

## 避灾露营对城市公共绿地土壤呼吸的短期影响

庞学勇<sup>1,2</sup>, 丁建林<sup>1</sup>, 吴福忠<sup>1,2</sup>, 王红梅<sup>1,2</sup>, 吴 宁<sup>1</sup>, 包维楷<sup>1,\*</sup>

(1 中国科学院成都生物研究所 成都 610041; 2 中国科学院研究生院 北京 100039)

**摘要:**2008 年 5 月 12 日四川汶川发生里氏 8.0 级大地震后,城市居民大规模在公共绿地上露宿避灾,而这些强人为干扰活动对绿地植被和土壤影响的科学研究却十分少。选择不同时间露营点和出入帐篷必经的践踏区域,测量土壤 CO<sub>2</sub> 通量的变化及相关环境因子(空气温湿度、土壤容重、孔隙度和微生物生物量等)。结果发现土壤 CO<sub>2</sub> 通量明显地受露营和人为践踏的影响,露营和人为践踏区土壤 CO<sub>2</sub> 通量明显地低于对照区。随着露营的增加,土壤 CO<sub>2</sub> 通量呈现先降低(大约 10d 后)后略有增加(大约 20d 后),后期又下降的趋势(大约 25d 后)。在露营区,土壤紧实和遮荫是土壤 CO<sub>2</sub> 通量减少的两个主要过程,在早期,严重遮荫后引起根系呼吸下降是主要过程,而在后期,随着人人睡帐篷次数的增加,土壤紧实是控制土壤 CO<sub>2</sub> 通量的主要过程;而在践踏区,践踏引起土壤紧实是土壤呼吸下降的主要原因。因此地震露营避灾后退化草坪恢复的一个关键措施是松土改善土壤的物理状况。

**关键词:**5.12 汶川大地震;土壤呼吸;土壤 CO<sub>2</sub> 通量;公共绿地;践踏;露营

**文章编号:**1000-0933(2008)12-5884-08 **中图分类号:**Q945, Q948 **文献标识码:**A

## The short-term effect of field camping on soil CO<sub>2</sub> efflux in urban grassland

PANG Xue-Yong<sup>1,2</sup>, DING Jian-Lin<sup>1</sup>, WU Fu-Zhong<sup>1,2</sup>, WANG Hong-Mei<sup>1,2</sup>, WU Ning<sup>1</sup>, BAO Wei-Kai<sup>1,\*</sup>

1 Chengdu Institute of Biology, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China

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

*Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(12): 5884 ~ 5891.

**Abstract:** On 12 May, 2008, a great sized earthquake of magnitude Ms = 8.0 occurred in Wenchuan County, Sichuan Province, southwest China. Many residents established a great of tents on all urban public and residential greenbelt for searching safe sites. However, there are few reports about the effect of these activities on soil and vegetation. We determined soil CO<sub>2</sub> efflux and relative environmental factors (i. e., bulk density, porosity, air temperature and humidity, and microbial biomass) in the field camping sites of different established time and trample area. Soil CO<sub>2</sub> efflux was significantly affected by field camping and trample. Soil CO<sub>2</sub> efflux was significantly lower in the different field camping sites and trample area than in CK treatment. Soil CO<sub>2</sub> efflux decreased firstly (after about 10 days), then increased little (after about 20 days) and again decreased (after 25 days) following field camping time increasing. Soil compaction and shade was two main processes controlling soil CO<sub>2</sub> efflux in field camping sites. In early periods, shade that caused root respiration decline was main process. With the increase of extent of compaction, soil physical properties were main factors.

**基金项目:**中国科学院西部行动计划资助项目(KZCX2-XB2-02);国家自然科学基金资助项目(No. 40701181);国家“十一五”科技支撑计划资助项目(2006BAC01A15);领域前沿创新资助项目(No. CIB-2007-LYQY-02);茂县生态站资助项目

**收稿日期:**2008-09-18; **修订日期:**2008-12-03

**作者简介:**庞学勇(1974~),男,四川巴中人,博士生,主要从事土壤生态与恢复生态学研究. E-mail: pangxy@cib.ac.cn

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: baowk@cib.ac.cn

**Foundation item:** The project was financially supported by the CAS action-plan for West Development (No. KZCX2-XB2-02), national natural science foundation of china(No. 40701181), key projects in the national science & technology pillar program in the eleventh five-year plan(2006BAC01A15), the talent plan of the CAS (No. CIB-2007-LYQY-02) and Maoxian ecological station, Chengdu Institute of Biology, CAS.

**Received date:**2008-09-18; **Accepted date:**2008-12-03

**Biography:** PANG Xue-Yong, Ph. D. candidate, mainly engaged in soil ecology and restoration ecology. E-mail: pangxy@cib.ac.cn

In trample area, soil compaction was main process that affected soil CO<sub>2</sub> efflux. So, scarification that improved soil physical properties was the first work to restore degraded urban grassland after 5.12 Wenchuan great earthquake.

**Key Words:** 5.12 Wenchuan Earthquake; soil respiration; soil CO<sub>2</sub> efflux; urban grassland; trample; field camping

2008年5月12日,四川汶川县发生了里氏8.0级大地震波及超过10个省(和市),造成了巨大的人员和财产损失<sup>[1]</sup>。成都市区距离震中较近,许多市民为了避灾,在城市开阔地带搭建了许多简易帐篷,城市的公共绿地、小区绿地,如公园、主干道绿化带、小区花园等成为他们首选地段。自从主震发生后的相继几天内,连续发生了几次大的余震,再加上地震预报部门对余震的不确定性,在城市公共绿地上搭建帐篷的人数越来越多,据成都市园林部门初步统计,仅在成都市人民公园内,就有上万顶帐篷。在短期内如此大量的人拥进城市绿地,势必会对城市绿地造成严重影响,但这些强人为干扰活动对绿地植被和土壤影响的科学研究却十分少。

关于天然草坪下放牧的践踏活动对土壤及植物的影响有不少研究,但由于国内许多草坪是禁止人进入,所以在人工草坪践踏等高度人为干扰活动下土壤及植物的反应研究却十分少。对于在人工草坪上野外露宿避灾活动对土壤影响的理解可能通过下面3个相似的活动来获得少量认识,如木材收获过程中的机械压迫、牲畜放牧践踏和各种户外休闲娱乐活动踩踏等<sup>[2]</sup>。这些活动的共同特点是增加了土壤容重<sup>[3]</sup>、降低土壤大孔隙和渗透性<sup>[4]</sup>、增加了土壤侵蚀<sup>[3]</sup>,进而影响土壤生物学特性<sup>[5]</sup>。而土壤结构的变化将导致土壤根系的穿插能力和呼吸下降<sup>[6,7]</sup>,菌根生长受到抑制<sup>[8]</sup>,从而降低幼苗的生长与建立,以及导致物种向更耐践踏和耐坚实种方向发展<sup>[6,7]</sup>。而野外露宿避灾活动对土壤和植被的影响与上述活动相似,但强度更大,潜在影响可能更为严重。5.12汶川大地震后许多野外露宿避灾点可能持续1~2个月,或可能更长时间,对城市公共绿地和小区绿地的无限制的利用可能增加土壤紧实度和容重,加速土壤和植被的机械损坏和去除,导致这些区域植被的破坏。

土壤CO<sub>2</sub>通量是自养根系呼吸(包括根围附近自养微生物种群)与异养生物呼吸贡献的总和。各土壤呼吸分量对总土壤呼吸的相对贡献的认识有助于更好地理解陆地生态系统和生态系统与大气之间碳循环<sup>[9,10]</sup>。在几乎所有的生态系统中,土壤微生物是土壤呼吸和养分循环的主体,通常认为是土壤分解过程的驱动力<sup>[11]</sup>。微生物生物量角色及他们与土体的相互作用的认识决定了土壤呼吸通量的速率,对提高科学地管理生态系统和改善土壤有机质转换模型有至关重要的作用。

干扰影响也可能从土壤特性来评价,来自于土壤的CO<sub>2</sub>通量时常指土壤呼吸,指示了土壤肥力状况。土壤呼吸是根、自由活体和共生异养生物(如真菌、微生物、大型土壤动物),以及植物根吸收等代谢过程的净效果<sup>[7,12,13]</sup>。碳以CO<sub>2</sub>形式流动来源于微生物、真菌和根呼吸等几个源,微生物和根呼吸依赖于土壤质量,呈现了根生物量<sup>[14]</sup>与土壤温湿度<sup>[15,16]</sup>的作用。土壤特性,如温度、水分、养分的有效性以及它们的相互作用均对土壤呼吸有直接或间接的影响<sup>[13,17]</sup>。

尽管有大量的关于土壤CO<sub>2</sub>通量的比较研究,然而很少的研究涉及在强烈的人为践踏对城市公共绿地和小区绿地土壤CO<sub>2</sub>通量的影响。城市的公共绿地在提供休闲娱乐场所、净化环境等方面扮演着重要作用,但是,在强烈人为践踏的露宿避灾点,这些功能会发生怎样的变化并不清楚。本研究试图探讨不同干扰水平露宿避灾点土壤呼吸速率有何变化?在强烈人为践踏下有哪些因子可能影响土壤呼吸通量?为解决此问题,利用汶川大地震后在成都市公共绿地上不同时间搭建的帐篷点,研究土壤CO<sub>2</sub>通量随着露营时间的增加的变化趋势,同时监测其环境因素的变化。本研究的主要目的是:(1)阐明不同时间搭建的帐篷与践踏对土壤呼吸的影响;(2)分析土壤呼吸与环境因子的关系,为严重践踏干扰草地土壤肥力恢复策略制定提供一定参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区域概况

研究地点位于成都市中心城区南面的中国科学院成都生物研究所小区绿地内,属亚热带湿润季风气候,

终年湿润,降水量丰富。年平均气温为 15.8℃,最冷月平均气温为 5.2℃,最热月平均气温为 25.2℃,极端最低温 -3.3℃,极端最高温 39.9℃,年平均相对湿度 83%,从 4 月中旬至 10 月上旬大于 10℃ 的年平均活动积温为 4700~5300℃,全年无霜期大于 337d,冬季最冷月((1 月份)平均气温为 5℃ 左右。冬春雨少,夏秋多雨,雨量充沛,年平均降水量为 1124.6mm。晴天少,日照率在 24%~32% 之间,年平均日照时数为 1042~1412h。研究对象为无芒雀麦(*Bromus inermis* Leyss)单优种的草坪,间杂有多年生黑麦草(*Lolium perenne* L.),单穗水蜈蚣(*Kyllinga cororata* (L.) Druce),和积雪草(*Centella asiatica* (L.) Urban)等。无芒雀麦是城市园林绿地广泛应用的物种,具有较强的无性繁殖能力,但不耐践踏和遮荫。草坪土壤为沙壤土,pH 值在 6.3~7.0 之间,中性偏酸。

## 1.2 试验设计

试验设践踏、露营与对照 3 个处理,其中露营设置为不同露营时间的 4 个亚处理(露营 13、20、24d 和 28d),其主要采用空间代替时间的方法,选择其它立地条件相对一致的,只是露营时间上存在差异的不同地点,同时,在选择帐篷点时,记录每天晚上入睡的人数,总共入睡的天数等参数,以此判别践踏的程度,尽量选择每天进入帐篷次数和晚上入睡人数基本一致的帐篷作为研究点,各处理设 2~3 个重复。践踏地点主要包括进出帐篷的 1 m<sup>2</sup> 范围内的区域或人出入帐篷必经的区域,常有人为践踏;不同露营时间主要指大地震后相隔不同时间露营的固定点,除了晚上有人睡的压实,还有严重帐篷遮荫现象;对照主要是少有人为践踏现象,其它环境因素与践踏和露营处理较为一致。整个试验区域面积约为 400 m<sup>2</sup>,各处理随机排列。

## 1.3 土壤 CO<sub>2</sub> 通量与环境因子的测定

土壤 CO<sub>2</sub> 通量的测定时间为 2008 年 6 月 10~11 号。用 LI-COR 收集器收集土壤排放的 CO<sub>2</sub>,在 LI-6400 红外线分析仪上测定排放的 CO<sub>2</sub>。4 个收集环分别随机置于每个处理的样方内,连续测定土壤 CO<sub>2</sub> 的排放(每隔 2h 测定 1 次,持续时间为 2d),测定时间选定为晴天。为了最小化凋落物和地上植被的影响,在测量之前,去除凋落物和地上植物。PVC 环内径为 10.5cm,高 5cm,在测定的前一天插入土壤内 3.5cm,LI-6400 每次计数 3 次,这些值的平均值为这期间的土壤 CO<sub>2</sub> 排放。

环境因子的测定与土壤 CO<sub>2</sub> 通量测定同步进行,主要测定离地面 10cm 和地面处空气温度、湿度以及 5cm 处土壤温度。10cm 处和地面温度和湿度用 i-button (DS1923-F5<sup>#</sup>, USA) 温湿度计测定(温度精确度 ±0.5℃、湿度精确度 ±0.6% RH),设定监测频率为 30min 记录 1 次数据,土壤 5cm 处温度用 LI-6400 自带的土壤温度传感器测定,测定频率与土壤 CO<sub>2</sub> 测定同步,每 2h 测定 1 次。

## 1.4 土壤采样与分析

在土壤 CO<sub>2</sub> 通量及其环境因子测定开始前,主要取 0~10cm 的表层土壤样品进行分析,在每一处理样方的正中央处采集土壤化学和生物学样品约 500 克,主要分析土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup><sup>[18]</sup>、NO<sub>3</sub><sup>-</sup><sup>[19,20]</sup> 和微生物生物量 C、N<sup>[21]</sup>;在附近处取环刀样 2 个,分别测定土壤容重、孔隙度和持水性能<sup>[18]</sup>。

## 1.5 数据分析

所有的数据分析均用 SPSS11.5 分析软件包进行处理。不同的帐篷搭建时间、践踏及对照间土壤呼吸、容重、孔隙度和微生物生物量 C、N 的显著分析用单因素方差分析,其差异性用 Tukey's 检验进行( $\alpha=0.05$ ),土壤呼吸与环境因子的相关分析用单变量相关分析进行。

## 2 结果

### 2.1 土壤 CO<sub>2</sub> 通量

露营、践踏明显地改变了土壤 CO<sub>2</sub> 通量,除露营 20d 在 8:30~13:30 分与对照没有明显差异外,在其它时段,露营后明显降低了土壤 CO<sub>2</sub> 通量,其中,践踏区和搭建 24d 后土壤 CO<sub>2</sub> 通量影响最为明显,降低最大(图 1,图 2)。露营、践踏及对照处理中土壤 CO<sub>2</sub> 通量均未表现出随着日变化的特点(图 1),即在白天,随着温度的升高,土壤 CO<sub>2</sub> 通量增加,夜晚随着温度的降低,土壤 CO<sub>2</sub> 通量减少,可能主要与在此期间土壤温度昼夜相差并不大有关,在土壤 CO<sub>2</sub> 监测期间,土壤温度昼夜相差仅 4.06,变幅为 23.59~27.65℃,是土壤微生物活动的

最适温度。

随着露营时间的增加,在不同的时期,土壤  $\text{CO}_2$  通量也表现出不同的变化。在露营初期(10d 左右),土壤  $\text{CO}_2$  通量明显地降低;在露营中期(20d 左右),略有增加后,到后期(约 25d 左右),土壤  $\text{CO}_2$  通量降到最低点(图 2)。

## 2.2 温、湿度日变化

在各处理之间,10 cm 处空气温湿度相差不大(图 3A,C),而 0 cm 处空气温湿度相差较为明显(图 3B,D),特别是在 12:00 至 15:00 这段时间,温度最大的为露营 20d 和 28d(图 3B),地上植被基本枯死的,其次为露营 13d 处理,最小的为对照,相对湿度则呈现相反的趋势(图 3D)。地面处温度和湿度受多种因素的影响,本试验中,在太阳辐射相同的情况下,其差异主要取决于下垫面的情况,露营 20d 以上,地面植被基本枯死,覆盖率下降到最低值,表现为温度明显高于对照,度则相反。土壤  $\text{CO}_2$  通量监测期间 0 cm 和 10 cm 处空气温度和湿度的日变化,在 0 cm 和 10 cm 处空气温度均在 13:30 达到最大值,而空气湿度则在此时间达到最低值;在 6:00 左右,空气温度达到最低值,而此时的湿度则相对较大(图 3)。

## 2.3 土壤理化性质

由图 4A 可见,露营的中后期,明显地改变了土壤容重,并且随着帐棚的搭建时间的增加,土壤容重明显地增大,特别在后期(约 30d),土壤容重较对照增加了 7.8%,变化最大的时期为中前期,后期土壤容重的变化速率较小。与土壤容重变化相反,土壤总孔隙度随着帐棚的搭建时间的增加而减小,变化最为剧烈的也在中前期,后期变化速率较小(图 4B),主要与前期土壤较松,易受人为干扰影响有关。露营也明显地改变了土壤的毛管孔隙和通气孔隙(图 4C,D)。同时,在进出帐棚的区域,定义为践踏区,研究了其土壤的物理性质,从图 4 可以看出,践踏区土壤容重、总孔隙度、毛管孔隙和通气孔隙明显地受人为干扰有影响,土壤容重明显地增大,土壤总孔隙、毛管孔隙和通气孔隙明显地减少。

土壤  $\text{NO}_3^-$  在露营初期略有增加,在中后期明显地减少(表 1), $\text{NH}_4^+$  则在露营的各个时期均小于对照,土壤微生物生物量碳受露营的影响,明显地低于对照,而微生物生物量氮则与对照间没有明显地差异。践踏区的  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$  和微生物生物量碳均小于未受践踏的区域,微生物量生物量氮与对照没有明显地差异(表 1)。

## 3 讨论

### 3.1 避灾露营对土壤的一些短期影响

在对野外露宿避灾活动近 1 个月的监测表明,土壤呼吸、物理结构、 $\text{NO}_3^-$ -N、 $\text{NH}_4^+$ -N 和微生物生物量碳明显地受到野外露营和践踏的影响。野外露营和践踏区土壤  $\text{CO}_2$  通量明显地低于对照点,并随着露营时间的增加表现为初期(约 10d)减小,中期(约 20d)略有增加,后期(约 25d)又下降的趋势(图 2)。土壤物理结构受到明显影响主要为中前期,表现为土壤容重增大,总孔隙度降低,毛管孔隙和通气孔隙也明显地低于对照

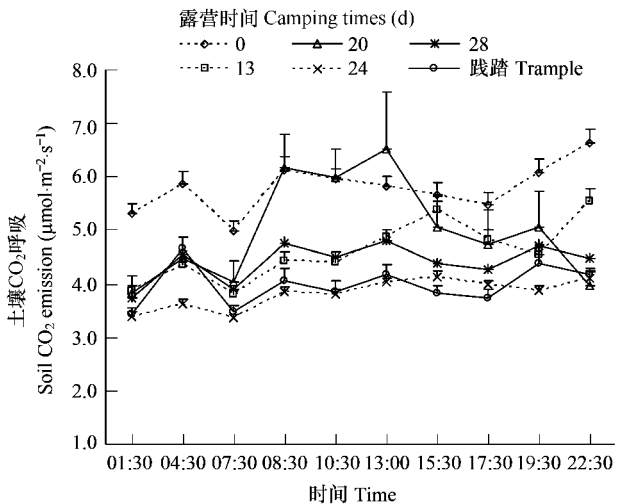


图 1 土壤呼吸通量随露营的日变化

Fig. 1 The daily change of soil  $\text{CO}_2$  efflux in degraded urban grassland with different field camping times

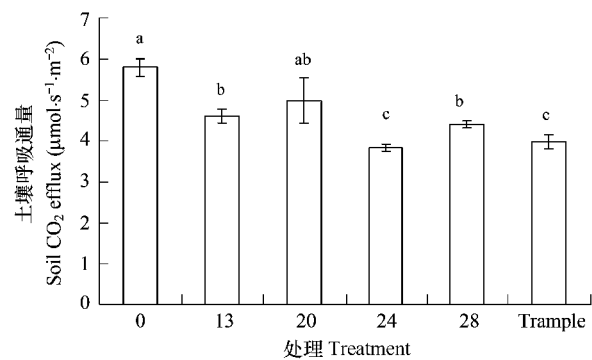


图 2 露营时间、践踏对土壤呼吸通量的影响

Fig. 2 The effect of field camping time and trample on soil  $\text{CO}_2$  efflux

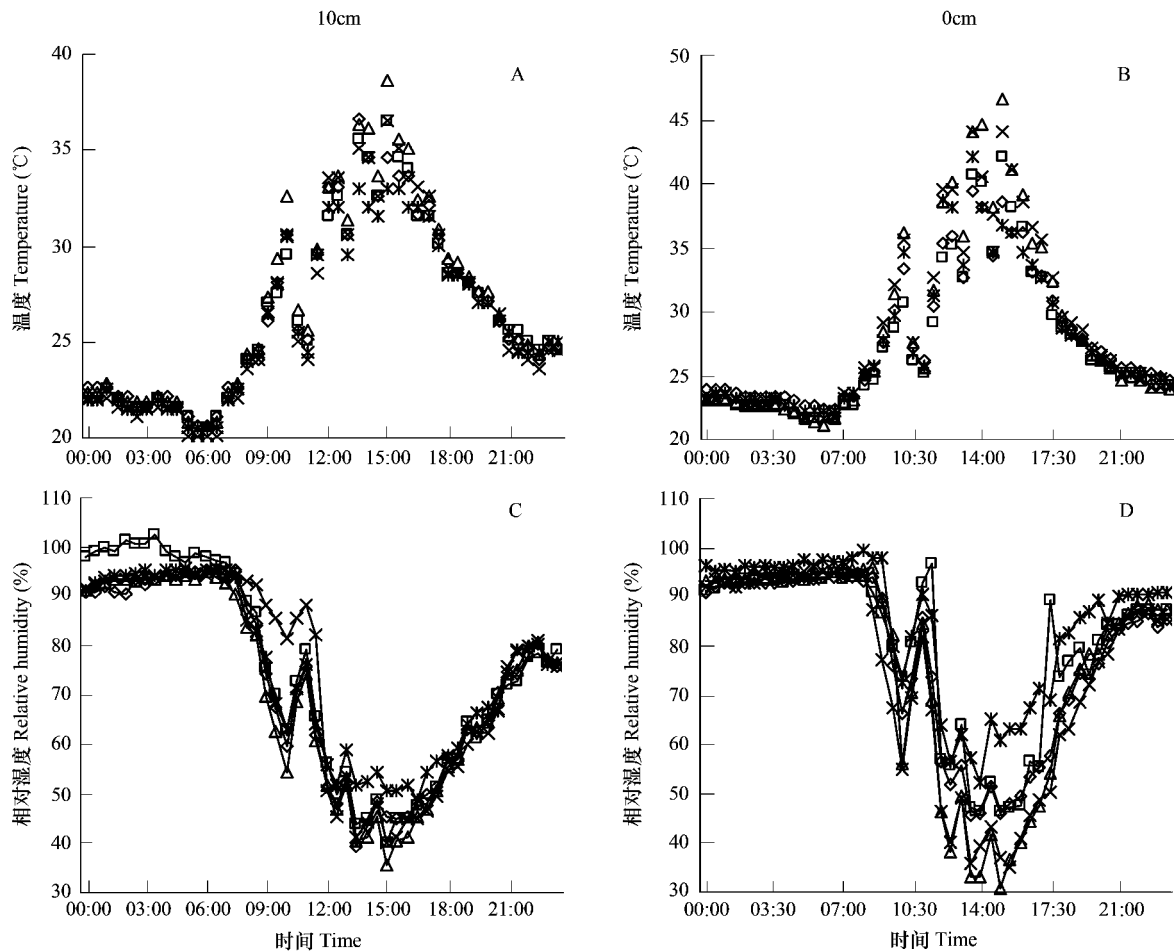


图3 露营时间对0cm和10cm处空气温度和相对湿度的影响

Fig. 3 The effect of of field camping time on air temperature and relative humidity

处理□, 13 d, ×, 20 d, ◇, 24 d, △, 28 d, +, CK

表1 露营时间和践踏对土壤  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$  和微生物生物量的影响Table 1 The effect of of field camping time and trample on soil  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$  and microbial biomass carbon and nitrogen (mean  $\pm$  DE)

Treatment	$\text{NO}_3^- \text{ N (mg/kg)}$	$\text{NH}_4^+ \text{ N (mg/kg)}$	Mic N (mg/kg)	Mic C (mg/kg)
13 d	39.39 $\pm$ 5.84 a	3.46 $\pm$ 1.00 b	6.11 $\pm$ 1.21 a	1098.3 $\pm$ 172.9 b
20 d	33.99 $\pm$ 2.57 ab	6.01 $\pm$ 2.63 ab	5.95 $\pm$ 1.43 a	1197.7 $\pm$ 0.0 b
24 d	32.28 $\pm$ 3.42 ab	3.72 $\pm$ 1.03 c	7.52 $\pm$ 3.83 a	1048.0 $\pm$ 149.7 b
28 d	29.15 $\pm$ 1.58 b	4.83 $\pm$ 0.88 b	5.08 $\pm$ 1.05 a	898.3 $\pm$ 345.8 b
Trample	27.33 $\pm$ 0.95 b	4.20 $\pm$ 0.49 b	5.29 $\pm$ 0.46 a	1057.1 $\pm$ 174.6 b
CK	34.33 $\pm$ 2.33 a	8.36 $\pm$ 2.53 a	6.50 $\pm$ 1.01 a	1437.3 $\pm$ 146.7 a
ANOVA	$F=2.414, p=0.049$	$F=3.225, p=0.035$	$F=1.052, p=0.427$	$F=4.084, p=0.0128$

(图4)。露营和践踏区的  $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{NH}_4^+$  和微生物生物量碳均小于对照,微生物生物量氮与对照没有明显地差异(表1)。此结论仅仅是为期1月露营后,土壤呼吸其理化性质的短期的变化,在露营撤离后,土壤呼吸及其理化性质长期如何变化,需要多点定位长期监测与分析,才能得出更为准确的结论。本文的设计是利用了汶川大地震露营避灾而采用空间代替时间的方法,虽然在一定程度上能反应干扰践踏对土壤呼吸的影响,但要更真实反应干扰影响,可采用定点长期动态跟踪监测设计。

### 3.2 土壤 $\text{CO}_2$ 通量影响过程与机制

帐篷的搭建对草坪影响的主要过程为土壤的压实和严重遮荫<sup>[22]</sup>,在本研究中,土壤  $\text{CO}_2$  通量明显地受露

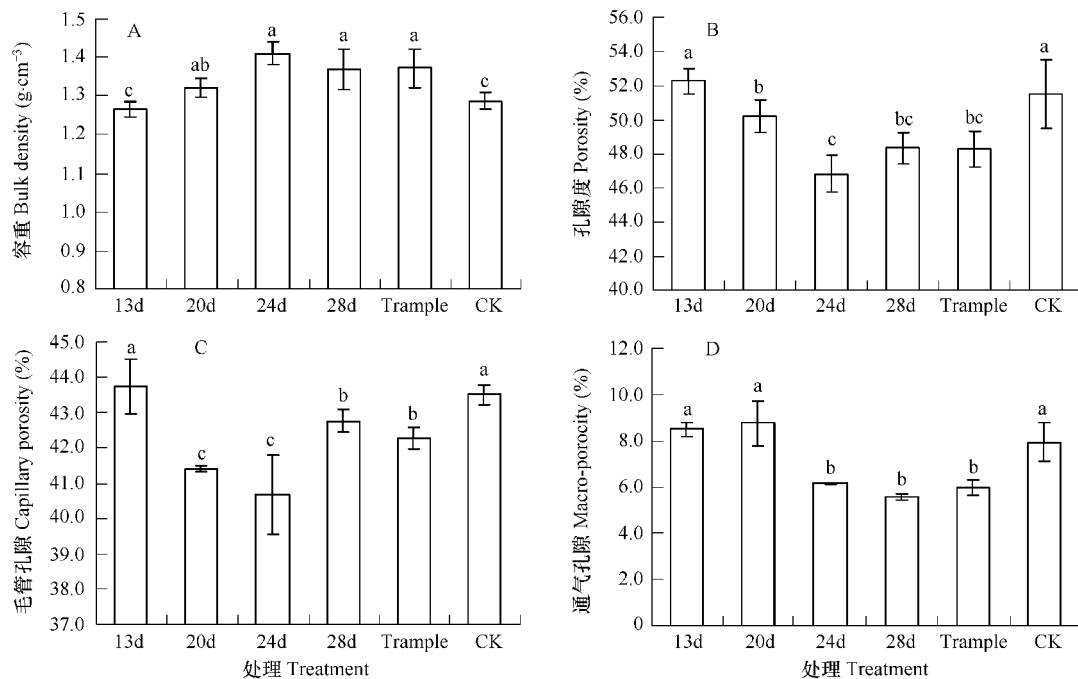


图4 露营时间和践踏对土壤容重(A)、总孔隙(B)、毛细孔隙(C)和大孔隙(D)的影响

Fig. 4 The effect of of field camping time and trample on soil bulk density(A), total porosity(B), capillary porosity(C) and macro-porosity(D)

营和人为践踏的影响(图1和图2)。在露营的初期,土壤 $\text{CO}_2$ 降低可能主要与严重遮荫后,植物的生理过程受影响有关<sup>[22]</sup>。地上植被的完全遮光后,光合作用停止,减少了光合产物从地上底物向根部的输入,根系生长停止,根系呼吸约占土壤呼吸的一半,但不同的土壤略有差异<sup>[23]</sup>,而根系呼吸也大约要消耗当天光合同化底物的一半<sup>[24]</sup>。因此,露营后土壤根系活力的减弱势必导致土壤 $\text{CO}_2$ 排放降低<sup>[25]</sup>,同时,根系分泌物的排泄减少也降低了土壤微生物的活性,从而影响其呼吸活动<sup>[13]</sup>;随着帐篷的搭建时间的增加,在露营中期(20d左右),土壤生物对暗呼吸的逐渐适应,增加了异氧呼吸<sup>[13]</sup>,同时加上部分根系死亡后增加了微生物的可利用的底物,分解增大,从而部分弥补了由于根系呼吸的损失;在后期(大于25d),随着死亡根系可利用底物的消耗殆尽,土壤呼吸降到最低点(图2)。

土壤产生的 $\text{CO}_2$ 通过土壤剖面到达土壤表面,其主要驱动力为土壤剖面 $\text{CO}_2$ 浓度梯度,而土壤孔隙状况明显地影响到土壤 $\text{CO}_2$ 扩散过程<sup>[13]</sup>。土壤的物理性质在露营后明显改变(图4),容重增大,孔隙度降低,增加了土壤 $\text{CO}_2$ 向外界排放难度,这从土壤 $\text{CO}_2$ 通量与土壤物理性质的相关性得到证实(图5a,b和c),土壤总孔隙、毛细孔隙和通气孔隙与土壤 $\text{CO}_2$ 通量呈明显地正相关,而总孔隙、通气孔隙与土壤 $\text{CO}_2$ 通量的相关系数远远大于毛细孔隙与其的相关系数,说明土壤 $\text{CO}_2$ 排放主要是通过通气孔隙来进行的,而践踏对土壤孔隙度的影响主要体现在通气孔隙的减少(图4D)。同时,过多的 $\text{CO}_2$ 在土壤中,也增加了土壤 $\text{CO}_2$ 分压,阻碍了微生物活动,可以从露营后和践踏区土壤微生物生物量碳和氮明显地低于对照区来证实(表1)。三羧酸循环是土壤 $\text{CO}_2$ 产生的主要途径,但它的先决条件是有氧条件下,一旦土壤供氧不足,土壤 $\text{CO}_2$ 通量将大大受影响<sup>[13]</sup>。

有机质分解和根呼吸是土壤呼吸的两个主要来源<sup>[13]</sup>,露营恶化了微环境条件,如在露营后期和严重践踏区,地上植被死亡后增加了土壤的裸露,增加了地面的温度(图3B和D),不利于根系生长和微生物的活动,土壤温度增加本身有利于土壤呼吸<sup>[13]</sup>,但过高的温度会影响到土壤微生物活性和根系活力,从而减少了土壤 $\text{CO}_2$ 排放(图5d)。同时微环境的恶化和土壤物理性质的改变,也会影响到土壤化学和生物学特性(表1),而这些化学和生物学性质与土壤 $\text{CO}_2$ 产生过程明显地相关,如 $\text{NH}_4\text{-N}$ 与土壤 $\text{CO}_2$ 通量呈正相关,土壤微生物生

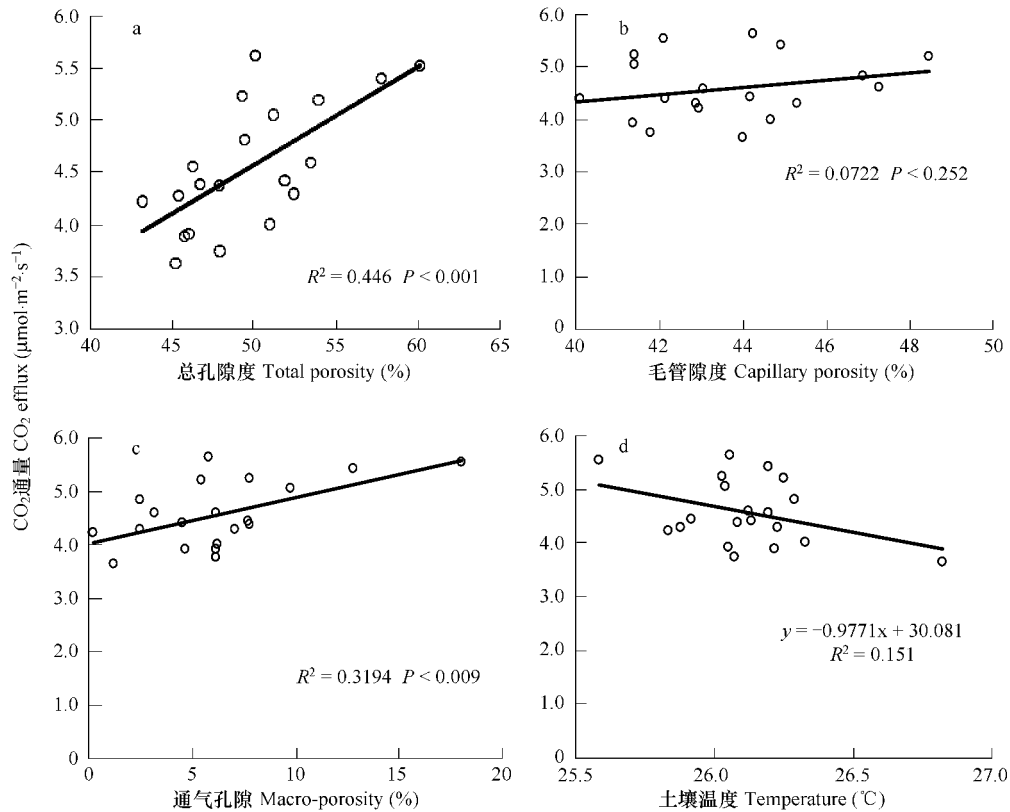


图5 土壤 CO<sub>2</sub> 通量与环境因子的相关性分析

Fig. 5 The relationship of soil CO<sub>2</sub> efflux and environmental factors

物量与微生物活性呈明显地相关关系,而土壤微生物活动是土壤呼吸的重要贡献者<sup>[26]</sup>。

土壤呼吸水平高低反应土壤肥力状况,在本试验中,土壤 CO<sub>2</sub> 通量明显地受露营和人为践踏的影响,土壤紧实和遮荫是露营后土壤 CO<sub>2</sub> 通量减少的主要影响过程,随着帐棚的搭建时间的增加,土壤 CO<sub>2</sub> 通量总体趋势为初期增加,后期略有增加,遮荫是露营区土壤 CO<sub>2</sub> 通量初期减少的主要影响因素,而后期随着人入睡次数的增加和压实作用的累加,土壤物理作用起主要作用。在践踏区,土壤 CO<sub>2</sub> 通量的主要过程为人为踩踏影响土壤物理性质。所以要恢复严重人为踩踏区和露营区草坪,迅速松土改善土壤通气状况是首要策略。

#### References:

- [1] Bao W K, Pang X Y. Ecological degradation in the Wenchuan earthquake seriously affected region in Sichuan, China. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2008, 14 (4): 441—444.
- [2] Trumbull V L, Dubois P C, Brozka R J, Guyette R. Military camping impacts on vegetation and soils of the Ozark Plateau. *Journal of Environmental Management*, 1994, 40: 329—339.
- [3] Lockaby B G, Vidrine C G. Effect of logging equipment traffic on soil density and growth and survival of young loblolly pine. *Southern Journal Applied Forestry*, 1984, 8: 109—112.
- [4] Malmer A, Grip H. Soil displacement and loss of infiltrability caused by mechanized and manual extraction of tropical rainforest in Sabah, Malaysia. *Forest Ecology and Management*, 1990, 38, 1—12.
- [5] Tan X, Chang S X, Kabzems R. Soil compaction and forest floor removal reduced microbial biomass and enzyme activities in a boreal aspen forest soil. *Biology & Fertility of Soils*, 2008, 44: 471—479.
- [6] James T D W, Smith D W, Mackintosh E E, Hoffman M K, Monti P. Effects of camping recreation on soil, Jack pine, and understory vegetation in a northwestern Ontario park. *Forest Science*, 1977, 25: 333—349.
- [7] Ponder F Jr. Effect of soil compaction and biomass removal on soil CO<sub>2</sub> efflux in a missouri forest. *Communications in Soil Science and Plant*

Analysis, 2005, 36: 9, 1301 — 1311.

- [ 8 ] Skinner M F, Bowen G D. The penetration of soil by mycelial strands of ectomycorrhizal fungi. *Soil Biology & Biochemistry*, 1974, 6: 57 — 61.
- [ 9 ] Luo Y Q, Jackson R B, Field R B, Mooney H A. Elevated CO<sub>2</sub> increases below-ground respiration in California grassland. *Oecologia*, 1996, 108, 130 — 137.
- [ 10 ] Edward N T. Below-ground respiration responses of sugar maple and red maple samplings to atmospheric CO<sub>2</sub> enrichment and elevated air temperature. *Plant and Soil*, 1998, 206, 85 — 97.
- [ 11 ] Smith J L, Paul E A, The significance of soil microbial biomass estimation. In: Lefroy R D B, Blair G J, Graswell E T eds. *Soil Organic Matter Management for Sustainable Agriculture*. Australian Center for International Agricultural Research, Canberra. 1995. 357 — 369.
- [ 12 ] Singh J S, Gupta S R. Plant Decomposition and Soil Respiration in Terrestrial Ecosystems. *Botany Reviews*, 1977, 43: 449 — 528.
- [ 13 ] Luo Y, Zhou X. *Soil respiration and the environment*. NY: Academic Press, 2006.
- [ 14 ] Behera N, Joshi S K, Pati D P. Root Contribution to Total Soil Metabolism in a Tropical Forest Soil from Orissa, India. *Forest Ecology and Management*, 1990, 36: 125 — 134.
- [ 15 ] Hanson P J, Wullschlegel S D, Bohlman S A, Todd D E. Seasonal and Topographic Patterns of Forest Floor CO<sub>2</sub> Efflux from an Upland Oak Forest. *Tree Physiology*, 1993, 13: 1 — 15.
- [ 16 ] Peterjohn W T, Melillo J M, Steudler P A, Newkirk K M, Bowles F P, Aber J D. Responses of Trace Gas Fluxes and N Availability to Experimentally Elevated Soil Temperatures. *Ecological Applications*, 1994, 4: 617 — 625.
- [ 17 ] Schlesinger W H. Carbon Balance in Terrestrial Detritus. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1977, 8: 51 — 81.
- [ 18 ] Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, eds. *Soil Physical and Chemical Analysis*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1978.
- [ 19 ] Norman R J, Edberg J C, Stucki J W. Determination of nitrate in soil extract by dual wavelength ultraviolet spectrophotometry. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1985, 49: 1182 — 1185.
- [ 20 ] Song G, Sun B, Jiao J Y. Comparison between ultraviolet spectrophotometry and other methods in determination of soil nitrate-N. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44 (12): 288 — 293
- [ 21 ] Wu J S, Lin Q M, Huang Q Y, Xiao H A. *Soil Microbial Biomass-Methods and Application*. Beijing: China Meteorological Press, 2006.
- [ 22 ] Jim C Y. Camping impacts on vegetation and soil in a Hong Kong country park. *Applied Geography*, 1987, 7, 317 — 332
- [ 23 ] Hanson P J, Edwards N T, Garten C T, Andrews J A. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: A review of methods and observations. *Biogeochemistry*, 2000, 48, 115 — 146.
- [ 24 ] Lambers H, Scheurwater I, Atkin O K. Respiratory patterns in roots in relation to their functioning. In: Waisel Y, Eshel A, Kafkafi U eds. *Plant roots: The hidden half*. Marcel Dekker, New York, 1996: 323 — 362,
- [ 25 ] Striegl R G, Wickland K P. Effects of a clear-cut harvest on soil respiration in a jack pine-lichen woodland. *Can. J. Forest Res.*, 1998, 28, 534 — 539.
- [ 26 ] Li Y, Xu M, Zou X, Xia Y. Soil CO<sub>2</sub> efflux and fungal and bacterial biomass in a plantation and a secondary forest in wet tropics in Puerto Rico. *Plant and Soil*, 2005, 268: 151 — 160.

#### 参考文献:

- [ 1 ] 包维楷, 庞学勇. 四川汶川大地震重灾区灾后生态退化及其基本特点. *应用与环境生物学报*, 2008, 14 (4): 441 ~ 444.
- [ 18 ] 中国科学院南京土壤研究所. *土壤理化分析*. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- [ 20 ] 宋歌, 孙波, 教剑英. 测定土壤硝态氮的紫外分光光度法与其他方法的比较. *土壤学报*, 2007, 44 (12): 288 ~ 293.
- [ 21 ] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 肖和艾. *土壤微生物生物量测定方法及其应用*. 北京: 中国气象出版社, 2006.