

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第17期 Vol.32 No.17 **2012**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 17 期

2012 年 9 月 (半月刊)

目 次

基于生物生态因子分析的长序榆保护策略.....	高建国,章 艺,吴玉环,等 (5287)
闽江口芦苇沼泽湿地土壤产甲烷菌群落结构的垂直分布.....	余晨兴,仝 川 (5299)
涡度相关观测的能量闭合状况及其对农田蒸散测定的影响.....	刘 渡,李 俊,于 强,等 (5309)
地下滴灌下土壤水势对毛白杨纸浆林生长及生理特性的影响.....	席本野,王 焯,邸 楠,等 (5318)
绿盲蝽危害对枣树叶片生化指标的影响.....	高 勇,门兴元,于 毅,等 (5330)
湿地资源保护经济学分析——以北京野鸭湖湿地为例.....	王昌海,崔丽娟,马牧源,等 (5337)
湿地保护区周边农户生态补偿意愿比较.....	王昌海,崔丽娟,毛旭峰,等 (5345)
湿地翅碱蓬生物量遥感估算模型.....	傅 新,刘高焕,黄 舸,等 (5355)
增氮对青藏高原东缘典型高寒草甸土壤有机碳组成的影响.....	郑娇娇,方华军,程淑兰,等 (5363)
大兴安岭 2001—2010 年森林火灾碳排放的计量估算.....	胡海清,魏书精,孙 龙 (5373)
基于水分控制的切花百合生长预测模型.....	董永义,李 刚,安东升,等 (5387)
极端干旱区增雨加速泡泡刺群落土壤碳排放.....	刘殿君,吴 波,李永华,等 (5396)
黄土丘陵区土壤有机碳固存对退耕还林草的时空响应.....	许明祥,王 征,张 金,等 (5405)
小兴安岭 5 种林型土壤呼吸时空变异	史宝库,金光泽,汪兆洋 (5416)
疏勒河上游土壤磷和钾的分布及其影响因素.....	刘文杰,陈生云,胡凤祖,等 (5429)
COII 参与茉莉酸调控拟南芥吲哚族芥子油苷生物合成过程	石 璐,李梦莎,王丽华,等 (5438)
Gash 模型在黄土区人工刺槐林冠降雨截留研究中的应用	王艳萍,王 力,卫三平 (5445)
三峡水库消落区不同海拔高度的植物群落多样性差异.....	刘维湄,王 杰,王 勇,等 (5454)
基于 SPEI 的北京低频干旱与气候指数关系	苏宏新,李广起 (5467)
山地枣树茎直径对不同生态因子的响应.....	赵 英,汪有科,韩立新,等 (5476)
幼龄柠条细根的空间分布和季节动态	张 帆,陈建文,王孟本 (5484)
山西五鹿山白皮松群落乔灌木层的种间分离.....	王丽丽,毕润成,闫 明,等 (5494)
长期施肥对玉米生育期土壤微生物量碳氮及酶活性的影响.....	马晓霞,王莲莲,黎青慧,等 (5502)
基于归一化法的小麦干物质积累动态预测模型.....	刘 娟,熊淑萍,杨 阳,等 (5512)
上海环城林带景观美学评价及优化策略	张凯旋,凌焕然,达良俊 (5521)
旅游风景区旅游交通系统碳足迹评估——以南岳衡山为例.....	窦银娣,刘云鹏,李伯华,等 (5532)
一种城市生态系统现状评价方法及其应用.....	石惠春,刘 伟,何 剑,等 (5542)
黄海中南部细纹狮子鱼的生物学特征及资源分布的季节变化.....	周志鹏,金显仕,单秀娟,等 (5550)
蓝藻堆积和螺类牧食对苦草生长的影响.....	何 虎,何宇虹,姬娅婵,等 (5562)
黑龙江省黄鼬冬季毛被分层结构及保温功能.....	柳 宇,张 伟 (5568)
虎纹蛙选择体温和热耐受性在个体发育过程中的变化	樊晓丽,雷焕宗,林植华 (5574)
水丝蚓对太湖沉积物有机磷组成及垂向分布的影响	白秀玲,周云凯,张 雷 (5581)
专论与综述	
城市绿地生态评价研究进展.....	毛齐正,罗上华,马克明,等 (5589)
全球变化背景下生态学热点问题研究——第二届“国际青年生态学者论坛”	万 云,许丽丽,耿其芳,等 (5601)
研究简报	
雅鲁藏布江高寒河谷流动沙地适生植物种筛选和恢复效果.....	沈渭寿,李海东,林乃峰,等 (5609)
学术信息与动态	
生态系统服务时代的来临——第五届生态系统服务伙伴年会述评	吕一河,卫 伟,孙然好 (5619)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 334 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 36 * 2012-09	



封面图说: 带雏鸟的白枕鹤一家——白枕鹤是一种体型略小于丹顶鹤的优美的鹤。体羽蓝灰色,腹部较深,背部较浅,脸颊两侧红色,头和颈的后部及上背为白色,雌雄相似。其虹膜暗褐色,嘴黄绿色,脚红色。白枕鹤常常栖息于开阔平原芦苇沼泽和水草沼泽地带,有时亦出现于农田和海湾地区,尤其是迁徙季节。主要以植物种子、草根、嫩叶和鱼、蛙、软体动物、昆虫等为食。繁殖区在我国北方和西伯利亚东南部。我国白枕鹤多在黑龙江、吉林、内蒙古繁殖,与丹顶鹤的繁殖区几乎重叠,为国家一级保护动物。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201202080161

刘殿君, 吴波, 李永华, 朱雅娟, 卢琦. 极端干旱区增雨加速泡泡刺群落土壤碳排放. 生态学报, 2012, 32(17): 5396-5404.

Liu D J, Wu B, Li Y H, Zhu Y J, Lu Q. Rain enrichment-accelerated carbon emissions from soil in a *Nitraria sphaerocarpa* community in hyperarid region. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(17): 5396-5404.

极端干旱区增雨加速泡泡刺群落土壤碳排放

刘殿君, 吴 波, 李永华, 朱雅娟, 卢 琦*

(中国林业科学研究院荒漠化研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 北京 100091)

摘要:以极端干旱区(敦煌)泡泡刺群落为研究对象,采用动态气室法(Li-8100, USA)于2010年5月至9月测定分析了生长季内增雨对泡泡刺群落土壤碳排放量的影响。结果表明:裸地和灌丛在09:00—11:00的碳排放量与全天碳排放量具有线性正相关关系(裸地 $R^2=0.31-0.76$, $P<0.001$; 灌丛 $R^2=0.85-0.96$, $P<0.001$)。增雨50%(4 mm)—300%(24 mm)能够加速裸地和灌丛土壤的碳排放,每增雨1 mm,裸地和灌丛土壤的碳排放分别增加0.27和1.12 g/m²。当泡泡刺群落盖度一定时,与对照相比,每增加1 mm降雨,泡泡刺群落土壤碳排放量增加0.69 g/m²。在未来中国西北干旱地区降雨增加背景下,这一研究数据将为进一步估算该区域群落或生态系统碳收支提供可靠的参考数据。

关键词:人工模拟增雨;极端干旱区;土壤碳排放量;泡泡刺

Rain enrichment-accelerated carbon emissions from soil in a *Nitraria sphaerocarpa* community in hyperarid region

LIU Dianjun, WU Bo, LI Yonghua, ZHU Yajuan, LU Qi*

Institute of Desertification Studies, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Tree breeding and cultivation of State Forestry Administration, Beijing 100091, China

Abstract: Our previous research showed an increasing trend of rainfall in a temperate arid region of China. In this study, to address potential effects of additional rain on carbon emissions of an arid ecosystem, we conducted a field manipulative experiment with five simulated rain addition treatments (four rain addition treatments and one for comparison). Each treatment included four repetitive plots, each with an area of approximately 113 m², in Dun Huang, Gansu. The design simulated rain increases of 0% (CK), 50%, 100%, 200% and 300% of the long-term (1978—2008) average annual precipitation (40 mm) at the study site. We used the Li-8100 automated soil CO₂ flux system in a *Nitraria sphaerocarpa* community during the growing season, from May to September 2010. Our results showed a linear positive correlation in soil carbon emissions between 09:00—11:00 and 24:00 hours for vegetated and bare soil (bare soil $R^2=0.31-0.76$, $P<0.001$; vegetated soil $R^2=0.85-0.96$, $P<0.001$). The rain increases accelerated vegetated and bare soil respiration in the plots. Compared with the control group, soil carbon emissions of bare soil increased by 8.83, 11.03, 26.64, 31.69 g/m², and the emissions of vegetated soil increased by 30.02, 45.34, 98.08, 133.90 g/m² with the 0% (CK), 50%, 100%, 200% and 300% treatments, respectively. Soil carbon emissions of vegetated soil were three times greater than those of bare soil during the growing season, which was statistically significant. There was a significant linear correlation between soil carbon emissions and precipitation during the growing season, in both bare soil and vegetated soil. With a 1 mm increase in rainfall, soil carbon emissions in vegetated and bare soils increased 1.12 g/m² and 0.27 g/m², respectively. With a given community cover, every 1 mm rainfall increase produced an additional 0.69 g/m² of soil carbon

基金项目:林业公益性行业科研专项(201104077);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金重点项目(CAFYBB2007008)资助

收稿日期:2012-02-08; **修订日期:**2012-07-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Luqi@caf.ac.cn

emission, relative to the control treatment.

We developed a multiple linear regression model for community coverage, precipitation and soil carbon emissions of a community of *Nitraria sphaerocarpa*, and found that soil carbon emissions of the control group were 2.97—6.55 kg from May to September. During the growing season, when community coverage was eight percent, soil carbon emissions of the community increased by 0.62, 2.18, 5.30 and 8.42 kg with the 0% (CK), 50%, 100%, 200% and 300% treatments, respectively. With community coverage at nineteen percent, the emissions respectively increased by 1.56, 3.12, 6.24 and 9.36 kg for those same treatments. For community coverage of thirty-eight percent, the respective emission increases were 2.50, 4.06, 7.18 and 10.30 kg. This study is important for estimating the ecosystem carbon budget in the arid region of Northwest China with future rainfall increases.

Key Words: rain addition; hyperarid region; soil carbon emissions; *Nitraria sphaerocarpa*

未来我国干旱地区的降水有增加的趋势^[1-6], 降水的增加能够改变生态系统的结构和功能, 尤其是在干旱地区, 水分作为主要限制因子, 其变化对干旱区生态系统影响将更为显著^[7-9]。土壤碳库不仅是生态系统重要组分, 而且其动态变化更是直接影响全球气候变暖进程^[10-11]。研究显示, 土壤呼吸是陆地生态系统向大气排放 CO₂ 的最主要方式之一^[12]。据估算, 全球陆地生态系统由土壤呼吸每年排放到大气中的碳通量达到 64—100 PgC^[13-14], 大约为化石燃料碳排放量的 11 倍^[15]。

土壤呼吸速率(或土壤碳通量)作为评价土壤碳库动态的关键因子, 备受全球生态学家共同关注。随降雨增加, 土壤呼吸具有增加趋势^[16]。然而在干旱区, 研究降雨变化对土壤碳库的影响相对较少。主要原因是(1)土壤呼吸速率测定困难;(2)系统异质性较高;(3)无法长期动态跟踪自然降雨的变化。虽然个别研究者利用人工增雨的模式研究水分对土壤呼吸速率的影响^[17], 但其研究仅跟踪单次降雨、或在人工模拟降雨中仅仅利用小的样方, 或在室内利用盆栽实验获得结果, 所以无法很好的反映干旱区土壤呼吸与降雨的共变特征。为克服以上缺点, 利用成熟的技术设备, 通过跟踪测定, 利用一天内典型时段(09:00—11:00)替代法, 研究日尺度上的土壤呼吸特征, 通过累积法获得生长季节 CO₂ 的排放总量; 利用大样方调查法, 以减少异质性的影响; 并且采用开放式人工模拟增雨实验, 选择自然植被, 长期跟踪研究土壤呼吸与降水的关系。

本研究依托位于我国西北极端干旱区的野外增雨实验地, 以典型植物群落的优势物种泡泡刺(*Nitraria sphaerocarpa*)为研究对象。通过对生长季节土壤呼吸速率的跟踪测定, 计算了不同增雨处理下裸地和灌丛的碳排放量, 分析了碳排放量和增雨量之间的相互关系, 据此建立了群落盖度、降雨量与群落土壤碳排放量的关系模型, 并通过模型来预测不同盖度样地降雨对土壤碳排放量的影响。为今后全球变化背景下预测该区域群落或生态系统碳收支提供重要的数据支撑。

1 研究地区与方法

1.1 研究区概况

研究地位于河西走廊最西端的甘肃省敦煌市。该区深居西北内陆, 降水稀少, 多年平均降水量仅 40 mm, 年内主要集中在夏秋季节(5—9月); 而且年际变幅巨大, 敦煌 1950—2010 年气象观测数据显示的年降水量为 0—120 mm。实验地位于敦煌市区以东 30 km 处(图 1), 位于山麓砾石洪积扇的边缘, 土壤为石质荒漠土。在土壤表层覆薄沙的地段, 植被以泡泡刺为主, 其它常见伴生种有戈壁沙拐枣(*Calligonum gobicum*)和骆驼刺(*Alhagi sparsifolia*)。样地植被盖度为 8%—30%。泡泡刺能够挡风阻沙并形成泡泡刺灌丛沙包, 其直径多分布在 0.5—1.5 m 之间, 高度在 2 m 以下。但是由于植被覆盖度低加之地表风速较大, 凋落物很难存留。

1.2 试验设置

2008 年, 在实验区设置了 4 个增雨处理样地和 1 个对照样地, 每个处理 4 次重复, 共 20 个实验样地, 所有样地均采用随机区组排列(图 2)。每个实验样地半径 6 m, 面积约 113 m², 为减少样地之间的相互干扰, 样地之间的间隔不少于 5 m。采用全光照喷雾增雨系统^[18]进行人工模拟增雨, 喷灌高度以刚好高过样地内最大

植被高度为准。

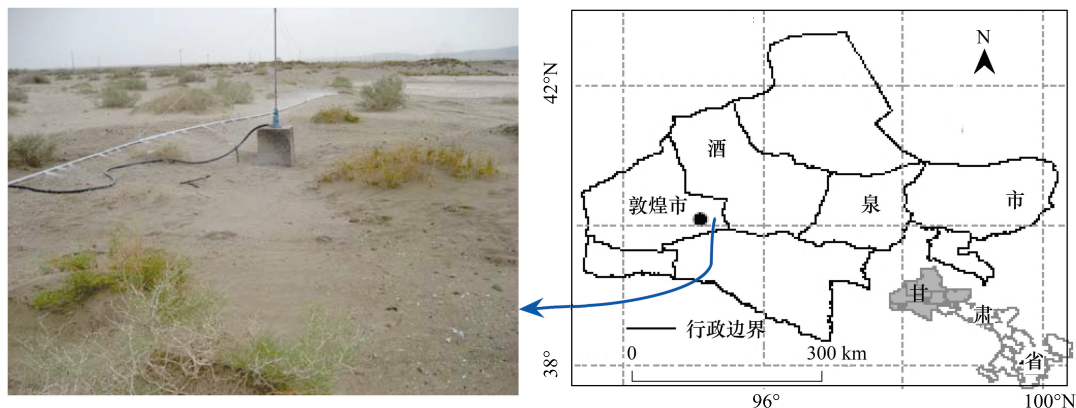


图 1 研究地位置

Fig.1 Location of study plots

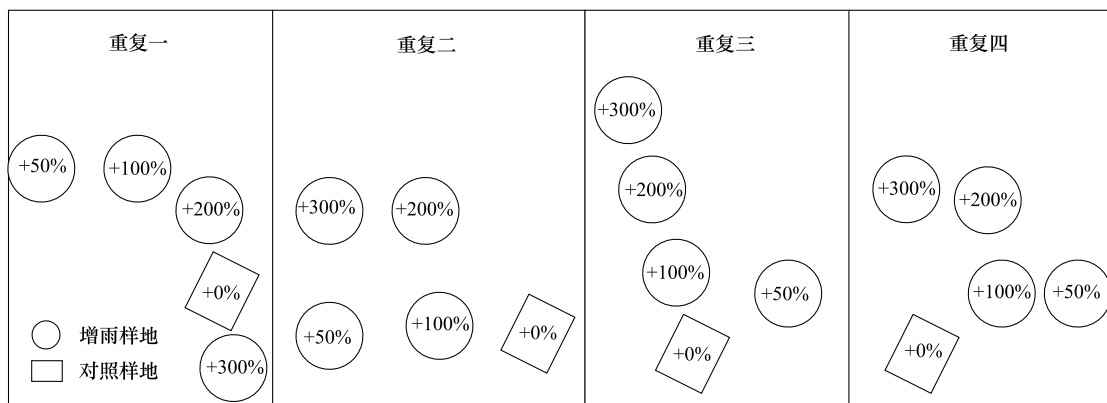


图 2 实验样地分布示意图

Fig.2 Distribution map of sample area

增雨从 2009 年开始,并持续至今,增雨量以敦煌多年平均降水量 40 mm 为基准,4 个增雨处理样地每年分别增雨 50%、100%、200% 和 300%。增雨在每年生长季节(5—9 月)分 5 次完成,每次增雨在 10 号左右进行。为尽可能降低风和蒸腾对增雨的影响,每次增雨均在 10:00 前完成。

1.3 土壤呼吸速率的测定

2010 年 5—9 月份,采用土壤 CO₂ 通量测定系统(Li-8100,LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA)测定土壤呼吸。为比较植被对土壤呼吸的影响,在每个样方内分别选择泡泡刺灌丛顶部和泡泡刺灌丛外的裸地作为土壤呼吸观测点。土壤呼吸测定前 1—2 d 在每个观测点分别嵌入 1 个用 PVC 管制作的土壤呼吸测定基座(Soil collar),基座内壁直径 10 cm,壁厚 0.3 cm,高 8 cm,出露地表约 2 cm。土壤呼吸在增雨前 1 d 测定 1 次,依据增雨后土壤呼吸的变化规律,在增雨后初期(第 1 周)、中期(第 2 周)和末期(第 3 周—第 4 周)进行观测,如遇阴雨天等不适宜测量的天气则向后顺延。5、6、7、8、9 月分别测定 13、11、11、11、6 次(9 月份阴天较多,影响测定次数)。测定在每天 9:00—11:00(北京时间)完成。

另外,为了准确计算增雨后土壤的碳排放量,分别在每月进行 3 次(9 月 2 次)全天土壤呼吸的测定,受天气条件等因素的影响,每月测定日期稍有调整,具体日期详见表 1。每次全天测定从当日 9:00 开始、次日 6:00 结束,每 3h 测量 1 次,每天共测量 8 次。

1.4 气象数据收集

为监测样地周围小气候特征,在样地附近设置了小型自动气象观测站。据气象观测数据显示,研究区气

温在5—9月呈单峰曲线变化(图3)。整个生长季内7月平均气温最高,为27.5℃,9月平均气温最低,为16.9℃。2010年整个生长季内自然降雨量只有17.1mm。

表1 每月增雨后全天土壤呼吸测定日期

Table 1 Diurnal soil respiration measurement date after rain enrichment every month

增雨日期 Date of rain enrichment	5-12			6-11			7-12			8-10			9-10	
全天土壤呼吸测量日期 Date measurement	5-13	5-17	6-10	6-12	6-20	7-5	7-13	7-23	8-5	8-11	8-20	9-4	9-11	9-18
增雨后天数 The number of days after rain enrichment	1	5	28	1	8	23	1	11	26	1	10	25	1	8

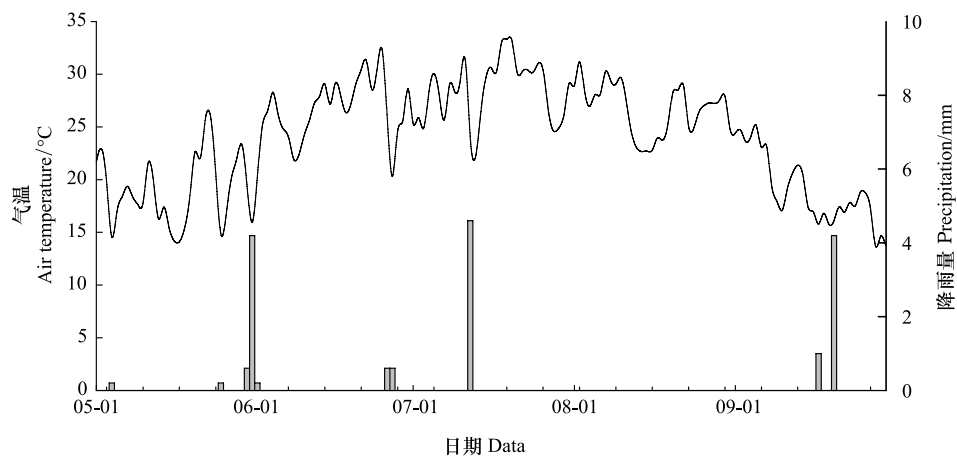


图3 研究区2010年5月至10月气温和降雨变化

Fig. 3 Changing trend of air temperature and precipitation in study area form May to October, 2010

1.5 数据统计与分析

运用 Li-8100 软件系统将土壤呼吸观测数据导出。利用 SPSS13.0 对 9:00—11:00 所测土壤呼吸速率瞬时值与全天土壤呼吸碳排放量进行回归分析,对相同覆被类型不同增雨处理的碳排放量进行单因素方差分析,对不同覆被类型不同增雨处理的碳排放量进行多重比较。用 Sigmaplot10.0 软件绘图。

1.5.1 全天碳排放量的计算

把一天中每 3h 测定 1 次的土壤呼吸速率作为这 3h 的平均值,将 9:00、12:00、15:00、18:00、21:00、次日 00:00、3:00、6:00 测定的 8 次土壤呼吸速率利用公式(1)计算得到这一天的土壤呼吸碳排放量。

$$C_{\text{daily}} = (SR_1 + SR_2 + \cdots + SR_8) \times 12 \times 3 \times 3600 / 1000000 \quad (1)$$

式中, C_{daily} 是全天土壤呼吸碳排放量($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); $SR_1, SR_2, \cdots, SR_8$ 分别代表 9:00、12:00、 $\cdots$,翌日凌晨 6:00 测定的土壤呼吸速率($\mu \text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)。

1.5.2 生长季碳排放量的计算

采用线性回归法分别对裸地和灌丛的碳排放量进行估算。首先利用每个月的全天观测数据建立 9:00—11:00 所测土壤呼吸速率瞬时值与全天土壤呼吸碳排放量的线性回归方程(2),求出系数 a 和 b ;然后将每月 9:00—11:00 所测 10 次左右的土壤呼吸速率求平均作为该月平均每天的土壤呼吸速率,代入方程(2)计算这个月平均每天的碳排放量,用平均每天碳排放量乘以每个月的天数求出每月的碳排放量。将每月碳排放量求和得到整个生长季的碳排放量。

$$\hat{C}_{\text{daily}} = a \times SR_1 + b \quad (2)$$

式中, SR_1 是当日 9:00—11:00 的测定的土壤呼吸速率; a 和 b 为系数。

2 结果

2.1 9:00—11:00 土壤呼吸瞬时值与全天碳排放量的相关关系

如图 4 所示,无论是裸地还是灌丛,全天碳排放量与当日 9:00—11:00 所测土壤呼吸速率瞬时值间存在

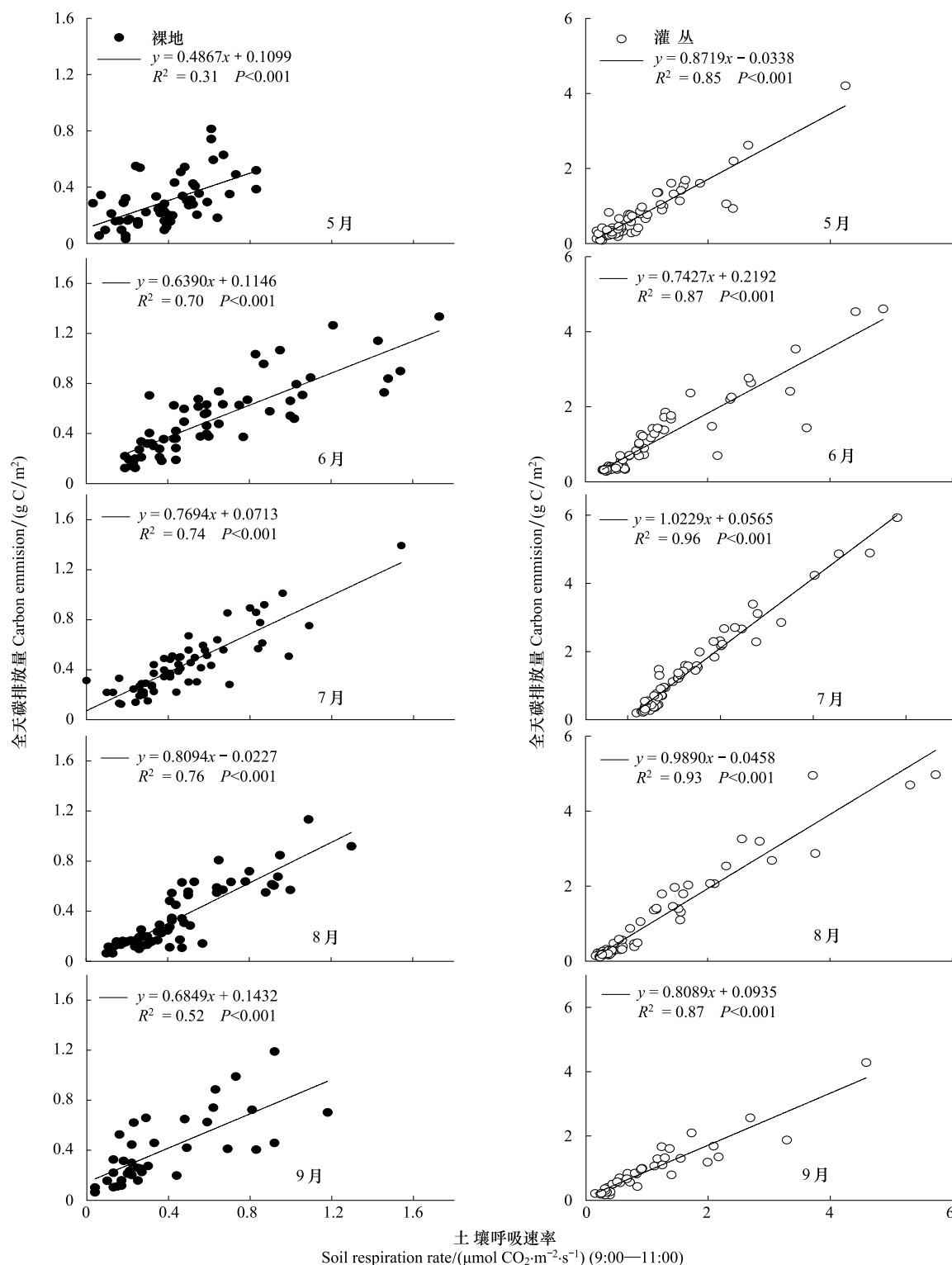


图 4 土壤呼吸速率瞬时值与全天土壤呼吸碳排放量的回归方程

Fig. 4 The functions and model fit parameters between soil respiration measured in 9:00—11:00 (SR9:00, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) with total C emission (C_{daily} , $\text{gC} \cdot \text{m}^{-2}$) over the diurnal dynamic on bare soil and vegetated soils

明显的正相关关系($P < 0.001$)。在裸地上, 9:00—11:00 所测土壤呼吸速率瞬时值可解释全天土壤碳排放量变异的 31%—76%, R^2 平均值为 60%; 在灌丛下, 9:00—11:00 所测土壤呼吸速率瞬时值可以解释全天土壤碳排放量变异的 85%—96%, R^2 平均值达 89% (图 4)。

从各月土壤呼吸速率(9:00—11:00)与全天碳排放量的一元线性回归方程来看, 其回归系数有一定的变化趋势(图 4)。回归系数是表明变量之间数量的增减关系的, 在生长季, 裸地和灌丛拟合方程的回归系数都呈先增大后减小的抛物线型变化; 裸地 6、7、8 月份回归系数较大, 表明在这 3 个月当中裸地 9:00—11:00 的土壤呼吸速率对全天碳排放量的影响程度较大; 灌丛上拟合方程的回归系数在 5—9 月都较大。因此, 裸地在生长季旺期, 9:00—11:00 土壤呼吸速率对全天碳排放量的代表性更高, 而灌丛在整个生长季都有很高的代表性。

与回归系数相同, 线性回归方程的判断系数 R^2 在生长季也呈先增大后减小的抛物线型变化, 同样说明在生长季旺期, 9:00—11:00 土壤呼吸速率对全天碳排放量的代表性更高。

2.2 生长季裸地和灌丛碳排放量

单因素方差分析的结果表明, 增雨处理显著影响灌丛和裸地的土壤碳排放量($P < 0.05$)。在整个生长季, 对照样地裸地和灌丛的碳排放量分别为 (40.62 ± 1.45) 、 (70.13 ± 7.30) g/m^2 ; 增雨 120 mm (300%) 时, 裸地和灌丛的碳排放量最大, 分别达 (72.31 ± 4.84) 和 (204.03 ± 21.99) g/m^2 。在各增雨处理, 灌丛的碳排放量均显著大于裸地($P < 0.01$)且灌丛的碳排放量是裸地的 1.73—2.82 倍(图 5)。

随着人工降雨的增加, 裸地和灌丛的碳排放量都呈逐渐增加的趋势。增雨 50%、100%、200% 和 300% 分别使裸地碳排放量较对照增加 8.83、11.03、26.64、31.69 g/m^2 , 分别使灌丛碳排放量较对照增加 30.02、45.34、98.08 g/m^2 和 133.90 g/m^2 。多重比较结果表明, 在裸地和灌丛上, 50%、100% 增雨处理样地的碳排放量与对照差异不显著($P > 0.05$), 而 200%、300% 增雨处理样地的碳排放量与对照有显著差异($P < 0.01$)。表明增雨达到当地年均降水量的 200% 时, 土壤碳排放量才对增雨产生响应, 即增雨 80 mm 使泡泡刺群落的碳排放量在生长季产生了显著增加(图 5)。

无论是裸地还是灌丛, 随着生长季内降雨总量的增加, 土壤呼吸碳排放量均呈明显的线性增加趋势($P < 0.01$)(图 6)。通过回归方程的斜率比较可知, 灌丛碳排放量对增雨的响应较裸地更为敏感; 而且每增雨 1 mm, 裸地和灌丛碳排放量分别增加 0.27 g/m^2 和 1.12 g/m^2 。

2.3 生长季泡泡刺群落土壤碳排放总量

在给定不同群落盖度的情形下, 以每个增雨样地的面积为基准计算了生长季泡泡刺群落土壤的碳排放量。如图 7 所示, 随着群落盖度和降雨量的增加, 泡泡刺群落的碳排放量呈现出幅度越来越大的增加趋势。

由于碳排放量与降雨量和群落盖度都呈显著的线性关系, 所以使用多元线性回归模型来表示三者之间的数量关系, 泡泡刺群落土壤碳排放量模型如下:

$$\text{泡泡刺群落土壤碳排放量}(\text{kg}) = 0.959 + 8.513 \times \text{群落盖度} + 0.078 \times \text{降雨量}(\text{mm}), (R^2 = 0.92; P < 0.001)$$

本研究实验样地的群落盖度范围为 8%—30%, 由以上方程可以得出整个生长季对照样地土壤的碳排放量为 2.97—6.55 kg。生长季内, 增雨 20、40、80、120 mm 分别使盖度为 8% 的泡泡刺群落土壤碳排放量增加 0.62、2.18、5.30 kg 和 8.42 kg; 分别使盖度为 19% 的泡泡刺群落土壤碳排放量增加 1.56、3.12、6.24 kg 和 9.36 kg; 分别使盖度为 30% 的泡泡刺群落土壤碳排放量增加 2.50、4.06、7.18 kg 和 10.30 kg。在盖度一定的

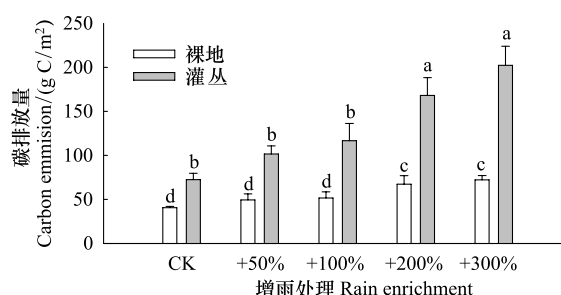


图 5 生长季各增雨处理碳排放总量

Fig. 5 Carbon emission of different rain enrichment in growing season

图中 CK 代表 0% 处理即对照, 相同字母代表 $P < 0.05$ 水平差异不显著; 不同字母代表 $P < 0.05$ 水平差异显著

情况下,每增雨 1 mm,泡泡刺群落土壤碳排放量较对照增加 0.078 kg。

3 讨论

水分与土壤 CO_2 通量关系密切。研究表明,自然状况下,土壤水分的增加会提高克氏针茅草原生态系统的呼吸作用^[19],而水分有效性的降低能够抑制土壤的呼吸作用^[20];人工控制实验环境下的实验结果同样表明,增雨不仅能够明显加速干旱环境下的土壤呼吸、甚至在较为湿润环境下的土壤呼吸也有增加趋势^[21-22];另外,在土壤水分极低的境况下,增雨能够刺激土壤碳排放的激增,在地中海稀树(橡树)草原的研究表明,干旱之后的降雨极大地加强了土壤呼吸进程,使土壤呼吸增加到夜间生态系统 CO_2 净交换的 95%^[23]。

短期内,土壤 CO_2 通量随水分变化的原因除物理过程外,主要来源于土壤内部根系及其它生物(尤其是微生物)活性的变化。研究表明,水分增加能够促进植物浅层细根的快速生长^[24-25],伴随这一过程,根系呼吸将不断增加,从而提高土壤内部 CO_2 的浓度,加速土壤 CO_2 的排放;另一方面,低水分环境往往抑制土壤内生物(尤其是微生物)的活性及繁殖能力,当土壤水分环境条件改善,土壤微生物种群迅速做出响应,分解土壤中的有机质,快速大量释放 CO_2 ^[26-27]。

长期来看,降雨也可以引发植物的萌发与生长^[28],由于土壤呼吸和植物的光合作用关系密切^[29-30],随着人工降雨量的增加,植物根部可能会被供应更多的光合作用产物,进而刺激根呼吸。所以,从碳平衡的角度来看,这一过程可以补偿一些由于降雨增多所导致的土壤呼吸碳损失^[31]。董明伟等人^[32]的模拟研究也显示,降水增加使草原群落净初级生产力(NPP)增加,对于干旱地区的研究也有相同的结果,但相对于草地生态系统来说,干旱生态系统植被覆盖度低,由降雨增加引起的大面积裸地的碳排放量的增加是不容忽视的。需要指出的是,降雨增加也会引起植被覆盖度的变化^[33],本研究中给定的群落盖度是一个静态值,并没有考虑增雨对灌丛盖度以及群落植被盖度的影响,研究表明,植被盖度也直接影响着土壤 CO_2 通量的大小^[34-37]。研究也发现,100%增雨处理下,盖度为 20% 的灌丛土壤呼吸速率的季节平均值(0.66 ± 0.06) $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 显著大于裸地的土壤呼吸速率季节平均值(0.40 ± 0.03) $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ($P < 0.01$),且盖度越大,土壤呼吸速率越大,盖度为 40% 的灌丛土壤呼吸速率达(1.40 ± 0.16) $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。本实验样地在 2009 年开始增雨,2010 年对样地的植被调查发现,在生长季出现了少量 1 年生植物猪毛菜(*Salsola collina*)和白茎盐生草(*Halogeton arachnoideus*),而在对照样地并没有此类植物的出现,但少量的 1 年生植物对群落盖度的影响微乎其微。不过,从近 20a 西北气象观测数据看,干旱区降水具有持续增加的趋势^[38],长期降水增加会提高干旱区植被的生产力,促进 1 年生草本植物或多年生草本植物的生长,还可能改变植被的物种组成^[33],因此,仍然需要关注增雨多年后,植被对气候变化的适应和反馈作用对群落植被覆盖度的季节变化以及物种组成产生的影响,是否会明显影响土壤的碳排放量。

4 结论

在极端干旱区,9:00—11:00 的土壤呼吸速率与全天碳排放量具有显著的线性正相关关系($P < 0.001$),

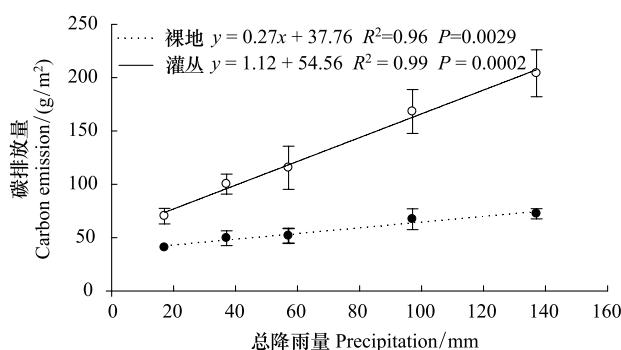


图6 生长季碳排放量与总降雨量的相关关系

Fig. 6 The correlation between carbon emission and precipitation

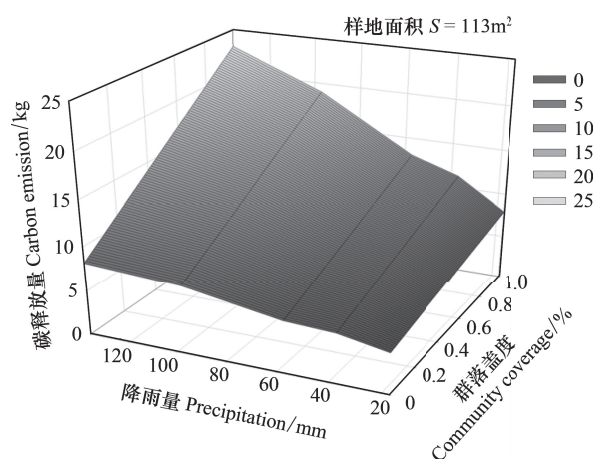


图7 不同盖度、不同降雨量的泡泡刺群落土壤碳排放量

Fig. 7 Soil carbon emission of *Nitraria sphaerocarpa* community in different coverage and different precipitation

相对于裸地($R^2=0.60$)来说,灌丛($R^2=0.89$)的可信度更高。在生长季节内增雨,促使裸地和灌丛两种覆被类型的土壤碳排放量出现不同程度的增加,增雨 20、40、80 和 120 mm 分别使裸地碳排放量增加 21.74%、21.76%、65.56% 和 77.99%,分别使灌丛碳排放量增加 42.82%、64.65%、139.86% 和 190.93%,灌丛的碳排放量是裸地的 1.73—2.82 倍。在盖度不变的情况下,每增雨 1 mm,泡泡刺群落土壤碳排放量增加 0.69 g/m²。

References:

- [1] Shi Y F, Shen Y P. Signal, impact and outlook of climatic shift from warm-dry to warm-humid in northwest China. *Science and Technology Review*, 2003, 23(2): 54-57.
- [2] Shi Y F, Shen Y P, Li D L, Zhang G W, Ding Y J, Hu R J, Kang E S. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in northwest China. *Quaternary Science*, 2003, 23(2): 152-164.
- [3] IPCC. Climate change 2007: impacts, adaptation, and vulnerability // Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, England: Cambridge University Press, 2007.
- [4] Gao X j, Zhao Z C, Ding Y H, Huang R H, Giorgi F. Climate change due to greenhouse effects in China as simulated by regional climate model. *Advance in Atmosphere Science*, 2001, 18(6): 1224-1230.
- [5] Wang Y, Cao M K, Tao B, Li K R. The characteristics of spatio-temporal patterns in precipitation in China under the background of global climate change. *Geographical Research*, 2006, 25(6): 1031-1040.
- [6] Zhai P M, Pan X H. Change in extreme temperature and precipitation over northern China during the second half of the 20th century. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(S1): 1-10.
- [7] Xiong H Q, Duan J Y, Wang Y, Zhang X S. Effects of biological soil crust on water infiltration and redistribution in the Mu Us sandland, Inner Mongolia, northern China. *Research of Soil and Water Conservation*, 2011, 18(4): 82-87.
- [8] An H, An Y. Soil moisture dynamics and water balance of *Salix psammophila* shrubs in south edge of MuUs Sandy Land. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(9): 2247-2252.
- [9] Fu H, Zhou Z Y, Chen S K. A study on relationship between vegetation density and soil water content of *Artemisia sphaerocephala* air-sown grassland in south-eastern edge of Tengger desert, Inner Mongolia, China. *Journal of Desert Research*, 2001, 21(3): 265-270.
- [10] Yang Q P, Xu M, Liu H S, Wang J S, Liu L X, Chi Y G, Zheng Y P. Impact factors and uncertainties of the temperature sensitivity of soil respiration. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(8): 2301-2311.
- [11] Gao H Y, Guo S L, Liu W Z. Characteristics of soil respiration in fallow and its influencing factors at arid-highland of Loess Plateau. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(18): 5217-5224.
- [12] Schlesinger W H, Andrews J A. Soil respiration and the 14 global carbon cycle. *Biogeochemistry*, 2000, 48(1): 7-20.
- [13] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus B*, 1992, 44(2): 81-99.
- [14] Musselman R C, Fox D G. A review of the role of temperate forest in the global CO₂ balance. *Journal of Air and Waste Management Association*, 1991, 41(6): 798-807.
- [15] Marland G, Boden T A, Andres R J. Global regional and national CO₂ emissions // Trends A Compendium of Data on Global Change Carbon Dioxide Information Analysis Center. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy, 2000.
- [16] Raich J W, Schlesinger W H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus*, 1992, 44B(2): 81-99.
- [17] Zhang L H, Chen Y N, Li W H, Zhao R F, Hua Y H. Responses of soil respiration to artificial rainfall in two desert communities in Junngar Basin. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 2819-2826.
- [18] Xu Y, Tian L, Xu C S. A cutting propagation device use full-light automatic spray technology. China, 200720191044.2 2009-04-08.
- [19] Li Q, Xue H X, Wang Y L, Hu Z H, Li J. The preliminary study on the impact of soil temperature and moisture on carbon flux over *Stipa krylovii* ecosystem. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(3): 605-610.
- [20] Harper C W, Blair J M, Fay P A, Knapp P A, Carlisle J D. Increased rainfall variability and reduced rainfall amount decreases soil flux in a grassland ecosystem. *Global Change Biology*, 2005, 11(2): 322-334.
- [21] Liu X Z, Wan S Q, Su B, Hui D F, Luo Y Q. Response of soil CO₂ efflux to water manipulation in a Tallgrass prairie ecosystem. *Plant and Soil*, 2002, 240(2): 213-223.
- [22] Risch A C, Frank D A. Effects of increased soil water availability on grassland ecosystem carbon dioxide fluxes. *Biogeochemistry*, 2007, 86(1): 91-103.
- [23] Unger S, Máguas C, Pereira J S, David T S, Werner C. Interpreting post-drought rewetting effects on soil and ecosystem carbon dynamics in a Mediterranean oak savannah. *Agricultural and Forest Meteorology* 2012, 154-155: 9-18.
- [24] Liu J, He X, Bao H L, Zhou C J, Chen J. Distribution of fine roots of *Salix psammophila* and its relationship with soil moisture in Mu Us

- Sandland. *Journal of Desert Research*, 2010, 30(6): 1362-1366.
- [25] Chen X Y, Eamus D, Hutley L B. Seasonal patterns of fine-root productivity and turnover in a tropical savanna of northern Australia. *Journal of Tropic Ecology*, 2004, 20(2): 221-224.
- [26] Lee X, Wu H J, Sigler J, Oishi C, Siccama T. Rapid and transient response of soil respiration to rain. *Global Change Biology*, 2004, 10(6): 1017-1026.
- [27] Sponseller R A. Precipitation pulses and soil CO₂ flux in a Sonoran Desert ecosystem. *Global Change Biology*, 2007, 13(2): 426-436.
- [28] Huxman T E, Snyder K A, Tissue D, Joshua L A, Ogle K, Pockman W T, Sandquist D R, Potts D L, Schwinning S. Precipitation pulses and carbon fluxes in semiarid and arid ecosystems. *Oecologia*, 2004, 141(2): 254-268.
- [29] Harper C W, Blair J M, Fay P A, Knapp A K, Carlisle J D. Increased rainfall variability and reduced rainfall amount decreases soil CO₂ flux in a grassland ecosystem. *Global Change Biology*, 2005, 11(2): 322-334.
- [30] Tang J W, Baldocchi D D, Xu L K. Tree photosynthesis modulates soil respiration on a diurnal time scale. *Global Change Biology*, 2005, 11(8): 1298-1304.
- [31] Chen S, Lin G, Huang J, Jenerette G D. Dependence of carbon sequestration on the differential responses of ecosystem photosynthesis and respiration to rain pulses in a semiarid steppe. *Global Change Biology*, 2009, 15(10): 2450-2461.
- [32] Dong M W, Yu M. Simulation analysis on net primary productivity of grassland communities along a water gradient and their responses to climate change. *Journal of Plant Ecology*, 2008, 32(3): 531-543.
- [33] Zhu Y J, Wu B, Lu Q. Progress in the study on response of arid zones to precipitation change. *Forest Research*, 2012, 25(1): 100-106.
- [34] Li D, Cao G M, Wu Q, Li Y M, Wang Y H. The seasonal change rule of CO₂ release rate in alpine *Potentilla fruticosa* shrub meadow ecosystem. *Pratacultural Science*, 2005, 22(5): 4-9.
- [35] Meng X L, Chen S P, Wei L, Lin G H. Temporal and spatial variations of soil respiration in an *Artemisia ordosica* shrubland ecosystem in Kubuqi Desert. *Environmental Science*, 2009, 30(4): 1152-1158.
- [36] Zhang L H, Chen Y N, Zhao R F, Li W H. Significance of temperature and soil water content on soil respiration in three desert ecosystems in Northwest China. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(10): 1200-1211.
- [37] Ding J Z, Lai L M, Zhao X C, Zhu L H, Jiang L H, Zhen Y R. Effects of desertification on soil respiration and ecosystem carbon fixation in MuUs sandy land. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(6): 1594-1603.
- [38] Zhang G H, Li Z C, Song Y, Wu Y L, Wang X L. Spatial patterns of change trend in rainfall of China and the role of East Asia summer monsoon. *Arid Land Geography*, 2011, 34(1): 34-42.

参考文献:

- [1] 施雅风, 沈永平. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初探. *科技导报*, 2003, 23(2): 54-57.
- [2] 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 张国威, 丁永健, 胡汝骥, 康尔泗. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨. *第四纪研究*, 2003, 23(2): 152-164.
- [5] 王英, 曹明奎, 陶波, 李克让. 全球气候变化背景下中国降水量空间格局的变化特征. *地理研究*, 2006, 25(6): 1031-1040.
- [6] 翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化. *地理学报*, 2003, 58(S1): 1-10.
- [7] 熊好琴, 段金跃, 王妍, 张新时. 毛乌素沙地生物结皮对水分入渗和再分配的影响. *水土保持研究*, 2011, 18(4): 82-87.
- [8] 安慧, 安钰. 毛乌素沙地南缘沙柳灌丛土壤水分及水量平衡. *应用生态学报*, 2011, 22(9): 2247-2252.
- [9] 付华, 周志宇, 陈善科. 腾格里沙漠东南缘飞播区白沙蒿植被密度与土壤水分关系的研究. *中国沙漠*, 2001, 21(3): 265-270.
- [10] 杨庆朋, 徐明, 刘洪升, 王劲松, 刘丽香, 迟永刚, 郑云普. 土壤呼吸温度敏感性的影响因素和不确定性. *生态学报*, 2011, 31(8): 2301-2311.
- [11] 高会议, 郭胜利, 刘文兆. 黄土旱塬裸地土壤呼吸特征及其影响因子. *生态学报*, 2011, 31(18): 5217-5224.
- [17] 张丽华, 陈亚宁, 李卫红, 赵锐锋, 花永辉. 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. *生态学报*, 2009, 29(6): 2819-2826.
- [18] 许洋, 田林, 许传森. 一种全光自动喷雾扦插育苗装置: 中国, CN200720191044.2. 2009-04-08.
- [19] 李琪, 薛红喜, 王云龙, 胡正华, 李洁. 土壤温度和水分对克氏针茅草原生态系统碳通量的影响初探. *农业环境科学学报*, 2011, 30(3): 605-610.
- [24] 刘健, 贺晓, 包海龙, 周成军. 毛乌素沙地沙柳细根分布规律及与土壤水分分布的关系. *中国沙漠*, 2010, 30(6): 1362-1366.
- [32] 董明伟, 喻梅. 沿水分梯度草原群落 NPP 动态及对气候变化响应的模拟分析. *植物生态学报*, 2008, 32(3): 531-543.
- [33] 朱雅娟, 吴波, 卢琦. 干旱区对降水变化响应的研究进展. *林业科学研究*, 2012, 25(1): 100-106.
- [34] 李东, 曹广民, 吴琴, 李月梅, 王迎红. 海北高寒灌丛草甸生态系统 CO₂ 释放速率的季节变化规律. *草业科学*, 2005, 22(5): 4-9.
- [35] 孟祥利, 陈世革, 魏龙, 林光辉. 库布齐沙漠油蒿灌丛土壤呼吸速率时空变异特征研究. *环境科学*, 2009, 30(4): 1152-1158.
- [37] 丁金枝, 来利明, 赵学春, 朱林海, 姜联合, 郑元润. 荒漠化对毛乌素沙地土壤呼吸及生态系统碳固持的影响. *生态学报*, 2011, 31(6): 1594-1603.
- [38] 张国宏, 李智才, 宋燕, 武永利, 王晓丽. 中国降水量变化的空间分布特征与东亚夏季风. *干旱区地理*, 2011, 34(1): 34-42.

CONTENTS

Conservation strategies for <i>Ulmus elongata</i> based on the analysis of biological and ecological factors	GAO Jianguo, ZHANG Yi, WU Yuhuan, et al (5287)
Vertical distribution of methanogen community structures in <i>Phragmites australis</i> marsh soil in the Min River estuary	SHE Chenxing, TONG Chuan (5299)
Energy balance closure and its effects on evapotranspiration measurements with the eddy covariance technique in a cropland	LIU Du, LI Jun, YU Qiang, TONG Xiaojuan, et al (5309)
Effects of soil water potential on the growth and physiological characteristics of <i>Populus tomentosa</i> pulpwood plantation under subsurface drip irrigation	XI Benye, WANG Ye, DI Nan, et al (5318)
Physiological indices of leaves of jujube (<i>Zizyphus jujuba</i>) damaged by <i>Apolygus lucorum</i>	GAO Yong, MEN Xingyuan, YU Yi, et al (5330)
Economic analysis of wetland resource protection: a case study of Beijing Wild Duck Lake	WANG Changhai, CUI Lijuan, MA Muyuan, et al (5337)
Comparative studies on the farmers' willingness to accept eco-compensation in wetlands nature reserve	WANG Changhai, CUI Lijuan, MAO Xufeng, et al (5345)
Remote sensing estimation models of <i>Suaeda salsa</i> biomass in the coastal wetland	FU Xin, LIU Gaohuan, HUANG Chong, LIU Qingsheng (5355)
Effects of N addition on soil organic carbon components in an alpine meadow on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau	ZHENG Jiaojiao, FANG Huajun, CHENG Shulan, et al (5363)
Estimating carbon emissions from forest fires during 2001 to 2010 in Daxing'anling Mountain	HU Haiqing, WEI Shujing, SUN Long (5373)
Predicting the effects of soil water potential on the growth of cut lily	DONG Yongyi, LI Gang, AN Dongsheng, et al (5387)
Rain enrichment-accelerated carbon emissions from soil in a <i>Nitraria sphaerocarpa</i> community in hyperarid region	LIU Dianjun, WU Bo, LI Yonghua, et al (5396)
Response of soil organic carbon sequestration to the "Grain for Green Project" in the hilly Loess Plateau region	XU Mingxiang, WANG Zheng, ZHANG Jin, et al (5405)
Temporal and spatial variability in soil respiration in five temperate forests in Xiaoxing'an Mountains, China	SHI Baoku, JIN Guangze, WANG Zhaoyang (5416)
Distributions pattern of phosphorus, potassium and influencing factors in the upstream of Shule river basin	LIU Wenjie, CHEN Shengyun, HU Fengzu, et al (5429)
COI1 is involved in jasmonate-induced indolic glucosinolate biosynthesis in <i>Arabidopsis thaliana</i>	SHI Lu, LI Mengsha, WANG Lihua, et al (5438)
Modeling canopy rainfall interception of a replanted <i>Robinia pseudoacacia</i> forest in the Loess Plateau	WANG Yanping, WANG Li, WEI Sanping (5445)
The differences of plant community diversity among the different altitudes in the Water-Level-Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir	LIU Weiwei, WANG Jie, WANG Yong, et al (5454)
Low-frequency drought variability based on SPEI in association with climate indices in Beijing	SU Hongxin, LI Guangqi (5467)
Response of upland jujube tree trunk diameter to different ecological factors	ZHAO Ying, WANG Youke, HAN Lixin, et al (5476)
The spatial distribution and seasonal dynamics of fine roots in a young <i>Caragana korshinskii</i> plantation	ZHANG Fan, CHEN Jianwen, WANG Mengben (5484)
Interspecific segregation of species in tree and shrub layers of the <i>Pinus bungeana</i> Zucc. ex Endl. community in the Wulu Mountains, Shanxi Province, China	WANG Lili, BI Runcheng, YAN Ming, et al (5494)
Effects of long-term fertilization on soil microbial biomass carbon and nitrogen and enzyme activities during maize growing season	MA Xiaoxia, WANG Lianlian, LI Qinghui, et al (5502)
A model to predict dry matter accumulation dynamics in wheat based on the normalized method	LIU Juan, XIONG Shuping, YANG Yang, et al (5512)
Optimization strategies and an aesthetic evaluation of typical plant communities in the Shanghai Green Belt	ZHANG Kaixuan, LING Huanran, DA Liangjun (5521)
Carbon footprint evaluation research on the tourism transportation system at tourist attractions; a case study in Hengshan	DOU Yindi, LIU Yunpeng, LI Bohua, et al (5532)
An urban ecosystem assessment method and its application	SHI Huichun, LIU Wei, HE Jian, et al (5542)
Seasonal variations in distribution and biological characteristics of snailfish <i>Liparis tanakae</i> in the central and southern Yellow Sea	ZHOU Zhipeng, JIN Xianshi, SHAN Xiujuan, et al (5550)
Effects of cyanobacterial accumulation and snail grazing on the growth of <i>vallisneria natans</i>	HE Hu, HE Yuhong, JI Yachan, et al (5562)
The structure and thermal insulation capability of <i>Mustela sibirica manchurica</i> winter pelage in Heilongjiang Province	LIU Yu, ZHANG Wei (5568)
Ontogenetic shifts in selected body temperature and thermal tolerance of the tiger frog, <i>Hoplobatrachus chinensis</i>	FAN Xiaoli, LEI Huanzong, LIN Zhihua (5574)
The influence of tubificid worms bioturbation on organic phosphorus components and their vertical distribution in sediment of Lake Taihu	BAI Xiuling, ZHOU Yunkai, ZHANG Lei (5581)
Review and Monograph	
Research advances in ecological assessment of urban greenspace	MAO Qizheng, LUO Shanghua, MA Keming, et al (5589)
Ecological hot topics in global change on the 2 nd International Young Ecologist Forum	WAN Yun, XU Lili, GENG Qifang, et al (5601)
Scientific Note	
Screening trial for the suitable plant species growing on sand dunes in the alpine valley and its recovery status in the Yarlung Zangbo River basin of Tibet, China	SHEN Weishou, LI Haidong, LIN Naifeng, et al (5609)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的生态学专业性高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,300 页,国内定价 90 元/册,全年定价 2160 元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 32 卷 第 17 期 (2012 年 9 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 32 No. 17 (September, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元