

# 濒危植物桫欏个体生态场梯度的研究

宋萍<sup>a</sup>,洪伟<sup>a\*</sup>,吴承祯<sup>a</sup>,封磊<sup>b</sup>,范海兰<sup>a</sup>,刘用心<sup>a</sup>

(福建农林大学, a. 林学院, b. 资源与环境学院, 福州 350002)

**摘要:**通过构建濒危植物桫欏(*Alsophila spinulosa*)个体生态场梯度模型,研究桫欏个体生态场梯度的变化特征。随着与场源距离的增加,桫欏个体生态场梯度先逐渐升高,达到最大值后又逐渐降低并收敛于零,其变化形式符合Rayleigh分布。不同地段的桫欏种群个体场梯度大小变化幅度不同,最大场梯度值以及出现最大场梯度时的作用距离亦不相同。随作用距离增加,场梯度的收敛速度差异增大。

**关键词:**桫欏; 个体生态场; 生态场梯度; 生态势

中图分类号: Q948.122.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3395(2009)01-0062-06

## Study on the Individual Ecological Field Gradient of the Endangered Plant *Alsophila spinulosa*

SONG Ping<sup>a</sup>, HONG Wei<sup>a\*</sup>, WU Cheng-zhen<sup>a</sup>, FENG Lei<sup>b</sup>, FAN Hai-lan<sup>a</sup>, LIU Yong-xin<sup>a</sup>

(a. College of Forestry; b. College of Resources and Environment, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract:** Characteristics of the individual ecological field gradient of the endangered plant *Alsophila spinulosa* was studied by constructing the individual ecological field gradient model. With the increment of the distances to field source plants, the individual ecological field gradients of *Alsophila spinulosa* increased gradually at first to the maximal values, then decreased gradually and converged at zero at last. The varying form fitted Rayleigh distribution. Variances were found among the varying amplitudes of the individual ecological field gradients of *Alsophila spinulosa* in different sites. The maximal gradient values and effect distances of the maximal gradients also varied. With the increment of effect distances, the convergent velocities of field gradients were different.

**Key words:** *Alsophila spinulosa*; Individual ecological field; Gradient of ecological field; Ecological potential

桫欏(*Alsophila spinulosa*)又称树蕨,是白垩纪末、第三纪早期冰川的孑遗植物,世界上最古老的活化石和目前仅存的几种珍稀木本蕨类植物之一。它对研究古气候与植物起源、进化和植物地理区系具有重要价值;同时,它还具有极高的园艺观赏价值、药用价值及其它多种用途。由于桫欏孢子萌发、发育及与配子体结合对环境要求甚高,目前人为活动频繁,生态环境正朝着不利于桫欏配子体发育的方向发展,致使该树种处于濒危状态<sup>[1]</sup>,成为我国二级重点保护植物<sup>[2]</sup>。

受物理学“场论”的思想启示,1985年,Wu等第一次在生态分析中引入了生态场的概念,提出了解释植物与环境相互作用的生态场理论,其以一种

全新的思维角度与较为严格的定量模型,希冀从机理上探求生物及其与资源环境生态过程中的相互作用的机制与规律<sup>[3]</sup>。一些研究已经表明,应用生态场方法,对木本植物及草本植物个体之间相互作用进行描述是可行的<sup>[3-11]</sup>。自从1985年生态场的概念提出以来,国内外许多学者先后进行了一系列相关方面的研究<sup>[3-12]</sup>,虽然越来越多的生态学工作者开始致力于这方面的研究,但迄今有关生态场的报道并不多,生态场理论仍处于理论框架的建造阶段,建立的场函数或参数模型也不多,其各方面都需要进行深入探讨和研究。

生态场的基本特征函数是生态势。生态场中任意一点的生态势,反映着生态场在该点作用的强

弱与形式,但这仅仅是从静态的观点表示场的性质。为了更深入地了解植物生态场的性质及其作用行为,研究生态场与场源植物之间的关系,有必要从动态变化的观点分析生态场的空间作用变化<sup>[1]</sup>。经典物理学场论认为,梯度是场分布的基本性质之一,有场的分布,必然有梯度的存在。野外实验观测表明,自然植物群落中生态场或生态势的分布是呈梯度变化的,梯度的存在对生态场和物理场具有相同的意义<sup>[13]</sup>。植物生态势沿任意方向存在着不同变化率,这种变化率可以用植物生态场梯度来表示,应用生态场梯度,可以进一步刻画植物作用的空间分布、生态势的作用特性与时变规律,可以认为,植物生态场的梯度是生态场的特征函数之一<sup>[3]</sup>。本研究拟通过构建濒危植物桫欏个体生态场梯度模型,对桫欏个体生态场梯度的变化特征进行研究,从而为进一步探索植株个体生态场的作用特性及空间变化规律等奠定基础。

## 1 研究区概况

福建省瓜溪桫欏自然保护区位于福安市西南部,中心位置在东经 119°31',北纬 26°58'。保护区属中亚热带海洋性季风气候。区内山高谷深,溪流纵横,植被茂密。年平均气温 19.2 ~ 19.8℃,年平均日照时数 1 905.8 h,年平均相对湿度 84%,无霜期 290 d,年平均降水量 1 350 ~ 2 150 mm。土壤呈地带性分布,高山为典型黄壤,低山为典型红壤和水化红壤,在红壤和黄壤之间有明显的黄红壤过渡地带,土壤肥力较高。植被属中亚热带照叶林植被带,闽中、闽东戴云山-鹫峰山北部常绿槭类照叶林小区。植物资源丰富,类型多样。保护区内桫欏种群多与毛竹 (*Phyllostachys edulis*)、大叶紫珠 (*Callicarpa macrophylla*)、芭蕉 (*Musa basjoo*) 或杉木

(*Cunninghamia lanceolata*)混生,林下植物主要有拟赤杨 (*Alniphyllum fortunei*)、三桠苦 (*Euodia lepta*)、楮头红 (*Sarcopyramis nepalensis*)、庐山楼梯草 (*Elatostema stewardii*)、杜茎山 (*Maesa japonica*)、细枝柃 (*Eurya loquiana*)、高粱泡 (*Rosa lambertianus*)、紫麻 (*Oreocnide frutescens*)、中华里白 (*Hicriopteris chinensis*)、铁线蕨 (*Adiantum capillusveneris*)、海金沙 (*Lygodium japonicum*)、肾蕨 (*Nephrolepis auriculata*)、蕨 (*Pteridium aquilinum*)、芒萁 (*Dicranopteris dichotoma*)等<sup>[1]</sup>。

## 2 研究方法

### 2.1 样地调查

在全面勘察的基础上,在竹林山、龙竹栏、红妹竹林、白水瀑边、蝙蝠洞、桫欏林、桫欏苗地、大竹栏 8 个桫欏分布的代表地段,根据桫欏分布情况,以 10 m × 10 m 为单位样方,分别设置总面积为 600 m<sup>2</sup>、700 m<sup>2</sup>、600 m<sup>2</sup>、500 m<sup>2</sup>、500 m<sup>2</sup>、600 m<sup>2</sup>、500 m<sup>2</sup>、300 m<sup>2</sup>的样地,对样地内的桫欏个体,调查株高、地径、冠幅、冠高、茎干高度、最大叶片的长度以及茎干高大于 1.3 m 的个体的胸径。同时观测各地段群落环境概况(表 1)。

### 2.2 桫欏个体生态场梯度模型

#### 2.2.1 桫欏个体生态场特征函数

将对周围产生作用的植物作为“场源”,以能反映场源植物的生长变化、生态场作用的衰减和具有实验可测性作为模型参数选择的原则,建立桫欏个体生态场生态势模型:

$$\phi(r) = kf\zeta(r)g \quad (1)$$

式中, $r$  为向量,表示场源植物作用距离; $f$  为个体

表 1 不同地段的群落环境概况

Table 1 Environmental survey of community in different sites

样地 Plot	地点 Location	海拔 (m) Elevation	坡向 Aspect	坡度 (°) Slope	郁闭度 Canopy density	林型 Forest type
Q1	竹林山 Zhulinshan	370	WN	32	0.40	杉木 + 毛竹 + 芭蕉 <i>C. lanceolata</i> + <i>P. edulis</i> + <i>M. basjoo</i>
Q2	龙竹栏 Longzhulan	370	W	28	0.45	杉木 <i>C. lanceolata</i>
Q3	红妹竹林 Hongmeizhulin	380	WN	32	0.60	毛竹 <i>P. edulis</i>
Q4	白水瀑边 Baishuipubian	385	N	36	0.40	毛竹 + 大叶紫珠 <i>P. edulis</i> + <i>C. macrophylla</i>
Q5	蝙蝠洞 Bianfudong	405	WN	31	0.40	毛竹 <i>P. edulis</i>
Q6	桫欏林 Suoluolin	395	W	35	0.50	大叶紫珠 + 芭蕉 + 毛竹 <i>C. macrophylla</i> + <i>M. basjoo</i> + <i>P. edulis</i>
Q7	桫欏苗地 Suoluomiaodi	340	S	38	0.25	杉木 <i>C. lanceolata</i>
Q8	大竹林 Dazhulin	330	N	25	0.50	毛竹 + 杉木 <i>P. edulis</i> + <i>C. lanceolata</i>

最大影响程度,以植株高度比表示, $f=H/H_{max}$ ;  $\zeta(r)$  为生态势消减系数;  $g$  为场源植物相对生活力参数,为方便测量,并根据桫欏每年从植株顶端抽出新芽生长成叶片的特性、植物叶面积对其光合作用强度具有重要影响以及桫欏叶片本身的形状特点,相对生活力参数采取植株最大叶片的相对长度来表达,即  $g=L/L_{max}$ ,其中  $L$  为植株最大叶片的长度,  $L_{max}$  为种群中所有植株最大叶片长度中的最大值;  $k$  为生态势模型系数,无实际意义。桫欏个体生态势消减系数方程为:

$$\zeta(r) = \frac{\exp(-\alpha r)}{1 + \exp[\beta(1+r^2-R^2)]} \quad (2)$$

其中,  $\alpha$  为茎影响的衰减指数,定义为  $\alpha=1/h$ ,  $h$  为场源桫欏的茎干高度;  $\beta$  为冠影响的衰减指数,定义为  $\beta=1/R$ ,  $R$  为植株冠半径。

为消除植物个体形态差异的影响,引入相对空间立地距离的概念<sup>[6]</sup>,设  $h_c$  为冠层中心点距地面的高度,  $x$  为距植株着生点的水平距离,则植株相对空间距离为:  $1 + (\sqrt{1+(x/h_c)^2} - \sqrt{1+(R/h_c)^2})^2 = 1 + (x/h_c)^2 - (R/h_c)^2$ ; 株茎相对空间距离为:  $\sqrt{1+(x/h_s)^2}$ ,这里  $h_s$  表示茎干中心到地面的高度。则桫欏个体生态势模型表达为:

$$\phi(x) = k \frac{H}{H_{max} 1 + \exp\left\{\beta\left[1 + \left(\frac{x}{h_c}\right)^2 - \left(\frac{R}{h_c}\right)^2\right]\right\}} \frac{L}{L_{max}} \exp\left[-\alpha\sqrt{1 + \left(\frac{x}{h_s}\right)^2}\right] \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{grad}\phi(x) &= \left| k\phi(x) \left\{ \frac{\alpha}{h_s \sqrt{1+(x/h_s)^2}} - \frac{2\beta x}{h_c^2 + h_c^2 \exp\{-\beta[1+(x/h_c)^2 - (R/h_c)^2]\}} \right\} \right| \\ &= k\phi(x) \left\{ \frac{\alpha}{h_s \sqrt{1+(x/h_s)^2}} \right\} + \frac{2\beta x}{h_c^2 + h_c^2 \exp\{-\beta[1+(x/h_c)^2 - (R/h_c)^2]\}} \end{aligned} \quad (5)$$

表 2 桫欏个体平均株生态势模型参数值

Table 2 Parameter of ecological potential model for *A. spinulosa* of the average point

样地 Plot	个体数量 Individual number	参数 Parameter						
		$f$	$g$	$\alpha$	$\beta$	$R$	$h_s$	$h_c$
Q1	74	0.0959	0.2176	9.9973	1.9612	0.5099	0.0500	0.4242
Q2	136	0.0916	0.2233	7.2181	1.5294	0.6538	0.0693	0.4265
Q3	133	0.1267	0.2810	2.4301	1.2945	0.7725	0.2058	0.7002
Q4	29	0.2754	0.4207	0.7339	0.7552	1.3242	0.6813	1.7554
Q5	19	0.3466	0.6864	0.4737	0.4103	2.4371	1.0556	2.4072
Q6	56	0.2576	0.4689	0.7219	0.7213	1.3864	0.6926	1.6971
Q7	86	0.0874	0.2353	6.1981	1.7864	0.5598	0.0807	0.4216
Q8	7	0.1258	0.4248	3.6045	1.1805	0.8471	0.1387	0.6294

此模型引用了 Wu 等<sup>[4]</sup>植物生态干涉势模型中某些参数的定义,如植株冠、茎及根系的影响程度方程等,并参考了王德利的羊草冠场及根系场生态势模型<sup>[3,14]</sup>。桫欏个体平均株的生态势模型参数值见表 2。

在生态势建模过程中作了如下简化与抽象:(1)在生态势模型中对获得的数据进行了相对化的无量纲处理,最大值为 1;(2)将桫欏个体看作以茎干轴为中线的对称体,将冠切面看作圆形,个体间形态一致,但大小有别;(3)个体对周围的作用不考虑方向性。

### 2.2.2 桫欏个体生态场梯度模型

植物群落中任意一株植物形成的生态场,沿任意方向以其作用距离  $x$  为变量,通过对其进行一次求导,可以求得生态场生态势沿作用距离上的连续动态变化函数,即为生态场梯度模型<sup>[13]</sup>,记作:

$$\text{grad}\phi(x) = \left| \frac{\partial\phi}{\partial x} \right| \quad (4)$$

其中,  $\Phi$  为生态势,  $x$  为作用距离。对  $\Phi(x)$  的一阶偏导数给予绝对值,在这里是将它看作一个标量,即仅作为只有空间变化率大小而没有考虑它的方向性。

应用生态场梯度模型,就能定量描述植物生态场的空间作用变化率,通过对桫欏个体生态势模型(3)式进行求导,就可以获得桫欏个体生态场梯度模型,即:

其中  $k$  为模型系数, 无实际意义。

当令  $\text{grad}\phi(x)' = 0$ , 则可以求出  $\text{grad}\phi(x)$  的最大值, 即为生态场空间变化率最快的点, 方程为:

$$\phi(x) \left\{ \frac{\alpha^2}{h_s^2 [1 + (h_s/x)^2]} + \frac{4\alpha\beta x}{h_s h_c^2 \sqrt{1 + (h_s/x)^2} \{1 + \exp\{-\beta[1 + (x/h_c)^2 - (R/h_c)^2]\}\}} \right. \\ \left. - \frac{\alpha h_s}{x^3 [1 + (h_s/x)^2]^{3/2}} - \frac{2R\beta^2 h_c^2 - 4\beta^2 x^2}{h_c^4 \{1 + \exp\{-\beta[1 + (x/h_c)^2 - (R/h_c)^2]\}\}} \right\} = 0 \quad (6)$$

### 3 结果和分析

#### 3.1 生态场梯度的变化规律

一株植物的存在状态及生理活动使邻近的资源条件和环境因子在时间与空间上发生连续变化, 如同一个连续场, 生态场就是生物之间相互作用的生态空间<sup>[4]</sup>。实际上生态场中某一点的生态势, 表明了该处具有的生物潜能。如果将生态场中的植物对场中某点或其它植物的影响看作是一个主动作用过程, 那么植物就被作为“场源”, 在它的周围形成自己的生态场, 其生态势越大, 对周围环境及其它植物的作用就越强, 周围环境所具有的生物潜能就越小, 而作为“场源”植物, 它的生态势越大, 又说明它所处的资源环境状况好, 有较强的生长与影响能力<sup>[3]</sup>。

有生态场的存在, 就有场梯度的变化。场梯度刻划了生态场分布或生态势的空间变化率, 也就是说场梯度反映了随作用距离改变的生态势变化<sup>[4]</sup>。杪椋个体(平均株)场梯度随与场源植物作用距离的增大呈现的变化规律是: 首先场梯度逐渐增大, 在某一距离点上达到场梯度的最大值, 随后又逐渐降低并收敛于零(图 1)。可见, 杪椋个体生态势的变化率, 即消减速率在近干处不大, 但随与场源植物距离的增大呈上升趋势, 并在一定作用距离上消减速率最快, 此时场作用迅速减弱, 这一作用距离之外, 场作用就已经非常小了。由此表明杪椋个体对周围环境及其它植物的作用强度在近干处的空间分布相对较稳定, 此处的生物潜能分布较均衡; 而随与杪椋个体距离的增加, 植株对周围环境及其它植物作用强度不断下降, 其空间分布呈现出明显的梯度, 生物潜能也相应呈现快速增加分布规律; 作用强度在经过快速衰减之后, 随距离的增加空间变化率逐渐减小,

分布趋于稳定, 生物潜能的空间分布趋于均衡。杪椋个体生态场梯度的变化规律与羊草生态场梯度的变化规律相似<sup>[3]</sup>, 其变化形式符合 Rayleigh 分布, 属于 Weibull 分布的一种特殊形式。

杪椋种群个体场梯度的大小除与场源植物作用距离有直接关系外, 还同生态势、茎高、冠径等相关, 这些因素综合影响着场梯度曲线的高度与宽度。一般, 茎高和冠径越大, 即势衰减指数越小, 相对空间距离越大, 则生态势消减速率越小, 势消减得越慢, 场梯度曲线则越低, 宽度越大, 意味着最大场梯度值越小, 场梯度的相对波动幅度越小, 场梯度随与场源植物的作用距离增大而收敛得越慢。另外, 场梯度的变化是植物生态场作用空间分布不均匀性的反映。

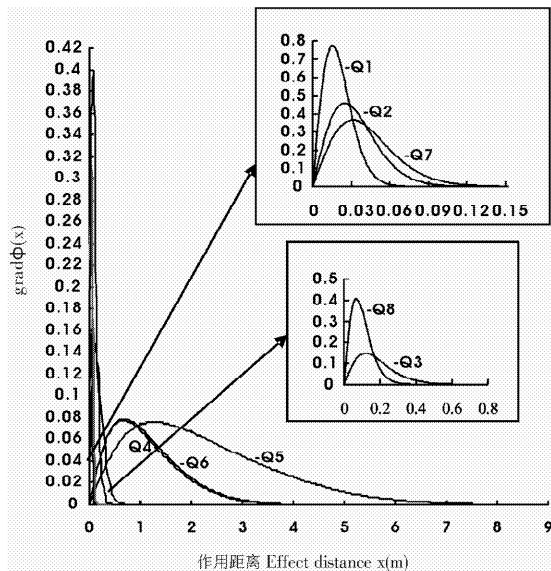


图 1 不同地段杪椋个体生态场梯度的差异  
Fig. 1 Changes in ecological field gradient for average individual of *A. spinulosa* populations in different sites

表 3 不同地段杪椋种群平均个体最大生态场梯度及其作用距离

Table 3 The maximal ecological field gradient and its effect distance for average individual of *A. spinulosa* populations in different sites

地段 Site	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8
场梯度最大值 Maximal value of field gradient	0.7732	0.4591	0.1487	0.0771	0.0755	0.0787	0.3653	0.4082
最大场梯度的作用距离 Effect distance of maximal field gradient (m)	0.0154	0.0250	0.1210	0.6651	1.2715	0.6823	0.0312	0.069

### 3.2 不同地段杪椏个体生态场梯度的差异

场梯度的变化因植物种类有很大差异,同一种内的不同个体之间由于大小不同,场梯度也有差异。不同地段杪椏种群平均个体生态场梯度差异显著(图 1),进而说明不同地段杪椏种群平均个体生态势空间变化率大小具有明显差异。地段 Q1 的种群平均个体的场梯度曲线是所有地段种群平均个体场梯度曲线中最高的,并且是最窄的,意味着它的场梯度波动幅度最大,最大场梯度值最大(0.7732,表 3),且场梯度随与场源植物距离的增大收敛得最快,同时它出现最大场梯度时的作用距离最小,为 0.0154 m(表 3)。表明地段 Q1 内种群个体生态势的消减速率随与场源个体距离的增大而迅速增加,且增加程度较大,种群个体对周围环境及其它植物作用强度的空间分布极不均匀,生物潜能呈现随空间变化而快速增加的梯度分布,在大约 0.0154 m 处生态势的消减速率最大,生态场空间变化最强烈,随后消减速率又迅速下降,生态场作用趋于零,相应的生物潜能达到最大,分布趋于稳定。Q1 内的种群以幼苗、幼株为主,平均植株个体小,茎高和株冠小,生态场作用强度和作用范围小,因此,随与场源植物距离的增大,生态势消减速率会迅速升高,引起生态场作用的迅速减弱,以致在极小的距离内,生态势便消减到近乎于零。而地段 Q5 内的种群平均个体场梯度曲线是所有地段种群个体场梯度曲线中最低的,且是最宽的,显示其场梯度波动幅度最小,最大场梯度值最小(0.0755,表 3),且场梯度随与场源植物距离的增加收敛的最慢,同时它出现最大场梯度时的作用距离最大,为 1.2715 m(表 3)。表明 Q5 内的种群个体场势的消减速率随与场源植物距离的增大,增加缓慢,且增加程度不大,种群个体对周围环境及其它植物作用强度的空间分布变化相对较平缓,生物潜能随空间的变化梯度较宽,在作用距离大约 1.2715 m 处生态势消减速率升至最大值,随后又缓慢下降至零。地段 Q5 内种群以大、中型植株为主,平均植株个体大,茎高和株冠大,生态场作用强度和作用范围都很大,因此,随与场源植物距离的增大,生态场作用缓慢减弱,场作用能波及到较大范围。其它地段杪椏种群平均个体场梯度的变化极值及收敛快慢程度介于 Q1 与 Q5 内的种群平均个体之间(图 1,表 3)。以上分析可见,同一种内不同个体间生态场梯度,即生态势空间变化率的大小取决于个体

的大小,个体大的植株,生态势空间变化率小,衰减慢,作用范围大,而个体小的植株,生态势空间变化率大,衰减迅速,作用范围小。因此,通过生态场梯度的分析,可以进一步了解植株个体生态场的作用特性、空间变化规律及空间分布等。

## 4 结论和讨论

生态场中梯度的存在,还可以通过受场源植物影响而产生其周围作用空间的生态因子的梯度变化加以说明。对于一个森林群落,从其边缘开始,空气的温度就存在梯度变化<sup>[15-16]</sup>。熊文愈和王汉杰<sup>[5]</sup>、王信理和熊文愈<sup>[17]</sup>在对生态界面的研究中,竹林和茶树植物群落的冠层对周围一定区域的小气候因素—水分、温度、CO<sub>2</sub>含量等都有一个梯度作用或影响。因而,植物个体与群体周围的生存空间或作用空间都是连续而有规律性变化的,那么植物生态场梯度变化或作用效果就显示出来了<sup>[9]</sup>。

植物生态场梯度的变化可以揭示生态势空间分布的不均匀性。杪椏种群平均个体生态场梯度分析表明,随与场源植物距离的增加,生态势空间变化率呈现先升后降的变化规律,并在某一作用距离上具有最大变化率,变化形式符合 Rayleigh 分布,反映出杪椏对周围的作用呈逐渐减小的规律,但衰减的速率并不均匀。杪椏种群个体场梯度的大小与场源植物作用距离、生态势、茎高、冠径等因素相关,这些因子综合起来影响着场梯度曲线的高度与宽度,即生态场作用的衰减速率。

不同地段的杪椏种群个体场梯度大小变化幅度不同,最大场梯度值以及出现最大场梯度时的作用距离不同,且随作用距离的增加,场梯度的收敛速度差异较大,其受场源植株个体大小的影响。植株个体小的地段(如 Q1),平均株个体生态势衰减快,出现生态势最大衰减速率的作用距离小。实际上在生态势出现最大衰减速率的范围之外,场源个体对周围的作用就变得很小了,其对于确定植物的作用范围很有意义<sup>[13]</sup>,因此可以说,个体小的植株生态场作用范围小。而植物个体较大的地段(如 Q5),平均株个体生态势衰减慢,出现生态势最大衰减速率的作用距离大,生态场作用范围大。

通过杪椏个体生态场梯度的分析,可以深入了解杪椏个体生态场作用的空间变化率,进一步探索植株个体生态场的作用特性、空间变化规律及空间分布等。

## 参考文献

- [1] 黄铃荣, 黄峰, 盖新敏. 福安瓜溪桫欏保护区生态环境分析 [J]. 林业勘察设计, 2002(1): 47-49.
- [2] Fu L G(傅立国). China Plant Red Data Book: Rare and Endangered Plants [M]. Beijing: Science Press, 1992:10-11.(in Chinese)
- [3] Wang D L(王德利). Introduction to Plant Ecological Field [M]. Changchun: Jilin Science & Technology Press, 1994:30-71.(in Chinese)
- [4] Wu H I, Sharp P J H, Walker J, et al. Ecological field theory (EFT): A spatial analysis of resource interference among plants [J]. Ecol Model, 1985, 29: 215-243.
- [5] Walker J, Sharpe P J H, Penridge L K, et al. Ecological field theory: The concept and field test [J]. Vegetation, 1989, 83: 81-95.
- [6] Wang G X(王根轩), Zhao S L(赵松岭). The spatial distribution of the ecological field in spring wheat colony under semi-arid ecological conditions [J]. Acta Ecol Sin(生态学报), 1995, 15(2): 121-127.(in Chinese)
- [7] Cong P T(丛沛桐), Yu J H(于景华), Zhao Z H(赵则海), et al. Studies on ecological field of *Quercus liaotungensis* forest, Dangling Mountain [J]. Bull Bot Res(植物研究), 2001, 21(1): 147-151.(in Chinese)
- [8] Miina J, Pukkala T. Application of ecological field theory in distance-dependent growth modeling [J]. For Ecol Manag, 2002, 161: 101-107.
- [9] Wu S J(吴淑杰), Dai F T(戴芳天), Li X J(李晓杰). Approach on the relationship between crown influencing function of ecological field and tree crown structure for Larch [J]. J NE For Univ(东北林业大学学报), 2003, 31(2): 39-40.(in Chinese)
- [10] Wang Y Q(王亚秋), Wang D L(王德利). The improved model of plant ecological field and the case analyzing [J]. Acta Ecol Sin(生态学报), 2005, 25(11): 2855-2861.(in Chinese)
- [11] Lin Y D(蒯银鼎), Han X M(韩学孟), Wu X G(武小刚), et al. Ecological field characteristic of green land based on urban green space structure [J]. Acta Ecol Sin(生态学报), 2006, 26(10): 3339-3346.(in Chinese)
- [12] Li B L, Wu H I, Zou G Z. Self-thinning rule: A causal interpretation from ecological field theory [J]. Ecol Model, 2000, 132: 167-173.
- [13] Wang D L(王德利), Zhu T C(祝廷成). Regularity of the ecological potential and gradient of aboveground ecological field of *Aneurolepidium chinense* and their seasonal changes under different population density [J]. Acta Ecol Sin(生态学报), 1996, 16(2): 121-127.(in Chinese)
- [14] Wang D L(王德利), Zhu T C(祝廷成). Ecological field gradient of *Aneurolepidium chinense* under different population density and its dynamic characteristics [J]. Chin J Appl Ecol(应用生态学报), 1995, 6(1): 29-33.(in Chinese)
- [15] Xiong W Y(熊文愈), Wang H J(王汉杰). A study of turbulent dynamics of a bamboo (*Phyllostachys praecox*) ecosystem [J]. J Nanjing For Univ(南京林业大学学报), 1990, 14(2): 1-8.(in Chinese)
- [16] Chen J, Franklin J F, Spies T A. An empirical model for predicting diurnal air-temperature gradients from edge into old-growth Douglas-fir forest [J]. Ecol Model, 1993, 67: 179-198.
- [17] Wang X L(王信理), Xiong W Y(熊文愈). Structure of tea plantation's ecoboundary layer and its variation pattern [J]. Chin J Appl Ecol(应用生态学报), 1993, 4(3): 256-259.(in Chinese)