: 土壤呼吸是全球碳循环的主要流通途径, 但半干旱草地土壤呼吸对全球变化和人类干扰的响应机制尚不清楚。该研究以科尔沁沙质草地为研究对象, 研究氮沉降增加、人类干扰(火烧、刈割)及其交互作用对沙质草地整个植物生长季(2017年5—9月)土壤呼吸的影响。结果表明, 土壤呼吸呈明显的季节动态变化, 在7月最高。氮沉降增加使根呼吸显著提高42%, 土壤呼吸显著增加17% ($P < 0.001$), 但对微生物呼吸无显著影响。火烧使根呼吸显著提高25% ($P < 0.01$), 但使微生物呼吸降低13% ($P < 0.001$), 从而导致土壤呼吸未显著增加 ($P > 0.05$)。刈割显著降低了土壤温度, 诱导微生物呼吸和根呼吸分别降低13% ($P < 0.001$) 和20% ($P < 0.05$), 从而显著抑制土壤呼吸 ($P < 0.001$)。氮沉降增强了火烧对土壤呼吸的促进作用, 但未显著影响刈割对土壤呼吸的抑制作用。氮沉降、火烧和刈割对土壤呼吸的不同影响可对全球变化背景下沙质草地土壤碳循环的预测和天然草地的科学管理提供参考。

关键词: 土壤呼吸; 氮沉降; 火烧; 刈割; 交互作用; 科尔沁沙地

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.15.015

中图分类号: P593

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2020)-15-0120-08

赵欣鑫, 李玉霖, 李有文, 等. 氮沉降增加和人类干扰对半干旱草地土壤呼吸的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(15): 120-127. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.15.015 http://www.tcsae.org

Zhao Xinxin, Li Yulin, Li Youwen, et al. Effects of increased nitrogen deposition and anthropogenic perturbation on soil respiration in a semiarid grassland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2020, 36(15): 120-127. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.15.015 http://www.tcsae.org

0 引言

土壤呼吸作为陆地与大气之间碳素交换的主要输出途径, 对土壤碳储量及陆地生态系统碳循环产生深远影响^[1-2]。随着全球变化(氮沉降、气候变暖、降水变化等)和人为干扰活动(火烧、刈割、放牧等)对土壤呼吸和地下碳储存的不断影响, 陆地生态系统碳循环将受到显著影响^[2-3]。不断加剧的氮沉降和人为干扰(火烧、刈割)可改变植物生长和土壤微生物量等, 从而影响土壤呼吸^[1]。而且, 氮沉降、火烧和刈割也可通过交互作用影响生物(植物初级生产力、植物根系、土壤微生物量等)和非生物因子(土壤温度、湿度等)而对土壤呼吸产生潜在影响^[2]。因此, 揭示氮沉降增加和人为干扰对土壤呼吸的影响规律及其作用机制, 对准确评估陆地生态系统碳释放和指导温室效应缓解具有重要意义。

随着化石燃料燃烧、施肥等人类活动的影响, 氮沉降已成为时下突出的全球变化问题之一, 而且氮沉降正在深刻改变着陆地生态系统中碳的生物地球化学过程^[4]。

氮沉降增加能够促进植物生长, 提高初级生产力, 增加凋落物向土壤的输入, 从而潜在影响生态系统的碳汇能力^[5]。氮沉降也通过改变植物根系生物量及微生物活性等影响土壤 CO_2 排放^[6], 从而对区域乃至全球碳循环产生重要影响。关于土壤呼吸对氮沉降的响应已有较多研究, 但目前尚未形成普适性结论, 有研究指出氮添加会显著促进土壤呼吸^[7-8], 也有氮添加显著抑制土壤呼吸^[9]或无显著影响^[10]的报道, 这可能与不同生态系统中氮诱导的微生物活性和碳固定及分配模式的差异等有关^[11]。因此, 准确预测未来全球氮沉降增加情景下土壤碳释放的动态变化, 深入了解不同陆地生态系统中氮沉降对土壤呼吸的影响具有重要意义。

火烧和刈割是2种典型的土地利用和管理方式, 可改变土壤碳输入和环境条件, 从而对陆地与大气间碳交换产生深刻影响^[12-13]。火烧处理去除了地表植物、凋落物和有机质, 从而抑制土壤呼吸^[14]; 但也有报道指出火烧升高了地表温度, 增强了微生物活性而促进土壤呼吸^[15]。同样, 刈割对不同陆地生态系统土壤呼吸的影响也尚未形成一致性结论, 有指出刈割会降低有机底物向土壤的输入, 减少土壤微生物量而显著抑制土壤呼吸^[16], 也有刈割对土壤呼吸无影响的报道^[17], 故而不同陆地生态系统土壤呼吸对火烧和刈割的响应机制仍需进一步研究。而且, 土壤呼吸对全球变化和人为干扰的响应主要取决于土壤呼吸各组分(微生物呼吸、根呼吸)的综合响应^[11], 因此在阐释土壤呼吸响应机制时, 极有必要同时对其组

收稿日期: 2020-04-20 修订日期: 2020-07-21

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0500907); 新疆维吾尔自治区科技厅自然科学基金青年项目(2020D01B02)

作者简介: 赵欣鑫, 博士生, 主要研究方向为土壤及地下水污染修复。

Email: zhaoux618@163.com

*通信作者, 李玉霖, 研究员, 研究方向为生物地球化学循环。

Email: liyl@lzb.ac.cn

分进行探讨。此外,以往研究认为环境因素之间的交互作用也对土壤呼吸具有重要影响^[1,18],但不同草地生态系统中环境驱动因素间的交互作用存在差异^[4,17]。

科尔沁沙地位于中国北方半干旱区,沙质草地面积广阔,土壤基质不稳定,大气氮沉降通量较高,并长期受到火烧和刈割等人类活动的干扰^[19]。由于半干旱地区生态环境脆弱,并受到气候变化和强烈的人类活动的影响,科尔沁沙地约 80%的地区在过去几十年中遭受了不同程度的荒漠化^[20]。诸多研究表明荒漠化与半干旱草地生态系统碳动态密切相关,而且半干旱草地全球范围广阔、荒漠化面积大,已被普遍认为具有很大的碳汇潜力^[21]。目前,科尔沁沙地土壤碳贮量研究吸引了越来越多研究者的关注^[22-23],但关于氮沉降和人类干扰对该区域土壤呼吸影响的研究却鲜有报道。本研究以科尔沁沙质草地为对象,依托氮添加、火烧和刈割野外试验平台,对研究区整个植物生长季的土壤呼吸及其组分以及环境因子(土壤温度、湿度、微生物量碳(Microbial Biomass Carbon, MBC)等)进行动态监测,分析氮沉降增加、人类干扰及其交互作用对沙质草地生态系统土壤呼吸的影响规律和作用机制,为未来氮沉降增加情景下半干旱草地生态系统碳循环的准确评估和沙质草地的科学管理提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究依托内蒙古奈曼农田生态系统国家野外科学观测研究站(42°55'N, 120°41'E),在全球变化和人类干扰模拟试验场开展。研究区位于内蒙古自治区奈曼旗,属温带半干旱大陆性气候,年平均气温 5.8~6.4℃,年均降水量 343~451 mm(70%集中于夏季),年均风速 3.5~4.5 m/s,大风日数 20~60 d,春季常现沙尘暴天气(约 10~15 d)。研究区地貌特征为流动沙丘、半固定沙丘、固定沙丘及草地。由于气候变化和人类活动的影响,天然草地发生不同程度的荒漠化。土壤多为风沙土,呈浅黄色,结构松散,暴露后易受风蚀。植被以白草(*Pennisetum centrasiticum*)、糙隐子草(*Cleistogenes squarrosac*)、胡枝子(*Lespedeza davurica*)、黄蒿(*Artemisia scoparia*)、尖头叶藜(*Chenopodium acuminatum*)、狗尾草(*Setaria viridis*)、猪毛菜(*Salsola collina*)等为主,每年 5—9 月为植物生长季。

1.2 试验设计

于 2014 年初设置氮沉降、火烧和刈割试验场,采用随机区组设计方法,共设置 6 个重复区组。每一区组设置 6 个 10 m×10 m 小区,各小区间设置 1 m 缓冲带。6 个处理分别为不施氮+对照(N0+CK)、不施氮+火烧(N0+CKB)、不施氮+刈割(N0+CKC)、氮添加+对照(N10+CK)、氮添加+火烧(N10+CKB)和氮添加+刈割(N10+CKC)。以往氮沉降增加模拟试验中,氮添加量广泛采用将研究区氮沉降通量扩大 2~4 倍的方法来设定^[18]。因此,本研究根据研究区氮沉降水平(1~3 g/(m²·a))^[3,19]和以往氮添加模拟试验^[2,11],于每年 5 月初(2014—2017

年)以尿素(CO(NH₂)₂)为氮源对样地进行一次氮添加处理,氮添加量为 10 g/m²。对于每一氮添加小区(10 m×10 m),将所需尿素(含氮质量分数 46%)2 174 g 溶解至 10 L 水中,使用喷雾器均匀喷施;不施氮区则喷施等量的无氮水。火烧和刈割每年 11 月初进行,频率为一年一次,刈割留茬高度为 4 cm。

在每个 10 m×10 m 小区,随机选定一个 1 m×2 m 样方,并将其划分为 2 个 1 m×1 m 小样方,分别作为土壤呼吸和微生物呼吸观测点。每一观测点均设置土样采集区(宽度为 1 m),采用 5 点取样法采集 0~10 cm 表层土壤,测定土壤微生物量碳。为了避免土壤扰动对试验结果的影响,于试验前一个月进行呼吸试验布置。2017 年 4 月初,将 PVC 土壤呼吸环(直径 20 cm,高 10 cm)和微生物呼吸环(直径 20 cm,高 45 cm,隔绝后期根系侵入)分别嵌入各小区土壤呼吸和微生物呼吸观测点,并去除微生物呼吸环内所有活体植物以去除地上呼吸和植物根呼吸对试验结果的影响^[11]。各呼吸环露出地面 5 cm,并在整个研究期间原位留置。

1.3 土壤呼吸测定

使用 Li-8100 土壤碳通量测量系统测定土壤呼吸速率(R_s)和微生物呼吸速率(R_m),观测周期为一个植物生长季(2017 年 5—9 月),每月测定 2 次。2017 年 5 月 1 日进行氮添加处理,2017 年 5 月 8 日开始第一次土壤呼吸测定。每次测定时间为晴天上午 08:00—11:00,每试验小区测定 1 次,每处理共计 6 个重复,取其 6 次均值作为当日呼吸值。为了避免降雨对土壤呼吸的脉冲效应,如遇降雨,测定于雨后第 3 天或第 4 天进行^[8]。测定前一天,将各土壤呼吸环内植物齐地剪除,以消除地上呼吸的贡献,而微生物呼吸环试验初期可能会存在微量未彻底清除的活体植物则需手工将其去除。同时,采用地温计(10 cm 探针)和 TDR 水分测定仪(20 cm 探针)分别对观测点 10 cm 处土壤温度和 20 cm 深度土壤湿度进行测定。植物根呼吸(R_r)采用 R_s 与 R_m 的差值进行测算。

在 R_s 观测期间(2017 年 5—9 月),每月底在每个土样采集区使用土钻进行 5 点取样(直径 2.5 cm,深度 10 cm),然后混合为一份土样。人工清除土样中的根和有机碎屑,过 2 mm 筛,4℃保存,采用氯仿熏蒸-浸提法对土壤微生物量碳进行测定^[24]。

1.4 数据处理

运用 SPSS 17.0 软件进行数据统计分析,采用多因素方差分析探究氮沉降、火烧、刈割、测定时间及其交互作用对 R_s 、 R_m 、 R_r 的影响。采用线性回归与幂函数回归分析 R_s 与温度、湿度之间的相关关系。用 Origin 9.0 软件作图。

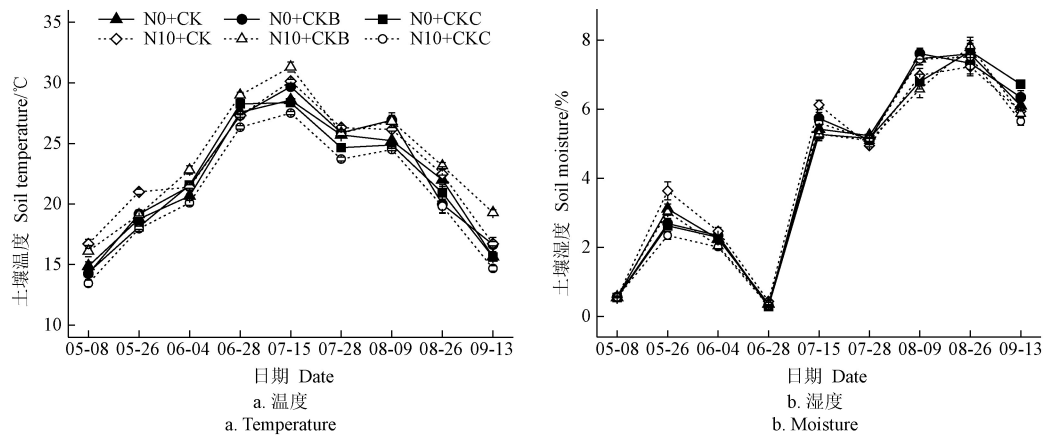
2 结果与分析

2.1 不同处理下的土壤温度和湿度

氮沉降、火烧和刈割各处理表层土壤温度、湿度均呈明显的季节变化(图 1)。较之不施氮处理,氮添加对土壤温度没有显著影响($P>0.05$)。较之人类干扰对照,火烧升高了土壤温度 3%($P<0.05$),刈割显著降低了土壤温度 7%($P<0.001$)。氮沉降、火烧和刈割对土壤湿

度均无显著影响 ($P>0.05$)。在整个植物生长季, 土壤温度均值为 22.67°C , 最大值出现于 7 月上旬, 最低值出现

于 5 月初。土壤湿度均值为 4.17% , 最大值出现在 8 月下旬, 最低值出现在 6 月底。



注: N0+CK, 不施氮+对照; N0+CKB, 不施氮+火烧; N0+CKC, 不施氮+刈割; N10+CK, 氮添加+对照; N10+CKB, 氮添加+火烧; N10+CKC, 氮添加+刈割。下同

Note: N0+CK, no nitrogen + control; N0+CKB, no nitrogen + burning; N0+CKC, no nitrogen + clipping; N10+CK, N addition + control; N10+CKB, N addition + burning; N10+CKC, N addition + clipping. Same as below.

图 1 不同处理下土壤温度和湿度季节动态

Fig.1 Seasonal dynamics of soil temperature and moisture under different treatments

2.2 不同处理下的土壤呼吸及其组分

在整个植物生长季, 土壤呼吸 (R_s)、微生物呼吸 (R_m) 和根呼吸 (R_r) 呈现出相似的季节动态变化 (图 2)。呼吸速率在 7—8 月最高, 6 月底最低。N0+CK、N0+CKB、

N0+CKC、N10+CK、N10+CKB、N10+CKC 处理下, R_s 均值分别为 2.75 、 2.40 、 2.20 、 2.78 、 3.26 、 $2.49 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ (图 2a), R_m 均值波动于 1.32 到 $1.78 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 之间 (图 2b), R_r 均值波动于 0.68 到 $1.62 \mu\text{mol}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ 之间 (图 2c)。

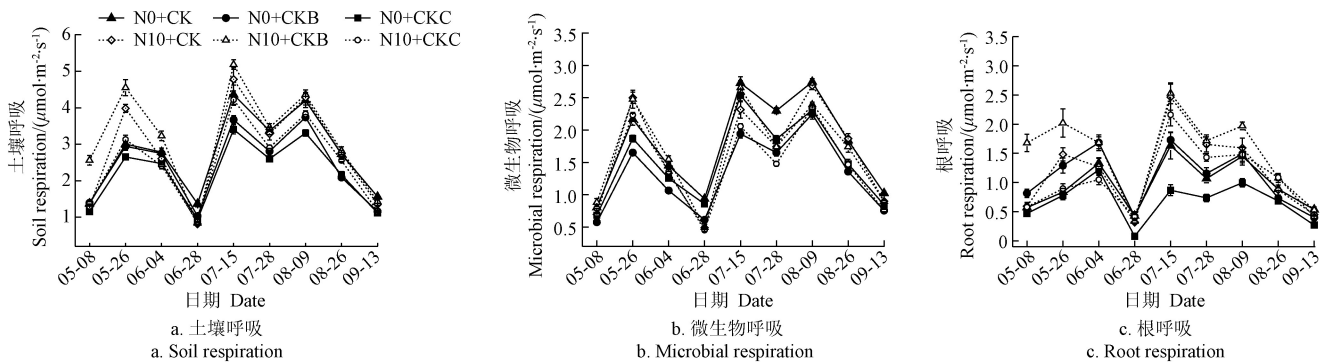


图 2 不同处理下土壤呼吸及其组分季节动态

Fig.2 Seasonal dynamics of soil respiration, and its components under different treatments

在整个植物生长季内, 较之不施氮, 氮添加处理下 R_s 均值显著增加了 17% , R_r 显著增加了 42% ($P<0.001$), 但未能显著促进 R_m ($P>0.05$)。火烧对 R_s 无显著影响 ($P>0.05$), 但使 R_m 显著降低了 13% ($P<0.001$), R_r 增加了 25% ($P<0.01$)。刈割显著降低 R_s 、 R_m 、 R_r ($P<0.001$), 生长季均值分别降低 16% 、 13% 和 20% 。N0+CK、N0+CKB、N0+CKC、N10+CK、N10+CKB、N10+CKC 处理下, R_m 对 R_s 的贡献率 (R_m 在 R_s 中占比) 分别为 64.68% 、 54.99% 、 69.20% 、 57.88% 、 50.50% 、 57.66% , 表明沙质草地 R_s 的贡献者主要为 R_m 。

对日期、氮添加、火烧、刈割等因素进行多变量分析可知, 日期×氮、氮×火烧对 R_s 和 R_m 具有显著的交互作用

($P<0.001$), 其余因素对 R_s 、 R_m 和 R_r 均无显著交互作用 ($P>0.05$, 表 1)。较之 N0+CK 和 N0+CKB 处理, N10+CKB 下 R_s 分别提高了 19% 和 36% (图 3)。

2.3 土壤微生物量碳

土壤微生物量碳 (MBC) 在氮添加与不施氮处理间无显著差异 ($P>0.05$)。与人类干扰对照 (N0+CK, N10+CK) 相比, 火烧导致 MBC 显著降低了 13% ($P<0.05$), 刈割下 MBC 显著降低了 12% ($P<0.01$)。各处理下整个植物生长季 MBC 均值波动范围为 $53.26\sim 69.01 \text{ mg/kg}$ (图 4)。线性回归分析指示, 土壤呼吸、微生物呼吸均随 MBC 的增加而显著增加 ($P<0.001$, 图 5)。

表 1 氮沉降、火烧和刈割影响的多变量分析

Table 1 Multivariate analysis of the effects of nitrogen deposition, burning and clipping

因子 Factor	df	土壤呼吸 Soil respiration		微生物呼吸 Microbial respiration		根呼吸 Root respiration	
		F	P	F	P	F	P
日期 Date	8	97.84	<0.001	127.23	<0.001	20.59	<0.001
氮添加 Nitrogen addition (N)	1	36.39	<0.001	2.66	0.104	29.00	<0.001
火烧 Burning (B)	1	0.34	0.56	19.84	<0.001	8.90	<0.01
刈割 Clipping (C)	1	21.34	<0.001	20.40	<0.001	5.64	<0.05
Date×N	8	4.30	<0.001	4.13	<0.001	2.57	0.08
Date×B	8	2.01	0.05	0.73	0.67	1.72	0.09
N×B	1	19.12	<0.001	26.45	<0.001	3.19	0.08
Date×N×B	8	0.53	0.84	0.94	0.48	0.54	0.83
Date×C	8	0.76	0.64	1.01	0.43	0.36	0.94
N×C	1	1.67	0.20	0.67	0.41	0.81	0.37
Date×N×C	8	0.29	0.97	0.13	0.99	0.36	0.94

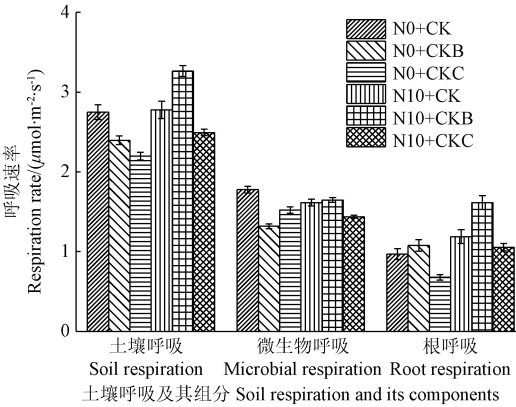


图 3 不同处理下土壤呼吸及其组分均值

Fig.3 Mean of soil respiration and its components under different treatments

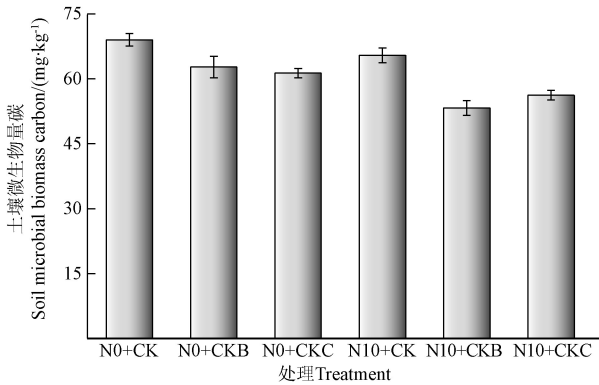


图 4 不同处理下平均土壤微生物量碳

Fig.4 Mean soil microbial biomass carbon under different treatments

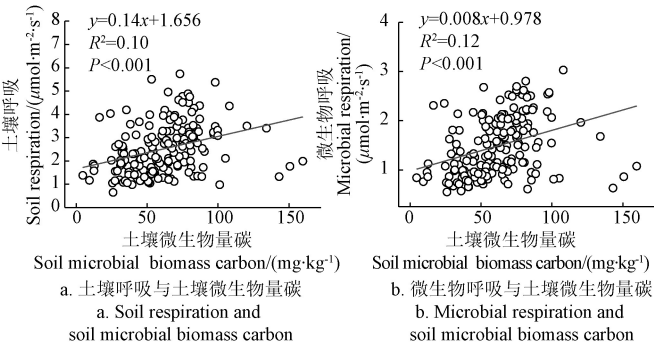


图 5 土壤呼吸、微生物呼吸与土壤微生物量碳的关系

Fig.5 Relationships between soil respiration, microbial respiration and soil microbial biomass carbon

3 讨论

3.1 土壤呼吸季节变化

土壤呼吸 (R_s) 主要包括土壤微生物呼吸 (R_m) 和植物根系呼吸 (R_r)，通常 R_m 所占比重更大，这与本研究结果一致。但是，根呼吸对土壤呼吸的贡献亦不可忽视。在整个生长季，沙质草地 R_s 、 R_m 和 R_r 均呈强烈的季节变化动态 (图 2)，以往研究中也多有报道^[2,25]，表明生态环境脆弱的沙质草地生态系统对环境变化的响应十分敏感^[26]。各处理下， R_s 均在 7—8 月最高，6 月下旬最低，季节变化趋势相似表明氮沉降、火烧和刈割均不改变沙质草地 R_s 的季节动态。以往研究认为土壤温度和湿度是解释 R_s 季节变化规律的主要环境因子^[27-28]，这是因为不断波动的土壤温度和湿度直接影响土壤微生物、植物根系的数量和活性，从而改变 R_m 和 R_r ，导致 R_s 呈季节动态变化^[27]。本研究也得出，土壤温度与 R_s 呈显著的线性正相关关系 (图 6a, $P<0.001$)，而土壤湿度与 R_s 呈显著幂函数关系 (图 6b, $P<0.001$)。而且，土壤湿度与 R_s 相关性大于土壤温度，表明沙质草地的水热因子共同驱动着土壤呼吸的季节变化，但土壤湿度影响更为突出，这与已有研究相似^[4,29]。原因可能在于，土壤水分作为半干旱草地土壤呼吸的重要限制因素，影响植物生长和地下碳分配，改变呼吸底物供应，从而影响 R_s ^[11]。

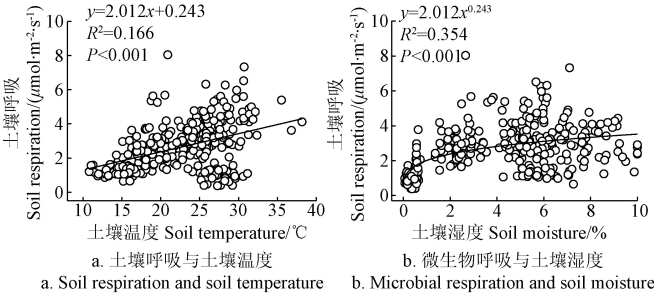


图 6 土壤呼吸与土壤温度、湿度的关系

Fig.6 Relationships between soil respiration and soil temperature, soil moisture

3.2 氮沉降对土壤呼吸的影响

本研究中，氮沉降对土壤呼吸具有显著促进作用。以往研究认为氮添加增强草地生态系统土壤呼吸速率的原因主要与氮诱导下植物生长、生态系统初级生产力、地下碳输入、植物根系和土壤微生物活性和呼吸等的增强有关^[4]。本研究发现，氮添加显著促进 R_r 和 R_s ，分别增加 42%、17% ($P<0.001$)，但对 R_m 无显著影响 ($P>0.05$)。大多研究证实，氮沉降促进植物生长，提高植物根系生物量和活性^[11,30]，从而显著增加 R_r ，这与本研究结果相似。进一步分析原因，氮添加直接增加了土壤中植物可利用氮含量^[4]，植物生物量和光合作用增加，光合产物向植物根系的分配随之增多^[11]，加之氮也会诱导植物细根生物量和活性增加^[7,30]，进而显著促进 R_r 。此外，氮沉降促进植物生长后，诱导凋落物向土壤的碳输入增加，从而增加土壤微生物和植物细根的呼吸底物供应，导致土壤呼吸显著提高^[4,30]。但是，也有氮添加抑制或不能显著影响

R_s 的报道, 研究者认为氮添加作用下陆地生态系统的结构和功能发生改变^[4], 诱导土壤微生物量和活性降低^[11], 导致土壤微生物呼吸作用减弱^[31], 抵消了根呼吸对土壤呼吸的积极贡献。此外, 也有研究报道氮添加会增强土壤中磷等其他元素的限制性, 抑制土壤微生物量和酶活性, 减弱微生物对土壤有机质的分解, 从而降低微生物呼吸^[32]。以往研究认为, 氮添加对微生物呼吸的抑制可归因于氮素诱导土壤微生物活性和生长受限, 从而抑制微生物对凋落物的纤维素和木质素分解, 而且这种抑制作用在长期的氮添加试验中更为显著^[33]。本研究表明氮添加对土壤微生物量碳并无显著影响 ($P>0.05$), 导致微生物呼吸无显著改变, 这可能是由于本研究氮添加处理年限较短, 短期的氮添加处理不能显著改变土壤微生物活性和微生物量, 从而对微生物呼吸没有显著影响^[4,33]。此外, 也有氮添加增强微生物呼吸的研究报道, 这主要归因于氮添加促进植物生长, 增加土壤微生物的底物供应, 从而增强微生物的矿化作用, 促进微生物同化作用, 导致土壤微生物量和微生物呼吸增加^[12]。综上, 氮沉降增加情景下, 氮沉降显著促进沙质草地的土壤呼吸, 这主要源自根呼吸的增加。

3.3 人类干扰对土壤呼吸的影响

火烧会消除地表大量的生物物质及腐殖质层, 增大土壤裸露面积, 降低原有植被的遮阴效果, 增强地表的太阳辐射吸收, 从而使地表温度升高^[13], 这与本研究火烧显著升高土壤温度结果一致 ($P<0.05$)。火烧诱导土壤温度升高通常会促进植物生长, 增加地下碳分配, 为植物根系和土壤微生物提供更多的碳氮底物, 促进植物根系和土壤微生物活性, 从而促进 R_t 和 R_m 。但是, 由于火烧强度、植被类型、火烧后植被恢复进程和气候条件的不同, 火烧对 R_s 的影响存在差异^[33]。有研究发现, 火烧会降低土壤微生物量碳, 从而抑制 R_m ^[13,34]。本研究中, 火烧使土壤微生物量碳含量显著降低了 13% ($P<0.05$), 导致 R_m 显著降低了 13% ($P<0.001$), 与上述研究结论一致。火烧诱导的土壤微生物量降低可归因于火烧对土壤微生物的致死作用, 进而抑制 R_m 。另外, 本研究表明火烧使 R_t 显著增加了 25% ($P<0.01$), 但对 R_s 无显著影响 ($P>0.05$)。火烧显著促进根呼吸与以往诸多研究结果^[15,34]一致, 其原因在于, 火烧后土壤温度显著升高, 促进了植物生长, 随着地下碳输入增加, 植物根系生物量和活性增加, 从而促进根呼吸。但是, 由于火烧诱导的土壤微生物量和 R_m 的显著降低抵消了 R_t 对 R_s 的积极贡献, 导致火烧未显著改变沙质草地 R_s 。

刈割与火烧相似, 也会去除地表大量生物物质, 从而对土地温度产生影响。但与火烧相比, 刈割虽然降低了地表植物盖度, 而对地表腐殖质层影响较小, 因此不会如火烧一样因土壤大量裸露而使土壤温度显著升高。相反, 本研究发现刈割显著降低了土壤温度 7% ($P<0.001$), 这与刈割削弱了植被对土壤的保温作用有关。诸多研究表明, 土壤温度的降低会对土壤微生物和植物根系产生潜在影响, 从而抑制 R_s ^[4,16]。本研究中, 刈割诱

导土壤温度下降, R_s 显著降低了 16% ($P<0.001$), 其中 R_m 和 R_t 分别降低 13% ($P<0.001$) 和 20% ($P<0.05$)。相似的研究结果表明刈割去除了地表大量植物而降低了有机底物对土壤的输入, 使土壤微生物活性和生物量均受到抑制, 从而降低 R_m 和 R_s ^[35]。本研究也得到刈割使微生物量碳显著降低 12% ($P<0.001$), 与上述研究结论一致。刈割减弱土壤微生物呼吸的原因在于, 刈割降低了沙质草地的土壤温度而使土壤酶活性降低, 同时也减少了植物向土壤的碳分配, 导致土壤中碳氮底物供应不足, 诱导土壤微生物量和活性降低, 进而抑制微生物呼吸^[12]。此外, 刈割诱导土壤温度降低, 也会抑制植物的生长, 降低植物根系生物量和活性^[30], 导致植物根呼吸降低。因此, 刈割显著降低沙质草地土壤温度和土壤微生物量, 诱导 R_t 和 R_m 显著降低, 导致 R_s 降低。

本研究还发现, 在火烧处理下, 氮沉降增加区 (N10+CKB) 的土壤呼吸比不施氮区 (N0+CKB) 高 36%, 但单独的火烧不能显著增强土壤呼吸 ($P>0.05$), 表明氮沉降增加显著增强了火烧对土壤呼吸的促进作用, 导致 N10+CKB 下土壤呼吸增加了 19% ($P<0.01$, 图 3)。因此, 氮沉降增加和火烧对沙质草地土壤呼吸具有协同促进作用, 这与其他研究结果相似^[36]。但是, 氮沉降和刈割对 R_s 未表现出显著的交互作用 ($P>0.05$)。环境因素对土壤呼吸的交互作用通常也会受其他因素共同作用的影响, 从而可致交互作用的规律性减弱, 因此交互作用的规律性有待更深入研究。

本研究与以往诸多研究一样仅观测了沙质草地生长季的土壤呼吸动态, 这将对试验结果带来不确定性, 增加非生长季土壤呼吸的观测频率将有助于土壤呼吸的准确评估。另外, 为了避免降雨对土壤呼吸的脉冲效应, 本研究于雨后第 3 天或第 4 天进行测定, 但雨后土壤湿度的变化也可能对土壤呼吸结果带来不确定性, 应增加雨后土壤呼吸的观测频率, 更合理、更准确地描述土壤呼吸对氮沉降和人类干扰的响应问题。

本研究仅反映出半干旱草地土壤呼吸在一个生长季内的短期动态规律, 由于土壤呼吸与温度、降水等气候因子关系密切, 而气候因素在不同年份间可能存在较大差异, 从而影响土壤呼吸的响应。因此, 有必要对土壤呼吸通过未来长期的监测, 更加全面、客观地分析氮沉降增加和人类干扰对半干旱草地土壤碳收支的影响规律及作用机制。

4 结 论

1) 沙质草地生态系统的水热因子共同驱动着土壤呼吸的季节动态, 微生物呼吸为沙质草地土壤呼吸的主要贡献者。

2) 氮沉降主要通过促进根呼吸而显著增加土壤呼吸; 火烧诱导土壤温度升高, 使根呼吸显著增加, 但由于火烧对微生物呼吸的抑制作用与之抵消, 导致土壤呼吸无显著影响; 刈割通过降低土壤温度和土壤微生物量, 诱导根呼吸和微生物呼吸显著减弱, 导致土壤呼吸降低。

研究结果突出微生物呼吸和根呼吸对沙质草地土壤呼吸具有重要调控作用, 阐释土壤呼吸对环境变化响应时应考虑土壤呼吸组分的贡献。

3) 土壤呼吸对单一环境因素(氮沉降、刈割、火烧)和交互作用的响应有异, 氮沉降增加和火烧会协同促进沙质草地土壤呼吸, 而氮沉降和刈割对土壤呼吸未表现出显著的交互作用。

[参 考 文 献]

- [1] Wang Z, Mckenna T P, Schellenberg M P, et al. Soil respiration response to alterations in precipitation and nitrogen addition in a desert steppe in northern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 688: 231-242.
- [2] Gao Q, Bai E, Wang J S, et al. Effects of litter manipulation on soil respiration under short-term nitrogen addition in a subtropical evergreen forest[J]. *Forest Ecology and Management*, 2018, 429: 77-83.
- [3] 郑丹楠, 王雪松, 谢绍东, 等. 2010 年中国大气氮沉降特征分析[J]. *中国环境科学*, 2014, 34(5): 1089-1097.
Zheng Danan, Wang Xuesong, Xie Shaodong, et al. Simulation of atmospheric nitrogen deposition in China in 2010[J]. *China Environmental Science*, 2014, 34(5): 1089-1097. (in Chinese with English abstract)
- [4] 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.
- [5] 吴越, 马红亮, 尹云峰, 等. 凋落物去除和氮添加对亚热带阔叶林土壤不同组分碳、氮的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(9): 1-14.
Wu Yue, Ma Hongliang, Yi Yunfeng, et al. Effects of litter removal and nitrogen addition on carbon and nitrogen in different soil fractions in a subtropical broad-leaved forest[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(9): 1-14. (in Chinese with English abstract)
- [6] 何立平, 田茂平, 吴红, 等. 大气氮沉降对三峡库区消落带土壤呼吸的影响[J]. *中国环境科学*, 2019, 39(3): 1132-1138.
He Liping, Tian Maoping, Wu Hong, et al. Effects of atmospheric nitrogen deposition on soil respiration in the water level fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir area[J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(3): 1132-1138. (in Chinese with English abstract)
- [7] Graham S L, Hunt J E, Millard P, et al. Effects of soil warming and nitrogen addition on soil respiration in a new zealand tussock grassland[J]. *PLoS ONE*, 2014, 9(3): e91204.
- [8] 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.
- [9] Phillips R P, Fahey T J. Fertilization effects on fineroot biomass, rhizosphere microbes and respiratory fluxes in hardwood forest soils[J]. *New Phytologist*, 2007, 176(3): 655-664.
- [10] Zhu X, Luo C, Wang S, et al. Effects of warming, grazing/cutting and nitrogen fertilization on greenhouse gas fluxes during growing seasons in an alpine meadow on the Tibetan Plateau[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 214: 506-514.
- [11] 林力涛, 孙学凯, 于占源, 等. 氮添加对沙质草地微生物呼吸与根系呼吸的影响[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(7): 2189-2196.
Lin Litao, Sun Xuekai, Yu Zhanyuan, et al. Effects of nitrogen addition on microbial respiration and root respiration in a sandy grassland[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(7): 2189-2196. (in Chinese with English abstract)
- [12] 王志瑞, 杨山, 马锐骛, 等. 内蒙古草甸草原土壤理化性质和微生物学特性对刈割与氮添加的响应[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(9): 3010-3018.
Wang Zhirui, Yang Shan, Ma Ruiao, et al. Responses of soil physicochemical properties and microbial characteristics to mowing and nitrogen addition in a meadow grassland in Inner Mongolia, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(9): 3010-3018. (in Chinese with English abstract)
- [13] 阚雨晨, 武瑞鑫, 钟梦莹, 等. 干扰对典型草原生态系统土壤净呼吸特征的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(18): 6041-6050.
Kan Yuchen, Wu Ruixin, Zhong Mengying, et al. The response of net soil respiration to different disturbances in a typical grassland of northern China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(18): 6041-6050. (in Chinese with English abstract)
- [14] Law B E, Falge E, Gu L, et al. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1/2/3/4): 97-120.
- [15] Heisler J L, Briggs J M, Knapp A K, et al. Direct and indirect effects of fire on shrub density and aboveground productivity in a mesic grassland[J]. *Ecology*, 2004, 85: 2245-2257.
- [16] Wan S, Luo Y. Substrate regulation of soil respiration in a tallgrass prairie: Results of a clipping and shading experiment[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, 17(2): 225-235.

- 1054.
- [17] Niu S, Sherry R A, Zhou X, et al. Ecosystem carbon fluxes in response to warming and clipping in a tallgrass prairie[J]. *Ecosystems*, 2013, 16(6): 948-961.
- [18] Zhang J B, Li Q, Wu J S, et al. Effects of nitrogen deposition and biochar amendment on soil respiration in a *Torreya grandis* orchard[J]. *Geoderma*, 2019, 355: 113918.
- [19] Lu C Q, Tian H Q. Spatial and temporal patterns of nitrogen deposition in China: Synthesis of observational data[J]. *Journal Geophysical Research: Atmosphere*, 2007, 112(D22): 1-10.
- [20] Li Y, Zhou X, Brandle J R, et al. Temporal progress in improving carbon and nitrogen storage by grazing enclosure practice in a degraded land area of China's Horqin Sandy Grassland[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2012, 159: 55-61.
- [21] Nosoetto M D, Jobbágy E G, Paruelo J M. Carbon sequestration in semi-arid rangelands: Comparison of *Pinus ponderosa* plantations and grazing exclusion in NW Patagonia[J]. *Journal of Arid Environments*, 2006, 67(1): 142-156.
- [22] Fan Z P, Sun X K, Li F Y, et al. Responses of soil respiration to precipitation changes in mongolian pine plantation at Horqin sandy lands in northeast China[J]. *Advanced Materials Research*, 2012, 518-523: 4545-4551.
- [23] 孙殿超, 李玉霖, 赵学勇, 等. 放牧及围封对科尔沁沙质草地土壤呼吸的影响[J]. *中国沙漠*, 2015, 35(6): 1620-1627.
- Sun Dianchao, Li Yulin, Zhao Xueyong, et al. Effects of grazing and enclosure on soil respiration rate in the Horqin sandy grassland[J]. *Journal of Desert Research*, 2015, 35(6): 1620-1627. (in Chinese with English abstract)
- [24] Joergensen R G. The fumigation-extraction method to estimate soil microbial biomass: Calibration of the k_{EC} value[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1996, 28(1): 25-31.
- [25] Mo J M, Zhang W, Zhu W, et al. Nitrogen addition reduces soil respiration in a mature tropical forest in southern China[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(2): 403-412.
- [26] Fang C, Ye J S, Gong Y H, et al. Seasonal responses of soil respiration to warming and nitrogen addition in a semi-arid alfalfa-pasture of the Loess Plateau, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 590: 729-738.
- [27] Liu W, Zhang Z, Wan S. Predominant role of water in regulating soil and microbial respiration and their responses to climate change in a semiarid grassland[J]. *Global Change Biology*, 2009, 15(1): 184-195.
- [28] 周孟霞, 莫碧琴, 杨慧. 岩溶石漠化区李树林土壤岩溶作用强度及碳汇效应[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(13): 116-123.
- Zhou Mengxia, Mo Biqin, Yang Hui. Soil karstification intensity and carbon sink effect of plum plantation in karst rocky desertification areas[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(13): 116-123. (in Chinese with English abstract)
- [29] Jia B, Zhou G, Yuan W. Modeling and coupling of soil respiration and soil water content in fenced *Leymus chinensis* steppe, Inner Mongolia[J]. *Ecological Modelling*, 2007, 201(2): 157-162.
- [30] Gang Q, Chang S X, Lin G, et al. Exogenous and endogenous nitrogen differentially affect the decomposition of fine roots of different diameter classes of Mongolian pine in semi-arid northeast China[J]. *Plant and Soil*, 2019, 436(1/2): 109-122.
- [31] Sun Z, Liu L, Ma Y, et al. The effect of nitrogen addition on soil respiration from a nitrogen-limited forest soil[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 197: 103-110.
- [32] Zhou Z, Wang C, Jin Y. Stoichiometric responses of soil microflora to nutrient additions for two temperate forest soils[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2017, 53(4): 397-406.
- [33] 肖胜生, 王嘉, 施政, 等. 基于组分区分的亚热带湿地松人工林土壤呼吸对氮添加的响应[J]. *环境科学研究*, 2018, 31(6): 1105-1113.
- Xiao Shengsheng, Wang Jia, Shi Zheng, et al. Responses of soil respiration and its main components to nitrogen addition in a subtropical *Pinus elliottii* plantation [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(6): 1105-1113. (in Chinese with English abstract)
- [34] 胡海清, 罗斯生, 罗碧珍, 等. 林火干扰对森林生态系统土壤有机碳的影响研究进展[J]. *生态学报*, 2020, 40(6): 1-12.
- Hu Haiqing, Luo Sisheng, Luo Bizhen, et al. Effects of forest fire disturbance on soil organic in forest ecosystems: A review[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(6): 1-12. (in Chinese with English abstract)
- [35] Sayer E J. Using experimental manipulation to assess the roles of leaf litter in the functioning of forest ecosystems[J]. *Biological Reviews*, 2006, 81(1): 1-31.
- [36] Xu W, Wan S. Water- and plant-mediated responses of soil respiration to topography, fire, and nitrogen fertilization in a semiarid grassland in northern China[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2008, 40(3): 679-687.

Effects of increased nitrogen deposition and anthropogenic perturbation on soil respiration in a semiarid grassland

Zhao Xinxin¹, Li Yulin^{2*}, Li Youwen³, Ju Tianzhen⁴

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. Naiman Desertification Research Station, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China;

3. College of Chemistry and Environmental Science, Kashgar University, Kashgar 844000, China;

4. School of Earth and Environmental Sciences, Northwestern Normal University, Lanzhou 730000, China)

Abstract: Soil respiration is the primary pathway for the global carbon cycle, but the response mechanism of soil respiration to global change and anthropogenic perturbation in semiarid grassland in the context of global change is still unclear. In this study, a field experiment was conducted to explore the effects of nitrogen (N) addition, anthropogenic perturbation, and their interactions on soil respiration throughout the growing season from May to September in 2017, in Horqin sandy land, northern China. In the field research, the nitrogen deposition included no nitrogen and nitrogen addition (10 g/(m²·a)), whereas, anthropogenic perturbation consisted of control, burning, and clipping activities. In soil respiration, the components and environmental factors, including soil temperature, soil moisture and soil microbial biomass carbon, were monitored in the whole plant growing season. The monitoring data was used to identify the effects of single factor, such as nitrogen deposition, burning and clipping, and their interaction on soil respiration, as well as the contributions of microbial and root respiration to soil respiration. The results showed that the soil respiration presented obvious seasonal dynamics, with the highest in July. Both soil temperature and soil moisture can regulate the seasonal variability pattern of soil respiration in the semiarid grassland, while nitrogen deposition, burning or clipping cannot alter that. The contribution ratios of microbial respiration to soil respiration were 64.68%, 54.99%, 69.20%, 57.88%, 50.50% and 57.66% under no nitrogen (N0)+control, N0+burning, N0+clipping, nitrogen addition (N10)+control, N10+burning and N10+clipping, respectively, indicating that the microbial respiration was main contributor to soil respiration in this semiarid grassland. The increased nitrogen deposition can remarkably enhance the root respiration by 42% ($P<0.001$), resulting in a significant increase in soil respiration by 17% ($P<0.001$). In the nitrogen addition, there was no significant effect on microbial respiration in this semiarid grassland, due to the nitrogen deposition cannot efficiently change soil microbial biomass. It infers that the decrease of soil carbon sequestration induced by nitrogen addition can mainly stem from the increase in the root respiration under the future global nitrogen deposition addition. The burning significantly increased the soil temperature, and thereby enhanced the root respiration by 25% ($P<0.01$), but it cannot efficiently increased the soil respiration, due to the reduction of microbial respiration that induced by the decrease of soil microbial biomass. Furthermore, the single nitrogen deposition enhanced the positive effect of single burning on soil respiration, indicating that both the nitrogen deposition and burning can be used to synergistically promote the soil respiration in this semiarid grassland. The clipping process significantly reduced the soil temperature by 7% ($P<0.001$), inducing the root respiration decreased by 20% ($P<0.05$). Moreover, the clipping significantly decreased the soil microbial biomass, and thus reduced the microbial respiration by 13% ($P<0.001$), thereby to effectively inhibit the soil respiration (16%, $P<0.001$). However, the nitrogen deposition and clipping had no significant interaction on the soil respiration. Different influences of nitrogen deposition, burning and clipping on soil respiration can provide the sound basis for the prediction of the soil carbon cycle, and for the scientific management of natural grassland in sandy grassland under the global climate change.

Keywords: soil respiration; nitrogen deposition; burning; clipping; interaction; Horqin sandy land