

栽培密度和施肥水平对黄花蒿生长特性和青蒿素的影响

王满莲, 蒋运生, 韦霄*, 柴胜丰, 漆小雪, 李锋

(广西壮族自治区、中国科学院广西植物研究所, 广西桂林 541006)

摘要: 采用大田试验, 研究不同密度和施肥水平对黄花蒿生长、生物量分配和青蒿素含量的影响。试验设 3 个密度水平: 高密度(111111 株/hm²)、中密度(55555 株/hm²)和低密度(27778 株/hm²)。各密度设 3 个施肥水平(复合肥, N-P₂O₅-K₂O 为 15-15-15); 不施肥、低肥(60 kg/hm²)和高肥(120 kg/hm²)。结果表明, 黄花蒿对密度和养分条件变化的适应性较强, 其中密度是植株大小、生物量分配和产量有关参数的主要决定因子, 而青蒿素含量由施肥水平决定。相同施肥水平下, 黄花蒿的茎径与分枝数均随密度的降低而显著增大, 其单株生物量也随密度的降低而显著增大; 中、高密度黄花蒿的支持结构生物量分数均显著大于低密度, 低密度黄花蒿的根生物量分数和根/冠比显著大于中、高密度。相同密度下, 施肥水平对黄花蒿的单株生物量影响不显著, 但显著影响其生物量分配。低密度下, 黄花蒿根生物量分数和根/冠比随施肥水平的增高而显著降低; 高密度下, 黄花蒿叶生物量分数随施肥水平的增高而显著增大。所有处理中, 低密度低施肥水平黄花蒿的青蒿素含量最高, 中密度低施肥水平的叶产量和青蒿素产量最大。本试验条件下, 黄花蒿栽培以密度 55555 株/hm²、施肥 60 kg/hm² 为宜。

关键词: 栽培密度; 施肥水平; 黄花蒿; 生长特性; 青蒿素

中图分类号: S567.9

文献标识码: A

文章编号: 1008-505X(2010)01-0185-06

Effects of planting density and fertilization on growth characters and artemisinin of *Artemisia annua* L.

WANG Man-lian, JIANG Yun-sheng, WEI Xiao*, CHAI Sheng-feng, QI Xiao-xue, LI Feng

(Guangxi Institute of Botany, Guangxi Zhuangzu Autonomous Region and Chinese Academy of Sciences, Guilin 541006, China)

Abstract: Field plot trials were carried out to study the effects of different planting densities and fertilization levels on *Artemisia annua* growth, biomass allocation and artemisinin content. *A. annua* was grown at three densities, namely high density (111111 plants/ha), intermediate density (55555 plants/ha) and low density (27778 plants/ha). There were three levels of compound fertilizer (N-P₂O₅-K₂O 15-15-15, 0, 60 and 120 kg/ha) for each density. The results show that *A. annua* is very flexible in response to the planting densities and nutrient availabilities, and the planting density is the main factor affecting the parameters related to the plant size, biomass allocation and yield, while artemisinin content is determined by the fertilizer levels. The biomass per plant, basal diameter and branch numbers of *A. annua* are significantly increased with the decrease of the planting density. The root mass fraction and ratio of the root mass to crown mass under the low planting density are significantly higher than those under the intermediate and high planting densities. In each planting density treatment, the biomasses per plant of *A. annua* are not significantly changed under the different fertilizer levels, while the biomass allocations of *A. annua* are significantly changed. Under the low planting density, the root mass fraction and root mass/crown mass are significantly increased with the decrease of the fertilizer levels, and under the high planting density, the leaf mass fractions are significantly increased with the increase of the fertil-

收稿日期: 2009-02-10 接受日期: 2009-07-31

基金项目: 国家自然科学基金(30660222); 中国科学院农办项目资助(KSCX2-YW-N-44-05); 广西区攻关项目(桂科攻 0663003); 广西科学基金项目(桂科基 0731039)资助。

作者简介: 王满莲(1978—)女, 湖南人, 硕士, 助理研究员, 主要从事植物引种栽培和生理生态研究工作。E-mail: Wangml1978@163.com

* 通讯作者 E-mail: Weixiao@gxib.cn

izer levels. Among all the treatments, the artemisinin content of *A. annua* is highest under the low planting density and the low fertilization, the leaf biomass and artemisinin yield are highest under the intermediate density and the low fertilization. In summary, the optimal density and fertilizer treatment are 55555 plants/ha and N 60 kg/ha in the experiment.

Key words: planting density; fertilization level; *Artemisia annua*; growth characters; artemisinin

黄花蒿(*Artemisia annua* L.)为菊科艾属一年生草本植物,它含有一种新的抗疟成分—青蒿素,是世界卫生组织推荐的首选治疗疟疾的药物,其中叶片是青蒿素提取的主要器官,叶片产量和青蒿素含量决定着青蒿素的产量^[1]。在一定的生态环境中,密度与施肥是影响作物生产最主要的两个栽培因素。种植密度能引起植株个体间相互作用,密度增加导致植物种内竞争产生,使种群中单株生长量和生物量发生改变,而这些变化反过来又影响植物对资源的利用、分配及其与邻体之间的关系^[2-3]。养分资源影响植物的生长和生物量分配,一般情况下,适度的养分增加有利于植物的生长,养分增加植物分配到根的生物量减少,分配到叶的生物量增大,因而导致地上部分竞争的增加^[4-5]。目前国内外已有一些关于种植密度和施肥水平对黄花蒿生长和产量方面的研究^[6-8],由于试验基质的养分不同,研究结果存在一定的差异。本试验通过施肥和密度2因素3水平完全设计方案,研究密度和施肥水平对黄花蒿生长、生物量分配和青蒿素含量的影响,进而为黄花蒿高产优质栽培提供理论依据。

1 材料与方法

试验地设在桂林雁山广西植物研究所试验场。土壤为红壤,pH值5.1,0—15 cm土层土壤的农化性状为:有机质15.9 g/kg、全氮2.24 g/kg、全磷1.13 g/kg、全钾11.2 g/kg、速效氮80.8 mg/kg、速效磷61.7 mg/kg、速效钾90.2 mg/kg。试验采用施肥和密度两因素完全随机设计。施肥因素(A)设置3个水平:不施肥(None);低肥施复合肥60 kg/hm²;高肥施复合肥120 kg/hm²。由于土壤氮含量较丰富,磷和钾含量中等,本试验选用复合肥(含N、P₂O₅、K₂O各15%),以追肥形式施入,苗期和盛长期各施50%。密度因素(B)设置3个水平:高密度,30 cm×30 cm(11.1株/m²);中密度,30 cm×60 cm(5.6株/m²);低密度,60 cm×60 cm(2.8株/m²)。本试验共9个处理,3次重复,27个小区,每小区面积15 m²随机排列。

于2008年2月15日将黄花蒿种子播种于苗床,幼苗株高均为20 cm左右时(4月15日),选择大小一

致的幼苗移栽。于现蕾期(8月28日)收割,各小区叶子晒干用于测产(测定叶片重量和青蒿素含量)。收割前每个小区随机选10株测定株高、基径和分枝数(各处理组合30株),同时每个小区随机取样5株(各处理组合15株)测定叶干重、支持结构干重(主茎与分枝)和根干重,叶子晒干(计入小区测产),其他部位105℃杀青30 min,80℃烘干至恒重。求出如下参数:根生物量分数(RMF,Root mass fraction,根重/植株总重);叶生物量分数(LMF,Leaf mass fraction,叶重/植株总重);支持结构生物量分数(SBF,Supporting organs biomass fraction,支持结构重/植株总重);根/冠比(R/C,Root mass/Crown mass)。

青蒿素含量采用柱前衍生-RP-HPLC法测定^[9]。土壤有机质采用H₂SO₄-K₄CrO₄水合热法测定;全氮采用凯氏定氮法消煮—流动注射分析仪测定;全磷采用H₂SO₄-H₂O₂联合消煮—钼蓝法测定;全钾采用H₂SO₄-H₂O₂联合消煮—火焰光度计测定;速效磷采用Olsen法测定;速效氮采用Nmin法,即测定土壤NO₃⁻-N和NH₄⁺-N总和;土壤速效钾采用1 mol/L NH₄OAc浸提—火焰光度法测定。

比较不同因素对某一变量的影响采用二维方差分析(Two-Way MANOVA),因素间的交互作用由软件自动取舍。不同处理组合对黄花蒿某参数的影响采用一维方差分析(One-way ANOVA),并用Duncan进行多重比较,检验的显著性界限水平定为0.05。数据分析前进行自然对数转换,所用软件为SPSS11.5(SPSS Inc., USA),用SigmaPlot 9.0(SPSS Inc., USA)绘图。

2 结果分析

2.1 密度与施肥水平对黄花蒿各参数的影响

密度和施肥水平对多数黄花蒿植株大小、生物量分配和产量有关变量影响显著;且其交互作用对多数变量影响显著,但密度对黄花蒿株高影响不显著。施肥水平对黄花蒿单株生物量、株高和支持结构生物量分数影响不显著,密度和施肥水平的交互作用对黄花蒿单株生物量和叶生物量分数影响不显著(表1)。比较F值大小可知,参数变化的主要诱因除青蒿素含量由施肥水平决定,植株高度由密度

表 1 黄花蒿植株大小、生物量分配和产量参数的双因素方差分析

Table 1 Two-way MANOVA analysis of variance of plant size, biomass allocation and yield variables measured for *A. annua* grown under different planting densities and fertilization levels

分组 Group	变量 Variable	密度 Density	施肥 Fertilization	密度 × 施肥 Density × Fertilization
自由度 <i>df</i>		2	2	4
植株大小 Plant size	生物量 Biomass	190.65 ***	2.14	0.49
	株高 Height	2.61	2.02	3.10 *
	分枝数 Branches	202.92 ***	50.41***	30.30***
生物量分配 Biomass allocation	基径 Basal diameter	337.25 ***	39.74***	10.15***
	根生物量分数 RMF	60.71 ***	14.00***	2.82*
	支持结构生物量分数 SBF	41.59 ***	0.51	4.56**
	叶生物量分数 LMF	4.25 *	4.15*	2.15
产量 Yield	根/冠比 R/C	58.05 ***	12.55***	3.46*
	叶产量 Leaf yield	343.60 ***	20.87***	16.56***
	青蒿素产量 Artemisinin yield	324.71 ***	20.32***	13.72***
	青蒿素含量 Artemisinin content	7.97**	9.51 ***	3.99*

注 (Note): RMF—Root mass fraction; LMF—Leaf mass fraction; SBF—Supporting organs biomass fraction; R/C—Root mass/Crown mass. 每一参数变化决定因子的 *F* 值突出显示 *F*-values of factors having the largest effect on a plant variable are given in bold. * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$.

和施肥水平的交互作用决定外,密度是黄花蒿植株大小、生物量分配和产量有关参数的主要决定因子。

2.2 密度与施肥水平对黄花蒿植株大小的影响

高密度条件下,黄花蒿高施肥水平的株高显著高于其他两个施肥水平;中、低密度各施肥水平的株高无显著差异(图 1A)。不施肥时,中密度黄花蒿的株高显著高于高密度,低密度与中、高密度均无显著差异;低施肥水平下,各密度间株高无显著差异。高施肥水平下,株高表现为高密度黄花蒿显著高于低密度,中密度与高、低密度均无显著差异(图 1A)。中、高密度各施肥水平分枝数无显著差异,低密度低施肥水平的分枝数最大,显著大于不施肥;各施肥水平,黄花蒿的分枝数均随密度的减小而显著增多(图 1B)。各密度条件下,施肥水平对黄花蒿的单株生物量影响不显著;各施肥水平,黄花蒿的单株生物量均随密度的减小而显著增大(图 1C)。高密度高施肥水平的基径显著小于其他两个施肥水平,中、低密度基径均随施肥水平增加呈先升后降的趋势;各施肥水平下,黄花蒿的基径均随密度的减小而显著增大(图 1D)。所有处理中,高密度高施肥水平黄花蒿的株高最高,低密度低施肥水平的分枝数、基径和生物量最大。

2.3 密度与施肥水平对黄花蒿生物量分配的影响

各密度黄花蒿的根生物量分数和根/冠比均随

施肥水平的增高而降低,其中低密度各施肥水平间差异显著;各施肥水平低密度黄花蒿的根生物量分数和根/冠比均显著大于中、高密度(图 2A、D)。各密度黄花蒿的支持结构生物量分数随施肥水平的变化趋势不一,但不施肥和低施肥水平黄花蒿的支持结构生物量分数却随密度的增大而显著增大;高施肥水平,中、高密度的支持结构生物量分数显著大于低密度(图 2B)。高密度黄花蒿的叶生物量分数随施肥水平的增高而显著增大,中、低密度施肥对黄花蒿的叶生物量分数影响不显著;不施肥和低施肥水平,中、低密度黄花蒿的叶生物量分数显著大于高密度,高施肥水平各密度差异不显著(图 2C)。所有处理中,低密度不施肥黄花蒿的根生物量分数和根/冠比最大,高密度低施肥水平的支持结构生物量分数最大,中密度低施肥水平的叶生物量分数最大。

2.4 密度与施肥水平对黄花蒿青蒿素含量和产量的影响

高密度条件下,黄花蒿青蒿素含量随施肥量增加而显著降低。中密度条件下,施肥对青蒿素含量影响不显著;低密度条件下,低施肥水平的青蒿素含量显著高于高施肥水平。不施肥时,不同密度黄花蒿的青蒿素含量差异不显著。低施肥水平,高密度黄花蒿的青蒿素含量显著低于低密度;高施肥水平,高密度黄花蒿的青蒿素含量显著低于中、低密度

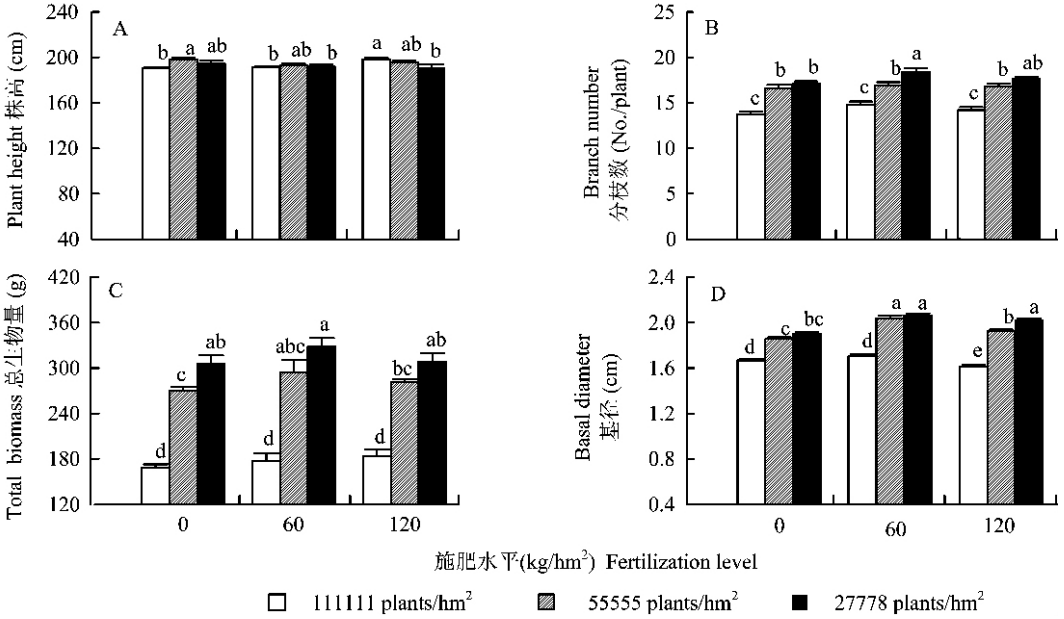


图 1 密度与施肥水平对黄花蒿植株大小的影响

Fig. 1 Effects of the planting densities and fertilization levels on variables related to plant size of *A. annua*

[注 (Note): 柱上不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

Different letters above the bars indicate significant differences ($P < 0.05$) according to Duncan multiple test.]

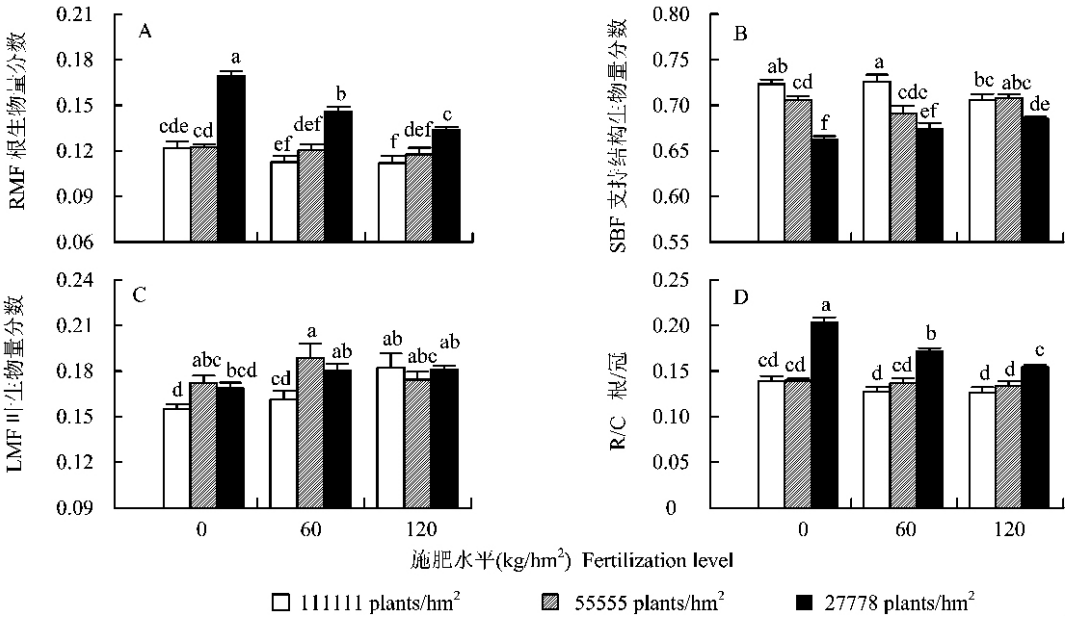


图 2 密度与施肥水平对黄花蒿生物量分配的影响

Fig. 2 Effects of the planting densities and fertilization levels on variables related to biomass allocation of *A. annua*

[注 (Note): RMF—Root mass fraction; LMF—Leaf mass fraction; SBF—Supporting organs biomass fraction; R/C—Root mass/crown mass.

柱上不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different letters above the bars indicate significant differences ($P < 0.05$) according to Duncan multiple test.]

(图 3A)。高密度,黄花蒿的叶产量和青蒿素产量均随施肥量的增多而显著增大;中密度,低施肥水平黄花蒿的叶产量和青蒿素产量显著大于高施肥和不施肥;低密度施肥对黄花蒿叶产量和青蒿素产量影

响不显著(图 3B、C)。不施肥和高施肥水平,黄花蒿叶产量和青蒿素产量随密度的增大而显著增大,低施肥水平,中密度黄花蒿叶产量和青蒿素产量最大,高密度次之(图 3B、C)。所有处理中,低密度低施肥

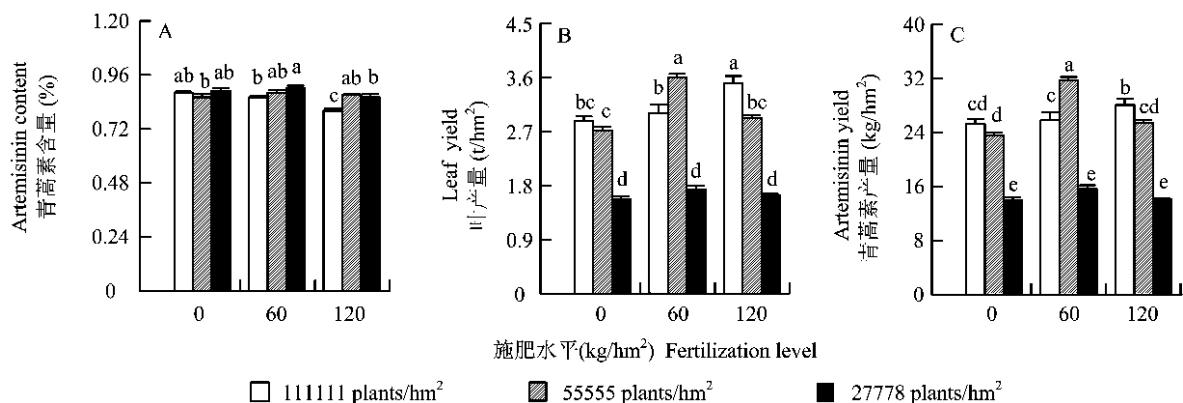


图3 密度与施肥水平对黄花蒿青蒿素含量和产量的影响

Fig.3 Effects of the planting densities and fertilization levels on variables related to artemisinin content and yield of *A. annua*

[注 (Note): 柱上不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)

Different letters above the bars indicate significant differences ($P < 0.05$) according to Duncan multiple test.]

水平黄花蒿的青蒿素含量最高,中密度低施肥水平的叶产量和青蒿素产量最大。

3 讨论

当存在密度效应(高密度)时,由于竞争养分、水分、光和物理空间,植物个体的生物量减小^[4]。各施肥水平,黄花蒿的基径与分枝均随密度的降低而显著增大,其单株生物量也均随密度的降低而显著增大(图1)。由于种内竞争和养分有效性之间的复杂关系,生物量分配对密度的反应较为复杂。Hickmar^[10]认为,在竞争(高密度)条件下,植物将更多的资源分配到枝和叶,则有利于增强个体截留光能的能力,这一分配行为的结果便是分配到根的生物量比例降低。各施肥水平下,中、高密度黄花蒿的支持结构生物量分数均显著大于低密度;低密度黄花蒿的根生物量分数和根/冠比显著大于中、高密度(图2)。尽管各施肥水平下,低密度黄花蒿的单株生物量最大,但由于单位种植面积的植株数减少,低密度的叶产量和青蒿素产量均显著低于中、高密度(图3)。

养分是影响植物生长的重要环境因子,分析物种对养分资源响应的可塑性,可了解物种对养分环境的适应机制和生态分布规律^[11]。各密度条件下,施肥水平对黄花蒿的单株生物量影响不显著,表明黄花蒿对养分变化的适应性较强,这与其在野外的分布情况一致。养分有效性影响植物的生物量分配,养分减少导致更多的生物量分配到根,根/冠比增大,养分增大可导致植物枝叶生物量增加,从而导致种群内地上部分竞争的增加^[12]。施肥显著影响

黄花蒿的生物量分配,低密度下,其根生物量分数和根/冠比随施肥水平的增高而显著降低;高密度下,黄花蒿叶生物量分数随施肥水平的增高而显著增大。低养分时,增加吸收器官的生物量分配,有利于养分吸收;高养分时,更多的生物量投入同化器官,有利于碳积累。尽管施肥对黄花蒿单株生物量影响不显著,但由于对叶生物量分配的影响,施肥使中、高密度黄花蒿的叶产量显著增大(图2、图3)。

本研究中,密度和施肥水平对多数黄花蒿植株大小、生物量分配和产量有关变量影响显著,且对多数变量存在显著的交互作用。除青蒿素含量由施肥水平决定,植株高度由密度和施肥水平的交互作用决定外,密度是黄花蒿植株大小、生物量分配和产量有关参数的主要决定因子。因此,在黄花蒿栽培过程中,尤其要重视合理密植。首先要确定合理的密度,在合理密植的基础上,再确定适宜的施肥量,这与Simor^[6]和崔广林^[7]的研究结果一致。所有处理中,中密度低施肥水平(55555株/hm²,60kg/hm²)的叶产量和青蒿素产量最大,高密度高施肥水平次之。从低成本高收益的角度分析,中密度低施肥水平既能获得高产,植株材料与肥料投入也均较小,因此在本试验土壤条件下,以每公顷种植55555株,施氮60kg为宜。崔广林^[7]认为,大田栽培采用24000~30000株/hm²密度条件时,施肥水平高时发挥的肥效较好。研究结果的不同可能与栽培土壤养分有关。本试验的土壤有机质和氮含量较丰富,而崔广林的研究是在土壤有机质和氮含量较缺乏的地块进行的,因此具体的施肥量还要根据植物的养分需求特性和土壤养分条件来决定。

参考文献:

- [1] 刘春朝,王玉春,欧阳藩. 青蒿素研究进展[J]. 化学进展, 1999, 11(1): 41-48.
Liu C C, Wang Y C, Ouyang P. Advances in artemisinin research [J]. Prog. Chem., 1999, 11(1): 41-48.
- [2] Weiner J, Thomas S C. Competition and allometry in three species of annual plant [J]. Ecol., 1992, 73(2): 648-656.
- [3] 李博, 陈家宽, Watkinson A R. 植物竞争研究进展[J]. 植物学通报, 1998, 15(4): 18-29.
Li B, Chen J K, Watkinson A R. A literature review on plant competition [J]. Chin. Bull. Bot., 1998, 15(4): 18-29.
- [4] Casper B B, Cahill J F. Population-level responses to nutrient heterogeneity and density by *Abutilon theophrasti* (Malvaceae): an experimental neighborhood approach [J]. Am. J. Bot., 1998, 85: 1680-1687.
- [5] Fichtner K, Schulze E D. The effect of nitrogen nutrition on growth and biomass partitioning of annual plants originating from habitats of different nitrogen availability [J]. Oecologia, 1992, 92: 236-241.
- [6] Sinon J E, Charles D, Cebert E *et al.* *Artemisia annua* L.: A promising aromatic and medicinal [A]. Janick J, Simon J E (eds). Advances in new crops [C]. Portland, OR: Timber Press, 1990. 522-526.
- [7] 崔广林. 施肥水平和种植密度对青蒿生长动态及有效成分影响的研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2008. 80-81.
Cui G L. Effect of fertilization levels and planting density on growth dynamics and effective components of *Artemisia Annua* L [D]. Chongqing: Southwest University, 2008. 80-81.
- [8] 韦霄, 李锋, 许成琼, 等. 不同栽培措施对黄花蒿产量和青蒿素含量的影响 [J]. 广西科学院学报, 1999, 15(3): 132-136.
Wei X, Li F, Xu C Q *et al.* The effect of different cultivation measures on yield and artemisinin content of *Artemisia annua* L. [J]. J. Guangxi Acad. Sci., 1999, 15(3): 132-136.
- [9] 刘金磊, 李典鹏, 韦霄, 等. 黄花蒿中青蒿素含量的 RP-HPLC 法测定 [J]. 广西植物, 2007, 27(5): 808-810.
Liu J L, Li D P, Wei X *et al.* Determination of artemisinin in *Artemisia annua* with RP-HPLC [J]. Guihaia, 2007, 27(5): 808-810.
- [10] Hickman J C. Environmental unpredictability and plastic energy allocation strategies in the annual *Polygonum cascadense* (Polygonaceae) [J]. J. Ecol., 1975, 63: 689-701.
- [11] Elberse I A M, Van Damme J M M, Van Tienderen P H. Plasticity of growth characteristics in wild barley (*Hordeum spontaneum*) in response to nutrient limitation [J]. J. Ecol., 2003, 91: 371-382.
- [12] Forrest M J, Brain C M. Responses of the biennial forest herb *Alliaria petiolata* to variation in population density, nutrient addition and light availability [J]. J. Ecol., 2000, 91: 371-382.