

准噶尔盆地两种荒漠群落土壤呼吸速率 对人工降水的响应

张丽华^{1,2}, 陈亚宁¹, 李卫红¹, 赵锐锋^{1,2}, 花永辉³

(1. 中国科学院绿洲生态与荒漠环境重点实验室, 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011;
2. 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3. 新疆水利水电科学研究院, 乌鲁木齐 830049)

摘要:通过野外定位观测准噶尔盆地荒漠植物群落(假木贼群落和盐穗木群落)在不同人工模拟降水强度下的土壤呼吸、土壤温度和湿度动态,探讨了荒漠群落土壤呼吸速率对降水后土壤增湿的响应。结果发现两种荒漠植物群落的土壤呼吸速率均出现了模拟降水后 10min 减小、随后逐渐增加、达到最大值后再次衰减的现象。降水处理的土壤呼吸速率最大值出现滞后于对照处理,且呼吸速率最大值及最大值后的递减速率普遍高于对照。降水后土壤呼吸速率变化受温度和土壤湿度共同影响,降水后 10min 土壤呼吸速率的减小与土壤湿度最大值同步,呼吸速率最大值出现时间与地表温度一致,在降水后 180 ~ 300min。2 类群落 3 种降水处理间的土壤呼吸速率在模拟降水后(0 ~ 450min 时段)均未达到显著差异。假木贼群落以 5mm 降水处理的平均土壤呼吸速率最大,盐穗木群落则以 2.5mm 处理最大。土壤呼吸速率对模拟降水的响应受降水量、降水前土壤湿润状况、土壤质地等多种因素影响。

关键词:土壤呼吸;模拟降水;土壤湿度;温度;准噶尔盆地

文章编号:1000-0933(2009)06-2819-08 中图分类号:Q143, Q145, Q948 文献标识码:A

Responses of soil respiration to artificial rainfall in two desert communities in Junngar Basin

ZHANG Li-Hua^{1,2}, CHEN Ya-Ning¹, LI Wei-Hong¹, ZHAO Rui-Feng^{1,2}, HUA Yong-Hui³

1 Key Laboratory of Oasis Ecology and Desert Environment, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China

3 Xinjiang Research Institute of Water Resources and Hydroelectric Science, Urumqi 830049, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 2819 ~ 2826.

Abstract: In the arid and semiarid regions, discrete precipitation pulses are important triggers for biological activity. Soil biogeochemical processes in these water-limited systems are closely linked to episodic rainfall events, and the relationship between microbial activity and the amount and timing of rainfall has important implications for carbon balance of the whole-system. In this paper the influence of rainfall on soil respiration was determined in field of natural deserts with *Anabasis aphylla* and *Halostachys caspica* in the western Junngar Basin, Xinjiang. The amount of rainfall was controlled at 5 mm and 2.5 mm with a control treatment (0 mm precipitation), respectively. A pattern of soil respiration rate after rainfall, that is, a decline followed by a subsequent increase which was followed by another decline was observed. Maximum soil respiration occurred at the 5 mm and 2.5 mm treatments lagged behind that for control treatment. The maximum rate and the declining respiration rate thereafter were higher at the 5 mm and 2.5 mm treatments than that at the 0 mm treatment. Soil respiration was influenced by temperature and soil moisture following rainfall. It was shown that the first decline of soil respiration

基金项目:国家支撑资助项目(2006BAD26B0901, 2006BAC01A03);中国科学院研究生科学与社会实践资助专项资助项目(创新研究类)

收稿日期:2008-03-29; **修订日期:**2008-08-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenyn@ms.xjb.ac.cn

coincide with wettest soil moisture at the 10_{th} minute after rainfall, and the largest soil respiration occurred simultaneously with soil surface temperature at the 180_{th} or 300_{th} minute. The difference of soil respiration in three rainfall treatments was not significant for the two communities during 0—450 minutes following rainfall simulation. The average rate of soil respiration at the 5 mm treatment was largest in the *Anabasis aphylla* community, while that at the 2.5 mm treatment was largest in the *Halostachys caspica* community. The response of soil respiration to rainfall simulation is dependent on rainfall size, antecedent soil moisture condition and soil texture and so on.

Key Words: soil respiration; artificial rainfall; soil moisture; temperature; Junngar Basin

土壤呼吸是指在不同环境因子的综合影响下土壤产生和向大气释放 CO₂ 的过程,它包括微生物参与的土壤有机质的矿化作用以及植物根系与土壤动物的呼吸作用等。全球土气界面 CO₂ 的通量相当可观,据估计高达 68~77 Pg a⁻¹,是大气 CO₂-C 库的 10%,即使土壤呼吸微小比例的变化都会对大气中 CO₂ 的浓度产生重要影响^[1]。因此,对土壤与大气间碳交换量的定量研究以及对其未来的可能变化进行预测具有十分重要的科学意义。

随着对温室效应日趋关注,人们对土壤呼吸及其主要影响因素(土壤温度和土壤湿度)进行了大量研究。目前土壤温度与土壤呼吸关系研究较多且较为深入^[2~6],而土壤湿度对土壤呼吸的调节机制研究则相对较少^[7~10]。降水是土壤水分最主要的来源,也是干旱、半干旱生态系统生物过程的主要驱动力,土壤生物地球化学过程与偶发性降水事件密切联系^[11~13]。伴随降水和干旱土壤增湿后 CO₂ 的脉冲式增加在几种生态系统中已被发现^[14,15]。然而干旱荒漠土壤 CO₂ 释放对降水的响应如何以及不同物种间的差别尚待研究。通过人工模拟降水改变土壤湿度也是对于干旱区降雨稀少、土壤水分季节变化较小条件下土壤呼吸与土壤湿度关系研究的补充与完善。

本文以准噶尔盆地荒漠植物群落假木贼(*Anabasis aphylla*)、盐穗木(*Halostachys caspica*)为研究对象,通过对不同人工降水强度下土壤呼吸速率、土壤温度、湿度动态的监测,研究土壤呼吸速率对降水后土壤湿度迅速增加的响应过程,揭示土壤湿度、温度对土壤呼吸的影响作用,比较不同降水强度对荒漠土壤呼吸影响的差异,探讨两种荒漠植物群落土壤呼吸速率对降水响应的差别,对预测全球变化中降水格局改变对荒漠生态系统土壤呼吸、碳平衡的影响具有实践意义。

1 研究区概况

研究区地处准噶尔盆地西北缘克拉玛依市农业开发区外围荒漠,北靠扎依尔山区,南接玛纳斯河下游冲积、湖积平原,地势西南高东北低,西南部海拔高程在 273~280 m 之间,东北部海拔高程在 258~260 m 之间。土壤类型主要有水成土纲的残余沼泽土(relic bog soils)、盐碱土纲的残余盐土(relic solonchaks)、初育土纲的荒漠风沙土(desert aeolian soils)^[16]。属典型的大陆性干旱荒漠气候,冬季严寒,夏季高温炎热,年平均气温 8℃,年平均降水量 105.3 mm,冬季无稳定积雪,年平均蒸发量达 3545 mm,约为年降水量的 34 倍,春夏季多大风。

2 研究方法和数据采集

选择典型荒漠植物群落—假木贼、盐穗木,分别建立大小为 30 m×30 m 样地。假木贼样地(N 45°23.849', E 84°51.431'),以无叶假木贼(*Anabasis aphylla*)为建群种,分布有少量白刺(*Nitraria sibirica* Pall)、小獐毛(*Aeluropus pungens*)等,植物高度达 50~70cm,盖度约 20%。盐穗木样地(N 45°23.080', E 84°51.412'),以盐穗木(*Halostachys caspica*)、琵琶柴(*Reaumuria soongorica*)、白刺(*Nitraria sibirica* Pall)等为主,还分布有盐节木(*Halocnerrum strobilaceum*)、盐爪爪(*Kalidium foliatum*)、无叶假木贼(*Anabasis aphylla*)、补血草(*Limonium suffruticosum*)、猪毛菜(*Salsola foliosa*)等物种。高度平均为 70~85cm,盖度为 25%。

人工模拟降水实验在 2007 年 7 月、9 月上旬各进行 1 次。降水强度为 5、2.5、0 mm(即对照),每个降水

处理设置 3 个重复测定,对照处理无重复。在 7 月份测定时,提前 1~3d 将测定基座(Soil collar)嵌入土壤中,并保证 collar 距植株基部 50 cm。植株的冠幅、高度基本一致。基座为直径 10 cm,高 10 cm 的聚氯乙烯圆柱体,嵌入土中约 7cm。经过 24 h 平衡后,土壤呼吸速率恢复到基座放置前的水平,从而避免了由于安置气室对土壤扰动造成的短期内呼吸速率波动。

在样地内以 collar 为中心的 50 cm × 50 cm 范围,使用喷洒装置进行模拟降水,使 5 mm 和 2.5 mm 模拟降水单位时间的降水强度保持一致,水滴均匀落在指定范围内,并保证地表不形成径流。对模拟降水前(10:00)、降水后 10min、60min、180min、300min、420min、540min 的土壤呼吸速率、土壤温度、湿度进行测定。土壤呼吸速率测定使用 LI-8100 土壤 CO₂ 通量自动测量系统(LI-COR, Lincoln, NE, USA)。测定土壤呼吸速率的同时,采用土钻取土,重量法测定 0~10 cm、10~20 cm 和 20~30 cm 土层的土壤湿度。使用地温计测定 0、5、10、15、20 cm 和 25 cm 土壤温度。采用干湿湿度计测定大气温度(距地面 150 cm 处)和相对湿度。

3 结果与分析

3.1 增湿后土壤呼吸速率随时间的变化

如图 1,7 月、9 月份假木贼群落 5 mm、2.5 mm 模拟降水处理的土壤呼吸速率普遍在降水后 10min 较降水前下降,降水后 60~300min 明显增加,300min 后逐渐下降。然而,9 月份,2.5 mm 降水处理的土壤呼吸速率在降水后 10min 仍微弱增加。降水处理的土壤呼吸速率最大值出现滞后于对照处理,且呼吸速率最大值及最大值后的递减速率普遍高于对照。5 mm 降水处理的土壤呼吸速率在达到最大值前,低于 2.5 mm 处理和对照,但最大值及递减阶段均较高。土壤呼吸速率在降水后 540min 恢复到降水前的大小。

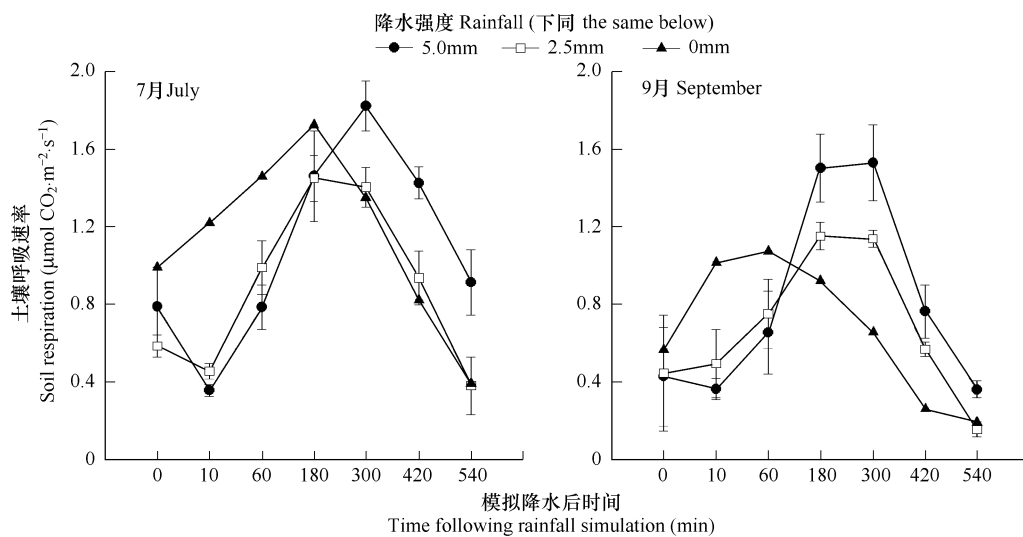


图 1 假木贼群落土壤呼吸速率对模拟降水的响应

Fig. 1 The response of soil respiration to rainfall simulation in July, September in *Anabasis aphylla* community

模拟降水后盐穗木群落土壤呼吸速率也发生先减小随后增加并再次减小的变化。同假木贼群落,9 月份,2.5 mm 降水处理的土壤呼吸速率在降水后 10min 未出现减小(图 2)。7 月份,对照土壤呼吸速率最大值及达到最大值前均高于 2.5 mm 降水处理,5 mm 处理的最低;9 月份,2.5 mm 降水处理的呼吸速率最大值及在最大值前的递增阶段高于其他处理,但 5 mm 降水处理呼吸速率在最大值后的递减阶段高于其他处理。7 月份,5 mm 处理的土壤呼吸速率较低,可能与模拟降水前土壤湿度较高有关,盐穗木群落 0~30 cm 平均土壤湿度 7 月份观测时为 17.8%,9 月份仅 10%。

3.2 土壤温度、湿度与土壤呼吸速率间的关系

由图 3 可知,7 月份,模拟降水后,假木贼群落 0~10 cm、10~20 cm 和 20~30 cm 土壤湿度都表现出先增加后逐渐降低的趋势,0~10 cm 的变幅最大。降水后 10min 表层土壤湿度达到最大,但由于土壤表面过湿而

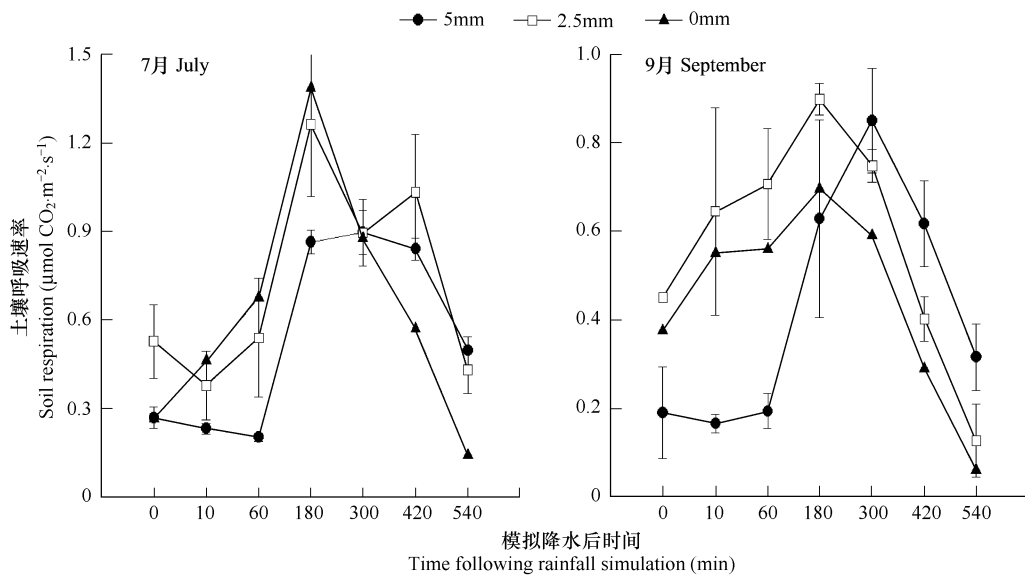


图2 盐穗木群落土壤呼吸速率对模拟降水的响应

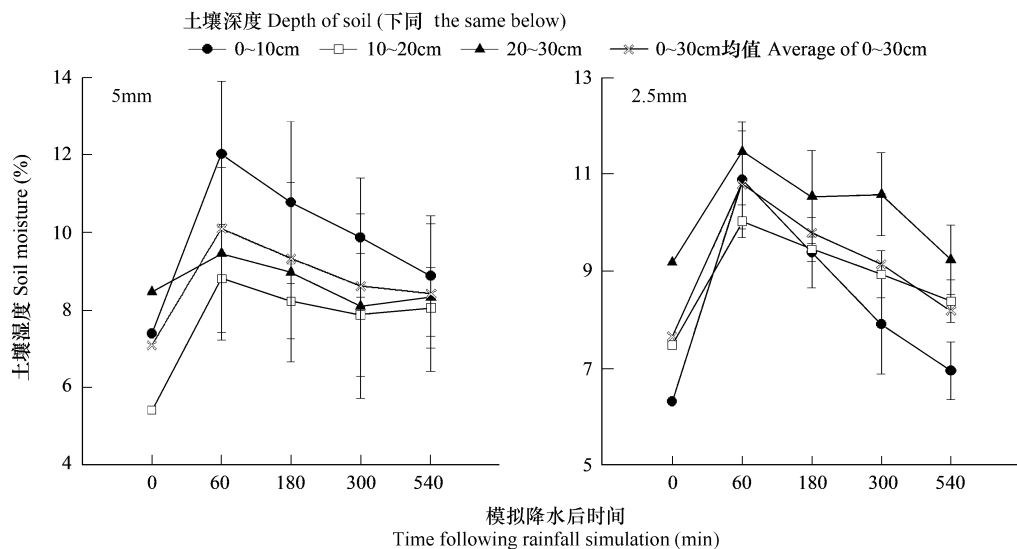
Fig. 2 The response of soil respiration to rainfall simulation in July, September in *Halostachys caspica* community

图3 降水后假木贼群落土壤湿度的变化

Fig. 3 The change of soil moisture following rainfall simulation in *Anabasis aphylla* community in July
5 mm and 2.5 mm simulated rainfall respectively

未能进行取样。土壤呼吸速率值在降水后 10min 相应下降,随后逐渐升高(图 1)。结合当日气温、土壤温度变化(图 4)可知,降水后 300min 时的气温达到当日最高值,5 mm 降水处理的地表温度在 300min 时达到峰值,2.5 mm 处理的地表温度在 180min 时达到最高,都与土壤呼吸速率最大值出现时间一致,此时土壤湿度也不是最低值。

9 月份,2.5 mm 降水处理土壤湿度变化幅度低于 5 mm 处理(图 5)。同 7 月份,土壤呼吸速率最大值的发生与地表温度基本一致。可见,降水后土壤 CO_2 释放的最大速率发生在温度最高而土壤湿度适中的时刻。

3.3 同一群落不同降水处理间土壤呼吸速率的差异

方差分析(One-Way ANOVA)表明,7、9 月份假木贼和盐穗木群落模拟降水后(0~450min)3 种降水处理间土壤呼吸速率差异均不显著($P>0.1$)(图 6)。从图 6 仍可看出,假木贼群落以 5 mm 降水处理的土壤呼吸

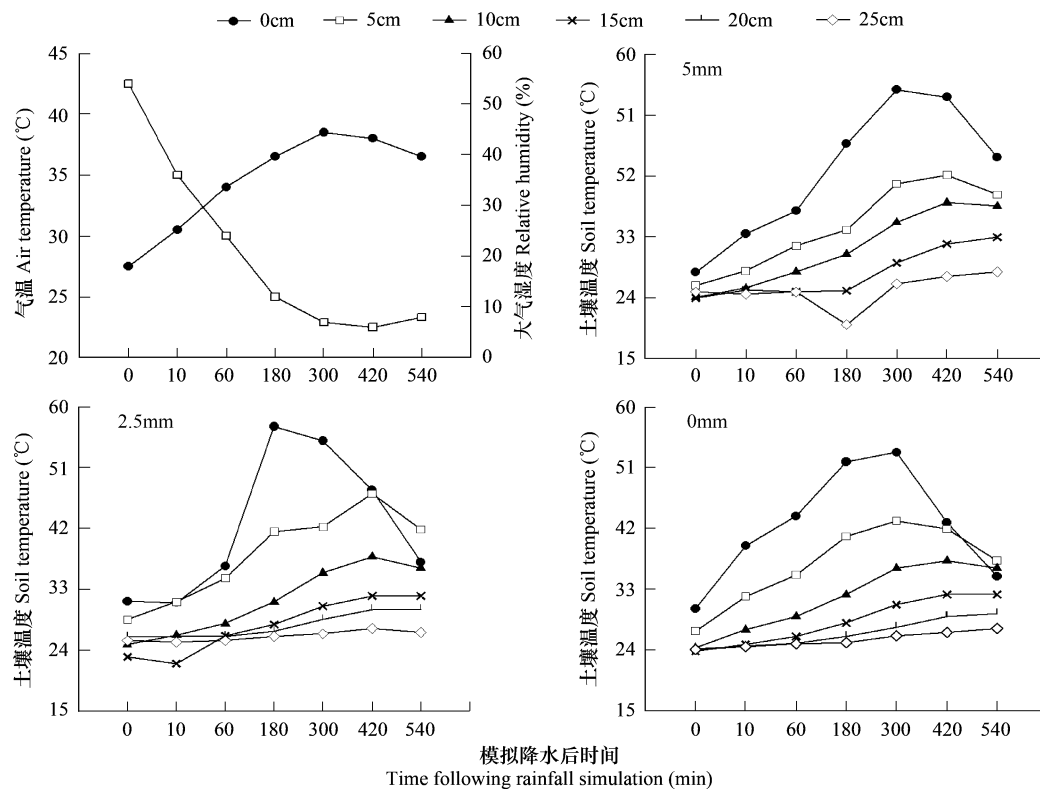


图4 7月份模拟降水后假木贼群落气温、土壤温度变化

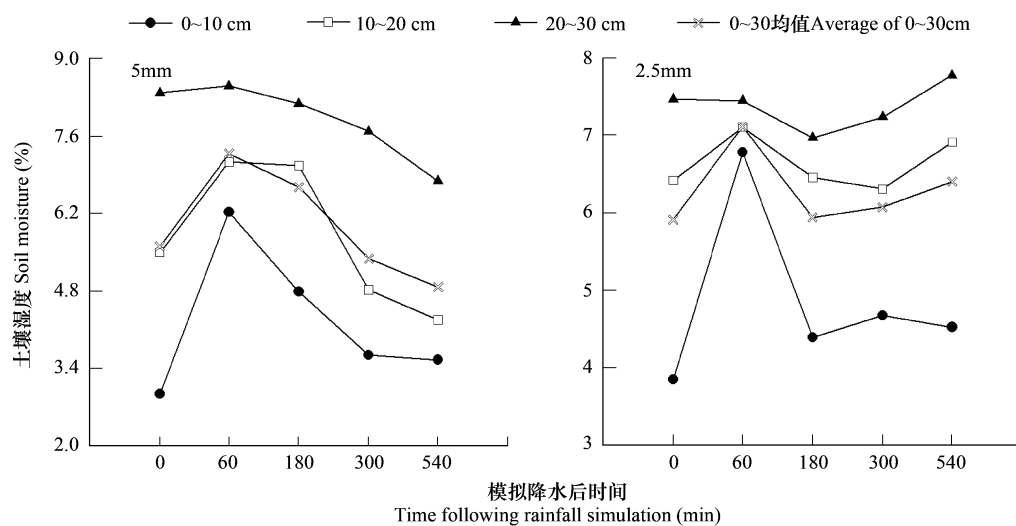
Fig. 4 The change of temperature following rainfall simulation in *Anabasis aphylla* community in July

图5 9月份模拟降水后假木贼群落土壤湿度的变化

Fig. 5 The change of soil moisture following rainfall simulation in *Anabasis aphylla* community in September

速率最大(图6),盐穗木群落则以2.5 mm处理的最大(图6)。

7月份假木贼群落在模拟降水后300、420和540min时5 mm、2.5 mm降水处理间的土壤呼吸速率存在显著差异($P < 0.1$ 或 0.05),而9月份仅在540min时差异达到极显著水平($P < 0.05$)。而盐穗木群落7月份降水处理间的土壤呼吸速率差异均不显著。9月份降水前(0min)和降水后60min时5 mm和2.5 mm降水处理间的呼吸速率差异达到显著水平。此外,同一降水处理下假木贼群落0 mm对照的土壤呼吸速率仅在7月份

和9月份间存在显著差异。盐穗木群落均未达到显著差异。

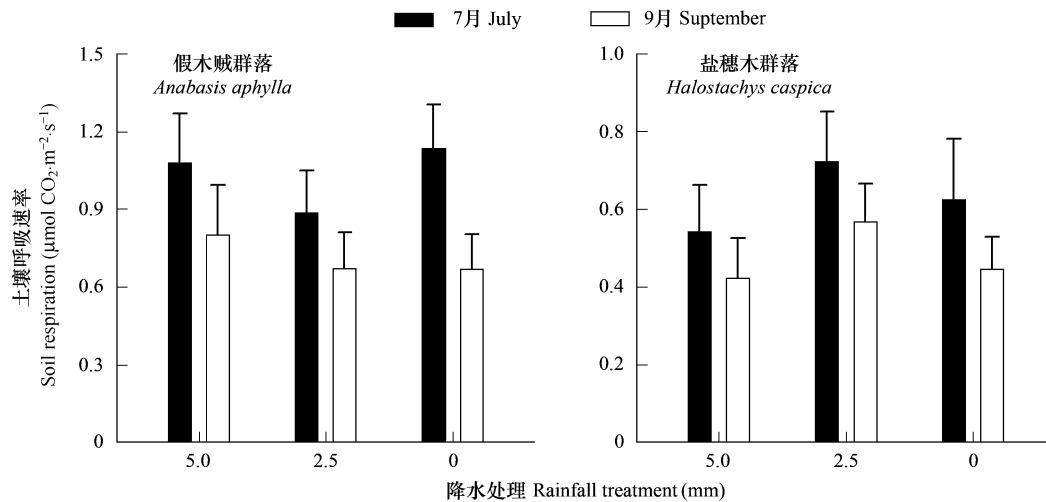


图6 模拟降水后假木贼群落和盐穗木群落不同降水处理间土壤呼吸速率的差异

Fig. 6 The differences of soil respiration in treatments following rainfall simulation for *Anabasis aphylla* and *Halostachys caspica* communities

4 讨论

本文对假木贼和盐穗木两种荒漠植物群落进行了5、2.5mm模拟降水实验。降水后10min时5、2.5mm降水处理的土壤呼吸速率较降水前下降,降水后水分迅速取代了土壤中气体的位置使土壤通透性变差,CO₂在土壤中的扩散阻力增大,从而导致测定的土壤呼吸速率减小。需要强调的是,9月两种群落2.5mm降水处理的土壤呼吸速率在降水后10min未下降,7月份时发生下降,原因分析是7月份野外实验的前3d都有雷阵雨,造成观测时土壤湿度本身较高。由此,降水量较小(如2.5mm)并不会对土壤呼吸产生抑制。模拟降水后60~300min土壤呼吸速率明显升高,300min后逐渐下降,两种群落土壤呼吸速率均未发生脉冲式增加,而在美国Sonoran荒漠研究得出土壤呼吸速率在模拟降水后15min迅速达到峰值,植物冠幅下和植物间空地由降水前0.43、0.09 g C m⁻² h⁻¹分别增加到2.2、0.69 g C m⁻² h⁻¹ [13];也不同于盐生荒漠灰漠土在风干-润湿培养后的第16小时CO₂释放量达到高峰 [17]。这可能反映出研究区荒漠土壤有机碳较稳定、不易分解,从而限制了供微生物分解的基质数量。此外,研究区土壤质地粘重,水分下渗慢,而模拟降水后气温不断升高,水分蒸发快,0~10 cm土壤湿度变化明显,土壤呼吸速率在模拟降水后540min时就已恢复到降水前的水平。本实验中5 mm、2.5 mm模拟降水处理下的土壤呼吸速率最高值和递减阶段值均高于对照(9月份更为典型),这是土壤中微生物数量在雨后明显增加,造成雨后土壤CO₂排放量增加的一个长时效应(1d以内) [18, 19]。

模拟降水后假木贼和盐穗木群落土壤呼吸速率的变化受温度和土壤湿度共同影响。地表温度在模拟降水后180或300min时达到峰值,与土壤呼吸速率最大值同步,此时土壤湿度也不是观测当天的最高或最低值;降水后10min,表层土壤湿度达到最大,土壤呼吸速率下降到最低值。此外,土壤呼吸速率在达到最大值前、后的递增和递减阶段与地表温度的变化过程同步。可见,在一定程度上温度对降水后土壤呼吸速率时间变化起到正向、积极的影响作用,土壤湿度的影响则相对复杂。本文中当土壤湿度达到最大,即土壤过湿情况下,土壤呼吸速率受到抑制;随降水后时间推移,土壤过湿状况改善,土壤呼吸速率升高。9月份两种群落在5、2.5 mm模拟降水处理下的土壤呼吸速率最高值和递减阶段值高于对照,表明在一定范围内的土壤湿度促进了土壤呼吸速率升高。在研究区以前的研究发现荒漠土壤呼吸速率季节变化与土壤湿度的相关性不显著,这与土壤湿度季节变化范围较小(10%)未超出极端范围有关,而且土壤水分变化的影响也可能被生长季较高的温度影响所掩盖 [20, 21]。Maestre & Cortina得出土壤湿度和温度能解释西班牙半干旱草原土壤CO₂释放小尺度上的空间变异 [22], Conant等也发现土壤湿度是控制亚利桑那州3种半干旱生态系统土壤呼吸速率最重

要的因素^[23]。然而,Casals 等和 Frank 等认为相对于土壤湿度,土壤温度更能解释干旱土壤 CO₂ 释放的变化^[24, 25]。因此,在不同生态系统中,因为植被类型与覆盖状况、土壤理化性质等不同,温度、土壤湿度对土壤呼吸作用的影响结果并不一致。

通过比较不同模拟降水处理下群落的平均土壤呼吸速率,得出假木贼群落以 5 mm 降水处理的土壤呼吸速率最大,盐穗木群落则以 2.5 mm 处理最大(图 6)。此外,降水后 1h 时盐穗木群落 5mm 处理土壤呼吸速率仍下降或微弱上升,假木贼群落则为增加(图 1,图 2)。这可能与研究区土壤较粘重有关,同时,模拟降水前盐穗木群落土壤湿度较假木贼更高。9 月份模拟降水前盐穗木群落 0~30 cm 平均土壤湿度是 9.67%,假木贼群落则为 5.87%,前者大于后者近两倍。因而盐穗木群落土壤呼吸速率对 2.5 mm 降水处理的响应更明显,土壤较干的假木贼群落土壤呼吸速率对 5mm 降水处理的响应更强烈。可见,模拟降水对土壤呼吸速率的影响还依赖于降水前土壤的湿润状况,这与 Thomas 等在喀拉哈里沙漠的研究结果一致^[26]。7 月份在土壤较湿润前提下,2.5mm 模拟降水造成土壤呼吸速率降水后 10min 下降也是该结论的例证。

气候变化可能改变降水大小和频率。在受降水脉冲驱动的生态系统中,降水量大小是决定土壤呼吸组分的活性、贡献率的重要因素。Cable & Huxman 在 Sonoran 荒漠研究得出,在小的降水脉冲作用下微生物结皮对土壤表面 CO₂ 释放的贡献达到 80%,而大的降水事件后,根系和土壤微生物呼吸占土壤表面 CO₂ 释放的近 100%^[27]。小降雨事件使水分在土壤中的下渗力弱,主要增加了微生物呼吸,而能下渗到土壤足够深处的大暴雨才会引起植物气体交换力增加^[28]。Reynolds 等得出植物对降水产生响应的降水量下限是 0.5 cm^[29]。由此,本研究中 5 mm 模拟降水可能已激发了荒漠植物根系呼吸,但实际响应幅度较小。相对浅根系植物,深根系植物对降水的响应更慢^[30]。研究区单次降水量以小于 5 mm 居多,能够充分激发微生物活性,但不足以引起植物自养活性增加的需要。今后研究中应进一步区分植物根系呼吸、土壤微生物呼吸对降水响应的差异,从而更准确地探索气候变化条件下降水量、频率变化对生态系统碳输出和碳平衡的影响机制。

References:

- [1] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 7—20.
- [2] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 1992, 44B: 81—99.
- [3] Fang C, Moncrieff J B. The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. *Soil Biology Biochemistry*, 2001, 33: 155—165.
- [4] Irvine J, Law B E. Contrasting soil respiration in young and old growth ponderosa pine forests. *Global Change Biology*, 2002, 8(12): 1183—1193.
- [5] Fernandez D P, Neff J C, Belnap J, *et al.* Soil respiration in the cold desert environment of the Colorado Plateau (USA): abiotic regulators and thresholds. *Biogeochemistry*, 2006, 78: 247—265.
- [6] Gaumont-Guay David, Andrew Black T, Griffis T J, *et al.* Interpreting the dependence of soil respiration on soil temperature and water content in a boreal aspen stand. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 140: 220—235.
- [7] Davidson E A, Verchot L V, Cattaneo J H, *et al.* Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 53—69.
- [8] Chen Q S, Li L H, Han X G, *et al.* Effects and mechanisms of water on soil respiration. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 972—978.
- [9] Jia B R, Zhou G S, Yuan W P. Modeling and coupling of soil respiration and soil water content in fenced *Leymus chinensis* steppe, Inner Mongolia. *Ecological Modelling*, 2007, 201: 157—162.
- [10] Dijkstra F A, Cheng W X. Moisture modulates rhizosphere effects on C decomposition in two different soil types. *Soil Biology Biochemistry*, 2007, 39: 2264—2274.
- [11] Austin A T, Yahdjian L, Stark J M, *et al.* Water pulses and biogeochemical cycles in arid and semiarid ecosystems. *Oecologia*, 2004, 141: 221—235.
- [12] Huxman T E, Snyder K A, Tissue D, *et al.* Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems. *Oecologia*, 2004, 141: 254—268.
- [13] Sponseller R A. Precipitation pulses and soil CO₂ flux in a Sonoran Desert ecosystem. *Global Change Biology*, 2007, 13: 426—436.
- [14] Franzluebbers A J, Haney R L, Honeycutt C W, *et al.* Flush of carbon dioxide following rewetting of dried soil relates to active organic pools. *Soil*

- Science Society of America Journal, 2000, 64: 613—623.
- [15] Yang Y S, Chen G S, Dong B, *et al.* Responses of soil respiration to soil monoculture plantations in subtropical rewetting in a natural forest and two China. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(5): 953—958.
- [16] Qian Y B, Zhou H R, Xu M, *et al.* Relationship between water-soil properties and desert plant diversities in agricultural development area of Kelamayi. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18 (2): 186—189.
- [17] Li C H, Tang L S, Li Y. Effect of air-drying and rewetting on physico-chemical properties and microbial activity of Desert Grey soil. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(2): 364—367.
- [18] Anderson J M. Carbon dioxide evolution from two temperate deciduous woodland soils. *Journal of Applied Ecology*, 1973, 10: 361—375.
- [19] Orchard V A, Cook F J. Relationship between soil respiration and soil moisture. *Soil Biology Biochemistry*, 1983, 22: 153—160.
- [20] Zhang L H, Chen Y N, Li W H, *et al.* Seasonal variation of soil respiration under different land use/land cover in arid region. *Science in China series D*, 2006, 36 (Supp. II): 68—76.
- [21] Zhang L H, Chen Y N, Li W H, *et al.* Soil carbon dioxide emission and affecting factors under *Haloxylon ammodendron* community in Junggar Basin. *Journal of Desert Research*, 2007, 27 (2): 266—272.
- [22] Maestre F T, Cortina J. Small-scale spatial variation in soil CO₂ efflux in a Mediterranean semiarid steppe. *Applied Soil Ecology*, 2003, 23: 199—209.
- [23] Conant R T, Klopatek J M, Klopatek C C. Environmental factors controlling soil respiration in three semiarid ecosystems. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64: 383—390.
- [24] Casals P, Romanyà J, Cortina J, *et al.* CO₂ efflux from a Mediterranean semi-arid forest soil I. Seasonality and effects of stoniness. *Biogeochemistry*, 2000, 48: 261—281.
- [25] Frank A B, Liebig M A, Hanson J D. Soil carbon dioxide fluxes in northern semiarid grasslands. *Soil Biology Biochemistry*, 2002, 34: 1235—1241.
- [26] Thomas A D, Hoon S R, Linton P E. Carbon dioxide fluxes from cyanobacteria crusted soils in the Kalahari. *Applied Soil Ecology*, 2008, 39: 254—263.
- [27] Cable M J, Huxman T E. Precipitation pulse size effects on Sonoran Desert soil microbial crusts. *Oecologia*, 2004, 141: 317—324.
- [28] Huxman T E, Snyder K A, Tissue D *et al.*, Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems. *Oecologia*, 2004, 141: 254—268.
- [29] Reynolds J F, Kemp P R, Ogle K *et al.* Modifying the ‘pulse reserve’ paradigm for deserts of North America: precipitation pulses, soil water, and plant responses. *Oecologia*, 2004, 141: 194—210.
- [30] BassiriRad H, Tremmel D C, Virginia R A, *et al.* Short-term patterns in water and nitrogen acquisition by two desert shrubs following a simulated summer rain. *Plant Ecology*, 1999, 145: 27—36.

参考文献:

- [8] 陈全胜, 李凌浩, 韩兴国, 等. 水分对土壤呼吸的影响及机理. *生态学报*, 2003, 23 (5): 972—978.
- [15] 杨玉盛, 陈光水, 董彬, 等. 格氏栲天然林和人工林土壤呼吸对干湿交替的响应. *生态学报*, 2004, 24(5): 953—958.
- [16] 钱亦兵, 周华荣, 徐曼, 等. 克拉玛依农业开发区水土性状与荒漠植物多样性的关系. *水土保持学报*, 2004, 18 (2): 186—189.
- [17] 李晨华, 唐立松, 李彦. 干湿处理对灰漠土土壤理化性质及微生物活性的影响. *土壤学报*, 2007, 44(2): 364—367.
- [20] 张丽华, 陈亚宁, 李卫红, 赵锐锋. 干旱荒漠区不同土地利用/覆盖类型土壤呼吸速率的季节变化. *中国科学 D 辑*, 2006, 36 (增刊 II): 68—76.
- [21] 张丽华, 陈亚宁, 李卫红, 赵锐锋. 准噶尔盆地梭梭群落下土壤 CO₂ 释放规律及其影响因子研究. *中国沙漠*, 2007, 27 (2): 266—272.