

喜旱莲子草和接骨草竞争对模拟增温的响应

班芷桦 王 琼*

西华师范大学生命科学学院, 西南野生动植物资源保护教育部重点实验室, 四川南充 637002

摘 要 研究外来入侵植物与本地植物种竞争对气候变暖的响应, 对于预测未来气候变化背景下入侵植物的入侵趋势、理解其入侵机制以及筛选生态替代种具有重要的意义。以入侵我国的外来植物喜旱莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)和本地植物种接骨草(*Sambucus chinensis*)为材料, 通过两种植物单栽、纯栽和混栽, 采用红外辐射加热器模拟增温, 研究了两种植物竞争对模拟增温的响应。结果表明: (1)在模拟增温期间(2013年5–12月), 增温组空气平均温度比不增温组提高了0.47 °C, 相对湿度降低了1.87%; (2)混栽的喜旱莲子草除根冠比与单栽无显著差异外, 其余各生物量和根系形态指标均显著低于单栽喜旱莲子草; 无竞争、种间竞争和种内竞争三种竞争间, 接骨草除根冠比、细根与总根生物量比、比根长和比根表面积无显著差异外, 其余指标均呈现无竞争>种间竞争>种内竞争的趋势; (3)无竞争、种间竞争和种内竞争三种条件下, 喜旱莲子草各指标在增温和不增温处理间差异均不显著, 而接骨草总生物量和根生物量在无竞争和种间竞争条件下增温处理均显著低于不增温处理, 在种内竞争条件下则相反; (4)增温使接骨草的相对拥挤系数降低, 接骨草对温度升高反应敏感, 而喜旱莲子草则表现出一定的适应性。由此推测, 在中度遮阴陆生生境中, 接骨草有望成为喜旱莲子草生物替代控制的材料。

关键词 喜旱莲子草, 竞争, 接骨草, 增温

引用格式: 班芷桦, 王琼 (2015). 喜旱莲子草和接骨草竞争对模拟增温的响应. 植物生态学报, 39, 43–51. doi: 10.17521/cjpe.2015.0005

Responses of the competition between *Alternanthera philoxeroides* and *Sambucus chinensis* to simulated warming

BAN Zhi-Hua and WANG Qiong*

College of Life Science, China West Normal University, Key Laboratory of Southwest China Wildlife Resources Conservation (Ministry of Education), Nan-chong, Sichuan 637002, China

Abstract

Aims Research on how competition between invasive and native plants responds to simulated warming can provide insights into the trends and mechanisms of plant invasion, and profoundly helps to screen ecological substitutes under future climates. Our objective was to explore the effects of simulated warming on competition between an invasive species *Alternanthera philoxeroides* and a native plant *Sambucus chinensis*.

Methods An experiment was conducted from May to December 2013 with the same five competition scenarios being arranged for under both warming and non-warming environments. Simulated warming was created by using infrared heater. Competition scenarios included non-competition (one plant per pot), intraspecific competition (two plants of the same species per pot) and interspecific competition (one plant for each species per pot). Biomass and root morphological variables were investigated of the plants under different warming and competition treatments.

Important findings (1) The average air temperature of the simulated warming environment was 0.47 °C higher than that of the non-warming environment, but the relative air humidity was decreased by 1.87% by the simulated warming. (2) Compared with the non-competition scenario, the values of all variables in *A. philoxeroides* under interspecific competition were significantly lower except the root/shoot ratio, which had no significant difference between the non-competition and interspecific competition scenarios. Root/shoot ratio, the biomass ratio of fine root to total root, relative root length and relative root surface area in *S. chinensis* did not show significant differences among the three competition scenarios; whereas other variables in *S. chinensis* decreased significantly following a pattern of non-competition > interspecific competition > intraspecific competition. (3) The effect of warming was not significant under any of the three competition scenarios in *A. philoxeroides*, but it varied with

competition scenarios in *S. chinensis*. The warming treatment significantly decreased the total biomass and root biomass in *S. chinensis* under non-competition and interspecific competition scenarios, but it increased the values of the two variables in *S. chinensis* under the intraspecific competition scenario. (4) The relative crowding coefficient for *S. chinensis* decreased with warming, reflecting the sensitivity of the species to warming; whereas *A. philoxeroides* had some adaptability to warming. Therefore, *S. chinensis* can be a potential ecological substitute for *A. philoxeroides* under moderate shade in terrestrial habitat.

Key words *Alternanthera philoxeroides*, competition, *Sambucus chinensis*, warming

Citation: Ban ZH, Wang Q (2015). Responses of the competition between *Alternanthera philoxeroides* and *Sambucus chinensis* to simulated warming. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 39, 43–51. doi: 10.17521/cjpe.2015.0005

气候变暖是全球环境变化的重大问题。1880–2012年, 全球地表平均温度呈线性上升0.85 °C, 2003–2012年地表平均温度比1850–1900年升高了0.78 °C。气候模型预测显示, 与1850–1900年相比, 21世纪全球平均地表温度增幅可能超过1.5–2.0 °C (IPCC, 2013)。生物入侵是全球变化的又一重大问题。入侵物种具有较强的环境适应能力(Chen *et al.*, 2013; Keser *et al.*, 2014)和竞争能力(Skálová *et al.*, 2013; Yuan *et al.*, 2014), 在入侵地大面积繁衍扩散, 对生态系统结构乃至人类健康可造成严重威胁(付增娟, 2005; Bhattarai & Cronin, 2014)。

气温升高通过改变植物体内的酶活性、土壤温度和水分以及土壤微生物特性等途径影响植物的吸收功能和代谢速率, 进而对植物形态、生物量及其分配等产生影响(常丽, 2013; 张万灵等, 2013)。有研究指出: 气候变暖可通过增加土壤温度、促进土壤微生物活动, 促进植物对土壤营养元素的吸收(Thakur *et al.*, 2014)。也有研究指出, 气候变暖可通过改变入侵种及其天敌的关系影响入侵趋势(Lu *et al.*, 2013)。

喜旱莲子草(*Alternanthera philoxeroides*)是一种世界性的恶性入侵植物, 其表型可塑性强, 生境适应范围广, 无性繁殖旺盛, 其较强的化感作用能抑制生境内伴生杂草或其他植物的生长, 从而可为自身争取更多的水分和养分, 造成入侵地农作物减产、生物多样性降低等严重的经济和生态危害(潘晓云等, 2006; 喻大昭等, 2008; 甄伟伟, 2012)。土壤增温有利于提高喜旱莲子草根对土壤资源的吸收效率, 从而减少根系在土壤空间延伸及根系生物量的投资(谢磊, 2009), 还有学者则通过数学模型预测喜旱莲子草在未来7–13年将蔓延至印度的整个武勒尔湖面(Masoodi *et al.*, 2013)。

利用本地种进行生态替代控制已成为入侵生境

生态恢复的一种有效措施(张瑞海, 2010; 刘冰, 2011; 张震等, 2012; 卢向阳等, 2013)。近年来, 观察到在一些林下和林缘生境中, 接骨草(*Sambucus chinensis*)生长旺盛, 并逐渐取代喜旱莲子草成为草本层的优势种。为此, 提出以下科学问题: 接骨草能抗衡喜旱莲子草入侵并取代喜旱莲子草的原因是什么? 这两种植物的竞争是否受全球气候变暖的影响? 本研究采用红外辐射加热器模拟增温, 结合两种植物单栽、纯栽与混栽的方法, 研究两种植物在不同竞争条件下的生长特征对增温的响应, 旨在阐明两种植物的竞争机制及其对短期增温的响应, 为全球气候变暖背景下生物替代控制喜旱莲子草的研究提供科学依据。

1 研究区域和研究方法

1.1 研究区域

本实验地点位于四川省南充市西华师范大学生命科学学院试验基地(106.02° E, 30.23° N, 海拔276 m)。该地区属亚热带湿润型季风气候, 年日照时数1 354.7 h, 年平均气温17.6 °C, 年降水量1 054.5 mm, 年蒸发量650–670 mm, 全年无霜期达301天。土壤为红棕色紫泥土, 胶体品质差, 土壤肥力不高(江贤盛和兰瑞成, 1993)。

1.2 研究方法

2013年3月下旬, 于西华师范大学试验地边采集长势良好、大小相近的喜旱莲子草和接骨草幼苗, 喜旱莲子草匍匐茎长约10 cm, 接骨草株高约10 cm, 栽种于底部有孔的塑料花盆(50 cm × 40 cm × 10 cm)中。取园土、市售腐殖土及沙子(15.0 : 1.0 : 0.2)混合均匀、捣碎, 拣出碎石和杂草, 倒入塑料花盆。每盆施复合肥10 g。土肥混匀, 并用灭菌剂灭菌后用于栽种。实验共设置10个小区: 5个小区为增温小区, 即增温组, 分别为喜旱莲子草一株单栽、两株纯栽,

接骨草一株单栽、两株纯栽以及喜旱莲子草与接骨草各一株混栽;另5个小区为不增温小区,即不增温组,栽种同增温小区,仅不进行增温处理。每个小区16盆重复,按4×4放置,实验共计栽种160盆。进行增温处理的5个小区,红外辐射加热器(HS-2420, Kalglo Electronics, Bethlehem, USA)悬挂于4排花盆的中间上方,距盆土170 cm高处,随植株的生长高度及自然温度的变化适当调整悬挂高度。为了避免红外加热器正下方温度过高对植株生长造成不良影响,第2排和第3排花盆间距设置为20 cm。每隔10天调换里外两排花盆的位置并变换每盆方向以确保均匀增温。实验期间精心管理,以确保实验顺利进行。

11月下旬,每个小区挑选5盆长势良好的植株,分别收获其地上和地下部分,尽量避免损坏其根系,用自来水浸泡根系20 min后,轻轻洗净,带回实验室,每盆根系选取鲜质量20%左右,用根系扫描仪(EPSON J181A, Seiko Epson, Nagano, Japan)进行根系扫描,扫描时将接骨草根状茎和喜旱莲子草贮藏根上着生的吸收根即细根用剪刀贴着根部轻轻剪开,轻轻放进扫描盘里,并整理根系,避免重叠。用WinRHIZO PRO (Version. 2009 C)软件分析其根长、根表面积数据,并将扫描后的和未扫描的接骨草根状茎、喜旱莲子草贮藏根及细根并地上部分分装,放于烘箱,60℃烘至恒重,用电子天平(精度0.01 g)称其生物量。最后,用扫描得出的根长、根表面积数据除以扫描部分生物量占整盆根系生物量的比例,即得整盆植株根系的根长和根表面积。其中,纯栽小区植株的各指标值均为两株植物相应指标的和除以2后求得平均值。比根长(relative root length)和比根表面积(relative root surface area)分别用根长和根表面积除以根生物量获得。接骨草相对于喜旱莲子草的拥挤系数(relative crowding coefficient, RCC)则用公式 $RCC = RY_A/RY_B$ 计算, RY_A 为混栽种群中替代植物接骨草个体总生物量的平均值与两株纯栽种群中接骨草个体总生物量的平均值之比值; RY_B 为混栽种群中喜旱莲子草个体总生物量的平均值与两株纯栽种群中喜旱莲子草个体总生物量的平均值之比值。反之,也可以喜旱莲子草为研究对象计算其相对于接骨草的拥挤系数。植物根表面积预示着根系与土壤的接触状况,它在一定程度上反映了植物对资源的竞争能力,也可用于计算两种植物

的相对拥挤系数。

1.3 环境因子监测

2013年5月在各小区安装温湿度记录仪(DS1923G, Maxim/Dallas Semiconductor, Dallas, USA),每小时自动记录一次监测的空气温度和空气相对湿度。为避免直接照射的影响,将记录仪安装于第1排和第2排花盆间,距离盆土表面50 cm处,且在记录仪上方约10 cm处安放小塑料挡板,阻挡降雨对其造成的影响。6月份自然气温较高时,为避免增温处理使得温度过高对接骨草顶端生长造成不良影响,在整个实验区域上方覆盖一层遮阳网,适当降低实验区域温度,遮阳网透光度约为50%。

1.4 数据处理

所有数据均采用SPSS 17.0统计软件进行分析。若数据满足正态分布和方差齐性,则分别对喜旱莲子草和接骨草进行双因素(增温和竞争)方差分析(two-way ANOVA),分别对不同处理(NC0, 不增温无竞争; NC1, 不增温种内竞争; NC2, 不增温种间竞争; WC0, 增温无竞争; WC1, 增温种内竞争; WC2, 增温种间竞争)各指标进行单因素方差分析(one-way ANOVA),采用S-N-K法判断各处理间是否有显著差异。对不满足方差齐性且转换后仍不满足方差齐性的数据进行非参数检验(non-parametric test)。对5个增温和5个不增温小区分别求日平均温度和日平均湿度后,进行配对样本 t 检验。图形用Excel软件绘制。

2 结果和分析

2.1 红外辐射加热器的增温效应

配对样本 t 检验结果表明:2013年5–12月增温组平均气温比不增温组显著提高了0.47℃($t = 23.462, p < 0.001$),空气相对湿度显著降低了1.87%($t = 21.675, p < 0.001$)。其中,5–9月的气温比不增温组提高了0.60℃,而10–12月比不增温组提高了0.26℃(图1A)。由于温度升高,增温组的空气相对湿度(84.09%)低于不增温组(85.96%),5–9月增温组的空气相对湿度比不增温组降低2.48%,10–12月比不增温组降低0.78%(图1B)。

2.2 增温和竞争对喜旱莲子草生长的影响

竞争对喜旱莲子草各指标的影响显著,而增温及其与竞争联合处理对喜旱莲子草各指标的影响均不显著(图2)。

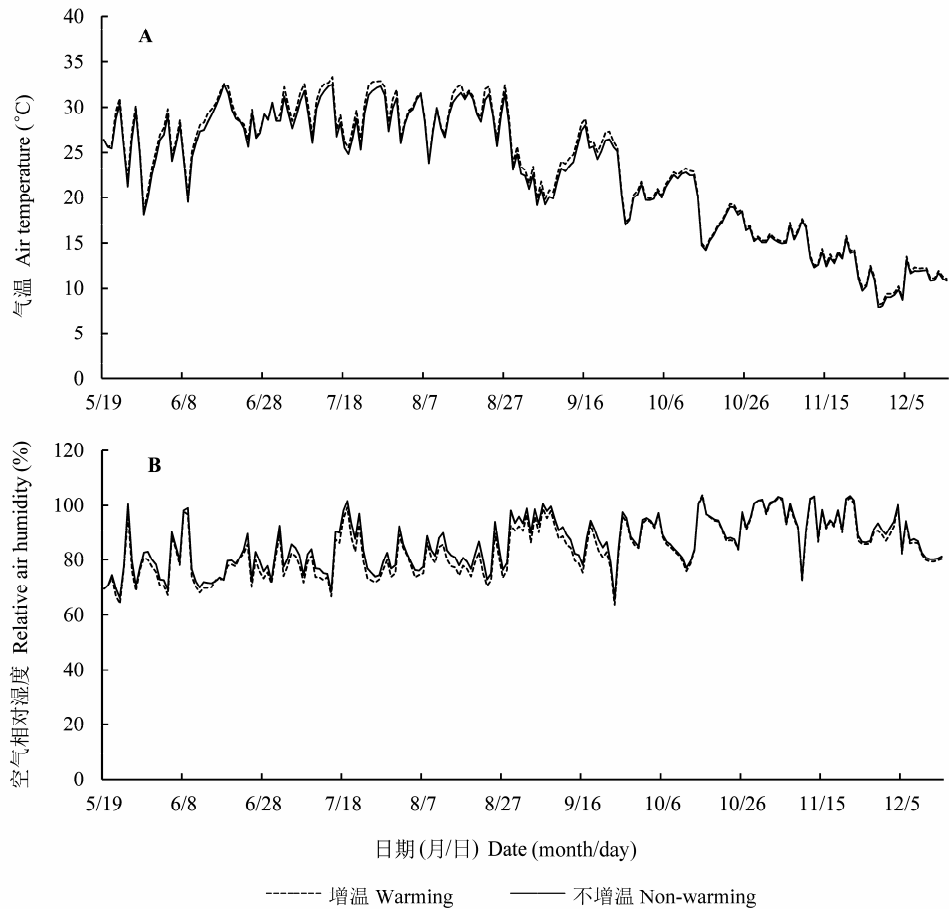


图1 2013年5–12月空气温度(A)和空气相对湿度(B)的变化。
Fig. 1 Variations of air temperature (A) and relative air humidity (B) from May to December 2013.

竞争对喜旱莲子草不同生长指标的影响有差异。无论增温与否,总生物量均是无竞争>种内竞争>种间竞争,且处理间差异显著,其中,种内竞争和种间竞争比无竞争在增温条件下分别降低48.56%和61.61%,不增温条件下分别降低42.37%和59.45%;根生物量和细根生物量均是无竞争显著大于种内竞争和种间竞争,而后两者无显著差异。根冠比呈现种间竞争>无竞争>种内竞争的趋势。细根与总根生物量比呈现种内竞争>无竞争>种间竞争的趋势,且处理间差异显著。比根长和比根表面积均呈种间竞争显著小于无竞争和种内竞争,而后两者无显著差异。非参数检验表明,根长与根表面积在3种竞争之间的差异格局与总生物量一致,种内竞争和种间竞争比无竞争根长分别降低了53.81%和72.20%,根表面积分别降低了53.68%和72.51%。

2.3 增温和竞争对接骨草生长的影响

增温和竞争不同程度地影响了接骨草生物量和根系形态特征,且二者的交互效应对总生物量、根生物量、根冠比和细根生物量影响显著(图3)。

单独增温与不增温相比,接骨草除细根与总根生物量比显著增加外($t = 3.921, p < 0.01$),其余各指标差异均不显著。然而,不同竞争条件下,各指标对增温的响应却有差异,无竞争和种间竞争条件下的总生物量和根生物量以及种间竞争条件下的根长和根表面积,增温均显著低于不增温,而在种内竞争条件下,除比根长和比根表面积增温与不增温无显著差异外,其余各指标增温均显著大于不增温。三种竞争间除根冠比、细根与总根生物量比、比根长和比根表面积无显著差异外,其余指标均为无竞争>种间竞争>种内竞争,且处理间差异显著。增温条件下,总生物量、根生物量和细根生物量均为无竞

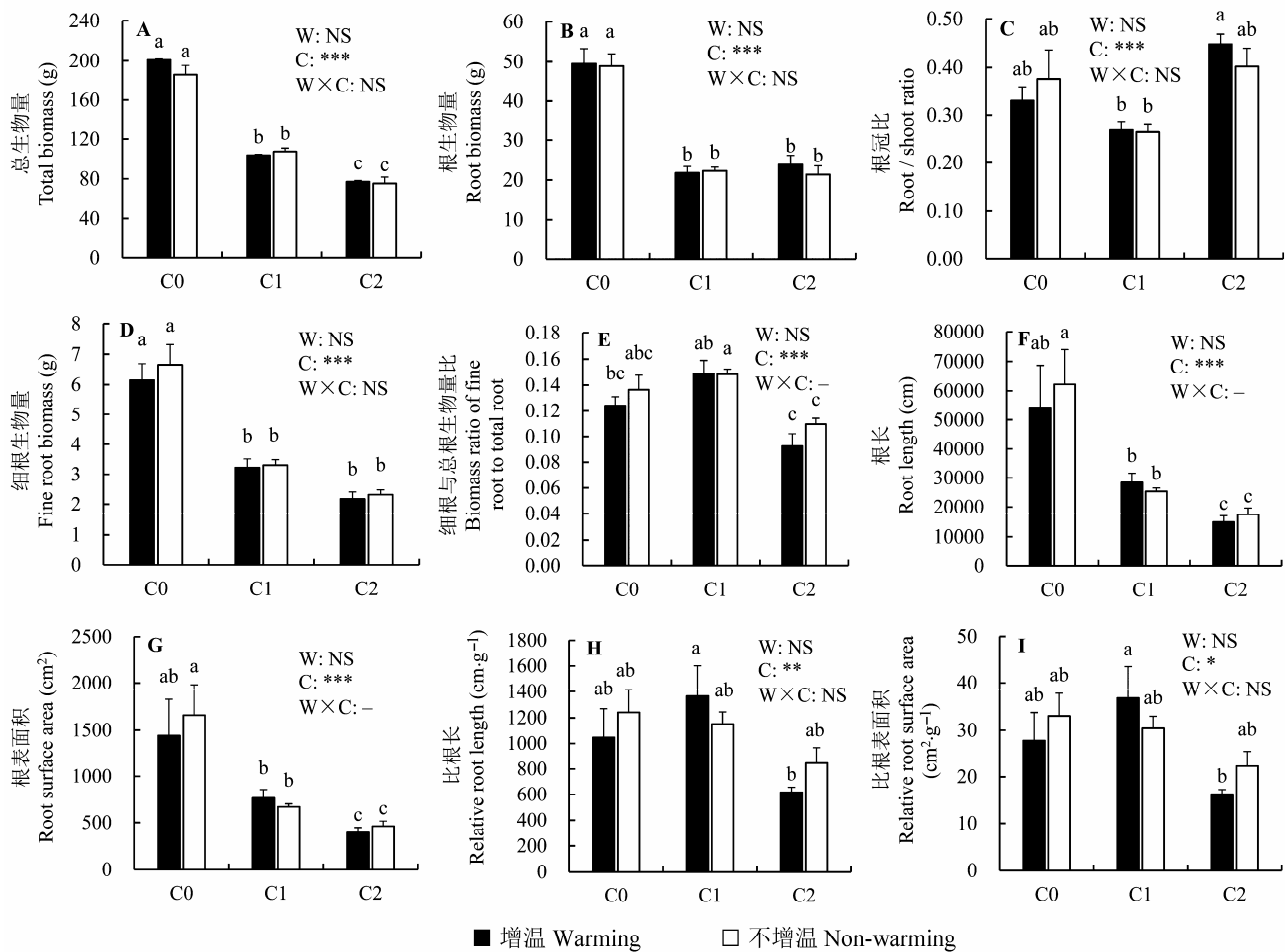


图2 喜旱莲子草在不同增温和竞争条件下各指标值(平均值±标准误差)。C0, 无竞争; C1, 种内竞争; C2, 种间竞争。不同小写字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$)。C, 竞争效应; W, 增温效应; W×C, 增温与竞争交互效应。NS, 没有显著差异; *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$; ***, $p < 0.001$; W×C: -, 该组数据进行非参数检验。

Fig. 2 Variables of *Alternanthera philoxeroides* under different warming and competition treatments (mean ± SE). C0, non-competition; C1, intraspecific competition; C2, interspecific competition. Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments ($p < 0.05$). C, competition effect; W, warming effect; W×C, interactive effect of warming and competition. NS, no significant difference; *, $p < 0.05$; **, $p < 0.01$; ***, $p < 0.001$; W×C: -, the data in the group have been tested by Kruskal-Wallis H (K).

争显著大于种内竞争和种间竞争,而后两者间无显著差异;不增温条件下,上述3个指标均为无竞争>种间竞争>种内竞争,且处理间差异显著,根冠比、根长和根表面积则均为种内竞争显著低于无竞争和种间竞争,而后两者间无显著差异。

2.4 相对拥挤系数

用个体总生物量(图4A)和根表面积(图4B)计算得出,接骨草的相对拥挤系数在增温和不增温条件下均大于1,而喜旱莲子草在两种条件下均小于1,且接骨草在不增温条件下的相对拥挤系数高于增温条件下。另外,用根表面积计算得出相对拥挤系数在物种间的差异及其随温度的变化趋势与用个体总生

物量计算所得结果一致,即接骨草对喜旱莲子草的根系竞争效应及其对增温的响应和整株植株一致。

3 讨论

3.1 喜旱莲子草和接骨草的竞争能力分析

一般认为,植物通过表型可塑性和改变生物量格局等实现对资源的竞争(马晓东等, 2012; 徐波等, 2013; 朱强根等, 2013)。本研究中,接骨草地下部分生物量显著大于喜旱莲子草,在对水分和养分的竞争中占据优势。

尽管混栽条件下两种植物的生长与单栽相比均受到抑制,但是接骨草的下降幅度低于喜旱莲子

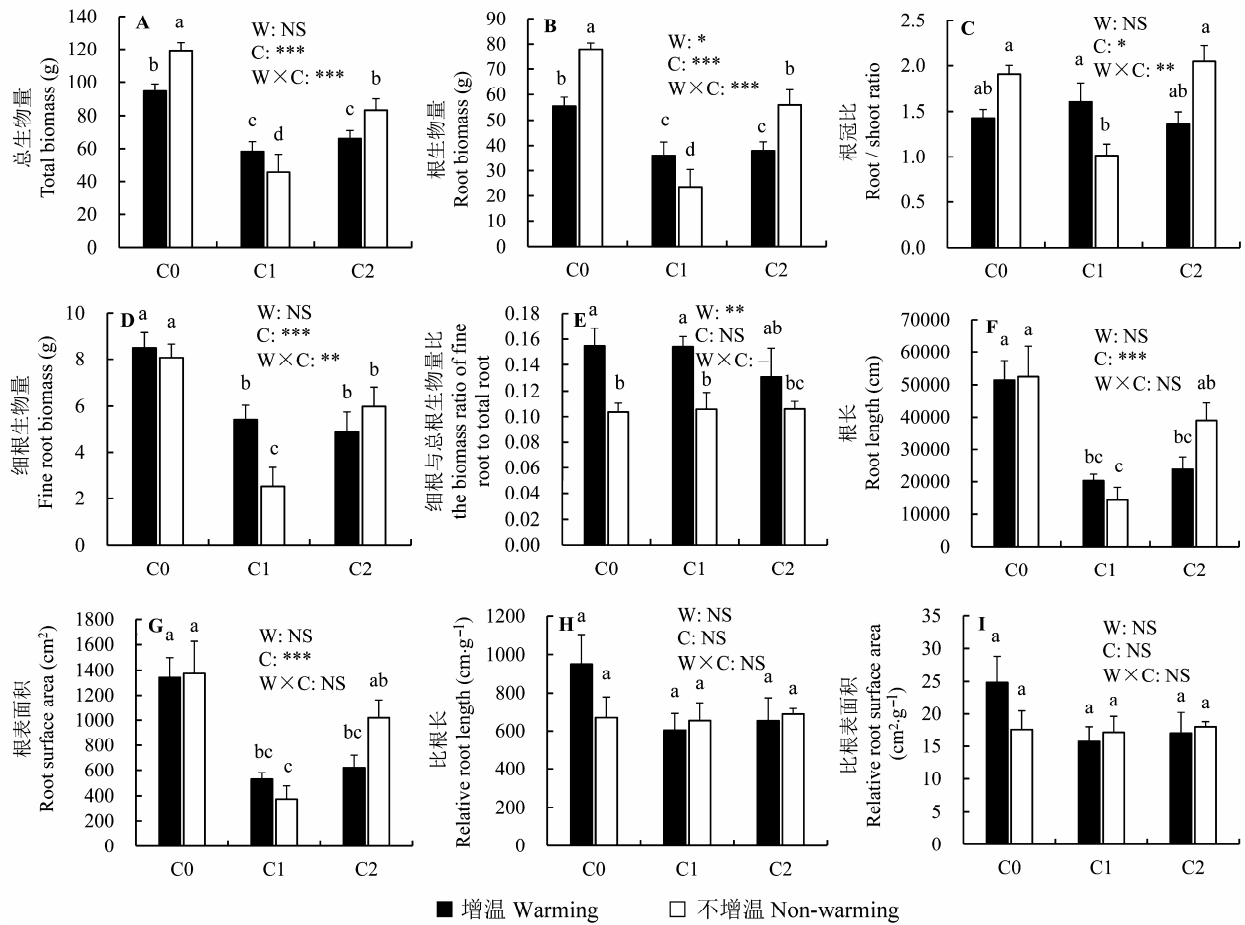


图3 接骨草在不同增温和竞争条件下各指标值(平均值±标准误差)。不同小写字母表示不同处理间差异显著($p < 0.05$); C0, C1, C2, C, W, W × C, NS, *, **, ***, W × C: -, 同图2。

Fig. 3 Variables of *Sambucus chinensis* under different warming and competition treatments (mean ± SE). Different lowercase letters indicate significant differences among different treatments ($p < 0.05$); C0, C1, C2, C, W, W × C, NS, *, **, ***, W × C: -, see Fig. 2.

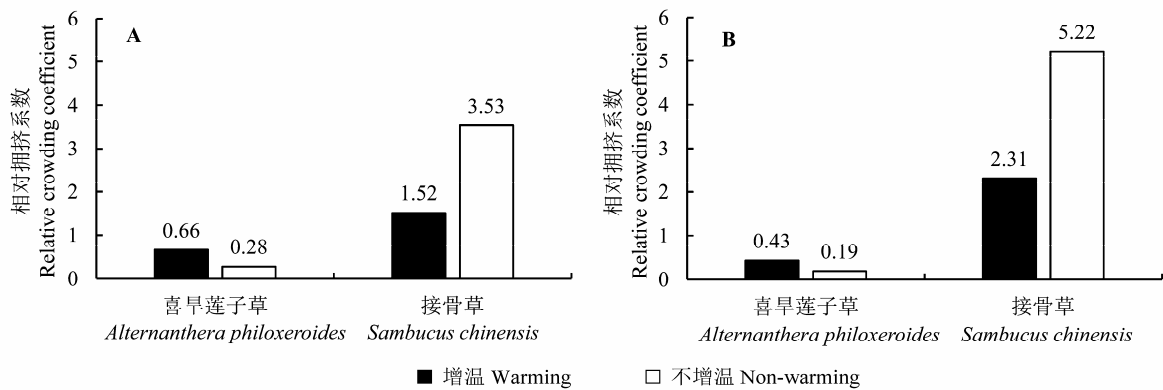


图4 不同增温处理下喜旱莲子草和接骨草的相对拥挤系数。A, 总生物量。B, 根表面积。

Fig. 4 Relative crowding coefficient for *Alternanthera philoxeroides* and *Sambucus chinensis* under different warming treatments. A, Total biomass. B, Root surface area.

草。同时, 在种间竞争条件下, 增温处理的接骨草根生物量和细根生物量显著高出喜旱莲子草59.17%

和124.29%; 不增温处理的接骨草根生物量、细根生物量、根长和根表面积分别显著高出喜旱莲子草

162.12%、161.54%、116.63%和114.89%。尽管增温后接骨草的相对拥挤系数有所下降,但无论增温与否,接骨草的相对拥挤系数都大于喜旱莲子草,即接骨草比喜旱莲子草具有更强的竞争能力。

两种植物的竞争能力与其生长特性密切相关。喜旱莲子草贮藏根较短,随着地上匍匐茎延伸而在茎节处扎根生长,对土壤资源利用不充分,且受到混栽接骨草高大植株的遮阴及竞争影响,其总生物量和根生物量比无竞争条件下均显著降低。而接骨草横走根状茎长且发达、多分支、木质化程度高,主要在地下延伸,与土壤接触面大,阻碍了喜旱莲子草根系在地下的延展,其根生物量和根长及根表面积均显著大于喜旱莲子草,更利于对土壤养分和水分的吸收和利用,抑制喜旱莲子草对资源的吸收,降低喜旱莲子草的入侵能力。

3.2 喜旱莲子草和接骨草对增温响应的差异

温度变化对植物的生长发育产生深刻的影响,从植物生物量分配格局的改变直到地理分布的变化(董丽佳和桑卫国, 2012; 马松梅等, 2014)。然而,增温的生物学效应具有很强的物种特异性。研究表明,增温对喜旱莲子草各指标的影响均不显著。这一方面,可能与喜旱莲子草广温性有关(Shen *et al.*, 2005; 褚延梅等, 2014),另一方面,本研究增温幅度较小,低于我国近百年来平均气温上升值(0.5–0.8 °C)和到2050年平均气温上升的预测值(2.3–3.3 °C)(国家发展和改革委员会, 2007),这也可能导致喜旱莲子草的生长对增温不敏感。在夏栎(*Quercus robur*)的增温研究中也发现了类似现象(Kuster *et al.*, 2013)。

与喜旱莲子草相比,本研究中接骨草对增温反应敏感,且对增温的响应格局因竞争条件而异。在无竞争和种间竞争条件下,增温处理的接骨草总生物量和根生物量均显著低于不增温处理,这可能是其喜阴耐寒的生物学特性所致(国家中医药管理局《中华本草》编委会, 1999; 董磊磊等, 2013)。而在种内竞争条件下,接骨草除比根长和比根表面积在增温与不增温间无显著差异外,其余指标均是增温处理显著大于不增温处理,这可能是由于增温处理增加了接骨草间的易化作用(于国磊, 2011)。

接骨草和入侵种喜旱莲子草对增温的不同响应,使得气候变暖在一定程度上影响了接骨草对喜旱莲子草的竞争效应,增温处理使喜旱莲子草相对

于接骨草的拥挤系数增加了2倍以上,而接骨草相对于喜旱莲子草的拥挤系数却下降了接近一半,即增温处理不利于接骨草对喜旱莲子草的竞争。

本实验从喜旱莲子草和接骨草的生长特性角度研究了二者间竞争及其对增温的响应。由本研究结果可以推测,在中度遮阴的陆生生境中,接骨草有望作为喜旱莲子草生物替代控制的材料。然而,接骨草能抗衡喜旱莲子草是否与其化感作用有关,值得进一步深入研究。

基金项目 西华师范大学博士科研启动基金(13E001)。

致谢 感谢西华师范大学外国语学院王容花老师、申爱英女士和齐鲁工业大学张桥英博士在英文摘要修改中提供的极大帮助,感谢西华师范大学生命科学学院胥晓教授、肖娟博士以及李成明、张飘、黎翔宇等同学在实验工作中给予的帮助。

参考文献

- Bhattarai GP, Cronin JT (2014). Hurricane activity and the large-scale pattern of spread of an invasive plant species. *PLoS ONE*, 9, e98478.
- Chang L (2013). *Responses of Flavonoid Synthesis in Ginkgo Leaves to Temperature and Soil Moisture*. Master degree dissertation, Nanjing Forestry University, Nanjing. 15–24. (in Chinese with English abstract) [常丽 (2013). 温度和土壤水分对银杏叶类黄酮合成的影响. 硕士学位论文, 南京林业大学, 南京. 15–24.]
- Chen Y, Zhou Y, Yin TF, Liu CX, Luo FL (2013). The invasive wetland plant *Alternanthera philoxeroides* shows a higher tolerance to waterlogging than its native congener *Alternanthera sessilis*. *PLoS ONE*, 8, e81456.
- Chu YM, Yang J, Li JJ, Peng PH (2014). Three warming scenarios differentially affect the morphological plasticity of an invasive herb *Alternanthera philoxeroides*. *Acta Ecologica Sinica*, 34, 1411–1417. (in Chinese with English abstract) [褚延梅, 杨健, 李景吉, 彭培好 (2014). 三种增温情景对入侵植物空心莲子草形态可塑性的影响. 生态学报, 34, 1411–1417.]
- Dong LJ, Sang WG (2012). Effects of simulated warming and precipitation change on seedling emergence and growth of *Quercus mongolica* in Dongling Mountain, Beijing, China. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 36, 819–830. (in Chinese with English abstract) [董丽佳, 桑卫国 (2012). 模拟增温和降水变化对北京东灵山辽东栎种子出苗和幼苗生长的影响. 植物生态学报, 36, 819–830.]
- Dong LL, Li YX, Quan QM, Fan ZL (2013). Photosynthetic characteristics of traditional Chinese medicine *Sambucus chinensis* Lind. *Acta Agrestia Sinica*, 21, 816–820. (in

- Chinese with English abstract) [董磊磊, 黎云祥, 权秋梅, 范曾丽 (2013). 中药接骨草光合生理特性研究. *草地学报*, 21, 816–820.]
- Fu ZJ (2005). *Invasiveness of Two Exotic Tree Species: Acacia mearnsii and Acacia dealbata*. Master degree dissertation, Chinese Academy of Forestry, Beijing. 25–38. (in Chinese with English abstract) [付增娟 (2005). 黑荆和银荆的生物入侵研究. 硕士学位论文, 中国林业科学研究院, 北京. 25–38.]
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (2013). Contribution of working group 1 to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. In: Stocker TF, Qin DH, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM eds. *Climate Change in 2013: The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Jiang XS, Lan RC (1993). *Nanchong Climography*. Nanchong Meteorological Bureau, Nanchong. (in Chinese) [江贤盛, 兰瑞成 (1993). 南充气象志. 南充气象局, 南充.]
- Keser LH, Dawson W, Song YB, Yu FH, Fischer M, Dong M, Kleunen M (2014). Invasive clonal plant species have a greater root-foraging plasticity than non-invasive ones. *Oecologia*, 174, 1055–1064.
- Kuster TM, Arend M, Günthardt-Goerg MS, Schulin R (2013). Root growth of different oak provenances in two soils under drought stress and air warming conditions. *Plant and Soil*, 369, 61–71.
- Liu B (2011). *Study of Competition Effect and Applicability of Related Competition Index Between Two Replacement Plants and Eupatorium adenophorum*. Master degree dissertation, Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong. 18–52. (in Chinese with English abstract) [刘冰 (2011). 2种替代植物与紫茎泽兰竞争效应及竞争相关指标适用性探索. 硕士学位论文, 山东农业大学, 山东泰安. 18–52.]
- Lu XM, Siemann E, Shao X, Wei H, Ding JQ (2013). Climate warming affects biological invasions by shifting interactions of plants and herbivores. *Global Change Biology*, 19, 2339–2347.
- Lu XY, Wang QX, Liu B, Yu JS, Yang WJ (2013). Effects of replacement control on *Eupatorium adenophorum* in abandoned mountain land with *Amorpha fruticosa*. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 26, 1893–1898. (in Chinese with English abstract) [卢向阳, 王秋霞, 刘冰, 俞晶山, 杨万吉 (2013). 紫穗槐替代控制对撂荒山地紫茎泽兰的影响. *西南农业学报*, 26, 1893–1898.]
- Ma SM, Nie YB, Geng QL, Wang RX (2014). Impact of climate change on suitable distribution range and spatial pattern in *Amygdalus mongolica*. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 38, 262–269. (in Chinese with English abstract) [马松梅, 聂迎彬, 耿庆龙, 王荣学 (2014). 气候变化对蒙古扁桃适宜分布范围和空间格局的影响. *植物生态学报*, 38, 262–269.]
- Masoodi A, Sengupta A, Khan FA, Sharma GP (2013). Predicting the spread of alligator weed (*Alternanthera philoxeroides*) in Wular Lake, India: A mathematical approach. *Ecological Modelling*, 263, 119–125.
- Ma XD, Zhu CG, Li WH (2012). Response of root morphology and biomass of *Tamarix ramosissima* seedlings to different water irrigations. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 36, 1024–1032. (in Chinese with English abstract) [马晓东, 朱成刚, 李卫红 (2012). 多枝柽柳幼苗根系形态及生物量对不同灌溉处理的响应. *植物生态学报*, 36, 1024–1032.]
- National Development and Reform Commission (2007). *National Scheme to Facing Climate Change*. <http://www1.chinacm.com/30/3027/302702/news/20070611/132937.asp>. Cited 2014-09-28. (in Chinese) [国家发展和改革委员会 (2007). 中国应对气候变化国家方案. <http://www1.chinacm.com/30/3027/302702/news/20070611/132937.asp>. 2014年9月28日引用.]
- Pan XY, Geng YP, Zhang WJ, Li B, Chen JK (2006). Cover shift and morphological plasticity of invasive *Alternanthera philoxeroides* along a riparian zone in south China. *Journal of Plant Ecology (Chinese Version)*, 30, 835–843. (in Chinese with English abstract) [潘晓云, 耿宇鹏, 张文驹, 李博, 陈家宽 (2006). 喜旱莲子草沿河岸带不同生境的盖度变化及形态可塑性. *植物生态学报*, 30, 835–843.]
- Shen JY, Shen MQ, Wang XH, Lu YT (2005). Effect of environmental factors on shoot emergence and vegetative growth of alligatorweed (*Alternanthera philoxeroides*). *Weed Science*, 53, 471–478.
- Skálová H, Jarošík V, Dvořáčková Š, Pyšek P (2013). Effect of intra- and interspecific competition on the performance of native and invasive species of *Impatiens* under varying levels of shade and moisture. *PLoS ONE*, 8, e62842.
- State Administration of Traditional Chinese Medicine, Chinese Herbalism Editorial Board (1999). *Chinese Herbalism*. Shanghai Science and Technology Press, Shanghai. (in Chinese) [国家中医药管理局《中华本草》编委会 (1999). 中华本草. 上海科学技术出版社, 上海.]
- Thakur MP, Reich PB, Eddy WC, Stefanski A, Rich R, Hobbie SE, Eisenhauer N (2014). Some plants like it warmer: Increased growth of three selected invasive plant species in soils with a history of experimental warming. *Pedobiologia*, 57, 57–60.
- Xie L (2009). *Effects of Warming Soil Temperature on Root, Stem and Leaf of an Invasive Species Alternanthera philoxeroides*. Master degree dissertation, Huazhong Normal University, Wuhan. 11–19. (in Chinese with English abstract)

- English abstract) [谢磊 (2009). 土壤增温对喜旱莲子草根根系表型、茎和叶特征的影响. 硕士学位论文, 华中师范大学, 武汉. 11–19.]
- Xu B, Wang JN, Shi FS, Gao J, Wu N (2013). Adaptation of biomass allocation patterns of wild *Fritillaria unibracteata* to alpine environment in the eastern Qinghai-Xizang Plateau. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 37, 187–196. (in Chinese with English abstract) [徐波, 王金牛, 石福孙, 高景, 吴宁 (2013). 青藏高原东缘野生暗紫贝母生物量分配格局对高山生态环境的适应. 植物生态学报, 37, 187–196.]
- Yu DZ, Wei SH, Zhu WD, Cao AC, Zhang CX, Song ZX (2008). Influence of *Alternanthera philoxeroides* on the growth of paddy rice and its economic threshold. *Acta Phytophylacica Sinica*, 35, 69–73. (in Chinese with English abstract) [喻大昭, 魏守辉, 朱文达, 曹勘程, 张朝贤, 宋兆欣 (2008). 空心莲子草对水稻生长的影响及其经济阈值. 植物保护学报, 35, 69–73.]
- Yu GL (2011). Effects of waterlogging on intraspecific interactions of the clonal herb *Alternanthera philoxeroides*. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 35, 973–980. (in Chinese with English abstract) [于国磊 (2011). 水淹对克隆植物空心莲子草种内关系的影响. 植物生态学报, 35, 973–980.]
- Yuan YG, Tang JJ, Leng D, Hu SJ, Yong JWH, Chen X (2014). An invasive plant promotes its arbuscular mycorrhizal symbioses and competitiveness through its secondary metabolites: Indirect evidence from activated carbon. *PLoS ONE*, 9, e97163.
- Zhang RH (2010). *Research on Screening of Replacement Plants for Flaveria bidentis and Competition Between Replacement Plants with F. bidentis*. Master degree dissertation, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou. 12–37. (in Chinese with English abstract) [张瑞海 (2010). 黄顶菊替代植物的筛选及其与黄顶菊竞争效应的研究. 硕士学位论文, 福建农林大学, 福州. 12–37.]
- Zhang WL, Xiao YA, Yan XH, Zhang SS, Huang HQ, Liu BB (2013). Effects of simulated warming on the growth and reproduction investment of invasive plant *Plantago virginica*. *Chinese Journal of Ecology*, 32, 2959–2965. (in Chinese with English abstract) [张万灵, 肖宜安, 闫小红, 张斯斯, 黄海裙, 刘保兵 (2013). 模拟增温对入侵植物北美车前生长及繁殖投资的影响. 生态学杂志, 32, 2959–2965.]
- Zhang Z, Wang YP, Li D, Xu L (2012). Effect of *Humulus scandens* water extracts on vegetative growth of invasive alien species, *Alternanthera philoxeroides*. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 32, 1844–1849. (in Chinese with English abstract) [张震, 王育鹏, 李丹, 徐丽 (2012). 葎草水浸提物对外来入侵植物喜旱莲子草营养生长的影响. 西北植物学报, 32, 1844–1849.]
- Zhen WW (2012). *Research on Allelopathic Effects of Extracts from A. philoxeroides on Three Kinds of Crops*. Master degree dissertation, Yangzhou University, Yangzhou. 21–49. (in Chinese with English abstract) [甄伟伟 (2012). 空心莲子草浸提液对三种作物化感效应的研究. 硕士学位论文, 扬州大学, 扬州. 21–49.]
- Zhu QG, Jin AW, Wang YK, Qiu YH, Li XT, Zhang SH (2013). Biomass allocation of branches and leaves in *Phyllostachys heterocycla* ‘Pubescens’ under different management modes: Allometric scaling analysis. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 37, 811–819. (in Chinese with English abstract) [朱强根, 金爱武, 王意锟, 邱永华, 李雪涛, 张四海 (2013). 不同营林模式下毛竹枝叶的生物量分配: 异速生长分析. 植物生态学报, 37, 811–819.]

责任编委: 于飞海 责任编辑: 王 葳