

淹水对河竹鞭根系统生物量分配及 异速生长模式的影响

刘玉芳, 陈双林*, 郭子武, 李迎春, 杨清平

(中国林业科学研究院亚热带林业研究所, 浙江 杭州 311400)

摘要:为了揭示长期淹水对河竹鞭根系统生物量分配及异速生长模式的影响,调查测定了人工喷灌供水(CK)和淹水处理(TR)3、6个月的河竹1年生竹鞭及其根系的生物量,分析了河竹鞭、根生物量分配对淹水环境的适应和响应策略。结果表明:淹水条件下河竹根系生长受到抑制,生物量分配比例鞭>根。与CK相比,淹水条件下河竹根系生物量及根系生物量/总生物量显著降低,鞭生物量/总生物量升高。随着淹水时间的延长,河竹鞭、根大量生长,生物量显著升高,但根生物量/总生物量、鞭生物量/总生物量和水中鞭生物量/总生物量变化并不明显。河竹鞭、根生物量间的关系在TR和CK处理下均符合幂函数增长关系,但淹水条件下的异速生长指数b要高于CK。研究表明河竹在鞭根系统生长和物质分配上具有较大的生态可塑性和可调节性,可以通过鞭根系统的生物量合理分配和异速生长调节以逐步适应淹水环境。研究结果可为河竹在水湿地和江河湖库消落带植被恢复中的应用提供参考。

关键词:河竹;鞭根系统;淹水;生物量分配;异速生长模式;生长策略

中图分类号:S795

文献标识码:A

Effect of Waterlogging on Biomass Allocation and Allometric Pattern of Rhizome and Root System of *Phyllostachys rivalis*

LIU Yu-fang, CHEN Shuang-lin, GUO Zi-wu, LI Ying-chun, YANG Qing-ping

(Research Institute of Subtropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Hangzhou 311400, Zhejiang, China)

Abstract: This paper is to study the effect of the waterlogging on biomass allocation and allometric pattern of rhizome and root system in *Phyllostachys rivalis*. The biomass of 1-year-old bamboo rhizome and root was investigated in a pot experiment with treatments of artificial irrigation and waterlogging for three and six months. The response, adaptive strategy of biomass allocation in rhizome and root of *Ph. rivalis* under long-term waterlogging conditions were analyzed. The results showed that the growth of roots was inhibited under waterlogging conditions and the allocation proportion of *Ph. rivalis* biomass was in the order of rhizome > root. Compared to the CK, the biomass of root and the ratio of root biomass to total biomass decreased significantly, the ratio of rhizome biomass to total biomass increased in the TR. It would grow lots of rhizome and root with the extension of waterlogging time and the biomass increased significantly. But no obvious impact of waterlogging on the proportion of rhizome biomass, root biomass or waterlogged rhizome in total biomass. The relationship between rhizome biomass and root biomass of *Ph. rivalis* accorded with positive power function in TR and CK. But the growth index in TR was higher than that in CK. By this research it showed that *Ph. rivalis* has ecological plasticity and regulatory on material distribution and growth of rhizome and root. And it could adapt to the waterlogging conditions gradually through reasonable distribution of biomass

收稿日期:2014-12-19

项目基金:浙江省中国林业科学研究院省院合作项目(2012SY05);浙江省自然科学基金项目(LY13C160001);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金项目(RISF61258)

作者简介:刘玉芳(1989—),女,河南郑州人,在读硕士研究生,主要从事竹林生态与培育研究。

* 通讯作者:陈双林(1965—),男,研究员,博士,主要从事竹林生态与培育研究。E-mail:cslbamboo@126.com

and allometric accommodation. This research could provide references for its application in vegetation restoration of wetland and areas of fluctuating water tables.

Key words: *Phyllostachys rivalis*; rhizome and root system; waterlogging; biomass allocation; allometric pattern; growth strategy

异速生长是生物体各器官不成比例和不均匀的生长,是生物界中普遍存在的基本规律之一^[1],也是生物体生长的一种特性,受遗传基因决定的同时也受外界环境的影响^[2],用于研究生长中的部分与整体或者部分与部分之间的关系。植株异速生长或物质分配模式的改变蕴涵着重要的生长和生物量分配策略^[3]。生物量分配是指植物各器官累积的资源占总资源中的比例,是植物生存与生殖平衡的结果,也是植物获取净碳的重要驱动因素^[4-5],生物量在叶、茎和根之间的分配对植物的生长和繁殖有着直接的影响^[6-7]。生物量分配格局对环境的响应主要是通过构件生物量的可塑性来表示,不仅是遗传基因的结果,也是对环境长期作用的生长响应,可以在一定程度上反应植物对环境的生长适应策略^[8]。一些环境因素的改变可以致使植物异速生长关系的改变,而这些变化又会反过来影响植物对资源的分配、利用及其与相邻器官之间的关系^[9]。

目前,关于植物异速生长的研究已有很多^[10-15],竹类植物构件生物量分配和异速生长的研究主要集中在立竹各器官生物量分配对不同环境条件的响应和生物量估算等方面^[16],已开展密度^[16-18]、不同营林模式^[19]等对竹类植物生长发育、生物量分配、形态可塑性及异速生长的研究,但关于淹水条件下竹类植物生物量异速生长模式的研究还未有涉及。河竹(*Phyllostachys rivalis* H. R. Zhao)隶属禾本科(Gramineae)倭竹族(Shibataeae)刚竹亚族(Subtrib. Phyllostachydinae)刚竹属(*Phyllostachys* Sieb. et Zucc.)水竹组(Sect. Heterocladae Z. P. Wang),在长期淹水条件下能够维持生长更新。本研究通过长期淹水和定期人工喷灌供水条件下的河竹鞭、根生物量调查,探讨长期淹水是否会对河竹鞭、根生物量分配格局和异速生长模式产生明显影响,揭示河竹对长期淹水环境的生长适应策略,为河竹在水湿地和江河湖库消落带植被恢复中的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料与处理

试验地位于浙江省临安市(29°56′~30°23′N,

118°51′~119°72′E)太湖源观赏竹种园,属中亚热带季风气候区,四季分明,温暖湿润。年平均气温15.4℃,极端低温-13.3℃,极端高温40.2℃,年降水量1 250~1 600 mm,年日照时数1 850~1 950 h,年平均无霜期为235 d。

2012年2月在试验地河竹种苗林中挖取生长状况基本一致(2年生,地径1.0±0.2 cm,全高1.03±0.38 m,保留5~6盘枝)的小丛状河竹苗,去除竹蔸部土壤后进行盆栽,每盆栽植10株立竹,共栽植试验盆栽苗80盆。盆栽容器为加仑盆,上端直径32 cm,下端直径23 cm,高度27 cm。容器苗栽植在细沙与红壤体积比1:3均匀混合而成的基质中,基质质量约为15 kg·盆⁻¹,占容器的4/5,基质水解氮、速效磷、速效钾分别为198.47 mg·kg⁻¹、67.25 mg·kg⁻¹、74.16 mg·kg⁻¹,pH值5.8。试验盆栽苗通过人工定期喷灌保持水分供应,及时清除竹笋和杂草,保持每盆试验容器苗立竹年龄和数量一致。

2013年4月对河竹试验盆栽苗进行淹水处理。试验设2个处理,分别为水淹超过容器苗上部土面5 cm的淹水处理(TR)和实行定期人工喷灌供水的对照(CK)。试验盆栽苗置于方形水泥池(长度4.3 m,宽度3.3 m,深度0.5 m)中进行淹水处理,试验期间视池中水量情况开水控制阀门补充水(试验地附近水库灌溉水)至试验要求水平。对照盆栽苗仍人工喷灌供水,使基质相对含水率保持在85%左右。每个处理试验盆栽苗各40盆,即每处理40个重复(也用于淹水环境下养分循环、光合等生理生化试验)。

1.2 鞭根系统生物量测定方法

淹水处理后3个月,河竹部分竹鞭会窜出栽植容器上端口的土壤而在水中延伸生长,鞭节处生长大量的根系。在水中生长的鞭根分为水中生长鞭(后称水中鞭)、水中生长根(后称水中根),在容器土壤中生长的鞭根分为土中生长鞭(后称土中鞭)、土中生长根(后称土中根),两者生长空间和养分、氧气吸收介质不同。

2013年7月和10月,即淹水处理3、6个月时,分别随机选取每种处理的河竹盆栽苗各6盆,从竹

苗地径处剪断,取其鞭和根,用剪子剪下 CK 试验盆栽苗 1 年生竹鞭的土中根及 TR 处理的试验盆栽苗 1 年生竹鞭的土中根和水中根($0.2\text{ mm} < \text{根径} < 2.0\text{ mm}$,其中淹水处理 3 个月时无水中根),清除粘在根系上的土壤等物,对鞭和根分别称鲜质量。称取 50 g 左右土中鞭和水中鞭样品,用剪刀剪成小段(长度约 1 cm)标号装进信封中,另分别称取每种处理 1 年生竹鞭的土中根和 TR 处理的水中根样品 50 g 左右标号装进信封中,一并放入烘箱 105°C 杀青 30 min,再置于 80°C 烘箱中烘至恒质量称样品干质量,计算试验盆栽苗土中鞭、根和水中鞭、根的生物量。每个处理重复 6 次。

1.3 数据分析

植物构件生物量简单异速生长模式可以用方程 $Y = aX^b$ 来描述,其中, X 代表河竹鞭生物量, Y 代表河竹根系生物量, a 为平衡常数, b 为异速生长指数, $b=1$ 时为等速生长, $b \neq 1$ 时则表现为异速生长^[20]。本文采用上述方程对河竹淹水 3、6 个月时的鞭、根生物量间关系进行拟合,探讨淹水对河竹鞭根系统生物量异速生长模式的影响。

试验数据在 Excel 2003 统计软件中进行整理和图表制作,在 SigmaPlot 10.0 软件中对河竹鞭根系统生物量关系进行拟合。试验数据均为平均值 \pm 标准差。

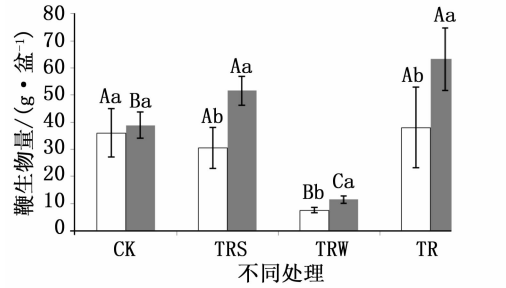
2 结果与分析

2.1 淹水环境下河竹鞭生物量变化

由图 1 可知,与淹水 3 个月比较,淹水 6 个月时,TR 处理的河竹土中鞭生物量、水中鞭生物量和鞭生物量均显著升高。其中,土中鞭生物量变化区间为 $30.43 \pm 7.51 \sim 51.65 \pm 5.31$,升幅为 69.73%;鞭生物量升幅为 66.49%;水中鞭生物量提高 1.53 倍。与 CK 相比,TR 处理的河竹土中鞭生物量在处理 6 个月时显著升高,升幅为 32.78%,处理 3 个月时有小幅度下降,变化范围为 $36.07 \pm 8.83 \sim 30.43 \pm 7.51$,差异不显著;水中鞭生物量处理 3、6 个月时均显著低于土中鞭生物量,降幅分别为 75.25% 和 77.66%;鞭生物量处理 3 个月时有小幅度升高,变化范围为 $36.07 \pm 8.83 \sim 37.96 \pm 14.87$,与 CK 无显著差异,处理 6 个月时显著升高,是 CK 的 1.62 倍。

2.2 淹水环境下河竹根系生物量变化

由图 2 可知,与淹水 3 个月比较,淹水 6 个月时,TR 处理的河竹土中根生物量和根生物量均显著



□ 3 个月 ■ 6 个月 TRS 表示淹水处理的土中鞭或土中根,TRW 表示淹水处理的水中鞭或水中根;大写字母表示相同淹水时间不同处理间比较,小写字母表示不同淹水时间同一处理间比较,TR 处理水中鞭生物量大写字母表示与相同淹水时间土中根比较。不同字母表示差异显著($p < 0.05$),相同字母表示差异不显著($p > 0.05$)。下同。

图 1 淹水环境下河竹鞭生物量

升高,升幅分别为 94.11% 和 114.61%。与 CK 相比,TR 处理的河竹土中根生物量 3、6 个月时均显著降低,降幅分别为 64.97% 和 36.40%;水中根生物量淹水 6 个月时显著低于土中根生物量,降幅为 89.44%;根生物量处理 3、6 个月时较 CK 显著降低,降幅分别为 64.97% 和 29.64%。说明淹水时间的延长对河竹根系的生长有明显的促进作用,可能河竹通过水中根的生长来获得更多的氧气以适应淹水缺氧环境。

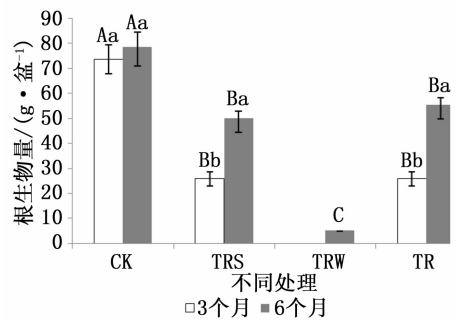


图 2 淹水环境下河竹根系生物量

2.3 淹水环境下河竹鞭根系统生物量分配

由表 1 可知,与淹水 3 个月比较,淹水 6 个月时,TR 处理的河竹鞭根系统总生物量显著升高,升幅为 85.96%,但鞭生物量/总生物量、根生物量/总生物量、土中鞭生物量/总生物量、水中鞭生物量/总生物量和土中根生物量/总生物量均无显著差异。水中鞭生物量/土中鞭生物量为 0.15 ~ 0.22,变化并不明显,而水中根生物量/土中根生物量为 0.00 ~ 0.11,淹水 6 个月较 3 个月时显著升高。

与CK相比,TR处理的河竹鞭根系统总生物量处理3个月时显著降低,降幅为41.90%,处理6个月时有小幅度升高,但无显著差异;鞭生物量/总生物量处理3、6个月时均显著升高,升幅分别为78.17%和60.67%,而根生物量/总生物量处理3、6个月时均显著降低,降幅分别为37.69%和29.92%;土中鞭生物量/总生物量处理3、6个月时

均差异不显著,而土中根生物量/总生物量处理3、6个月时均显著降低,降幅分别为37.69%和36.63%。可见,随着淹水时间的延长,河竹鞭、根大量生长,生物量显著升高,但根生物量/总生物量、鞭生物量/总生物量和水中鞭生物量/土中鞭生物量均处于相对稳定的状态。

表1 淹水环境下河竹鞭、根生物量分配比例

项目	CK		TR	
	3个月	6个月	3个月	6个月
鞭+根总生物量/(g·盆 ⁻¹)	109.74±14.26 A a	117.60±12.48 A a	63.76±17.76 B b	118.57±17.05 A a
土中鞭生物量/总生物量	32.53%±4.30% A a	33.03%±0.98% A a	46.06%±9.05% A a	43.38%±5.19% A a
水中鞭生物量/总生物量	--	--	11.91%±0.81% a	9.69%±1.48% a
比例/%				
鞭生物量/总生物量	32.53%±4.30% B a	33.03%±0.98% B a	57.96%±8.51% A a	53.07%±6.64% A a
土中根生物量/总生物量	67.47%±4.30% A a	66.97%±0.98% A a	42.04%±8.51% B a	42.44%±6.37% B a
水中根生物量/总生物量	--	--	--	4.49%±0.64% C
根生物量/总生物量	67.47%±4.30% A a	66.97%±0.98% A a	42.04%±8.51% B a	46.93%±6.64% B a

注:大写字母表示相同淹水时间不同处理间比较,小写字母表示不同淹水时间同一处理间比较,TR处理水中鞭生物量大写字母表示与相同淹水时间土中根生物量比较。不同字母表示差异显著($p < 0.05$),相同字母表示差异不显著($p > 0.05$)。下同。

2.4 淹水环境下河竹鞭根系统生物量异速生长模式变化

由表2分析可知,TR和CK处理下的河竹鞭、根生物量间均呈幂函数增长模式,拟合方程 p 值均小于0.05。从拟合方程参数来看,随着鞭生物量的增加,河竹根系生物量的增加速率幂值为0.377 0~

0.814 7,决定系数 $R^2 > 0.69$,TR处理的河竹异速生长指数 b 值较CK升高,且逐渐接近于1。这些定量关系既反映了河竹在长期淹水环境下鞭根系统生物量具有稳定的生长模式规律,也蕴含着河竹在生物量分配格局上对淹水环境的生长适应策略。

表2 淹水环境下河竹鞭、根生物量异速生长关系

处理	a	b	样本数	决定系数 R^2	p 值	拟合方程
CK	19.480 0	0.377 0	12	0.703 8	0.041 2	$Y = 19.480 0X^{0.377 0}$
TR	1.629 7	0.814 7	12	0.694 9	0.021 8	$Y = 1.629 7X^{0.814 7}$

注: X 代表河竹鞭生物量, Y 代表河竹根系生物量。

3 讨论

植物生物量体现了在生长发育过程中光合产物在各功能部分的积累,影响着最优分配格局,但各器官生物量分配格局会因种类、植株大小及外界环境而改变^[21-24]。植物生物量分配指植物将有限的资源分配到不同器官或者结构功能上,能反映植物的潜在生长特征,可以实现对外界环境变化的更好适应^[25-26]。本研究中,淹水3个月时水中翘鞭较少,一定程度上抑制根的生长,基本上还没有生长水中根。随着淹水时间的延长,河竹鞭、根大量生长,与对照相比,淹水环境下鞭、根生物量显著降低,竹鞭占生物量的比例升高,竹根占生物量的比例降低,且两者比例逐渐趋于一致,有利于河竹的生长。虽然

淹水6个月时会会长出大量的水中鞭、根,但根生物量/总生物量、鞭生物量/总生物量和水中鞭生物量/土中鞭生物量均处于相对稳定的状态。说明河竹能通过鞭根系统生物量的合理分配来适应淹水环境,尤其是水中鞭、根生物量的显著提高,在长期淹水环境下,河竹具有较强的鞭根生物量调节和适应能力,将生物量更多地分配给水中鞭、根,以提高氧气的获取能力,反映出生物量分配转移也是植物长期应对环境变化的一种普遍适应机制^[27-30]。由此可见,河竹对资源分配的权衡是存在的。在植物生长过程中,不同构件间存在资源分配的权衡,以期达到更快、更好地促进植物生长发育,增强其生态适合度^[31]。河竹在资源分配上对鞭和水中根的倾斜,可提高吸收养分和氧气的的能力,尤其是水中根的产生,

有利于河竹在长期淹水缺氧环境下保持正常生长,这可能是河竹对淹水环境生态适应性较强的机制之一。

环境的改变不仅引起植物的生物量分配格局发生变化,而且导致植物对环境的可塑生长及异速生长关系的改变,植物构件的异速生长受遗传因素决定的同时也受外界环境的影响^[30,32,33]。本研究发现,尽管不同处理下河竹的生物量分配有着显著的差异,但河竹鞭、根生物量间关系在淹水和对照处理下均符合幂函数增长关系,且淹水处理下,单位鞭生物量增加引起根生物量的增量较对照升高(b_{TR} 升高),这可能与淹水促进了河竹水中根的生长导致根系整体生物量升高有关。说明长期淹水条件下,河竹能够通过改变系统生物量分配格局来维持生存。拟合方程在淹水和对照间异速生长指数值的差异则进一步体现了河竹在生长和物质分配上具有较大的生态可塑性和可调节性。

综上所述,淹水条件下河竹根系生长一定程度上受到抑制,生物量分配比例鞭 > 根,与对照相比,淹水环境下河竹根系生物量显著降低,竹鞭占生物量的比例升高,竹根占生物量的比例降低。随着淹水时间的延长,河竹鞭、根大量生长,生物量显著升高,但根生物量/总生物量、鞭生物量/总生物量和水 中鞭生物量/土中鞭生物量均处于相对稳定的状态。河竹鞭、根生物量间关系在淹水和对照处理下均符合幂函数增长关系,且淹水处理下的异速生长指数 b 要高于对照。体现出河竹可以通过鞭根系统的生物量合理分配和异速生长调节来逐步适应淹水环境,这是河竹对长期淹水环境的重要适应策略。目前,许多关于林木生物量和异速生长模式的研究主要集中在地上部分,而对地下部分的相关研究较少^[34]。本研究从地下生物量分配和异速生长方面探讨了河竹的耐水湿机制,为河竹在水湿地和江河湖库消落带植被恢复中的应用提供了参考依据。

参考文献:

- [1] West G B, Brown J H. The origin of allometric scaling laws in biology from genomes to ecosystems; towards a quantitative unifying theory of biological structure and organization[J]. The Journal of Experimental Biology, 2005, 208(9): 1575 - 1592.
- [2] 李 博. 生态学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 64 - 87.
- [3] Schmid B, Weiner J. Plastic relationships between reproductive and vegetative mass in *Solidago altissima*[J]. Evolution, 1993, 47(1): 61 - 74.
- [4] 陶 冶, 张元明. 准噶尔荒漠 6 种类短命植物生物量分配与异速生长关系[J]. 草业学报, 2014, 23(2): 38 - 48.
- [5] Körner C. Alpine plant life: Functional plant ecology of high mountain ecosystems[M]. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1999: 1 - 338.
- [6] Silvertown J W, Doust J L. Introduction to plant population biology [M]. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 1993: 116 - 140.
- [7] Bazzaz F, Grace J. Plant resource allocation[M]. London: Academic Press, 1997.
- [8] 李红丽, 智颖飘, 赵 磊, 等. 大米草自然衰退种群对 N、P 添加的生态响应[J]. 生态学报, 2007, 27(7): 2725 - 2732.
- [9] Tremmel D C, Bazzaz F A. Plant architecture and allocation in different neighborhoods, Implications for competitive success[J]. Ecology, 1995, 76(1): 262 - 271.
- [10] 周 婵, 杨允菲. 松嫩平原两个生态型羊草叶构件异速生长规律[J]. 草业学报, 2006, 15(5): 76 - 81.
- [11] 祝介东, 孟婷婷, 倪 健, 等. 不同气候带间成熟林植物叶性状间异速生长关系随功能型的变异[J]. 植物生态学报, 2011, 35(7): 687 - 698.
- [12] 杨允菲, 张宝田, 张春华. 松嫩平原赖草无性系构件的形成与空间扩展实验[J]. 应用生态学报, 2007, 18(5): 977 - 982.
- [13] 程栋梁, 钟全林, 林茂兹, 等. 森林自然更新过程中地上氮贮量与生物量异速生长的关系[J]. 生态学报, 2012, 32(9): 2929 - 2935.
- [14] 马玉珠, 程栋梁, 钟全林, 等. 中国森林凋落物不同组分异速比例关系[J]. 植物生态学报, 2013, 37(12): 1071 - 1079.
- [15] 汪金松, 张春雨, 范秀华, 等. 臭冷杉生物量分配格局及异速生长模型[J]. 生态学报, 2011, 31(14): 3918 - 3927.
- [16] 吴福忠, 壬开运, 杨万勤, 等. 缺苞箭竹密度对其生物量分配格局的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(6): 991 - 995.
- [17] 郭子武, 杨清平, 陈双林, 等. 密度对四季竹地上生物量分配格局及异速增长模式的制约性调节[J]. 生态学杂志, 2013, 32(3): 515 - 521.
- [18] 顾大彤, 陈双林, 郭子武, 等. 四季竹地上现存生物量分配及其与构件因子关系[J]. 林业科学研究, 2011, 24(4): 495 - 499.
- [19] 朱强根, 金爱武, 王意锟, 等. 不同营林模式下毛竹枝叶的生物量分配: 异速生长分析[J]. 植物生态学报, 2013, 37(9): 811 - 819.
- [20] Kohyama T, Hara T, Tadaki Y. Patterns of trunk diameter, tree height and crown depth in crowded *Abies stands*[J]. Annals of Botany, 1990, 65(5): 567 - 574.
- [21] Li X, Yi M J, Son Y, et al. Biomass and carbon storage in an age - sequence of Korean pine (*Pinus koraiensis*) plantation forests in central Korea[J]. Journal of Plant Biology, 2011, 54(1): 33 - 42.
- [22] Noh N J, Son Y, Lee S K, et al. Carbon and nitrogen storage in an age - sequence of *Pinus densiflora* stands in Korea[J]. Science China. Life sciences, 2010, 53(7): 822 - 830.
- [23] Bonser S P, Aarssen L W. Allometry and development in herbaceous plants; Functional responses of meristem allocation to light and nutrient availability[J]. American Journal of Botany, 2003, 90(3): 404 - 412.
- [24] Cheplick G P. A modular approach to biomass allocation in an inva-

- sive annual (*Microstegium vimineum Poaceae*) [J]. *American Journal of Botany*, 2006, 93(4): 539 – 545.
- [25] 任海彦,郑淑霞,白永飞. 放牧对内蒙古锡林河流域草地群落植物茎叶生物量资源分配的影响[J]. *植物生态学报*, 2009, 33(6): 1065 – 1074.
- [26] 王海洋,陈家宽,周进. 水位梯度对湿地植物生长、繁殖和生物量分配的影响[J]. *植物生态学报*, 1999, 23(3): 269 – 273.
- [27] 安慧,上官周平. 密度对刺槐幼苗生物量及异速生长模式的影响[J]. *林业科学*, 2008, 44(3): 151 – 155.
- [28] 彭玉兰,涂卫国,包维楷,等. 九寨沟自然保护区4种水深梯度下芦苇分株地上生物量的分配与生长[J]. *应用与环境生物学报*, 2008, 14(2): 153 – 157.
- [29] 杨允菲,李建东. 松嫩平原不同生境芦苇种群分株的生物量分配与生长分析[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(1): 30 – 34.
- [30] 韩忠明,韩梅,吴劲松,等. 不同生境下刺五加种群构件生物量结构与生长规律[J]. *应用生态学报*, 2006, 17(7): 1164 – 1168.
- [31] 冯丽,张景光,张志山,等. 腾格里沙漠人工固沙植被中油蒿的生长及生物量分配动态[J]. *植物生态学报*, 2009, 33(6): 1132 – 1139.
- [32] Xiao S, Chen S Y, Zhao L Q, *et al.* Density effects on plant height growth and inequality in sunflower populations[J]. *Journal of Integrative Plant Biology*, 2006, 48(5): 513 – 519.
- [33] 刘秀香,杨允菲. 松嫩平原不同生境芦苇生殖分株的异速生长分析[J]. *草业学报*, 2012, 21(4): 313 – 318.
- [34] Lamberty B B, Wang C, Gower S T. Aboveground and belowground biomass and sapwood area allometric equations for six boreal tree species of northern Manitoba [J]. *Canadian Journal of Forest Research*, 2002, 32(8): 1141 – 1450.