

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2020.04.019

自然降雨对高寒沙地中间锦鸡儿人工林土壤呼吸的影响

戴捷^{1,3}, 贾志清^{2,3}, 李清雪^{1,3*}, 何凌仙子^{1,3}, 杨凯悦³, 高娅^{2,3}

(1. 中国林业科学研究院荒漠化研究所, 北京 100091; 2. 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091;
3. 青海共和荒漠生态系统定位观测研究站, 青海 共和 813005)

摘要: [目的] 本研究以青海共和盆地中间锦鸡儿人工林为研究对象, 分析其土壤呼吸与环境因子的关系及自然降雨对土壤呼吸和环境因子的影响机制, 以期为高寒沙区人工林土壤碳通量估算和碳循环研究提供依据和理论参考。[方法] 于2018年7月, 在观测样内地开展30 d的连续定位观测试验, 对其土壤呼吸速率和环境因子变化及自然降雨过程进行定量分析研究。[结果] (1) 土壤呼吸受太阳总辐射、空气温度、土壤温度和土壤含水量等环境因子影响, 其中, 太阳总辐射影响较直接; (2) 无降雨日土壤呼吸主要受表层(10 cm)土壤温湿度影响, 降雨过程中主要受深层(150 cm)土壤温湿度影响。累计降雨量大于0.8 mm的自然降雨对土壤呼吸日均值有抑制作用, 且激发效应通常出现在降雨结束次日, 约持续3 d; (3) 大于0.07 mm的自然降雨发生即抑制土壤呼吸速率, 其在累计降雨量达10.44 mm、降雨时长达3~4 h时抑制率最高; (4) 自然降雨可使 Q_{10} 值短期升高。[结论] 研究区土壤呼吸主要源于植物根系自养呼吸, 自然降雨过程对其具有显著抑制作用, 并在降雨结束次日出现激发效应; 同时, 自然降雨可使 Q_{10} 值升高。

关键词: 高寒沙地; 人工林; 土壤呼吸; 自然降雨; 温度系数

中图分类号: S154.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2020)04-0151-09

土壤是陆地表层系统中最大的碳储库^[1], 土壤表面碳释放是陆地生态系统中第二大碳通量^[2]。一般认为, 土壤温湿度是调控土壤呼吸的两个重要环境因子^[3]; 也有研究发现, 制约草原生态系统土壤呼吸的主要因子是太阳辐射^[4]; 而降雨引起的干湿交替则直接影响土壤呼吸并通过干扰太阳辐射、土壤水分和土壤温度等间接途径影响土壤呼吸动态^[5-6]。据气候模型预测显示, 未来全球降雨格局将持续变化, 极端干旱和降雨不断升高^[7]; 但降雨对土壤呼吸的影响具有较大的不确定性, 其引发的干湿交替过程将显著影响土壤呼吸时空特征、碳通量估算^[8]与干旱和半干旱区土壤碳释放过程^[9-11]。

现阶段我国研究土壤呼吸对降雨的响应主要集

中在森林生态系统^[12-13]、草原生态系统^[14-15]和农田生态系统^[16], 对广泛分布于我国西北部干旱与半干旱区的荒漠生态系统的研究鲜有报道, 其中, 青藏高原的共和盆地是受土地沙漠化影响最严重的区域之一, 植被重建是该区域防治土地沙漠化的有效措施^[17]。有研究表明, 植被恢复可以显著改良土壤理化性质, 加速沙成壤进程^[18], 但水土保持措施也会引起微地形、土壤结构和土壤水分的改变, 进而影响土壤呼吸^[19]。因此, 本研究以共和盆地2013年栽植的中间锦鸡儿(*Caragana intermedia* Kuang et H. C. Fu)人工防风固沙林为例, 通过对比降雨前后土壤呼吸与各环境因子的变化, 分析自然降雨对土壤呼吸的干扰途径和影响机制, 为完善干旱与半

收稿日期: 2019-12-19 修回日期: 2020-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(31670706、31600585); 林业公益性行业科研专项经费项目(201504420)

* 通讯作者: 贾志清. E-mail: jiazq369@caf.ac.cn

干旱区人工林的碳循环估算模型提供参考^[20]。

1 研究区概况

本研究在国家林业和草原局青海共和荒漠生态系统定位研究站开展。研究区位于青藏高原东北部，具有明显的高原大陆性气候特征，年均气温 2.4℃，降水量 246.3 mm，潜在蒸发量 1 716.7 mm，无霜期平均 91 d。研究区以人工林为主，常见植被有小叶杨 (*Populus simonii* Carr)、中间锦鸡儿、柠条锦鸡儿 (*Caragana korshinskii* Kom)、乌柳 (*Salix cheilophila* Schneid) 和北沙柳 (*Salix psammophila* C. Wang et Ch. Y. Yang) 等；天然植被主要有芨芨草 (*Achnatherum splendens* Nevski)、川青锦鸡儿 (*Caragana tibetica* Kom) 灌丛和针茅 (*Stipa* spp.) 等^[21]。地带性土壤为栗钙土和棕钙土，非地带性土壤是风沙土、盐土和草甸土等，下垫面主要由固定、半固定沙丘及流动沙丘组成。观测样地为半固定沙丘，有麦格沙障，样地面积 50 m×50 m，平均海拔 2 878 m；2013 年直播造林，株行距 1 m×1 m，平均株高 0.8 m，平均冠幅 1.1 m×1.05 m，平均地径 6.2 mm。

2 研究方法

2.1 样地土壤呼吸测定

于 2018 年 7 月 1 日至 7 月 30 日在生态站的中间锦鸡儿长期观测样地内开展观测。样地土壤呼吸采用 3 台 ACE 土壤呼吸自动监测仪 (ADC 公司, 英国) 进行连续监测, 分别沿样地对角线等距布设, 安装前预先清理地表枯落物。该测量系统由封闭透明的呼吸室 (面积 $S=866\text{ cm}^2$, 高 $H=3\text{ cm}$) 和红外气体分析仪组成, 采样间隔 1 h; 土壤温度和土壤含水量数据由布设于样地中心的土壤温湿度传感器 5TM (METER 公司, 美国) 获取, 采样区间为 0~150 cm 垂直土壤层 (深度梯度: 10、20、30、40、60、90、120、150 cm), 采样间隔 1 h; 太阳总辐射、空气温度和降雨量等大气环境因子数据由样地内 Dynamet-1k 科研级气象站 (Dynamax 公司, 美国) 同步获取。

土壤呼吸速率和土壤温度间的关系采用指数模型拟合^[22]:

$$R_S = ae^{bT}$$

式中: R_S ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) 为土壤呼吸速率,

T (°C) 为土壤温度, a 为 0°C 时土壤呼吸速率, b 为温度反应系数。

Q_{10} 代表土壤呼吸温度敏感性, 即温度每升高 10°C 土壤呼吸增加的倍数, 本文采用 Fang 等^[23]的计算方法, 公式如下:

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

2.2 数据处理与分析

本文利用 Microsoft Office Excel 2016 软件对土壤呼吸速率、太阳总辐射、空气温度和降雨量等数据进行处理。统计分析在 SPSS 24.0 软件中完成, 采用 Pearson 相关性分析 (双尾) 研究自然降雨和土壤呼吸速率及各环境因子间关系; 采用回归分析研究降雨和土壤呼吸速率变化率的关系; 建立土壤温度和土壤呼吸速率的指数方程, 估算 Q_{10} 值。使用 Microsoft Office Excel 2016 软件绘图。

3 结果与分析

3.1 环境因子对土壤呼吸的影响

选取观测月内无降雨发生的 15 d 数据, 对比不同深度土壤温度 (T_S) 和土壤含水量 (V_{WC}) 与土壤呼吸速率 (R_S) 的相关性, 发现 10 cm 深度土壤的 T_{S10} 和 V_{WC10} 与 R_S 相关性较强 ($P<0.01$)。分别对 R_S 、空气温度 (T_A)、 T_{S10} 、 V_{WC10} 和太阳总辐射 (S_R) 进行相关性检验, 结果 (表 1) 表明: R_S 与各环境因子均表现为显著强相关 ($P<0.01$, $|r|>0.6$), 表明各环境因子均对 R_S 具有显著影响。各环境因子与 T_A 相关性强弱顺序为: $T_{S10}>S_R>V_{WC10}$; 与 T_{S10} 顺序为: $T_A>V_{WC10}>S_R$; 与 V_{WC10} 顺序为: $T_{S10}>T_A>S_R$; 与 S_R 顺序为: $T_A>T_{S10}>V_{WC10}$, 即各环境因子间呈 $S_R-T_A-T_{S10}-V_{WC10}$ 彼此相关性最强趋势, 其可能存在依次相互作用关系。

选取 7 月 25 日至 7 月 30 日连续无降雨发生的 6 d 分析 R_S 和各环境因子间相互作用的关系, 图 1 表明: 每日各环境因子峰值对应的时间顺序呈 $S_R-T_A-T_{S10}-V_{WC10}$ 分布, 结合各环境因子间的相关性分析, $S_R-T_A-T_{S10}-V_{WC10}$ 间可能表现为能量传递关系, 即 S_R 引起 T_A 波动, 进而影响 T_{S10} , 最终引起 V_{WC10} 变化, 其中, R_S 与 S_R 峰值对应的时间最接近, 均为每日 13:00—15:00, 表明 S_R 是最先影响 R_S 变化的环境因子。

3.2 自然降雨对土壤呼吸与环境因子日变化的影响

检验观测月内单日累计降雨量和不同深度

表1 环境因子与土壤呼吸速率的相关性

Table 1 Correlation between environmental factors and soil respiration rate

项目 Item	空气温度 T_A	土壤温度(10 cm) T_{S10}	土壤含水量(10 cm) V_{WC10}	太阳总辐射 S_R	土壤呼吸速率 R_S
空气温度 T_A	1				
土壤温度(10 cm) T_{S10}	0.88**	1			
土壤含水量(10 cm) V_{WC10}	-0.34**	-0.38**	1		
太阳总辐射 S_R	0.66**	0.37**	-0.09**	1	
土壤呼吸速率 R_S	0.74**	0.66**	-0.62**	0.66**	1

注:**表示在0.01级别(双尾)相关性显著;数值为Pearson相关系数 r 值。

Notes: ** indicates a significant correlation at level 0.01; and the value is the r of Pearson's correlation coefficient.

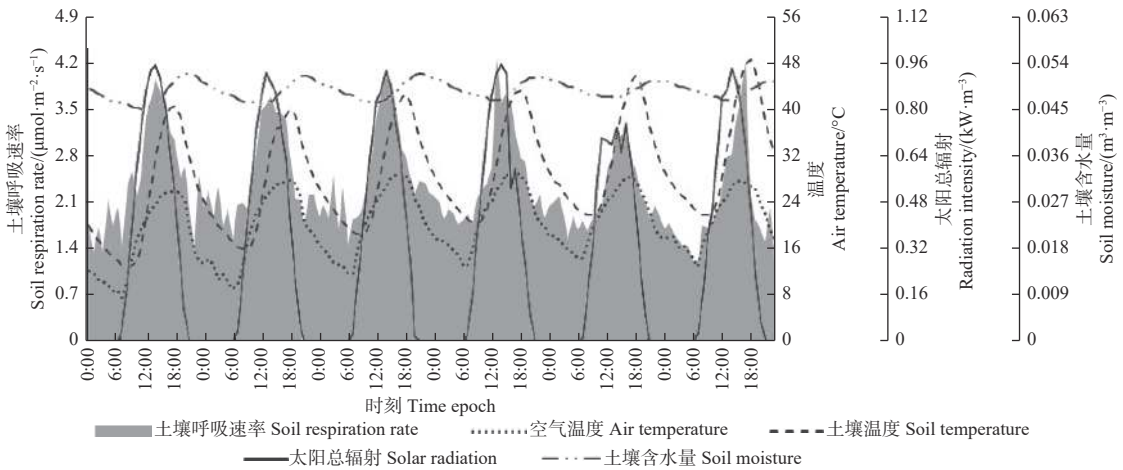


图1 7月25—30日土壤呼吸和环境因子日变化

Fig. 1 Diurnal changes in soil respiration and environmental factors from July 25 to July 30

T_S 与 V_{WC} 的相关性, 发现 10 cm 深度土壤的 T_S 和 V_{WC} 与降雨量相关性较强 ($P < 0.01$)。对比降雨量与 R_S 和各环境因子日均值的关系 (图 2), 自然降雨与 R_S 呈显著负相关 ($P < 0.01$), 且单日累计降雨量大于 0.8 mm 时 R_S 均明显受到抑制。降雨结束次日, R_S 迅速回升, 该效应约可持续 3 d, 且累计降雨量越高 R_S 回升越高。如 7 月 3 日发生了该月最大单日降雨, 对应出现了当月最小 R_S 日均值 $0.297 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 次日 R_S 迅速增长了 186%, 该效应持续至 7 月 6 日, 累计增长 397%。

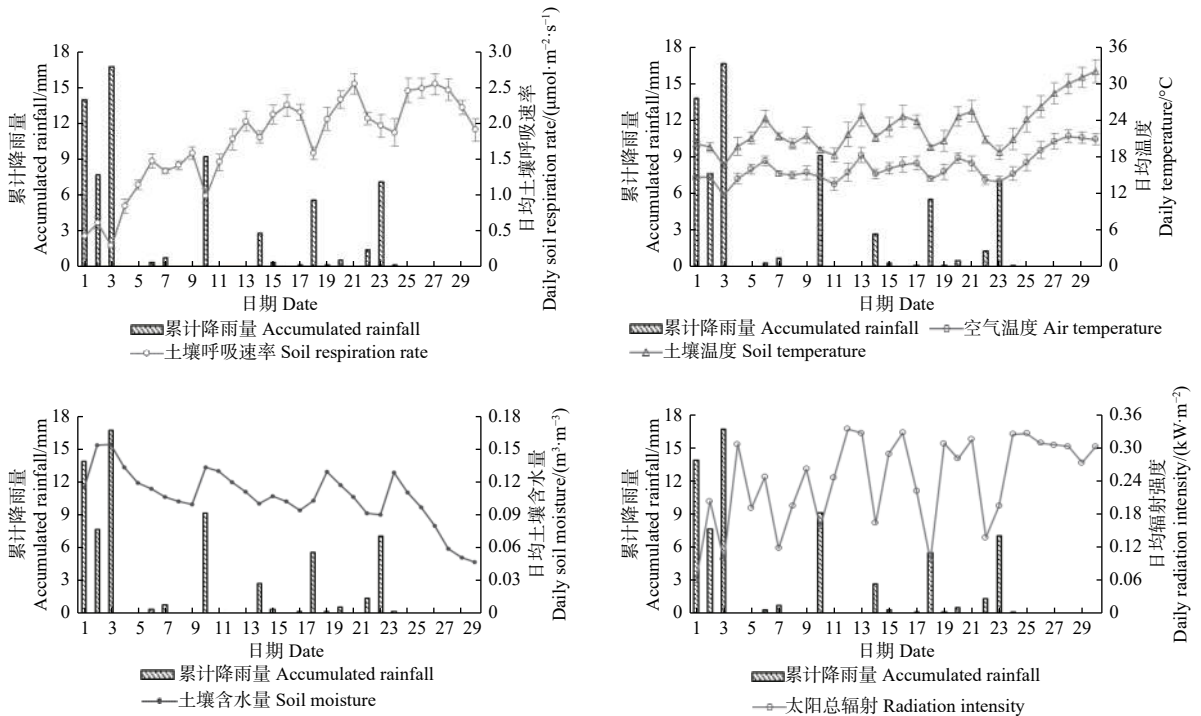
T_A 及其离散程度都低于 T_{S10} ($S^2_{\text{空气}}=5.74$, $S^2_{\text{土壤}}=14.69$), 自然降雨与二者均呈显著负相关 ($P < 0.01$), 且单日累计降雨量大于 1.4 mm 可以明显抑制 T_A 和 T_{S10} 。自然降雨与 V_{WC10} 呈显著正相关 ($P < 0.01$), 单日累计降雨量大于 2.8 mm 可以明显促进 V_{WC10} 升高; 自然降雨与 S_R 呈显著负相关关系 ($P < 0.01$), 单日累计降雨量大于 0.6 mm 时 S_R 明显受到抑制。对比自然降雨与 R_S 和各

环境因子间 Pearson 系数, 其相关性表现为: S_R (-0.72) $> R_S$ (-0.70) $> T_A$ (-0.54) $> T_{S10}$ (-0.52) $> V_{WC10}$ (0.41), 表明 S_R 对自然降雨的敏感度最高, 且大于 R_S , V_{WC10} 最低。

3.3 自然降雨过程对土壤呼吸的影响

对观测月发生的 15 次自然降雨事件依据单次连续降雨时长 (h) 和累计降雨量 (mm) 进行分类统计, 并计算降雨强度 ($\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$), 发现 R_S 变化率与降雨时长、降雨量、降雨强度均显著相关 ($P < 0.05$), 其相关性表现为: 降雨量 ($r = -0.64$) $>$ 降雨时长 ($r = -0.43$) $>$ 降雨强度 ($r = -0.40$)。对比 R_S 和降雨量与不同深度 T_S 和 V_{WC} 的相关性, 发现 R_S 和降雨量均与 150 cm 深度的 T_{S150} 和 V_{WC150} 相关性最强 ($r_{R_S-T_S}=0.68$, $r_{R_S-V_{WC}}=0.60$; $r_{\text{雨量}-T_S}=0.35$, $r_{\text{雨量}-V_{WC}}=0.37$; $P < 0.01$)。

表 2 表明: 降雨发生后, R_S 低于雨前水平。降雨在 0~4 h, R_S 变化率随降雨时长增加而降低; 降雨在 3~4 h 时 R_S 变化率降至最低, 达 -65.30%;



注：土壤含水量 $S.E < 0.001$ ，太阳总辐射 $S.E > 0.05$ ，均未表达。

Note: Soil moisture $S.E < 0.001$, total solar radiation $S.E > 0.05$, did not express.

图2 7月土壤呼吸与环境因子日变化

Fig. 2 Diurnal changes in soil respiration and environmental factors from July

表2 土壤呼吸速率和环境因子对降雨时长的响应

Table 2 Response of soil respiration rate and environmental factors to rainfall time

降雨时长 Rainfall time/h	土壤呼吸速率变化率 R_S rate of change/%	空气温度变化率 T_A rate of change/%	150 cm土壤温度变化率 T_{S150} rate of change/%	150 cm土壤含水量变化率 V_{WC150} rate of change/%
0-1	-5.18	-3.70	0.13	0.00
1-2	-40.65	-18.06	0.13	0.00
2-3	-56.03	-22.11	0.00	0.24
3-4	-65.30	-23.34	0.13	0.47
4-8	-50.28	-23.78	0.27	0.48
8-12	-42.51	-25.26	0.32	0.57

注：变化率=(降雨后-降雨前)/降雨前×100%

Note: rate of change=(after rain-before rain)/before rain×100%

降雨时长大于4 h时， R_S 变化率随降雨时长增加而逐渐升高。降雨过程中， T_A 变化率表现为随降雨时长增加而降低的趋势， T_{S150} 和 V_{WC150} 的变化率则小幅缓慢升高，但三者变化率均始终低于 R_S ，表明 R_S 对降雨时长的敏感度大于 T_A 、 T_{S150} 和 V_{WC150} 。由于 S_R 受昼夜因素较大影响，未参与分析。

表3表明：单次累计降雨量在0~12 mm， R_S 变化率随降雨量增加而降低；降雨量达8~12 mm时， R_S 变化率降至最低，达-87.42%；降雨量大于12 mm时， R_S 变化率随降雨量增加而逐渐升

高。对 R_S 变化率与降雨量进行回归分析（图3左）发现：降雨量可以解释 R_S 变化率的73.5%。当降雨量大于0.07 mm时， R_S 即受到抑制；当降雨量达10.44 mm时， R_S 变化率降至最低，抑制率为-94.65%。降雨过程中， T_A 均低于雨前水平；降雨量为0~5 mm时， T_{S150} 和 V_{WC150} 表现为随降雨量升高而缓慢升高；当降雨量大于5 mm后， T_{S150} 和 V_{WC150} 逐步恢复至雨前水平；三者变化率均始终低于 R_S ，表明 R_S 对降雨量的敏感度大于 T_A 、 T_{S150} 和 V_{WC150} 。

表3 土壤呼吸速率和环境因子对降雨量的响应

Table 3 Response of soil respiration rate and environmental factors to rainfall

降雨量 Rainfall/mm	土壤呼吸速率变化率 R_S rate of change/%	空气温度变化率 T_A rate of change/%	150 cm土壤温度变化率 T_{S150} rate of change/%	150 cm土壤含水量变化率 V_{WC150} rate of change/%
0~1	-12.96	-11.58	0.24	0.00
1~2	-18.76	-23.97	0.32	0.57
2~5	-50.44	-17.92	0.43	0.77
5~8	-85.49	-16.85	0.00	0.30
8~12	-87.42	-19.15	0.00	0.27
12~16	-78.17	-20.42	0.00	0.00
16~20	-66.67	-17.99	0.00	0.00

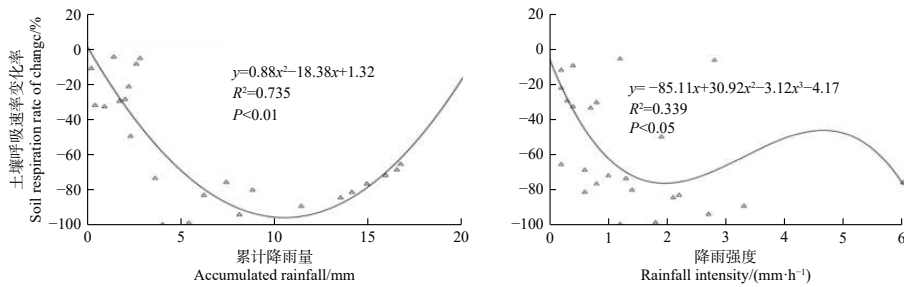


图3 累计降雨量和降雨强度对土壤呼吸速率变化率的影响

Fig. 3 Effect of accumulated rainfall and rainfall intensity on soil respiration rate of change

对 R_S 变化率与降雨强度 (降雨强度=降雨量/降雨时间) 进行回归分析 (图3右) 发现: 降雨强度可以解释 R_S 变化的 34%。当降雨强度为 0~1.95 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时, R_S 变化率随降雨强度增加而降低; 当降雨强度为 1.95~4.65 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时, R_S 变化率随降雨强度增加而增加; 当降雨强度大于 4.65 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 时, R_S 变化率再次随降雨强度增加而降低。

3.4 土壤呼吸温度敏感性 (Q_{10}) 对自然降雨的响应

对观测月内无降雨日和自然降雨日 R_S 与不同

深度 T_S 数据进行相关性检验, 其中, 10、90、120、150 cm 深度都呈中等程度以上相关关系 ($P < 0.01$, $|r| \geq 0.4$)。分别对 R_S 和各深度 T_S 数据进行指数方程拟合 ($P < 0.05$), 结果 (表4) 表明: 自然降雨日各深度 Q_{10} 值均高于无降雨日 45% 左右, 且整体随土壤深度增加而升高, 分别在 90 cm 和 120 cm 深度出现最小值和最大值, 其中, 无自然降雨日 Q_{10} 值水平均在“2”以下。

表4 土壤呼吸温度敏感性对降雨干扰的响应

Table 4 Response of the Q_{10} to rainfall disturbance

干扰因素 Interference factor	拟合因子 Fit factor	拟合方程 Fitted equation	拟合度 R^2	温度敏感系数 Q_{10}
无自然降雨日 Non_rainy day	T_{S10}	$R_S = 0.73e^{0.035T}$	0.46	1.42
	T_{S90}	$R_S = 0.006e^{0.031T}$	0.34	1.37
	T_{S120}	$R_S = 0.002e^{0.042T}$	0.33	1.53
	T_{S150}	$R_S = 0.004e^{0.04T}$	0.37	1.50
自然降雨日 Rainy day	T_{S10}	$R_S = 0.243e^{0.073T}$	0.47	2.07
	T_{S90}	$R_S = e^{0.069T}$	0.31	1.99
	T_{S120}	$R_S = e^{0.08T}$	0.36	2.23
	T_{S150}	$R_S = e^{0.077T}$	0.42	2.17

4 讨论

4.1 自然降雨对土壤呼吸的激发效应

1958年 Birch 发现,在干旱条件下,降雨能使土壤呼吸速率(R_S)急剧增加的现象,即“Birch 效应”^[24],该激发效应在诸多研究中得到验证,并表现为一定量的降雨可以迅速激发 R_S ,当降雨量超过某阈值时才转为抑制作用^[25-27]。对该效应的分析,一方面认为,雨水可以迅速置换出土壤空隙中的 CO_2 ^[28];另一方面认为,雨水可以破坏土壤团聚体释放有机质,促进微生物呼吸^[29-32]。

本文在自然降雨对 R_S 日变化影响的研究中发现,日累计降雨量小于0.8 mm时对 R_S 日均值无显著影响, ≥ 0.8 mm会显著抑制 R_S ;自然降雨过程对 R_S 瞬时变化的影响表现为大于0.07 mm的降雨发生就对 R_S 产生抑制作用,即研究区自然降雨发生过程中无“激发效应”出现,该效应通常出现在降雨结束后的3 d内。分析其原因,一方面,自然降雨过程通过降低 S_R 、 T_A 和表层 T_S 水平限制植被光合作用,而雨水迅速填充土壤空隙阻碍土壤与大气间气体交换,使植物根系自养呼吸受到抑制^[33];另一方面,荒漠生态系统土壤有机质相对匮乏,雨水从土壤中置换出的 CO_2 较少;同时,雨水入渗过程可以缓解根系的水盐胁迫并促进地表凋落物分解^[34-36]。因此,自然降雨结束后,恢复的 S_R 、 T_A 和表层 T_S 与补充的 V_{WC} 和土壤有机质可以提高微生物活性并促进植被光合作用和根系呼吸^[37],从而有效提高 R_S 水平。

4.2 自然降雨对土壤呼吸的抑制作用

R_S 主要源于植物根系自养呼吸和微生物异养呼吸^[38],其不仅受根系活性、土壤微生物和土壤理化性质等因素影响^[39-40],还与大气环境有关^[41]。本文通过对 R_S 与环境因子日变化的研究发现, S_R 、 T_A 、 T_S 和 V_{WC} 均对 R_S 变化有影响,且彼此可能存在依次作用关系,但与李思思等^[42]对青海高寒区典型林分 R_S 的研究结果不同,本研究中, S_R 对 R_S 的影响比温度因子更直接(时间一致性最强),即植物光合作用强烈时 R_S 也旺盛^[4,43]。同时无降雨发生时 R_S 主要受表层(10 cm) T_S 和 V_{WC} 影响,与中间锦鸡儿浅根系分布的特征相一致^[44];而在自然降雨过程中, R_S 受到显著抑制且转为受深层(150 cm) T_S 和 V_{WC} 影响。由此推断,无自然降雨时植物根系自养呼吸是研究区 R_S 的主要来源,

其在降雨过程中随光合作用和地表透气性下降而受到明显抑制^[28], R_S 转为以微生物分解深层有机质的异养呼吸主导;而 S_R 不仅在无降雨时对 R_S 有直接影响,其对降雨的响应也最积极(降雨量大于0.6 mm即受到抑制)。因此,本研究认为,当自然降雨发生时, S_R 最先受到抑制并对 R_S 产生影响,随后 T_A 、 T_S 和 V_{WC} 协同影响 R_S 变化。

解欢欢等^[25]在对祁连山亚高山草地的研究中发现,少量降雨可以显著刺激 R_S ,且降雨强度对 R_S 无显著影响;而本研究与其结果不同,降雨对 R_S 始终表现为抑制作用,且降雨时长、降雨量和降雨强度均对 R_S 有显著影响。究其原因,本研究区地表植被覆盖度比草地生态系统较低,不同强度的降雨可能对土壤的激溅侵蚀差异较大,使土壤物理结构发生改变进而影响 R_S 。

4.3 自然降雨对土壤呼吸温度敏感性(Q_{10})的影响

土壤呼吸温度敏感系数 Q_{10} 是评价 R_S 的重要指标之一,了解环境因子对 Q_{10} 的影响是预测未来气候变化下土壤碳循环的关键^[45]。本研究区观测月在未发生降雨时各土壤深度 Q_{10} 值均小于2,与Jassal等^[46]对美国西海岸冷杉林的研究相一致,即 V_{WC} 处于亏缺状态时, Q_{10} 值明显低于“2”;同时发现,自然降雨日的 Q_{10} 值会升高45%左右,达到2以上水平,表明降雨对 Q_{10} 值的激发效应可能与 V_{WC} 关系密切^[47-48];随着土壤深度的增加, CO_2 含量升高^[49]且 T_S 更稳定^[50],利于提高RuBP羧化酶再生和光和产物向下运转^[51],使 Q_{10} 在降雨和非降雨环境下都随土壤深度增加而升高。

5 结论

(1) 研究区各环境因子间可能存在 S_R - T_A - T_{S10} - V_{WC10} 顺序的相互作用关系,且各环境因子共同影响 R_S ,其中, R_S 对 S_R 最敏感;无降雨日 R_S 主要受表层(10 cm) T_S 和 V_{WC} 影响,降雨过程中主要受深层(150 cm) T_S 和 V_{WC} 影响;自然降雨过程中 S_R 最先受到抑制,而大于0.8 mm的降雨也会影响 R_S 日变化;

(2) 自然降雨过程抑制 R_S ,大于0.07 mm的降雨即对 R_S 产生抑制作用,其中,降雨量对 R_S 的影响最大,降雨时长次之,降雨强度相对最小。当降雨时长达3~4 h,累计降雨量达10.44 mm时,对 R_S 的抑制率最大;

(3) 自然降雨对 R_S 的激发效应通常出现在降雨结束后, 该效应可以持续约 3 d;

(4) 自然降雨可使 Q_{10} 值升高, 其对 Q_{10} 值的影响可能与 V_{WC} 条件有关。

参考文献:

- [1] Chiara B, Laura Z, Dario S, *et al.* Soil organic matter dynamics and losses in manured maize-based forage systems[J]. *European J of Agronomy*, 2009, 30(3): 177-186.
- [2] Mirco R, Alessandor C. Spatial variability and optimal sampling strategy if soil respiration[J]. *Forest Ecology and Management*, 2008, 255(1): 106-112.
- [3] 王 一, 刘彦春, 刘世荣, 等. 模拟气候变暖和林内穿透雨减少对干旱年暖温带锐齿栎林土壤呼吸的影响[J]. *林业科学研究*, 2016, 29(5): 698-704.
- [4] Roderick M L, Farquhar G D, Berry S L, *et al.* On the direct effect of clouds and atmospheric particles on the productivity and structure of vegetation[J]. *Oecologia*, 2001, 129(1): 21-30.
- [5] Jiang H, Deng Q, Zhou G, *et al.* Responses of soil respiration and its temperature/moisture sensitivity to precipitation in three subtropical forests in southern China[J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(6): 3963-3982.
- [6] Zhang L, Xie Z, Zhao R, *et al.* Plant, microbial community and soil property responses to an experimental precipitation gradient in a desert grassland[J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 127: 87-95.
- [7] IPCC. Working group I contribution of to the IPCC fifth assessment report, *Climate Change in 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge[M]. UK: Cambridge University Press, 2013.
- [8] Austin A T, Yahdjian L, Stark J M, *et al.* Water pulses and biogeochemical cycles in arid and semiarid ecosystems[J]. *Oecologia*, 2004, 141(2): 221-235.
- [9] Waring B G, Powers J S. Unraveling the mechanisms underlying pulse dynamics of soil respiration in tropical dry forests[J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(10): 1-9.
- [10] Wang L, Manzoni S, Ravi S, *et al.* Dynamic interactions of ecohydrological and biogeochemical processes in water limited systems[J]. *Ecosphere*, 2015, 6(8): 133.
- [11] Rey A, Oyonarte C, Morán-López T, *et al.* Changes in soil moisture predict soil carbon losses upon rewetting in a perennial semiarid steppe in SE Spain[J]. *Geoderma*, 2017, 287: 135-146.
- [12] 颜学佳, 魏江生, 周 梅, 等. 兴安落叶松林土壤呼吸及组分的变化特征[J]. *生态环境学报*, 2013, 22(6): 948-954.
- [13] 董丽媛, 武传胜, 高建梅, 等. 模拟降雨对西双版纳热带次生林和橡胶林土壤呼吸的影响[J]. *生态学杂志*, 2012, 31(8): 1887-1892.
- [14] 刘合满, 曹丽花, 马和平. 土壤呼吸日动态特征及其与大气温度、湿度的响应[J]. *水土保持学报*, 2013, 27(1): 193-196.
- [15] 王 旭, 闫玉春, 闫瑞瑞, 等. 降雨对草地土壤呼吸季节变异性的影响[J]. *生态学报*, 2013, 33(18): 5631-5635.
- [16] 高 翔, 郝卫平, 顾峰雪, 等. 降雨对旱作春玉米农田土壤呼吸动态的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(24): 7883-7893.
- [17] 李清雪, 朱雅娟, 贾志清, 等. 沙丘不同部位中间锦鸡儿人工林土壤养分特性及植物群落特征[J]. *林业科学研究*, 2014, 27(5): 677-682.
- [18] 李少华, 王学全, 高 琪, 等. 植被恢复对高寒沙区土壤性质的影响[J]. *林业科学研究*, 2016, 29(4): 553-559.
- [19] 赵世伟, 刘娜娜, 苏 静, 等. 黄土高原水土保持措施对侵蚀土壤发育的效应[J]. *中国水土保持科学*, 2006, 4(6): 5-12.
- [20] Cable J M, Ogle K, Lucas R W, *et al.* The temperature responses of soil respiration in deserts: a seven desert synthesis[J]. *Biogeochemistry*, 2011, 103(1/2/3): 71.
- [21] 张登山, 高尚玉, 石蒙沂, 等. 青海高原土地沙漠化及其防治[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 6-40.
- [22] Luo Y Q, Wan S Q, Hui D F, *et al.* Acclimatization of soil respiration to warming in a tall grass prairie[J]. *Nature*, 2001, 413(6856): 622-625.
- [23] Fang C, Moncrieff J B. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2001, 33(2): 155-165.
- [24] Birch H F. The effect of soil drying on humus decomposition and nitrogen availability[J]. *Plant and Soil*, 1958, 10: 9-31.
- [25] 解欢欢, 马文瑛, 赵传燕, 等. 祁连山亚高山草地土壤呼吸和生态系统呼吸对降雨的响应[J]. *生态学杂志*, 2016, 35(11): 2875-2882.
- [26] 李会杰, 饶良懿, 宋丹丹, 等. 不同降雨处理对北京西部山区油松林土壤呼吸的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2014, 33(1): 79-82, 86.
- [27] 金冠一, 赵秀海, 康峰峰, 等. 太岳山油松人工林土壤呼吸对强降雨的响应[J]. *生态学报*, 2013, 33(6): 1832-1841.
- [28] Nielsen U N, Ball B A. Impacts of altered precipitation regimes on soil communities and biogeochemistry in arid and semi-arid ecosystems[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(4): 1407-1421.
- [29] Miller A E, Schimel J P, Meixner T, *et al.* Episodic rewetting enhances carbon and nitrogen release from chaparral soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(12): 2195-2204.
- [30] Jin V L, Haney R L, Fay P A, *et al.* Soil type and moisture regime control microbial C and N mineralization in grassland soils more than atmospheric CO₂-induced changes in litter quality[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2013, 58: 172-180.
- [31] Kim D G, Vargas R, Bondlamberty B, *et al.* Effects of soil rewetting and thawing on soil gas fluxes: A review of current literature and suggestions for future research[J]. *Biogeosciences*, 2012, 9(7): 2459-2483.
- [32] 陈 亮, 孙宝玉, 韩广轩, 等. 降雨量增减对黄河三角洲滨海湿地土壤呼吸和芦苇光合特性的影响[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(9): 2794-2804.
- [33] Bouma T J, Bryla D R. On the assessment of root and soil respiration for soils of different textures: Interactions with soil moisture contents and soil CO₂ concentrations[J]. *Plant and Soil*, 2000, 227(1/2): 15-221.
- [34] McIntyre R E, Adams M A, Ford D J, *et al.* Rewetting and litter addi-

- tion influence mineralisation and microbial communities in soils from a semi-arid intermittent stream[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41(1): 92-101.
- [35] Wang Y, Wang Z L, Wang H, *et al.* Rainfall pulse primarily drives litterfall respiration and its contribution to soil respiration in a young exotic pine plantation in subtropical China[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 42(4): 657-666.
- [36] Lee X, Wu H J, Sigler J, *et al.* Rapid and transient response of soil respiration to rain[J]. *Global Change Biology*, 2015, 10(6): 1017-1026.
- [37] Huxman T E, Snyder K A, Tissue D, *et al.* Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems[J]. *Oecologia*, 2004, 141(2): 254-268.
- [38] 张远东, 庞 瑞, 顾峰雪, 等. 西南高山地区土壤异养呼吸时空动态[J]. *生态学报*, 2013, 33(16): 5047-5057.
- [39] RAICH J W, SCHLESINGER W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus*, 1992, 44(2): 81-99.
- [40] XU M, QI Y. Soil surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California[J]. *Global Change Biology*, 2001, 7(6): 667-677.
- [41] Chapin F S, Matson P A, Mooney H A. Principles of terrestrial ecosystem[M]. New York: Springer New York, 2002.
- [42] 李思思, 贺康宁, 田 赞. 青海高寒区5种典型林分土壤呼吸季节变化及其影响因素[J]. *北京林业大学学报*, 2016, 38(10): 95-103.
- [43] Tang J W, Baldocchi D D, Xu L K. Tree photosynthesis modulates soil respiration on a diurnal time scale[J]. *Global Change Biology*, 2005, 11(8): 1298-1304.
- [44] 石 坤, 贾志清, 张洪江, 等. 青海共和盆地典型固沙植物根系分布特征[J]. *中国水土保持科学*, 2016, 14(6): 78-85.
- [45] Gao R, Tang Y P, Yang Y S, *et al.* Q₁₀ values of soil respiration and its affecting factors for Chinese fir plantation and paddy field[J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2007, 4: 9-14.
- [46] Jassal R S, Black T A, Novak M D, *et al.* Effect of soil water stress on soil respiration and its temperature sensitivity in an 18-year-old temperate Douglas-fir stand[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(6): 1305-1318.
- [47] 任艳林, 杜恩在. 降水变化对樟子松人工林土壤呼吸速率及其表观温度敏感性Q₁₀的影响[J]. *北京大学学报: 自然科学版*, 2012, 48(6): 933-941.
- [48] 刘彦春, 尚 晴, 王 磊, 等. 气候过渡带锐齿栎林土壤呼吸对降雨改变的响应[J]. *生态学报*, 2016, 36(24): 8054-8061.
- [49] 王 超, 杨智杰, 陈光水, 等. 土壤垂直剖面的CO₂通量研究[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2010, 5(4): 85-92.
- [50] 涂 钢, 刘辉志, 董文杰. 东北半干旱区退化草地土壤温度的日、季变化特征[J]. *高原气象*, 2008, 27(4): 741-748.
- [51] Niu S L, Li Z X, Xia J Y, *et al.* Climatic warming changes plant photosynthesis and its temperature dependence in a temperate steppe of northern China[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, 63(1-3): 91-101.

Effects of Natural Rainfall on Soil Respiration of *Caragana* Plantation in Alpine Sandland

DAI Jie^{1,3}, JIA Zhi-qing^{2,3}, LI Qing-xue^{1,3}, HE Ling-xian-zi^{1,3}, YANG Kai-yue³, GAO Ya^{2,3}

(1. Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 3. Qinghai Gonghe Desert Ecosystem Research Station, Gonghe 813005, Qinghai, China)

Abstract: [Objective] *Caragana intermedia* plantation in Gonghe Basin of Qinghai province was used to analyze the relationship between soil respiration and environmental factors, and the effects of natural rainfall on soil respiration and environmental factors, so as to provide reference for estimation of soil carbon flux and the study of carbon cycle in the alpine sandy plantations. [Method] A 30-days' continuous positioning observation was conducted in July, 2018. The changes of soil respiration rate, environmental factors and natural rainfall process were analyzed quantitatively. [Result] (1) The soil respiration was affected by environmental factors such as solar radiation, air temperature, soil temperature and soil moisture, among which the total solar radiation showed a more direct effect. (2) Soil respiration in non rainy day was mainly affected by soil temperature and moisture of the surface soil layer, while during rainfall, it was mainly affected by deep soil temperature and moisture. The natural rainfall with cumulative rainfall more than 0.8 mm showed an inhibitory effect on the daily average of soil respiration, and the excitation effect usually occurred on the next day after the end of rainfall, and lasted about 3 days. (3) Soil respiration rate was inhibited when the rainfall was more than 0.07 mm, and the inhibition rate was the highest when the cumulative rainfall reached 10.44 mm and rainfall time reached 3–4 hours. (4) Natural rainfall caused a short-term increase of the sensitivity of soil respiration to temperature. [Conclusion] Soil respiration in the study area is mainly due to plant root autotrophic respiration, the natural rainfall process has a significant inhibitory effect on it, and the excitation effect occurs in the next day after the rain ends. Natural rainfall can increase the sensitivity of soil respiration to temperature.

Keywords: alpine sandland; plantation; soil respiration; natural rainfall; temperature quotient

(责任编辑: 徐玉秀)