

DOI:10.11937/bfy.201624044

强碱土土壤呼吸对不同降水强度的响应

张 录¹, 张 芳^{1,2}, 胡 实¹, 张 楠¹, 段 鹏 程¹

(1. 新疆大学 资源与环境科学学院, 教育部绿洲生态重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046;

2. 新疆大学 生态学博士后流动站, 新疆 乌鲁木齐 830046)

摘 要:以准噶尔盆地南缘奇台县境内的强碱土为研究对象,测定分析了模拟不同降水强度(小雨、中雨、大雨)在降水过程中和降水后对土壤呼吸速率的影响。结果表明:小雨处理促进了土壤呼吸速率的释放,在降水过程中,其比对照点增加了 320.69%,降水后仅比对照点增加了 58.82%;中雨处理在降水过程中,土壤呼吸速率比对照点减少了 48.27%,但在降水后则增加了 29.41%;大雨处理使得土壤呼吸速率迅速降低,与对照点相比,降水过程中和降水后的土壤呼吸速率,分别减少 306.89%和 188.24%,且表现出持续负值的趋势,大雨明显地增强了强碱土对 CO₂ 的吸收效应。

关键词:强碱土;土壤呼吸;模拟降水

中图分类号:S 154.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2016)24-0170-05

土壤呼吸是全球碳循环的一个重要环节,即使较小的土壤呼吸作用变化也能显著地减缓或加剧大气中 CO₂ 含量的增加^[1-2]。据估算,全球陆地生态系统每年由土壤呼吸释放到大气中的碳通量达到 68~100 Pg^[2-3]。相关研究表明,在全球气候变暖的情况下,未来中国干旱地区的降水有增加的趋势^[4-6]。土壤呼吸与土壤水分紧密相关,因此,降水量的改变对于干旱区土壤呼吸的影

响尤为明显^[7]。目前,在干旱区已进行的土壤呼吸速率对模拟降水响应的研究,多集中于有植被覆盖的区域^[8-10],对于无植被覆盖的强碱土在模拟不同降水条件下的土壤呼吸变化研究较少。现以强碱土为研究对象,通过对人工模拟不同降水强度下土壤呼吸速率的动态监测,研究干旱区不同降水强度下以及降水后的土壤呼吸变化特征,探讨强碱土对于不同降水等级的响应,以增加对于干旱区碳循环的进一步认识。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于天山北坡与准噶尔盆地南缘地区过渡地带的新疆奇台县草原站(北纬 44°04′42.62″,东经 89°53′24.81″,海拔 791 m),属中温带大陆性干旱半干旱气候。年平均气温 4.7℃,年平均降水量 176 mm,蒸发

第一作者简介:张录(1989-),男,陕西汉中,人,硕士,研究方向为干旱区环境。E-mail:zhanglu1356@126.com.

责任作者:张芳(1969-),女,山东嘉祥人,博士,副教授,现主要从事干旱区环境与人地关系等研究工作。E-mail:zhangf602@163.com.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41261049);中国博士后科学基金资助项目(2013M532100)。

收稿日期:2016-09-26

investigated. The results showed that mycorrhizal colonization rates were 47%—52%, external hyphal density was more than 4 m · g⁻¹ soil, aboveground parts and root dry weight were improved significantly, and the typical mycorrhizal structures were formed in the roots of the above four plant species by using AM inoculums. Similarly, plant vegetative growths were improved significantly by inoculation of AM via increasing survival rate, plant height, ground diameter and leaf SPAD. Also, available N, organic matter, GRSP, acid phosphatase, sucrase and urease and nitratase activities of soil was significantly higher and reduced Olsen P and available K in the inoculation treatments than those in the non-inoculated treatments. Thus, AM fungi dramatically enhanced the extremely poor and arid coal mining-induced subsidence soil restoration by improving typical plant growths and chemical or biological properties of soil, which could provide some suggestions for long-term ecological improvements by using AM inoculums.

Keywords: coal mining subsidence area; arbuscular mycorrhizal fungus; reclamation species; soil chemical properties; soil enzymatic activities

势 2 141 mm,无霜期平均 156 d,年日照时数 2 280~3 230 h。所选样地为无植被覆盖的强碱化白板地,经采样后测定,该区域富含无机碳酸盐,表层 0~20 cm 土壤碳酸钙含量约 84 g · kg⁻¹,pH 范围在 10.16~10.38,有机质含量极低,约占 0.2%~0.3%,电导率为 3.34~4.57 mS · cm⁻¹。根据《中国土壤地理发生学分类和系统分类近似参比》及碱化土壤分级相关研究结果^[1],样地内土壤属于强碱土。

1.2 试验方法

1.2.1 布设土壤呼吸环 在样地内,选择平坦、背景均一的 2 m×2 m 的区域,采用直径 20 cm,高 20 cm 的 PVC 管按环形设置 4 个土壤呼吸环,分别代表对照点(A)、小雨(B)、中雨(C)、大雨(D)(图 1)。将这 4 个 PVC 管打入土中,露出地表约 3 cm,静置 48 h 待其平衡,以避免安置 PVC 管对土壤呼吸速率造成短时间的扰动。

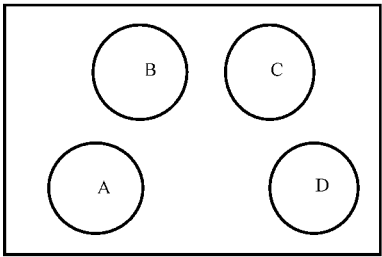


图 1 试验地示意

Fig.1 The schematic diagram of experimental place

1.2.2 模拟降水等级及降雨量 试验于 10 月初进行,期间天气晴朗。在野外环境模拟不同降水强度下,采用美国 LI-COR 公司的 LI-8100 测定土壤呼吸速率。模拟降水等级及降雨量具体处理见表 1,对照点 A 环内的土壤不做任何人工干扰,用于作为土壤呼吸背景值对不同降水处理的 B、C、D 环内土壤测定数据进行对比分析。先测定对照点的土壤呼吸速率(连续测 2 个值,最终结果取其平均值,小雨、中雨、大雨处理相同)。在对照点测定结束前给小雨处理的 PVC 管内均匀的洒纯净水(pH 7.3),待对照点测定结束后立即测定小雨处理。按照测小雨处理的方法依次测中雨、大雨处理。整个过程要保证连续性,避免测定时间过长而引起温度差异。各个处理(含对照点)测定频度为每 1 h 测定 1 次。降水过

表 1 模拟降水等级及降雨量

Table 1 The simulated of precipitation grade and rainfall mm

降水等级	12 h 降水总量	模拟降水总量
Precipitation grade	12 h rainfall	Simulated rainfall
小雨 Light rain	0.1~4.9	2.50
中雨 Moderate rain	5.0~14.9	9.95
大雨 Heavy rain	15.0~29.9	22.45

程为 12 h(08:00—19:00),降水结束后再持续观测 60 h。同时仪器所带传感器同步记录了试验期间的温度(地上 10 cm 处气温和地下 10 cm 处地温)及湿度(地上 10 cm 处空气相对湿度和地下 10 cm 处土壤湿度)背景数据。

2 结果与分析

2.1 试验期间的气象因子

试验期间测得地上 10 cm 处气温和空气相对湿度以及地下 10 cm 处地温和土壤湿度数据,模拟降水试验在此背景下进行。由表 2 可知,试验期间温度的日较差大,尤其是气温的差异更大;空气相对湿度较低,均值为 33.20%。强碱土由于含有较多的盐、碱离子及较细的土壤质地,其土水势较低,保湿性好,土壤平均湿度达到了 16.31%。

表 2 试验期间温度和湿度特征

Table 2 The temperature and humidity characteristics during the test

项目	气温	地温	空气相对湿度	土壤湿度
Item	Air temperature	Ground temperature	Relative humidity	Soil moisture
	/℃	/℃	/%	/%
最高(大) Maximum	31.61	22.09	57.41	18.88
最低(小) Minimum	8.30	12.05	12.06	14.50
平均 Average	18.07	17.12	33.20	16.31

2.2 气温和空气相对湿度与土壤呼吸的相关性

降水后的地温和土壤湿度发生了很大变化,但是由于该试验的模拟降水仅在 PVC 管内操作,使得空间较狭小,加之为了保证不同降水处理之间的连贯性,导致了空间操作和时间上的限制,使得这 2 个因子无法测得。但不同降水强度后,在相同的气温和蒸发势下,蒸发引起的空气相对湿度也会发生不同的变化,因此,用不同降水处理后 PVC 管内的空气相对湿度的不同变化来揭示加水后的土壤湿度的变化(土壤湿度越大,空气相对湿度亦越大)。由表 3 可知,各降水处理在整个观测过程中的土壤呼吸速率与气温和空气相对湿度的相关关系均达到极显著相关,且与气温为正相关关系,与空气相对湿度为负相关。

表 3 土壤呼吸速率与气温、空气相对湿度的相关关系

Table 3 The correlation between soil respiration rate, air temperature and relative humidity

项目	对照点	小雨	中雨	大雨
Item	Background point	Light rain	Moderate rain	Heavy rain
气温 Air temperature	0.669 **	0.671 **	0.654 **	0.380 **
空气相对湿度	-0.712 **	-0.634 **	-0.641 **	-0.693 **
Relative humidity				

注: ** , P<0.01; * , P<0.05。

Note: ** , P<0.01; * , P<0.05。

2.3 模拟降水过程中土壤呼吸速率变化

由图 2 可以看出,模拟降水持续的整个 12 h 过程

中,不同降水处理的土壤呼吸速率的变化特征存在较大差异。对照点的土壤呼吸速率在 10:00—18:00 为正值,变化较为平稳,剩余时段为负值。小雨处理的土壤呼吸速率随气温的升高而增大,在 13:00 达到最大值后逐渐减小,18:00—19:00 降低至负值,变化幅度较对照点大。中雨处理的土壤呼吸速率变化趋势与小雨相似,只是较为平缓,在 12:00 左右达到最大值后缓慢降低,15:00—19:00 为负值。而大雨处理的呼吸速率在 08:00—09:00 为正值,后迅速降低,在 10:00—19:00 期间,呼吸速率均为负值。与对照点的土壤呼吸速率(平均值为 $0.29 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)相比,小雨、中雨、大雨处理的平均土壤呼吸速率为分别为 1.22、0.15、 $-0.60 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,小雨处理的平均土壤呼吸速率增加了 320.69%,而中雨、大雨处理的平均土壤呼吸速率则分别减少了 48.27%和 306.89%。这是因为小雨处理模拟降水量小(2.5 mm),供水强度小于土壤入渗能力,降水以垂直入渗模式渗入土壤后,填充了部分土壤孔隙,使 CO_2 排出,使得土壤呼吸量增加。但是中雨处理和大雨处理模拟降水量大(分别为 9.95 mm 和 22.45 mm),土壤湿度明显增大(平均空气相对湿度分别为 53.08%和 58.45%,图 3),这是因为强碱土结构紧密,入渗能力较低,水分下渗缓慢,中雨雨量占据了表层大部土壤孔隙,使得土壤的通透性变的更差,从而抑制了土壤呼吸速率。模拟中雨降水至 16:00 左右,表层土壤开始出现饱和和积水现象。而模拟大雨降水仅在 2 h 后即开始出现积水现象,之后直至降水结束,土表之上均存在积水层,积水一方面有利于表层土壤中的碳酸盐与 CO_2 的化学反应,吸收 CO_2 (反应公式: $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$),另一方面, CO_2 也是较易溶于水的气体,因此,使得大雨处理的土壤呼吸在日整体为负值。

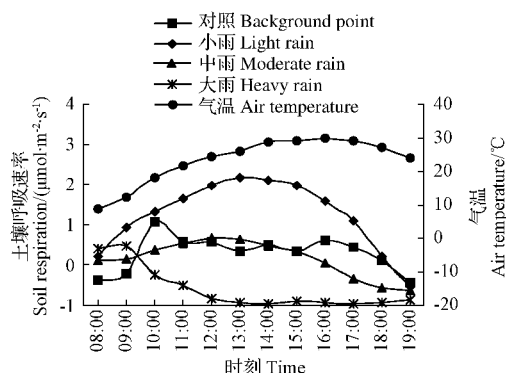


图 2 不同强度模拟降水过程中土壤呼吸速率与气温变化

Fig. 2 The changes of different precipitation process of soil respiration rate and air temperature

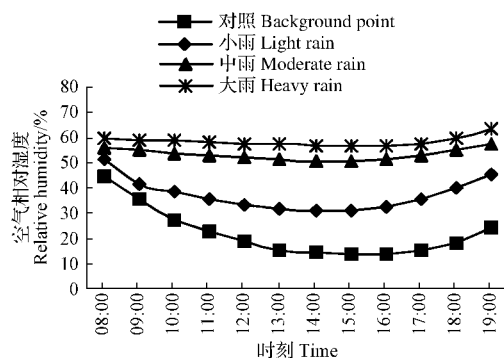


图 3 不同强度模拟降水过程中空气相对湿度变化

Fig. 3 The air relative humidity changes of different precipitation process

2.4 降水后土壤呼吸速率变化

模拟降水之后,各降水处理后的土壤呼吸速率均与气温的昼夜变化趋势同步,在日间段(08:00—20:00)以释放为主,而在夜间段(21:00—07:00)均以吸收为主,可以看出温度是影响各降水处理后土壤呼吸速率变化的主要因子,土壤水分在此基础上起到促进作用。大雨处理的土壤呼吸速率最低,是因为土壤湿度仍处于较高的状态;小雨和中雨处理在降水后,夜间土壤呼吸速率低于对照点,日间则高于对照点。小雨处理的土壤呼吸速率在第 1 个日间段的 17:00 后(降水后 22 h)与对照点的变化曲线开始重合(图 4),二者空气相对湿度也趋于相同(图 5),表明小雨处理的土壤水分蒸发后,土壤湿度与对照点逐渐一致;中雨处理后的土壤呼吸变化曲线则在第 2 个日间段的 08:00 后(降水后 37 h),逐渐与对照点趋于重合(图 4),二者在空气湿度上的变化趋势也与之同步(图 5)。而模拟大雨条件下的土壤呼吸速率在降水后 60 h 时间段内均低于对照点的土壤呼吸速率。

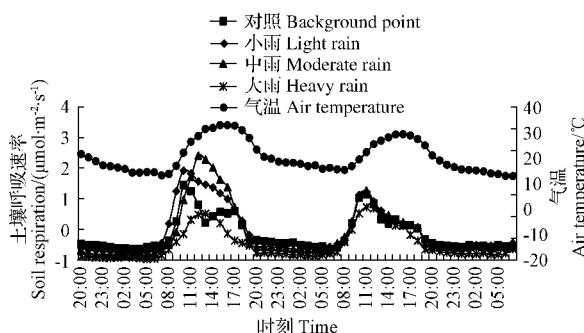


图 4 降水处理后土壤呼吸速率与气温变化

Fig. 4 The soil respiration rate and air temperature changes after different precipitation process

将模拟降水后的数据按先后顺序分时段(日间段、夜间段)进行处理,取各时段的平均土壤呼吸速率值。由图 6 可知,各降水处理的土壤呼吸速率与对照点的呼

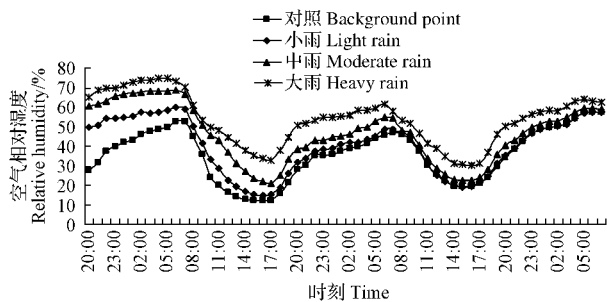


图5 降水处理后空气相对湿度变化

Fig. 5 The air relative humidity changes after different precipitation process

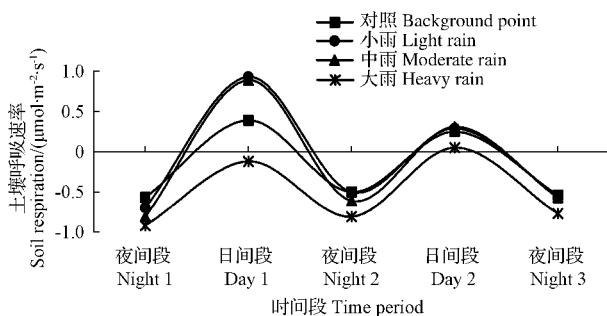


图6 不同强度降水处理后的各时段平均呼吸速率

Fig. 6 The average respiratory rate in each period after different intensity precipitation process

吸速率变化趋势相同,夜间段平均值均为负值,且降水量越大,夜间的土壤呼吸值越低,吸收的 CO_2 量就越多,这也符合 CO_2 在水中的溶解度随着温度的降低而增加的变化规律。大雨处理的平均值在各时段均小于对照点,可见其土壤湿度仍较大,有利于吸收 CO_2 。而小雨、中雨处理的平均土壤呼吸速率除在第1日间段明显大于对照的土壤呼吸速率外,在其它时段与对照点差别不大。

与对照的平均土壤呼吸速率($-0.17 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)相比,小雨、中雨、大雨处理的平均呼吸值分别为 -0.07 、 -0.12 、 $-0.49 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,前二者降雨处理比对照点分别增大了58.82%和29.41%,第三者则比对照点减少188.24%。因为随着时间的增加,小雨、中雨处理的土壤湿度降低,逐渐趋同于对照点,夜间的吸收量减少,土壤通透性相较于大雨处理的土壤通透性好,夜间吸收 CO_2 所生成的重碳酸盐在日间高温下又分解释放、排出(公式为 $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 \downarrow + \text{CO}_2 \uparrow + \text{H}_2\text{O}$),使呼吸速率增加。而大雨处理的 CO_2 释放量较少,可能是由于积水过程长,下渗深度较大,易溶的氯化物盐、硫酸盐等溶解充分,溶解产生的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等与溶解的 CO_2 以碳酸盐形式在土体内部再结晶,使得大雨处理呼吸速率明显低于对照点,在表土水分蒸发过程中没有表现出等量释放的现象。

3 讨论与结论

土壤呼吸是土壤与大气交换 CO_2 的过程,通常指未受扰动土壤中产生的所有代谢作用,它包括3个生物学过程:土壤有机质的分解和土壤微生物的呼吸;植物根系呼吸;土壤动物呼吸以及一个非生物学过程:含碳矿物质的化学氧化作用^[12]。该研究所选样地为奇台绿洲的强碱土,由于碱性强,结构紧密,无植物生长,有机质含量极低,干旱环境使得极端环境微生物如嗜碱微生物的量也不会太多,因此,试验区土壤与大气交换 CO_2 的过程主要以无机碳的物理化学过程为主。碱化土壤中富含大量的次生碳酸盐,而 CO_2 则是碳酸盐的淋溶与重结晶过程中不可缺少的重要组成部分。在半干旱半湿润气候条件下,碳酸盐通常是上部土层淋溶,下部土层淀积,并且淀积过程发生在干旱半干旱地区的整个历史时期^[13]。因此,可以认为碱化土壤以水为作用介质,通过无机化学反应与大气之间存在着强烈的 CO_2 交换过程。

研究区气候干旱,脱离了地下水影响的碱化荒地,其土壤水分变化主要受降水影响。降雨对于土壤呼吸的作用较为复杂,有学者认为短期降雨量或者降雨强度增加可能会强烈地激发土壤呼吸,尤其是在较为干旱的生态系统或者干湿交替生态系统中的较干旱季节^[14]。而有的研究结论则认为降雨不会刺激土壤呼吸通量,恰恰相反,降雨后土壤温度变低,或者强降雨使得土壤的空隙被雨水填满,减少了 CO_2 排放的通路,使得土壤呼吸迅速减小^[15],可见,降雨对土壤呼吸的影响由于研究区域、研究方法、土壤状况等不同,学者们得出的研究结果差异较大甚至结论相反^[16]。

在该研究中,与对照点相比,小雨降水促进土壤呼吸,这与禹朴家等^[17]的研究结果相近。禹朴家等^[17]研究了沙丘不同部位土壤呼吸对人工降水的响应,在5 mm降水下,增雨处理增大了土壤呼吸速率的变化幅度,增雨处理后,沙丘坡底、坡中和坡顶的土壤呼吸速率变化幅度分别比非增雨处理样地增加了230%、58%和28%。大雨则使得强碱土表现出明显的 CO_2 吸收特征。张红星等^[18]研究了黄土高原小麦田土壤呼吸对强降雨的响应,也发现土壤水分充足时的强降雨,整体上抑制土壤呼吸,降雨结束后土壤呼吸水平比降雨前低,并且在降雨过程中有明显的呼吸低谷。DAVIDSON 等^[19]对巴西亚马逊河流域东部森林和草原的土壤呼吸研究表明,大的降水事件后,土壤呼吸会受到明显的抑制,且降水过程中的土壤呼吸具有下降趋势。

降水过程中,降水强度对土壤呼吸影响显著。降水之后,温度成为影响土壤呼吸速率变化的主要因子,土壤水分在此基础上起到促进作用。与对照点相比,小雨

降水处理整体上促进了土壤中 CO_2 的释放,在降水过程中,土壤呼吸速率比对照点增加了 320.69%,降水后的增长有所减少,为 58.82%。降水后 22 h,土壤呼吸速率恢复到对照点水平。中雨处理在降水过程中和降水后对土壤呼吸的作用不同。在降水过程中,土壤呼吸速率比对照点减少了 48.27%,但在降水后则整体增加了 29.41%。降水后 37 h,呼吸速率大致恢复到与对照点相同。大雨处理使得强碱土土壤呼吸速率迅速降低,降水处理过程中和降水后的土壤呼吸速率相较于对照点,分别减少 306.89%和 188.24%,在整个试验过程中,土壤呼吸速率多以负值为主, CO_2 吸收特征明显。

参考文献

- [1] SCHLESINGER W H, ANDREWS J A. Soil respiration and the global carbon cycle[J]. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 7-20.
- [2] 周广胜. 全球碳循环[M]. 北京: 气象出版社, 2003.
- [3] RAICH J W, SCHLESINGER W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus; Series B, Chemical and Physical Meteorology*, 1992, 44(2): 81-99.
- [4] WEST N E, STARK J M, JOHNSON D W, et al. Effects of climatic change on the edaphic features of arid and semiarid lands of western North America[J]. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, 1994, 8(4): 307-351.
- [5] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(2): 152-164.
- [6] 王英, 曹明奎, 陶波, 等. 全球气候变化背景下中国降水量空间格局的变化特征[J]. *地理研究*, 2006, 25(6): 1031-1040.
- [7] HUXMAN T E, SNYDER K A, TISSUE D T, et al. Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems[J]. *Oecologia*, 2004, 141(2): 254-268.
- [8] 刘涛, 张永贤, 许振柱, 等. 短期增温和增加降水对内蒙古荒漠草原土壤呼吸的影响[J]. *植物生态学报*, 2012, 36(10): 1043-1053.
- [9] 吴林, 苏延桂, 张元明. 模拟降水对古尔班通古特沙漠生物结皮表观土壤碳通量的影响[J]. *生态学报*, 2012, 32(13): 4103-4113.
- [10] 张丽华, 陈亚宁, 李卫红, 等. 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[J]. *生态学报*, 2009, 29(6): 2819-2826.
- [11] 张芳, 熊黑钢, 安放舟, 等. 基于盐(碱)生植被盖度的土壤碱化分级[J]. *土壤学报*, 2012, 49(4): 665-672.
- [12] SINGH J S, GUPTA S R. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystems[J]. *The Botanical Review*, 1997, 43: 449-528.
- [13] 李法虎. 土壤物理化学[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.
- [14] SPONSELLER R A. Precipitation pulses and soil CO_2 flux in a Sonoran Desert ecosystem[J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(2): 426-436.
- [15] LIU X, WAN S, SU B, et al. Responses of soil CO_2 efflux to water manipulation in a tall grass prairie ecosystem[J]. *Plant and Soil*, 2002, 240(2): 213-223.
- [16] 彭琴, 齐玉春, 董云社, 等. 干旱半干旱地区草地碳循环关键过程对降雨变化的响应[J]. *地理科学进展*, 2012, 31(11): 1510-1518.
- [17] 禹朴家, 徐海量, 王炜, 等. 沙丘不同部位土壤呼吸对人工降水的响应[J]. *中国沙漠*, 2012, 32(2): 438-441.
- [18] 张红星, 王效科, 冯宗炜, 等. 黄土高原小麦田土壤呼吸对强降雨的响应[J]. *生态学报*, 2008, 28(12): 6189-6196.
- [19] DAVIDSON E A, SAVAGE L K, VERCHOT L V, et al. Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113: 21-37.

Response of Strong Alkaline Soil Respiration to Different Rainfall Intensity

ZHANG Lu¹, ZHANG Fang^{1,2}, HU Shi¹, ZHANG Nan¹, DUAN Pengcheng¹

(1. College of Resources and Environmental Science/Key Laboratory of Oasis Ecology of Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046; 2. Ecology Post-doctoral Research Station, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046)

Abstract: The strong alkali soil in Qitai county in the south edge of Junggar basin was selected as the study area, and the effects of different simulated rainfall intensity (light rain, moderate rain, heavy rain) on strong alkaline soil respiration rate were measured and analyzed. The results showed that the light rain process added much more release of soil respiration rate, in the process of rainfall, the soil respiration rate increased 320.69% than background value, and after rainfall the soil respiration rate was still more than background value of 58.82%; in the process of moderate rain, the soil respiration rate reduced as much as 48.27% than background value, but it increased 29.41% after rainfall; the effect of heavy rain was characterized by a rapid soil respiration rate decline with 306.89% and 188.24% below background value respectively in rainfall process and after. The heavy rain contributed strong effect of carbon dioxide absorption.

Keywords: strong alkaline soil; soil respiration; simulated rain