

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

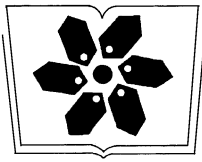
Acta Ecologica Sinica



第33卷 第14期 Vol.33 No.14 **2013**

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 33 卷 第 14 期 2013 年 7 月 (半月刊)

目次

前沿理论与学科综述

石鸡属鸟类研究现状..... 宋 森,刘迺发 (4215)

个体与基础生态

不同降水及氮添加对浙江古田山 4 种树木幼苗光合生理生态特征与生物量的影响.....
..... 闫 慧,吴 茜,丁 佳,等 (4226)

低温胁迫时间对 4 种幼苗生理生化及光合特性的影响..... 邵怡若,许建新,薛 立,等 (4237)

不同施氮处理玉米根茬在土壤中矿化分解特性..... 蔡 苗,董燕婕,李佰军,等 (4248)

不同生育期花生渗透调节物质含量和抗氧化酶活性对土壤水分的响应.....
..... 张智猛,宋文武,丁 红,等 (4257)

天山中部天山云杉林土壤种子库年际变化..... 李华东,潘存德,王 兵,等 (4266)

不同作物两苗同穴互作育苗的生理生态效应..... 李伶俐,郭红霞,黄耿华,等 (4278)

镁、锰、活性炭和石灰及其交互作用对小麦镉吸收的影响..... 周相玉,冯文强,秦鱼生,等 (4289)

CO₂ 浓度升高对毛竹器官矿质离子吸收、运输和分配的影响 庄明浩,陈双林,李迎春,等 (4297)

pH 值和 Fe、Cd 处理对水稻根际及根表 Fe、Cd 吸附行为的影响 刘丹青,陈 雪,杨亚洲,等 (4306)

弱光胁迫对不同耐荫型玉米果穗发育及内源激素含量的影响..... 周卫霞,李潮海,刘天学,等 (4315)

玉米花生间作对玉米光合特性及产量形成的影响..... 焦念元,宁堂原,杨萌珂,等 (4324)

不同林龄胡杨克隆繁殖根系分布特征及其构型..... 黄晶晶,井家林,曹德昌,等 (4331)

植被年际变化对蒸散发影响的模拟研究..... 陈 浩,曾晓东 (4343)

蝇蛹金小蜂的交配行为及雄蜂交配次数对雌蜂繁殖的影响..... 孙 芳,陈中正,段毕升,等 (4354)

西藏飞蝗虫粪粗提物的成分分析及其活性测定..... 王海建,李彝利,李 庆,等 (4361)

不同水稻品种对稻纵卷叶螟生长发育、存活、生殖及飞行能力的影响..... 李 霞,徐秀秀,韩兰芝,等 (4370)

种群、群落和生态系统

基于 *mtCOII* 基因对山东省越冬代亚洲玉米螟不同种群的遗传结构分析
..... 李丽莉,于 毅,国 栋,等 (4377)

太湖湿地昆虫群落结构及多样性..... 韩争伟,马 玲,曹传旺,等 (4387)

西江下游浮游植物群落周年变化模式..... 王 超,赖子尼,李新辉,等 (4398)

环境和扩散对草地群落构建的影响..... 王 丹,王孝安,郭 华,等 (4409)

黄土高原不同侵蚀类型区生物结皮中蓝藻的多样性..... 杨丽娜,赵允格,明 姣,等 (4416)

景观、区域和全球生态

基于景观安全格局的建设用地管制分区..... 王思易,欧名豪 (4425)

黑河中游湿地景观破碎化过程及其驱动力分析..... 赵锐锋,姜朋辉,赵海莉,等 (4436)

2000—2010 年青海湖流域草地退化状况时空分析 骆成凤,许长军,游浩妍,等 (4450)

基于“源”“汇”景观指数的定西关川河流域土壤水蚀研究 李海防,卫 伟,陈 瑾,等 (4460)

农业景观格局与麦蚜密度对其初寄生蜂与重寄生蜂种群及寄生率的影响 ... 关晓庆,刘军和,赵紫华 (4468)

CO₂ 浓度和降水协同作用对短花针茅生长的影响..... 石耀辉,周广胜,蒋延玲,等 (4478)

资源与产业生态

城市土地利用的生态服务功效评价方法——以常州市为例..... 阳文锐,李 锋,王如松,等 (4486)

城市居民食物磷素消费变化及其环境负荷——以厦门市为例..... 王慧娜,赵小锋,唐立娜,等 (4495)

研究简报

间套作种植提升农田生态系统服务功能..... 苏本营,陈圣宾,李永庚,等 (4505)

矿区生态产业评价指标体系 王广成,王欢欢,谭玲玲 (4515)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 308 * zh * P * ¥90.00 * 1510 * 32 * 2013-07



封面图说: 古田山常绿阔叶林景观——亚热带常绿阔叶林是我国独特的植被类型,生物多样性仅次于热带雨林。古田山地处中亚热带东部,浙、赣、皖三省交界处,由于其特殊复杂的地理环境位置,分布着典型的中亚热带常绿阔叶林,是生物繁衍栖息的理想场所,生物多样性十分突出。中国科学院在这里建立了古田山森林生物多样性与气候变化研究站,主要定位于研究和探索中国亚热带森林植物群落物种共存机制,阐释生物多样性对森林生态系统功能的影响,以及监测气候变化对于亚热带森林及其碳库和碳通量的影响。

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

DOI: 10.5846/stxb201204160546

石耀辉, 周广胜, 蒋延玲, 王慧, 许振柱. CO₂ 浓度和降水协同作用对短花针茅生长的影响. 生态学报, 2013, 33(14): 4478-4485.

Shi Y H, Zhou G S, Jiang Y L, Wang H, Xu Z Z. Effects of interactive CO₂ concentration and precipitation on growth characteristics of *Stipa breviflora*. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(14): 4478-4485.

CO₂ 浓度和降水协同作用对短花针茅生长的影响

石耀辉^{1,2}, 周广胜^{1,3,*}, 蒋延玲¹, 王 慧^{1,2}, 许振柱¹

(1. 中国科学院植物研究所植被与环境变化国家重点实验室, 北京 100093;

2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 中国气象科学研究院, 北京 100081)

摘要:关于二氧化碳(CO₂)浓度和降水等单因子变化对植物生长的影响研究已很多,但多因子协同作用的影响研究仍较少,制约着植物对全球变化响应的综合理解与预测。利用开顶式生长箱(OTC)模拟研究了 CO₂ 浓度升高(450 和 550 μmol/mol)和降水量变化(-30%、-15%、对照、+15%和+30%)的协同作用对荒漠草原优势植物短花针茅(*Stipa breviflora*)生长特性的影响。结果表明:550 μmol/mol CO₂ 浓度下短花针茅植株的生物量和叶面积较对照显著增加,但 450 μmol/mol CO₂ 浓度下的变化不明显;降水增多导致植株生物量、叶面积、叶数和株高显著增加;CO₂ 浓度与降水协同作用显著影响短花针茅植株生物量。CO₂ 浓度升高在一定程度上缓解了降水减少对短花针茅的胁迫效应,但降水量减少 30% 则明显抑制了 CO₂ 浓度升高带来的效应。研究结果有助于增进荒漠草原植物对未来气候变化的适应性理解,可为制定荒漠草原应对气候变化的对策提供依据。

关键词:降水量; CO₂ 浓度; 协同作用; 短花针茅; 生长特性

Effects of interactive CO₂ concentration and precipitation on growth characteristics of *Stipa breviflora*

SHI Yaohui^{1,2}, ZHOU Guangsheng^{1,3,*}, JIANG Yanling¹, WANG Hui^{1,2}, XU Zhenzhu¹

1 State Key Laboratory of Vegetation and Environmental Change, Institute of Botany, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100093, China

2 Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China

Abstract: Although lot of the studies on the effects of single factor, such as atmospheric CO₂ concentration and precipitation, on plant growth characteristics have been done, the effects of interactive CO₂ concentration and precipitation on plant growth characteristics have not been studied yet. Those restricted the comprehensive understanding and accurate prediction of the effects of global change on plant growth characteristics. *Stipa breviflora* is one of the dominant plant species in desert steppe and a kind of forage grass with high quality. Investigating the sensitivity and adaptive capacity of *S. breviflora* to climate change is significant for maintaining the stabilization of desert ecosystem and the security of stockbreeding. We had studied the effects of increased CO₂ concentration and varied precipitation as well as their interactions on the growth characteristics (such as plant height, leaf area, survival rate, leaf number and biomass, etc.) of *S. breviflora* based on the simulation experiment using open-top chambers (OTC) from June to August (the main growing season) in 2011.

In this paper, three levels of CO₂ concentrations (control, 450 and 550 μmol/mol), five levels of precipitation (-30%, -15%, control, +15%, and +30% based on the average monthly precipitation from 1978 to 2007 in Siziwangqi county, Inner Mongolia) and their interactions were studied. There were six replicates (i. e., six pots with four plants per

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2010CB951301); 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050400)

收稿日期:2012-04-16; **修订日期:**2012-09-06

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: gszhou@ibcas.ac.cn; yljia@ibcas.ac.cn

pot) for every CO₂ concentration treatment and precipitation treatment. The seeds were sowed on April 18th and well watered before control experiment. Then 90 pots of plants with consistent growing vigor were randomly selected and placed into different chambers as different treatments. High-purity CO₂ was pumped into those chambers with high CO₂ concentration day and night, regulated by a CO₂ automatic control system. Each precipitation regime was converted to irrigation amounts of every month and then divided into 10 times to water, i. e. watered every three days after 4:00pm. The chambers were covered in rainy days to avoid extra water input. The whole experimental site was covered with sun-shading net to lower the temperature in chambers at 9:00—16:00 on clear days.

Plant heights were measured in late July and late August, respectively. Leaf number, leaf area and biomass were measured at the stage with the biggest biomass. The results indicated that, comparing with the control, the growth characteristics of *S. breviflora* did not change significantly under 450 μmol/mol CO₂ concentration. However, the biomass, plant heights (in July), leaf area and single leaf area of *S. breviflora* increased significantly under 550 μmol/mol CO₂ concentration, while leaf number and plant heights (in August) did not change significantly. The changes of precipitation obviously affected the biomass, leaf area, leave number, plant height and survival rate of *S. breviflora*. The interactions of increased CO₂ concentration and varied precipitation had significant effects on the biomass of *S. breviflora*. CO₂ fertilization effect could offset the adverse impact induced by decreasing precipitation, but the effect of increasing CO₂ concentration would be reduced markedly when the precipitation decreased about 30%. This result would help to understand the adaptation of desert steppe to future climatic change and to make countermeasures to cope with climatic change.

Key Words: precipitation; CO₂ concentration; interaction; *Stipa breviflora*; growth characteristics

大气 CO₂ 浓度已由工业化前约 270—280 μmol/mol 增加到 2009 年的 387 μmol/mol^[1], 预计到 2050 年大气 CO₂ 浓度将达到 550 μmol/mol 左右^[2]。大气 CO₂ 浓度升高一方面直接对植物光合作用和生长发育产生影响, 另一方面, 其引起的“温室效应”将诱发全球增暖与降水格局等的改变, 间接影响植物光合作用和生长发育^[3]。

关于大气 CO₂ 浓度升高^[4-13] 及水分变化^[14-20] 对植物的影响国内外已经开展了大量研究, 但关于 CO₂ 和水分交互作用对植物的影响研究仍较少^[21-23], 制约着植物对全球变化响应的综合理解与预测。关于 CO₂ 浓度升高的模拟通常采用 700 μmol/mol^[7-8]、550 μmol/mol 或其它浓度处理^[10-13]; 水分变化的模拟多以土壤持水量为参考^[17-23], 或以降水量为参考^[15-16], 主要关注干旱的影响; 实验设计的水分梯度少、跨度较小, 无法全面理解植物对水分的响应及涝渍对植物的影响^[24]。不同植物对 CO₂ 浓度升高和水分胁迫的敏感程度不尽相同, 即使是生存在相同环境下的植物, 它们受到的影响也可能存在较大的差异^[6]。

短花针茅 (*Stipa breviflora*) 是亚洲中部暖温带荒漠草原的建群种, 在我国主要分布在内蒙古高原南部、阴山山脉以南及黄土高原西部等地区。短花针茅为优等牧草, 具有耐干旱、返青早、适口性好等优点^[25]。本研究以短花针茅为研究对象, 利用开顶式生长箱 (OTC) 模拟 CO₂ 浓度升高和降水量变化协同作用对短花针茅生长特性的影响, 探讨短花针茅对气候变化的适应性, 为未来气候变化情景下荒漠草原的科学管理与畜牧业生产提供科学依据。

1 实验材料和方法

1.1 实验材料与设计

实验于 2011 年 5 月至 8 月在中国科学院植物研究所进行。短花针茅种子于实验前一年采集于中国科学院植物研究所乌兰察布草地生态研究站 (41°43'N, 111°52'E, 海拔 1420—1500 m), 经 0.5% 高锰酸钾溶液消毒 8min, 用水冲洗后备播。土壤来源于内蒙古锡林浩特草原典型栗钙土。

实验设置 3 个 CO₂ 浓度水平: 对照 (Control)、450 μmol/mol 和 550 μmol/mol, 每个浓度水平 3 个重复, 共 9 个开顶式气室 (OTC)。以钢瓶装高纯度 CO₂ 为气源, 利用 CO₂ 自动控制系统进行 24h 监控, 每分钟监测 1

次气室内 CO_2 浓度并补气。对每个 CO_2 浓度水平,以短花针茅种源地内蒙古乌兰察布盟四子王旗 6、7、8 月的 30a(1978—2007)月均降水量为对照设置 5 个降水量梯度: -30% (W_1)、 -15% (W_2)、对照 (W_3)、 $+15\%$ (W_4) 和 $+30\%$ (W_5),每个气室内相同降水量水平设置两个重复处理。根据塑料盆的尺寸将月均降水量换算为各处理的总浇水量,每 3d 浇灌 1 次。短花针茅种源地 30 年月均降水量及各水分处理的每次浇灌水量见表 1。

表 1 短花针茅种源地 30 年(1978—2007)月平均降水量及各水分处理施水量表

Table 1 Average monthly precipitation during 1978—2007 and water supply for the five water treatments

月份 Month	月平均降水量 Precipitation/mm	每次施水量 Irrigation amount/mL				
		W_1	W_2	W_3	W_4	W_5
6	55.50	36	44	52	60	67
7	92.73	55	67	79	90	102
8	67.58	44	54	63	72	82

W_3 为对照, W_1 、 W_2 、 W_4 和 W_5 分别代表降水量在对照基础上 -30% 、 -15% 、 $+15\%$ 和 $+30\%$

在进行 CO_2 浓度和水分控制实验前先进行育苗、间苗及定苗。(1)育苗:4 月 18 日播种,将土壤过筛去除其中的残根、石块后分装入聚乙烯塑料盆中,每盆播种短花针茅种子 10 粒左右(短花针茅种子发芽率 94.4%),浇水 100 mL。随后,放入温室育苗(最大光强约 $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,昼夜温度 $26\text{—}28^\circ\text{C}/18\text{—}20^\circ\text{C}$),定期浇水。(2)间苗及定苗:在出苗至第 1 片叶完全展开后进行间苗,直到幼苗第 3 片叶完全展开时进行定苗,每盆选取长势较好且一致的幼苗保留 4 株。

5 月 23 日将 90 盆实验材料随机转入 OTC 气室,每个气室 10 盆。2011 年 5 月 31 日开始控制实验。开始实验前对每盆样品进行称重、补水以保证初始水分条件一致。控制实验开始后每天检查一次 CO_2 通气状况,经常清洁气室的玻璃内外壁,每 3d 在 16:00 后浇水 1 次,雨天及时扣上防雨罩。晴天于 9:00—16:00 用遮阳网遮挡强光,用鼓风机不间断向气室内鼓风以防止气室内温度过高,6、7、8 月气室内的日均温分别为 27.8°C 、 27.7°C 和 26.5°C 。

1.2 观测指标

(1)形态特征及存活率 在 7 月和 8 月下旬进行每株株高测定,收获时统计相同处理下植株整体存活率,计数每株叶片数,利用 WinFOLIA (Régent Instruments Inc., Quebec, Canada) 植物叶片分析系统测定每株总叶面积。

(2)生物量 采用收获法在 9 月 2 日进行测定,测定每盆短花针茅植株的叶、茎、根(经过筛、分拣和冲洗)的生物量(75°C 下烘干至恒重后采用感量 0.01 g 电子天平称量)。

1.3 数据分析

采用统计分析软件 SPSS16.0 的单因素方差分析和多因素方差分析方法,分析不同 CO_2 浓度和降水量梯度及其协同作用对观测指标影响的显著性。若影响显著,则采用 Duncan 多重比较分析各处理间的显著性差异,显著性水平为 0.05。

2 结果分析

2.1 植株存活率

降水量变化对短花针茅植株存活率影响较大(表 2),随着降水量的减少植株存活率下降,降水量减少 30% (W_1) 条件下存活率仅为 66.7%,较对照 (W_3) 存活率降低 14.6%(表 2); CO_2 浓度升高对植株存活率没有明显影响。

2.2 植株株高

短花针茅生长中期(7 月),相同 CO_2 浓度下,随着降水量增多,株高增高,但 W_4 和 W_5 两个处理之间株高差异不显著(表 3)。在相同降水量条件下,与对照(Control)相比,550 $\mu\text{mol}/\text{molCO}_2$ 浓度下株高显著增高,在

W₁—W₅ 个降水量条件下株高分别增高 14.4%、33.7%、20%、20.4% 和 20.3%,但在降水量减少 30% (W₁) 条件下 CO₂ 浓度升高引起的株高差异不显著。

表 2 CO₂ 浓度升高和降水量变化对短花针茅植株存活率的影响/%

Table 2 Effects of elevated CO₂ concentration and changing precipitation on the survival rate of *S. breviflora*

降水量变化 Precipitation change	CO ₂ 浓度 CO ₂ concentration (μmol/mol)		
	对照	450	550
W ₁	66.7	62.5	65.0
W ₂	66.7	58.3	70.8
W ₃	81.3	75.0	75.0
W ₄	87.5	83.3	87.5
W ₅	85.0	87.5	87.5

表 3 短花针茅植株株高对 CO₂ 浓度升高和降水量变化的响应/cm

Table 3 Responses of plant heights of *S. breviflora* to elevated CO₂ concentration and changing precipitation

CO ₂ 浓度/(μmol/mol)		降水量变化 Precipitation change				
CO ₂ concentration		W ₁	W ₂	W ₃	W ₄	W ₅
7 月 July	对照	11.58±0.63d	16.38±1.45c	21.98±1.38b	26.55±1.70a	26.92±0.45a
	450	11.20±0.10d	15.25±0.85c	23.21±2.89b	27.89±0.40ab	25.43±0.14a
	550	13.25±1.80c	21.90±1.11b*	26.38±1.24b	31.97±1.78a*	32.39±1.60a*
8 月 August	对照	25.55±0.67b	30.74±1.55a	32.45±1.11a	32.15±1.40a	33.06±2.27a
	450	25.67±0.73b	30.00±0.43ab	33.14±3.40a	33.61±2.14a	31.77±1.24ab
	550	25.52±0.67b	30.87±0.86b	35.03±1.11a	35.26±0.60a	35.13±2.27a

表中株高数据为平均数±标准误差($n=3-6$);不同的小写字母表示在相同 CO₂ 浓度下由于降水量变化导致在 $P<0.05$ 水平上差异显著,* 表示在相同降水量水平下 CO₂ 浓度升高在 $P<0.05$ 水平上差异显著

短花针茅生长后期(8 月),相同 CO₂ 浓度下,与对照(W₃)相比,降水量减少(W₁, W₂)显著降低了短花针茅的株高;降水量增多(W₄, W₅)一定程度上增加了植株株高,但差异不显著(表 3)。在相同降水量条件下,与对照相比,450 μmol/mol CO₂ 浓度对株高变化影响不显著,550 μmol/mol CO₂ 浓度下植株株高略有增加但差异不显著。

2.3 叶面积

2.3.1 植株总叶面积

相同 CO₂ 浓度下,随着降水量增多,植株总叶面积呈增加趋势,降水量增加 15% (W₄) 后叶面积增加趋势变缓(图 1)。相同降水量条件下,随着 CO₂ 浓度增加,植株总叶面积有增加趋势。与对照相比,450 μmol/mol CO₂ 浓度下的植株总叶面积增加不显著,550 μmol/mol CO₂ 浓度下的植株总叶面积显著增加;W₁—W₅ 5 个降水量条件下分别增加 14.5%、20.1%、18.7%、18.3% 和 13.2%。降水量减少 15% 条件下,550 μmol/mol CO₂ 浓度与对照 CO₂ 浓度相比增加比率最大。CO₂ 浓度升高条件下(550 μmol/mol),降水量增加 15% (W₄) 植株总叶面积最大。

2.3.2 单叶面积

相同 CO₂ 浓度下,降水量变化对短花针茅单叶面积影响显著,随着降水量增加单叶面积逐渐增大,但降水量增多(W₄, W₅)两个处理之间差异不显著(图 1)。相同降水量条件下,与对照 CO₂ 浓度相比,短花针茅单叶面积在 450 μmol/mol CO₂ 浓度下没有显著变化;在 550 μmol/mol CO₂ 浓度下则显著增大,在 W₁—W₅ 5 个降水量条件下分别增加 5.6%、14%、13.5%、9.4% 和 8.6%,但降水量减少 30% (W₁) 条件下,CO₂ 浓度为 550 μmol/mol 与对照 CO₂ 浓度相比差异不显著。CO₂ 浓度升高条件下,降水量增加可以促进短花针茅单叶面积的增大。

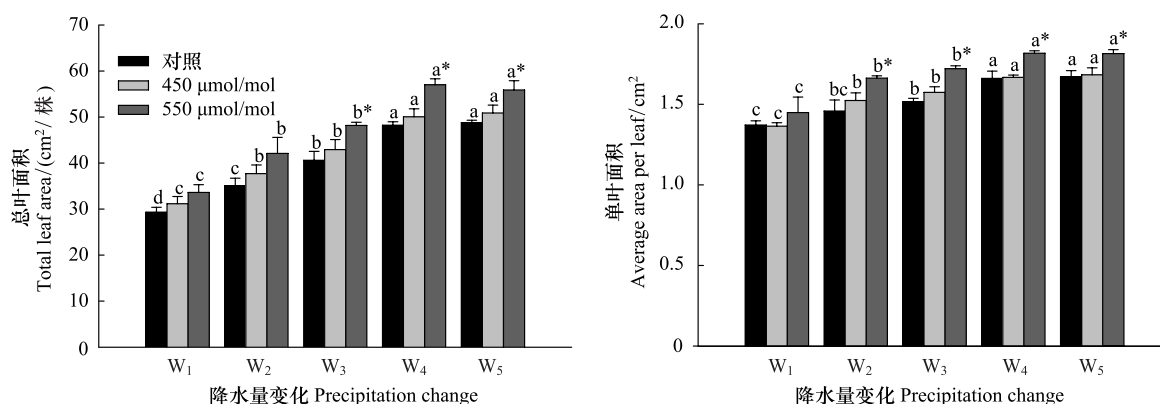


图1 短花针茅植株总叶面积和单叶面积对 CO₂ 浓度升高和降水量变化的响应

Fig. 1 Responses of plant total leaf area and single leaf area of *S. breviflora* to elevated CO₂ concentration and changing precipitation

不同的小写字母表示在相同 CO₂ 浓度下由于降水量变化导致在 0.05 水平上差异显著, * 表示在相同降水量水平下和对照浓度相比 CO₂ 浓度升高在 0.05 水平上差异显著

2.4 叶数

相同 CO₂ 浓度下,随着降水量增加,短花针茅植株叶片数量逐渐增多,降水量增加 15% (W₄) 后增加趋势减缓。与对照 (W₃) 相比,降水量减少尤其是减少 30% (W₁) 时植株叶片数量显著减少,总体减少 19.1%。相同降水量条件下,与对照 CO₂ 浓度相比,CO₂ 浓度升高短花针茅植株的叶片数量增多,但是变化不显著 (图 2)。CO₂ 浓度升高的条件下,降水量增加,短花针茅叶片数也增加。

2.5 植株总生物量

相同 CO₂ 浓度下,随着降水量增加,短花针茅植株总生物量呈先增后减趋势 (图 3)。在本实验 5 个降水量处理水平下,降水量增加 15% (W₄) 短花针茅生物量达到最大值,降水量增加 30% (W₅) 短花针茅植株总生物量较降水量增加 15% (W₄) 有所减少,但 W₄ 和 W₅ 两种降水量处理差异不显著。相同降水量条件下,随着 CO₂ 浓度增加,短花针茅植株总生物量呈增加趋势。与对照 CO₂ 浓度相比,在 450 μmol/mol CO₂ 浓度下有所增加但差异不显著;而在 CO₂ 浓度为 550 μmol/mol 时除降水量减少 30% (W₁) 增加不显著外,其它降水量水

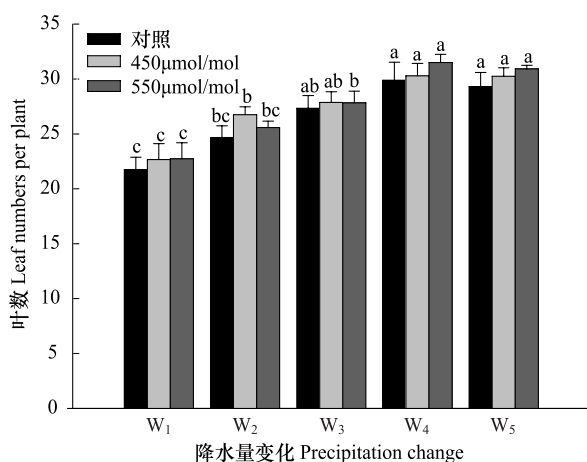


图2 短花针茅植株叶数对 CO₂ 浓度升高和降水量变化的响应

Fig. 2 Responses of plant total leaf number of *S. breviflora* to elevated CO₂ concentration and changing precipitation

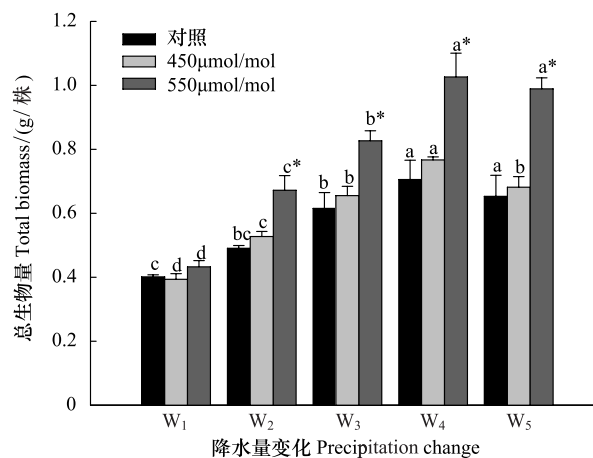


图3 短花针茅植株总生物量 (g) 对 CO₂ 浓度升高和降水量变化的响应

Fig. 3 Response of plant biomass (g) of *S. breviflora* to elevated CO₂ concentration and changing precipitation

平下生物量显著增加。CO₂ 浓度升高条件下,降水量增加可以明显提高短花针茅植株总生物量。

2.6 生长指标多因素方差分析

对降水量变化和 CO₂ 浓度升高以及两者交互作用的多因素方差分析表明(表 4):CO₂ 浓度增加与降水量变化对短花针茅植株总生物量变化存在显著的交互作用($P < 0.05$),其中 CO₂ 浓度 550 $\mu\text{mol/mol}$ 和降水量增加 15% (W_4) 交互作用下植株生物量最大,而株高和叶面积对交互作用的响应不显著。

表 4 不同 CO₂ 浓度和降水量变化下短花针茅生长指标的多因素方差分析

Table 4 Variance of the growth characteristics of *S. breviflora* to elevated CO₂ concentration and changing precipitation

变量 Variable	CO ₂ 浓度 CO ₂ concentration			降水量 Precipitation			交互作用 Interaction		
	df	F	P	df	F	P	df	F	P
生物量 Biomass	2	43.735	0.000	4	56.229	0.000	8	2.863	0.017
株高(7月) Plant heights (July)	2	22.869	0.000	4	103.768	0.000	8	1.01	0.45
单叶面积 Single leaf area	2	20.623	0.000	4	32.027	0.000	8	0.443	0.886
总叶面积 Total leaf area	2	20.569	0.000	4	76.087	0.000	8	0.299	0.961

3 讨论

本研究表明,降水量变化对短花针茅植株的存活率有较大影响,而 CO₂ 浓度升高对其存活率的影响不明显。因此,水分是影响干旱半干旱地区短花针茅植株存活的关键因子,与已有研究结果一致^[14]。

研究表明,CO₂ 浓度升高促进植物株高、叶面积和生物量的增加^[26-30];对植株叶数的影响则不一致,或促进植株叶数增加^[14],或无明显变化^[27]。本研究显示,CO₂ 浓度升高对短花针茅株高的影响在不同生长期表现不同,高 CO₂ 浓度(550 $\mu\text{mol/mol}$)使得生长中期(7月)短花针茅的株高显著增加,生长后期(8月)株高虽有增加,但差异不显著。短花针茅植株总叶面积和单叶面积在 550 $\mu\text{mol/mol}$ CO₂ 浓度下较对照 CO₂ 浓度显著增加,叶片数目受 CO₂ 浓度升高影响不显著。因此,高浓度 CO₂(550 $\mu\text{mol/mol}$)对短花针茅植株总叶面积的正效应主要通过增加单叶面积实现。研究表明,前期叶片细胞增大和后期叶片细胞数目增多是单叶叶面积增加的直接原因^[28],其机制在于 CO₂ 浓度增加促进了细胞增殖、细胞增长等基因表达,从而增加了单叶面积^[29]。高 CO₂ 浓度(550 $\mu\text{mol/mol}$)显著增加了短花针茅植株的生物量,CO₂ 是植物光合作用的底物,CO₂ 浓度升高的“施肥效应”将增加光合速率,进而促使植株总生物量增加^[7]。

水分是影响植物生长发育的重要环境因子,水分过少将对植物造成旱害,过多则造成涝害^[24]。降水量变化对短花针茅株高的影响在不同生长期不同,降水量增加使得生长中期(7月)短花针茅的株高显著增加;生长后期(8月),与对照(W_3)相比降水量减少(W_1 , W_2)导致短花针茅株高显著降低,降水增多(W_4 , W_5)对短花针茅株高影响不显著。在一定降水量变化范围内短花针茅植株总叶面积、单叶面积、叶数和生物量随降水量增加而增加。但在降水量增加超过 15% 后增加趋势变缓,降水量增加 15% (W_4) 与增加 30% (W_5) 两种处理对生长指标影响并不显著,降水量增加 30% (W_5) 生物量甚至有降低趋势,可能此时已产生涝渍胁迫。干旱胁迫下单叶面积减少和叶数的降低将造成植株总叶面积减小,说明植株在受到水分胁迫时通过减小蒸腾面积减少水分损失来维持植株体内水分平衡,反映了植物对干旱胁迫的适应机制^[14]。

一般而言,CO₂ 浓度升高具有“施肥效应”,水分减少对植物的影响则为负效应,高 CO₂ 浓度下发生土壤干旱胁迫时,CO₂ 施肥效应受到一定程度的抑制^[31]。但也有研究表明,高 CO₂ 浓度下玉米和高粱的产量增幅干旱条件明显大于湿润条件^[13]。本研究表明,在 W_2 — W_5 四个降水量水平条件下,高浓度 CO₂(550 $\mu\text{mol/mol}$)显著增加了短花针茅植株总叶面积、单叶面积和生物量,在降水量减少 15% (W_2) 条件下增加幅度最大;CO₂ 浓度升高与降水量变化对短花针茅植株生物量有较强的交互作用。CO₂ 浓度的升高在一定程度上可以缓解干旱胁迫对植株的影响^[6],但降水量减少 30% (W_1) 则抑制了 CO₂ 浓度升高的效应。本研究还表明,CO₂ 浓度升高也将缓解涝渍胁迫(W_5),这可能是由于 CO₂ 浓度升高增加了植物叶面积导致蒸腾作用增强,进而起到缓解水分涝渍胁迫的效果。

4 结论

利用开顶式生长箱(OTC)模拟 CO₂ 浓度升高和降水量变化协同作用对荒漠草原优势物种短花针茅的影响表明:降水量变化显著影响短花针茅的生长特性。降水量减少 30% 将严重影响短花针茅植株的存活率、株高、叶面积、生物量等,而降水量增加 15% 与 30% 对短花针茅存活影响不显著,对生物量、叶数等影响显著,但降水量增加 30% 已对短花针茅产生轻微的涝渍胁迫。CO₂ 浓度升高对降水量减少 30% 条件下的短花针茅影响不显著,但对其它降水量水平下短花针茅的生物量、叶面积等影响显著,可能是降水量严重减少限制了 CO₂ 浓度升高对短花针茅产生的施肥效应;同时 CO₂ 浓度升高会对轻度干旱和涝渍产生缓解作用。这为阐明干旱和干旱区生态系统优势植物对全球变化的响应和适应机理,分析其脆弱性提供了实验支持。

致谢:感谢孙敬松、孙晓红、张彦敏、刘涛、吕晓敏、侯彦会、宋健等对实验给予的帮助。

References:

- [1] Mauri A. Field experiments using CO₂ enrichment: a comparison of two main methods. *Iforest: Biogeosciences and Forestry*, 2010, 3(1): 109-112.
- [2] IPCC. Climate change 2007: synthesis report // Core Writing Team, Pachauri R K, Reisinger A, eds. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva, Switzerland: IPCC, 2007.
- [3] Zhao M, Wang X W, Mao Z J. The effect of CO₂ concentration and temperature on chlorophyll content of *Quercus mongolica* Fisch. under different nitrogen levels. *Bulletin of Botanical Research*, 2006, 26(3): 337-341.
- [4] Niu Y F, Zong X B, Du S T, Huang L D, Zhang Y S. Effect of elevated CO₂ on morphology change of plant roots and its regulatory mechanism. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(1): 240-246.
- [5] Baldocchi D. Global change: the grass response. *Nature*, 2011, 476(7359): 160-161.
- [6] Yin F H, Li X L, Dong Y S, Xie Z M, Gao Z J, He S, Liu C Y. Effect of elevated CO₂ on ecosystem and C-N coupling in arid and semi-arid region. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(2): 235-244.
- [7] Ge Y, Jie D M, Guo J X, Liu H M, Shi L X. Response of phytoliths in *Leymus chinensis* to the simulation of elevated global CO₂ concentrations in Songnen grassland. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(32): 3703-3708.
- [8] Hou Y, Yang H C, Wang K Y. Responses of morphological structure and competition capability of dominant plant species in subalpine timberline to elevated atmospheric CO₂ concentration and air temperature. *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(11): 2413-2420.
- [9] Morgan J A, LeCain D R, Pendall E, Blumenthal D M, Kimball B A, Carrillo Y, Williams D G, Heisler-White J, Dijkstra F A, West M. C₄ grasses prosper as carbon dioxide eliminates desiccation in warmed semi-arid grassland. *Nature*, 2011, 476(7359): 202-205.
- [10] Zheng Y R, Xie Z X, Rimmington G M, Yu Y J, Gao Y, Zhou G S, An P, Li X J, Tsuji W, Shimizu H. Elevated CO₂ accelerates net assimilation rate and enhance growth of dominant shrub species in a sand dune in central Inner Mongolia. *Environmental and Experimental Botany*, 2010, 68(1): 31-36.
- [11] Hikosaka K, Onoda Y, Kinugasa T, Nagashima H, Anten N P R, Hirose T. Plant responses to elevated CO₂ concentration at different scales leaf, whole plant, canopy, and population. *Ecological Research*, 2005, 20(3): 243-253.
- [12] Ainsworth E A, Long S P. What have we learned from 15 years of free-air CO₂ enrichment (FACE)? A meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO₂. *New Phytologist*, 2005, 165(2): 351-372.
- [13] Wang Y X, Yang L X, Manderscheid R, Wang Y L. Progresses of free-air CO₂ enrichment (FACE) researches on C₄ crops: a review. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(5): 1450-1459.
- [14] Li Y H, Lu Q, Wu B, Zhu Y J, Liu D J, Zhang J X, Jin Z H. A review of leaf morphology plasticity linked to plant response and adaptation characteristics in arid ecosystems. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, 36(1): 88-98.
- [15] Jia M Q, Gao Y B, Yang Y. Leaf traits of *Stipa krylovii* Roshev. and *S. grandis* P. Smirn. in middle and eastern Inner Mongolia steppe. *Journal of Tianjin Normal University: Natural Science Edition*, 2010, 30(1): 57-63.
- [16] Tian Q, Cao Z Z, Wang G H. Response of leaf traits of 14 plant species in typical steppe to water gradient in Inner Mongolia. *Grassland and Turf*, 2008, (5): 23-26.
- [17] Huang J Y, Yuan Z Y, Li L H. Changes in N, P and specific leaf area of green leaves of *Leymus Chinensis* along nitrogen, phosphorus and water gradients. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2009, 33(3): 442-448.
- [18] Wang K, Yang J, Chen J K. Comparison of morphological traits between alligator weed and two congeners under different water and nutrient conditions. *Biodiversity Science*, 2010, 18(6): 615-621.
- [19] Yu Q S, Zhao M, Li C L, Li A D. Growth and biomass allocation of *Chilopsis linearis* under different soil water stresses. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(1): 7-12.
- [20] Dai L M, Li Q R, Wang M, Ji L Z. Responses of the seedlings of five dominant tree species in Changbai Mountain to soil water stress. *Journal of*

- Forestry Research, 2003, 14(3): 191-196.
- [21] Kang S Z, Zhang F C, Hu X T, Zhang J H. Benefits of CO₂ enrichment on crop plants are modified by soil water status. *Plant and Soil*, 2002, 238(1): 69-77.
- [22] Xu Z Z, Zhou G S, Xiao C W, Wang Y H. Responses of two dominated desert shrubs to soil drought under doubled CO₂ condition. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(10): 2186-2191.
- [23] Guo J P, Gao S H. Impacts of CO₂ Enrichment and soil drought on C, N accumulation and distribution in *stipa baicalensis*. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(2): 118-121.
- [24] Jiao J Y, Chen K, Yin C Y. Effects of soil moisture content on growth, physiological and biochemical characteristics of *Jatropha curcas* L. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(16): 4460-4466.
- [25] Du L X, Li Q F. Effects of grazing on reproductive characteristics of *stipa breviflora* in Desert Steppe. *Journal of Shanxi agricultural university: Natural Science Edition*, 2008, 28(1): 4-6.
- [26] Zhang P, Zhang W H, Miao X L, Li H, Liu L L, Zhang W W. Effects of Doubled CO₂ Concentration on Growth and Photosynthesis of Soybean. *Soybean science*, 2010, 29(1): 64-67.
- [27] Driscoll S P, Prins A, Olmos E, Kunert K J, Foyer C H. Specification of adaxial and abaxial stomata, epidermal structure and photosynthesis to CO₂ enrichment in maize leaves. *Journal of Experimental Botany*, 2006, 57(2): 381-390.
- [28] Chen G Y. Advances in the study on response and acclimation of plants to free-air CO₂ enrichment (FACE). *Journal of Plant Physiology and Molecular Biology*, 2003, 29(6): 479-486.
- [29] Ainsworth E A, Rogers A, Vodkin L O, Walter A, Schurr U. The effects of elevated CO₂ concentration on soybean gene expression. An analysis of growing and mature leaves. *Plant Physiology*, 2006, 142(1): 135-147.
- [30] Kang H. Study on effect of increasing CO₂ concentration of environment on plant growth. *Auhui Agricultural Science Bulletin*, 2008, 14(22): 42-45.
- [31] Wang M Y, Hao T H, Zhang W W, Shi Y. Effects of interactions between elevated CO₂ concentration and temperature, drought on physiological processes of plants. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2007, 25(2): 99-103.

参考文献:

- [3] 赵蕊, 王秀伟, 毛子军. 不同氮素浓度下 CO₂ 浓度、温度对蒙古栎 (*Quercus mongolica*) 幼苗叶绿素含量的影响. *植物研究*, 2006, 26(3): 337-341.
- [4] 牛耀芳, 宗晓波, 都韶婷, 黄利东, 章永松. 大气 CO₂ 浓度升高对植物根系形态的影响及其调控机理. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(1): 240-246.
- [6] 尹飞虎, 李晓兰, 董云社, 谢宗铭, 高志建, 何帅, 刘长勇. 干旱半干旱区 CO₂ 浓度升高对生态系统的影响及碳氮耦合研究进展. *地球科学进展*, 2011, 26(2): 235-244.
- [7] 葛勇, 介冬梅, 郭继勋, 刘红梅, 石连旋. 松嫩草原羊草植株对模拟全球 CO₂ 浓度升高的响应研究. *科学通报*, 2010, 55(27/28): 2735-2741.
- [8] 侯颖, 杨红超, 王开运. 亚高山林线优势种形态结构和竞争力对 CO₂ 浓度和温度升高的响应. *生态学杂志*, 2011, 30(11): 2413-2420.
- [13] 王云霞, 杨连新, Manderscheid R, 王余龙. C₄ 作物 FACE (free-air CO₂ enrichment) 研究进展. *生态学报*, 2011, 31(5): 1450-1459.
- [14] 李永华, 卢琦, 吴波, 朱雅娟, 刘殿君, 张金鑫, 靳占虎. 干旱区叶片形态特征与植物响应和适应的关系. *植物生态学报*, 2012, 36(1): 88-98.
- [15] 贾美清, 高玉葆, 杨勇. 内蒙古中东部草原克氏针茅和大针茅的叶性分析. *天津师范大学学报: 自然科学版*, 2010, 30(1): 57-63.
- [16] 田青, 曹致中, 王国宏. 内蒙古多伦典型草原 14 种植物比叶面积对水分梯度变化的响应. *草原与草坪*, 2008, (5): 23-26.
- [17] 黄菊莹, 袁志友, 李凌浩. 羊草绿叶氮、磷浓度和比叶面积沿氮、磷和水分梯度的变化. *植物生态学报*, 2009, 33(3): 442-448.
- [18] 王坤, 杨继, 陈家宽. 不同土壤水分和养分条件下喜旱莲子草与同属种生长状况的比较研究. *生物多样性*, 2010, 18(6): 615-621.
- [19] 尉秋实, 赵明, 李昌龙, 李爱德. 不同土壤水分胁迫下沙漠蒿的生长及生物量的分配特征. *生态学杂志*, 2006, 25(1): 7-12.
- [22] 许振柱, 周广胜, 肖春旺, 王玉辉. CO₂ 浓度倍增条件下土壤干旱对两种沙生灌木碳氮含量及其适应性的影响. *生态学报*, 2004, 24(10): 2186-2191.
- [23] 郭建平, 高素华. 高 CO₂ 浓度和土壤干旱对贝加尔针茅 C, N 积累和分配的影响. *水土保持学报*, 2005, 19(2): 118-121.
- [24] 焦娟玉, 陈珂, 尹春英. 土壤含水量对麻疯树幼苗生长及其生理生化特征的影响. *生态学报*, 2010, 30(16): 4460-4466.
- [25] 杜利霞, 李青丰. 放牧对荒漠草原短花针茅繁殖特性的影响. *山西农业大学学报: 自然科学版*, 2008, 28(1): 4-6.
- [26] 张朋, 张文会, 苗秀莲, 李会, 刘丽丽, 张雯雯. CO₂ 浓度倍增对大豆生长及光合作用的影响. *大豆科学*, 2010, 29(1): 64-67.
- [28] 陈根云. 植物对开放式 CO₂ 浓度增高 (FACE) 的响应与适应研究进展. *植物生理与分子生物学报*, 2003, 29(6): 479-486.
- [30] 康辉. 环境 CO₂ 浓度升高对植物的影响研究. *安徽农学通报*, 2008, 14(22): 42-45.
- [31] 王美玉, 赵天宏, 张巍巍, 史奕. CO₂ 浓度升高与温度、干旱相互作用对植物生理生态过程的影响. *干旱地区农业研究*, 2007, 25(2): 99-103.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 14 Jul. ,2013 (Semimonthly)

CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

A review of the researches on *Alectoris* partridge SONG Sen, LIU Naifa (4215)

Autecology & Fundamentals

Effects of precipitation and nitrogen addition on photosynthetically eco-physiological characteristics and biomass of four tree seedlings in Gutian Mountain, Zhejiang Province, China YAN Hui, WU Qian, DING Jia, et al (4226)

Effects of low temperature stress on physiological-biochemical indexes and photosynthetic characteristics of seedlings of four plant species SHAO Yiruo, XU Jianxin, XUE Li, et al (4237)

Decomposition characteristics of maize roots derived from different nitrogen fertilization fields under laboratory soil incubation conditions CAI Miao, DONG Yanjie, LI Baijun, et al (4248)

The responses of leaf osmoregulation substance and protective enzyme activity of different peanut cultivars to non-sufficient irrigation ZHANG Zhimeng, SONG Wenwu, DING Hong, et al (4257)

Interannual variation of soil seed bank in *Picea schrenkiana* forest in the central part of the Tianshan Mountains LI Huadong, PAN Cunde, WANG Bing, et al (4266)

Physiological & ecological effects of companion-planted grow seedlings of two crops in the same hole LI Lingli, GUO Hongxia, HUANG Genghua, et al (4278)

Effects of magnesium, manganese, activated carbon and lime and their interactions on cadmium uptake by wheat ZHOU Xiangyu, FENG Wenqiang, QIN Yusheng, et al (4289)

Effects of increased concentrations of gas CO₂ on mineral ion uptake, transportation and distribution in *Phyllostachys edulis* ZHUANG Minghao, CHEN Shuanglin, LI Yingchun, et al (4297)

Effects of pH, Fe and Cd concentrations on the Fe and Cd adsorption in the rhizosphere and on the root surfaces of rice LIU Danqing, CHEN Xue, YANG Yazhou, et al (4306)

Effects of low-light stress on maize ear development and endogenous hormones content of two maize hybrids (*Zea mays* L.) with different shade-tolerance ZHOU Weixia, LI Chaohai, LIU Tianxue, et al (4315)

Effects of maize || peanut intercropping on photosynthetic characters and yield forming of intercropped maize JIAO Nianyuan, NING Tangyuan, YANG Mengke, et al (4324)

Cloning root system distribution and architecture of different forest age *Populus euphratica* in Ejina Oasis HUANG Jingjing, JING Jialin, CAO Dechang, et al (4331)

Impact of vegetation interannual variability on evapotranspiration CHEN Hao, ZENG Xiaodong (4343)

Mating behavior of *Pachycrepoides vindemmiae* and the effects of male mating times on the production of females SUN Fang, CHEN Zhongzheng, DUAN Bisheng, et al (4354)

Component analysis and bioactivity determination of fecal extract of *Locusta migratoria tibetensis* (Chen) WANG Haijian, LI Yili, LI Qing, et al (4361)

Effects of different rice varieties on larval development, survival, adult reproduction, and flight capacity of *Cnaphalocrocis medinalis* (Guenée) LI Xia, XU Xiuxiu, HAN Lanzhi, et al (4370)

Population, Community and Ecosystem

Genetic structure of the overwintering Asian corn borer, *Ostrinia furnacalis* (Guenée) collections in Shandong of China based on *mtCOII* gene sequences LI Lili, YU Yi, GUO Dong, TAO Yunli, et al (4377)

The structure and diversity of insect community in Taihu Wetland HAN Zhengwei, MA Ling, CAO Chuanwang, et al (4387)

Annual variation pattern of phytoplankton community at the downstream of Xijiang River WANG Chao, LAI Zini, LI Xinhui, et al (4398)

Effect of species dispersal and environmental factors on species assemblages in grassland communities WANG Dan, WANG Xiao'an, GUO Hua, et al (4409)

- Cyanobacteria diversity in biological soil crusts from different erosion regions on the Loess Plateau: a preliminary result YANG Lina, ZHAO Yunge, MING Jiao, et al (4416)
- Landscape, Regional and Global Ecology**
- Zoning for regulating of construction land based on landscape security pattern WANG Siyi, OU Minghao (4425)
- Fragmentation process of wetlands landscape in the middle reaches of the Heihe River and its driving forces analysis ZHAO Ruifeng, JIANG Penghui, ZHAO Haili, et al (4436)
- Analysis on grassland degradation in Qinghai Lake Basin during 2000—2010 LUO Chengfeng, XU Changjun, YOU Haoyan, et al (4450)
- Research on soil erosion based on Location-weighted landscape index (LWLI) in Guanchuanhe River basin, Dingxi, Gansu Province LI Haifang, WEI Wei, CHEN Jin, et al (4460)
- Effects of host density on parasitoids and hyper-parasitoids of cereal aphids in different agricultural landscapes GUAN Xiaoqing, LIU Junhe, ZHAO Zihua (4468)
- Effects of interactive CO₂ concentration and precipitation on growth characteristics of *Stipa breviflora* SHI Yaohui, ZHOU Guangsheng, JIANG Yanling, et al (4478)
- Resource and Industrial Ecology**
- Eco-service efficiency assessment method of urban land use: a case study of Changzhou City, China YANG Wenrui, LI Feng, WANG Rusong, et al (4486)
- Changes in phosphorus consumption and its environmental loads from food by residents in Xiamen City WANG Huina, ZHAO Xiaofeng, TANG Lina, et al (4495)
- Research Notes**
- Intercropping enhances the farmland ecosystem services SU Benying, CHEN Shengbin, LI Yonggeng, et al (4505)
- Assessment indicator system of eco-industry in mining area WANG Guangcheng, WANG Huanhuan, TAN Lingling (4515)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于 1981 年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科工作者,探索生态学奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的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;新书评价和学术、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

本期责任副主编 骆世明

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 33 卷 第 14 期 (2013 年 7 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 14 (July, 2013)

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	王如松	Editor-in-chief	WANG Rusong
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:100717	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 90.00 元