

高寒山区混播草地燕麦和毛苕子生物量分配格局对组分密度比的响应*

张 静 赵成章**

(西北师范大学地理与环境科学学院, 甘肃省湿地资源保护与产业发展工程研究中心, 兰州 730070)

摘 要 密度梯度对植物生物量分配格局的制约影响到混播草地在生态和生产上表现。2010年6—9月采用取代系列实验方法,在石羊河上游建立1年生人工混播草地,按燕麦(*Avena sativa* L.)与毛苕子(*Vicia villosa* Roth)的密度比例设置A(8:2)、B(6:4)、C(5:5)、D(4:6)和E(2:8)5个处理,研究了密度对燕麦与毛苕子生物量分配格局的影响。结果表明:混播草地中随着燕麦相对密度的减小和毛苕子相对密度的增大,燕麦根系生物量先减小后增大最后再减小的趋势与毛苕子相反,燕麦和毛苕子茎、叶生物量先减小后增大;随着牧草的生长,5种混播草地中燕麦和毛苕子茎生物量分配比例逐渐增加,叶、根生物量分配比例逐渐减少。密度制约下混播牧草资源分配策略发生的调整,证明了植物地上部分对光竞争的不对称性和地下部分对资源竞争的对称性,毛苕子攀援生长及其对燕麦茎秆的压力使植物茎秆生物量分配比例较高,实现了资源利用的最大化。

关键词 密度制约; 生物量分配格局; 石羊河上游; 1年生混播牧草

中图分类号 Q948.1 文献标识码 A 文章编号 1000-4890(2013)2-0266-05

Distribution patterns of the biomass of *Avena sativa* and *Vicia villosa* in response to the component density ratio of the grass species in a mixed-seeding grassland in alpine region of Qilian Mountains, Northwest China. ZHANG Jing, ZHAO Cheng-zhang** (Research Center of Wetland Resources Protection and Industrial Development Engineering of Gansu Province, College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2013, 32(2): 266-270.

Abstract: Plant density gradient can restrict the distribution pattern of plant biomass, and thus, affect the performances of mixed-seeding grassland in ecology and production. From June to September 2010, a replacement series experiment was conducted to establish a piece of grassland with mixed-seeding of *Avena sativa* and *Vicia villosa* in the upper reaches of Shiyang River, Gansu Province of Northwest China. Five treatments were installed, according to the relative density of *A. sativa* to *V. villosa*, i. e., 8:2, 6:4, 5:5, 4:6, and 2:8, with the effects of the density gradient on the distribution patterns of the biomass of *A. sativa* and *V. villosa* studied. With the decreasing relative density of *A. sativa* and the increasing relative density of *V. villosa*, the root biomass of *A. sativa* decreased first and increased then, and decreased lastly, while that of *V. villosa* was in the contrary. The stem- and leaf biomass of *A. sativa* and *V. villosa* increased after an initial decrease. With the growth of the grasses, the allocation ratio of the stem biomass of *A. sativa* and *V. villosa* in the five treatments increased gradually, while that of the leaf- and root biomass was in adverse. The adjustment of the resource allocation strategies of the mixed-seeding grasses under the restriction of plant density gradient demonstrated the asymmetry of the light competition of plant aboveground parts and the symmetry of the resource competition of underground parts. The climbing growth of *V. villosa* and its pressure on *A. sativa* stem made the plants have higher allocation ratio of stem biomass, and achieve the maximum resource use.

* 国家自然科学基金项目(91125014和40971039)、甘肃省科技支撑计划项目(1011FKCA157)和甘肃省生态经济重点学科项目资助。

** 通讯作者 E-mail: zhaocz@nwnu.edu.cn

收稿日期: 2012-09-13 接受日期: 2012-11-05

Key words: density restriction; biomass distribution pattern; upper reaches of Shiyang River; annual mixed-seeding forage grass.

对于许多生态学问题来说,植物器官生物量分配的差异性以及由此导致的功能差异,要比其在分子或细胞水平的生理机制的差异重要得多(Schwinn & Weiner, 1998)。植物资源分配的研究是生活史理论研究的一项中心内容,是现代生态学最成功的理论之一(Abello & Macpherson, 1992),在草本植物生物量配置方面突出的研究成果是指导草地生产的关键。生物量分配格局的可塑性贯穿植物的整个生活史(Steams, 1992),决定着植物在异质性环境中获取资源的能力(Poorter *et al.*, 1990),从而影响其在群落中的竞争力。因此,生物量分配格局对环境条件的可塑性具有重要的生态学意义(Grime, 1979; Tilman, 1988)。植物可获得性资源的有限性通常是由于邻株植物的物理或几何上的拥挤效应引起的,密度制约是自然界重要选择压之一(Japhet *et al.*, 2009),它通过改变种群内每个植物可获得性资源的数量,使邻体间发生地上光竞争和地下水与矿质营养竞争(黎磊等, 2011),植物生长形态的变化使其载重压力存在差异。不同的生物量分配格局反映了对不同选择压力的适应对策(Iwasa, 2000; Weiner, 2004),密度制约改变了植物各器官生物量的分配格局。以往关于植物资源分配的研究大多采用人工模拟的方法制造资源短缺的条件如人为地控制光照强度(Runk & Zobel, 2007),而忽略了密度制约对植物生物量分配格局的潜在影响,即未考虑邻体竞争作用对植物载重胁迫适应性以及生产发展的影响。因此,密度制约下植物资源分配的研究,是了解植物载重胁迫和生产发展的关键。

高寒山区气候寒冷,牧草生长季短、产量低,发展优质高产的人工草地是解决冷季草畜供求矛盾、保障草地畜牧业可持续性的重要途径。研究密度制约下混播牧草生物量的分配格局及其转化规律,探讨混播草地牧草密度的最佳搭配模式,对于提高草地干物质产量和资源利用效率具有重要意义。以往大量研究依赖根冠比(平晓燕等, 2007)来确定最优化分配格局,忽略了植物生长过程中各器官间生物量的分配格局对草地生态和生产方面的影响。鉴于此,本文采用取代系列实验方法,在石羊河上游高寒山区建立一年生禾本科牧草燕麦和豆科牧草毛苕子混播草地,试图从草地生态和生产方面研究植物各

器官资源分配的动态变化,为了解植物生物量分配格局对不同种群密度的响应机制提供理论基础,同时揭示密度引起物种资源分配对延缓生态系统退化、维持其结构与功能稳定性中的作用,为草原生态系统的适应性管理提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

实验地位于石羊河上游的甘肃省肃南县皇城镇绵羊育种场(37°58'26"N, 101°47'34"E),海拔 2530 m,具有大陆性气候和山地垂直气候特征。年均温 0 °C,最热和最冷月气温分别为 12 ~ 15 °C 和 -13 ~ -11 °C, ≥ 0 °C 的年积温 2450 ~ 2600 °C。年均降水量 350 mm 左右,主要集中在 6—9 月,年蒸发量 1500 ~ 1800 mm,相对湿度 65%。年日照时数 2200 ~ 2800 h,无霜期 80 d 左右。土壤以山地栗钙土为主,有机质 36.5 mg · g⁻¹,全氮 2.2 mg · g⁻¹,全磷 0.6 mg · g⁻¹,全钾 28.3 mg · g⁻¹,代换量 15.1 me · 100 g⁻¹ 土。试验区地处山地荒漠草原与干旱草原过渡带,具备发展人工草地的气候和灌溉条件,已经形成了以禾本科牧草为主的人工饲草料种植模式,但是人工草地品种单一、生产能力低下,具有进一步提升的潜力。

1.2 试验设计

运用 de Wit 取代试验研究方法,该研究方法是在单位面积总密度保持恒定的前提下,2 种植物的密度比在 0 ~ 1,这样可以克服单一密度所带来的弊端(李博, 2001)。在单位面积植株总密度一定条件下,按 1 年生燕麦(*Avena sativa* L.) 和毛苕子(*Vicia villosa* Roth) 的密度比例设 A(8 : 2)、B(6 : 4)、C(5 : 5)、D(4 : 6) 和 E(2 : 8) 5 种植方式。所有小区总密度为 300 株 · m⁻²,浓硫酸处理打破毛苕子种子硬实,根据种子纯净度、千粒重和发芽率确定 2 种牧草混播的播种量(A 为 152 和 18 g · m⁻²; B 为 114 和 36 g · m⁻²; C 为 95 和 45 g · m⁻²; D 为 76 和 54 g · m⁻²; E 为 38 和 72 g · m⁻²)。小区面积 2 m × 5 m,3 次重复,小区纵横间距均为 0.50 m,共 21 个小区,随机区组排列。2010 年 6 月 5—12 日整理实验小区,去除地面植被,深翻 30 cm 内土层,平整地面。2010 年 6 月 15 日播种,播种采用行播,行距 20 cm,每

行均匀播种燕麦与毛苕子 播种深度2~4 cm 实验过程中不施肥 分别于7月10日、8月5日、8月20日人工除草3次 7月20日、8月10日分别采用喷灌方式对供试草地进行二次 $3000\text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ 的灌溉。

1.3 测量与数据分析

在2010年7月27日—8月27日隔10 d取样一次,记录牧草物候期,各小区取样面积 $50\text{ cm} \times 50\text{ cm}$ 。考虑到一年生的燕麦和毛苕子根系相对较少,对其根系采取了沿根基周围逐层挖掘的全部挖掘法,深度至看不到细微根系的土层,最大挖掘深度为60 cm,保留植株地上部分并进行标记,根据外形、色泽、弹性区别燕麦与毛苕子根系重叠部分,并在现场绘制根系分布图,将收获样品分为茎、叶、根,最后分别收集燕麦和毛苕子的所有根系装入尼龙网后在水中浸泡30 min,然后再用自来水冲洗干净,用镊子去除杂质和杂根,按区组顺序将材料分别置于 $65\text{ }^\circ\text{C}$ 烘箱8 h至恒重后分别记录两物种茎、叶、根干重。

2 结果与分析

2.1 密度对燕麦和毛苕子各器官生物量的影响

密度对混播牧草各器官生物量的分配有显著影响($P < 0.001$)。从混播组A到混播组E随着燕麦相对密度的减小和毛苕子相对密度的增大,燕麦茎、叶生物量平均值分别从124.9、40.9 g减小到81.3、26.0 g后增加到159.1、68.5 g,毛苕子茎、叶生物量平均值分别从34.9、20.6 g减小到14.0、12.4 g后增加到29.3、17.8 g(图1);燕麦和毛苕子根生物量的变化趋势相反,燕麦根生物量呈先减小后增大最后再减小的趋势,而毛苕子根生物量呈先增大后减小最后再增大的趋势(图1)。

表1 密度比对燕麦和毛苕子根、茎、叶生物量分配的影响

Table 1 Effect of density ratio on biomass allocation of root, stem, leaf of *Avena sativa* L. and *Vicia vilosa* Roth

器官	日期	燕麦					毛苕子				
		A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
茎	7-27	36.18 ^a	14.85 ^a	21.50 ^{ab}	13.79 ^b	21.22 ^b	34.72 ^a	24.94 ^a	30.06 ^{ab}	9.45 ^b	15.54 ^b
	8-07	38.16 ^a	38.60 ^a	31.68 ^{ab}	23.27 ^b	48.93 ^b	48.79 ^a	43.66 ^a	37.31 ^{ab}	26.36 ^b	41.17 ^b
	8-17	41.47 ^{ac}	52.57 ^{ac}	37.44 ^{bc}	46.68 ^{bc}	52.82 ^{bc}	58.81 ^{ac}	33.68 ^{ac}	42.44 ^{bc}	32.92 ^{bc}	48.04 ^{bc}
	8-27	40.15 ^c	50.89 ^c	43.21 ^c	54.01 ^c	60.69 ^c	58.89 ^a	40.34 ^a	55.65 ^c	48.56 ^c	62.42 ^c
	叶	7-27	17.40 ^a	35.54 ^a	22.02 ^{ab}	20.35 ^b	39.67 ^b	48.25 ^a	48.73 ^a	49.52 ^{ab}	19.95 ^b
8-07	14.98 ^a	21.01 ^a	17.52 ^{ab}	20.08 ^b	26.00 ^b	41.47 ^a	36.26 ^a	46.15 ^{ab}	42.81 ^b	38.39 ^b	
8-17	12.87 ^{ac}	13.59 ^{ac}	13.58 ^{bc}	16.79 ^{bc}	21.28 ^{bc}	25.56 ^{ac}	31.93 ^{ac}	40.98 ^{bc}	54.24 ^{bc}	34.64 ^{bc}	
8-27	10.64 ^c	7.95 ^c	6.54 ^c	11.37 ^c	22.72 ^c	27.39 ^c	27.36 ^c	28.58 ^c	36.73 ^c	23.00 ^c	
根	7-27	46.42 ^a	49.61 ^a	56.49 ^{ab}	65.86 ^b	39.11 ^b	17.03 ^a	26.33 ^a	20.42 ^{ab}	70.60 ^b	63.64 ^b
	8-07	46.86 ^a	40.39 ^a	50.80 ^{ab}	56.65 ^b	25.07 ^b	9.75 ^a	20.08 ^a	16.54 ^{ab}	30.83 ^b	20.44 ^b
	8-17	45.66 ^{ac}	33.84 ^{ac}	48.98 ^{bc}	36.53 ^{bc}	25.90 ^{bc}	15.63 ^{ac}	34.39 ^{ac}	16.59 ^{bc}	12.83 ^{bc}	17.32 ^{bc}
	8-27	49.21 ^c	41.15 ^c	50.25 ^c	34.63 ^c	16.60 ^c	13.71 ^c	32.30 ^c	15.78 ^c	14.71 ^c	14.58 ^c

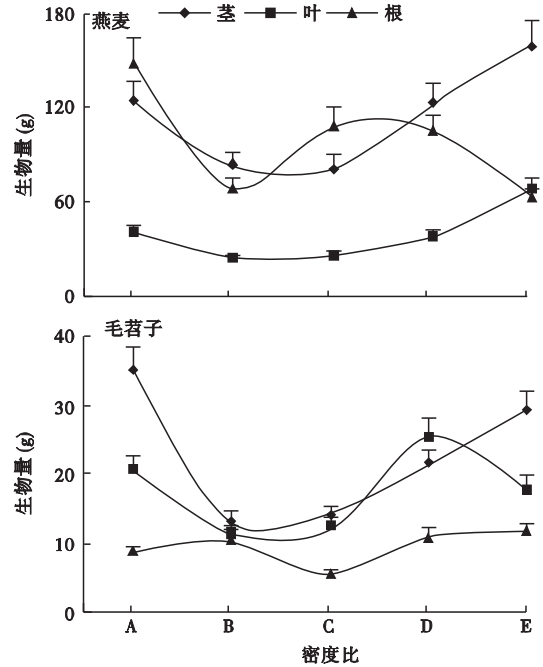


图1 密度比对燕麦和毛苕子茎、叶、根生物量的影响

Fig. 1 Effect of density ratio on biomass of root, stem, leaf of *Avena sativa* L. and *Vicia vilosa* Roth

2.2 密度对燕麦和毛苕子各器官生物量分配比例的影响

密度对混播牧草各器官生物量的分配比例有显著影响($P < 0.001$)。密度制约下随着燕麦相对密度的减小和毛苕子相对密度的增加,燕麦和毛苕子茎生物量分配比例平均值由40.8%、49.0%逐渐增大到56.8%、58.8%(表1);燕麦和毛苕子叶生物量分配比例的变化趋势相反,燕麦平均值从15.9%先减小到13.8%后增加到27.4%而毛苕子平均值由35.7%先增加到41.3%后减小到29.2%(表1)。

表 2 混播草地燕麦与毛苕子株高 (cm)

Table 2 Plant height of *Avena sativa* L. and *Vicia villosa* Roth in mixed-seeding meadow

物种	日期	A(8:2)	B(6:4)	C(5:5)	D(4:6)	E(2:8)
燕麦	7-27	41.4±3.1 ^a	31.3±1.5 ^a	26.7±2.8 ^{ab}	23.3±2.4 ^b	22.1±1.7 ^b
	8-07	59.7±3.8 ^a	49.7±3.6 ^a	40.4±3.6 ^{ab}	42.1±4.3 ^b	48.0±2.5 ^b
	8-17	83.3±6.2 ^{ac}	55.2±6.1 ^{ac}	44.2±8.2 ^{bc}	60.9±6.1 ^{bc}	62.0±4.9 ^{bc}
	8-27	97.8±3.7 ^c	68.3±8.3 ^c	60.8±1.2 ^c	89.7±3.9 ^c	90.8±5.4 ^c
毛苕子	7-27	21.6±2.4 ^a	20.4±0.5 ^a	17.1±3.4 ^{ab}	14.9±2.3 ^b	14.4±0.9 ^b
	8-07	39.4±4.5 ^a	33.2±1.8 ^a	27.4±2.1 ^{ab}	29.3±2.7 ^b	31.2±2.6 ^b
	8-17	55.1±1.0 ^{ac}	37.6±3.5 ^{ac}	33.5±5.4 ^{bc}	42.2±5.8 ^{bc}	45.2±5.6 ^{bc}
	8-27	86.3±1.2 ^c	42.4±5.7 ^c	36.5±8.6 ^c	60.3±4.6 ^c	65.9±6.3 ^c

数值为平均值±标准误。

随着牧草的生长,混播牧草各器官生物量分配比例发生复杂的变化,燕麦和毛苕子茎生物量分配比例均增加,叶、根生物量分配比例有所减少(表1)。

2.3 密度对燕麦和毛苕子株高的影响

牧草生长各阶段密度对混播牧草株高有显著影响($P<0.001$)。从密度组 A 到 E 随着燕麦相对密度的减小和毛苕子相对密度的增加,牧草生长后期(除燕麦分蘖期外)燕麦和毛苕子株高平均值分别从 80.27、60.27 cm 减小到 48.47、32.47 cm 后增加到 66.93、47.43 cm(表2)。

3 讨论

混播草地中混播种相对密度的变化使植物个体生长形态发生改变,影响植物对资源的利用,导致混播种的竞争强度和转化存在差异(Kazuharu 2005),植物通过改变各器官生物量的分配模式来对资源竞争和载重胁迫做出响应(黎磊等 2012)。植物各器官生物量的高低反映光合产物在各功能部分积累的多少,直接影响着植物各器官生物量的最优化分配格局(黎磊等 2011),而各器官生物量分配比例是决定植物获取资源以及竞争能力的重要指标(Wang *et al.* 2008),表明混播草地的生产贡献和草地质量。光照是植物生长最重要的生态因子之一(冯玉龙等 2002),叶片是植物进行光合作用的主要器官,是植物暴露在环境中面积最大的器官,对人为干扰和光照等环境因子的影响十分敏感(Holechek *et al.* 1952),而植物茎秆主要行使对叶片的物理支持功能,二者是决定草地质量的关键,同时植物地下部分根系是植物生长所需养分和水分的直接途径。因此,植物茎、叶、根是植物储存能量的主要器官,其生物量分配格局与混播种相对密度密切相关。

燕麦属直立生长型禾本科牧草,毛苕子属匍匐蔓生型豆科牧草,两物种的生物学特性和限制资源

的时空响应存在差异,导致密度制约下燕麦与毛苕子各器官生物量分配格局发生转变。在燕麦相对密度小于毛苕子的混播组 D 和 E 中,燕麦较弱的种内竞争增强其自身光合作用,叶片生物量比例较大,草地质量较好,同时顶层燕麦对较多毛苕子的荫蔽作用使毛苕子在底层匍匐缠绕生长,毛苕子种内对光资源的竞争变强,底层光照已不能满足毛苕子生长,毛苕子为了获得生长所需的足够光资源,依赖自身匍匐生长的特性以燕麦的直立茎秆为支撑体向上迅速生长,促进燕麦株高在原有基础上再次增加(表2),同时燕麦茎秆在毛苕子茎秆的压力下逐渐变粗,燕麦和毛苕子茎、叶生物量增加(图1),草地上部分生物量分配较高,产草量高;在其他混播组中,毛苕子相对密度小于燕麦,种内对光资源的竞争较弱,不仅使其自身株高增加较慢,而且没有对燕麦株高的再次促进(表2),导致燕麦和毛苕子茎、叶生物量逐渐减少(图1),草地的有效产量较低。叶片是牧草进行光合作用和储存能量的主要器官,茎是植物叶片的支撑体,由于本研究在牧草生长过程中主要是毛苕子茎秆的攀援改变牧草的载重压力,使混播牧草株高发生变化,影响了各器官生物量的分配格局,所以燕麦和毛苕子茎的生长是资源最大化利用的关键,因此,随牧草生长过程中对光资源需求的增加使燕麦和毛苕子茎生物量分配比例逐渐增大(表1)。茎、叶生物量变化趋势的一致性证明了植物地上部分对光竞争的不对称性(李博 2001),同时说明了密度制约下混播牧草各器官生物量变化趋势与生物量分配比例变化趋势之间的差异与混播牧草生长形态和相对种的影响密切相关。

在燕麦相对密度大于毛苕子的混播组中随燕麦相对密度的减小和毛苕子相对密度的增加,燕麦根系生物量逐渐减少而毛苕子逐渐增加(图1);由于燕麦竞争能力强于毛苕子(张静等 2012),所以在

毛苕子相对密度等于燕麦的混播组中,燕麦对资源的竞争强于毛苕子,燕麦根系生物量增加而毛苕子减小;随后在毛苕子相对密度大于燕麦的混播组中,燕麦根系对资源的利用受到毛苕子的限制,毛苕子根系生物量增加而燕麦减少(图1)。密度制约下燕麦对水、矿质营养和物理空间等地下资源竞争能力先减少后增加最后再减少的变化趋势与毛苕子相反,证明了植物地下部分对资源竞争的对称性和混播草地地下资源分配的权衡关系(黎磊等,2011),即当一定的资源分配给某个器官或行使某种功能时,就不能被其他器官或功能所利用。本研究还预示混播牧草地上部分资源竞争能力的强弱与其株高密切相关,而地下部分资源竞争能力的强弱与其竞争能力密切相关。

本文探索了高寒山区燕麦和毛苕子混播草地根、茎、叶生物量分配格局的动态变化,认为混播种相对密度的改变影响了植物对载重胁迫的适应性及草地产量的贡献,毛苕子相对密度大于燕麦的混播草地中,毛苕子攀援生长及其对燕麦茎秆的压力增强了植物的载重胁迫,使植物茎秆生物量分配比例较高。环境条件的改变降低了物种生存适合度,导致物种各器官生物量分配格局发生转变(刘运科等,2012)形成最优的生物量分配格局,促使生态系统的稳定。但是,关于混播牧草的稳定性和适合度的变化还有待于进一步研究。

参考文献

- 冯玉龙,曹坤芳,冯志立,等. 2002. 四种热带雨林树种幼苗比叶重、光合特性和暗呼吸对生长光环境的适应. 生态学报, **22**(6): 901-910.
- 李博. 2001. 植物竞争——作物与杂草相互作用的实验研究. 北京: 高等教育出版社.
- 黎磊,周道玮,盛连喜. 2011. 密度制约决定的植物生物量分配格局. 生态学杂志, **30**(8): 1579-1589.
- 黎磊,周道玮,盛连喜. 2012. 植物种群自梳过程中构件生物量与密度的关系. 生态学报, **32**(13): 3987-3997.
- 刘运科,范川,李贤伟,等. 2012. 间伐对川西亚高山粗枝云杉人工林细根生物量及碳储量的影响. 植物生态学报, **36**(7): 645-654.
- 平晓燕,贾丙瑞,袁文平,等. 2007. 羊草种群生物量分配动态模拟. 应用生态学报, **18**(12): 2699-2704.
- 张静,赵成章,盛亚萍,等. 2012. 高寒山区混播草地燕麦和毛苕子种间竞争对密度的响应. 生态学杂志, **31**(7): 1605-1611.
- Abello P, Macpherson E. 1992. Epibiosis and rhizocephalan infestation patterns in relation to the reproductive biology of *Lithodes ferox* (Filhol, 1885) (Anomra, Lithodidae). *Journal of Crustacean Biology*, **12**: 561-570.
- Grime JP. 1979. *Plant Strategies and Vegetation Processes*. Wiley: Chichester.
- Holechek J, Pieper RD, Herbel CH. 1952. *Range Management: Principles and Practices* (Fifth edition). New Jersey: Pearson Prentice Hall.
- Iwasa Y. 2000. Dynamic optimization of plant growth. *Evolutionary Ecology Research*, **2**: 437-45.
- Japhet W, Zhou DW, Zhang HX, et al. 2009. Evidence of phenotypic plasticity in the response of *Fagopyrum esculentum* to population density and sowing date. *Journal of Plant Biology*, **52**: 303-311.
- Kazuharu O. 2005. Relationships between mean shot and root masses and density in an overcrowded population of hinoki (*Chamaecyparis obtuse* (Sieb. et Zucc.) Endl.) seedlings. *Forest Ecology and Management*, **213**: 391-398.
- Poorter H, Renkes C, Lambers H. 1990. Carbon and nitrogen economy of twenty-four wild species differing in relative growth rate. *Plant Physiology*, **94**: 621-627.
- Rünk K, Zobel K. 2007. Phenotypic plasticity and biomass allocation pattern in three *Dryopteris* (Dryopteridaceae) species on an experimental light-availability gradient. *Plant Ecology*, **193**: 85-99.
- Schwinnig S, Weiner J. 1998. Mechanisms determining the degree of size asymmetry in competition among plants. *Oecologia*, **113**: 447-455.
- Steams SC. 1992. *The Evolution of Life Histories*. Oxford: Oxford University Press.
- Tilman D. 1988. *Plant Strategies and the Dynamics and Structure of Plant Communities*. Princeton: Princeton University Press.
- Wang JW, Yu D, Wang Q. 2008. Growth, biomass allocation, and autofragmentation responses to root and shoot competition in *Myriophyllum spicatum* as a function of sediment nutrient supply. *Aquatic Botany*, **89**: 357-364.
- Weiner J. 2004. Allocation, plasticity and allometry in plants. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, **6**: 207-215.

作者简介 张静,女,1988年生,硕士研究生。主要从事生物地理学研究。E-mail: zhangjing19860913@163.com
责任编辑 魏中青