

# 武夷山风景名胜区景观空间格局变化 及其干扰效应模拟

何东进<sup>1</sup>, 洪 伟<sup>1\*</sup>, 胡海清<sup>2</sup>, 吴承祯<sup>1</sup>, 陈先珍<sup>3</sup>

(1. 福建农林大学, 福州 353002; 2. 东北林业大学, 哈尔滨 150040; 3. 武夷山风景名胜区管理委员会, 武夷山 354300)

**摘要:**景观空间格局是大小和形状不一的景观斑块在空间上的配置,它是各种生态过程在不同尺度上共同作用的结果,景观空间格局变化及其干扰研究对于准确掌握景观资源的动态过程以及进一步开展景观生态规划与建设具有十分重要的意义,因此,它是景观生态学研究的核心内容。以武夷山风景名胜区为研究对象,运用景观多样性、景观优势度、景观均匀度及景观破碎度等多种景观格局指数对武夷山风景名胜区不同时期景观格局进行研究,在此基础上,运用分室理论对未来 50a 武夷山风景名胜区在不同干扰程度下景观格局变化进行了模拟分析。结果表明:①从 1996 年至 2001 年,武夷山风景名胜区总斑块数从 421 块增加到 452 块,景观破碎度呈增大趋势。景观多样性从 0.6066 减少至 0.6028,而景观均匀度却增加了 0.0026,但景观格局总体上未出现显著的变化,即仍以天然马尾松林为基质景观,其它景观类型镶嵌其中的景观格局,表明了武夷山风景名胜区作为世界文化与自然遗产,受到较为有效的保护;②从局部上看,5a 间武夷山风景名胜区各景观类型除河流景观外均发生了一定的变化,其中杉木林、农田与马尾松林景观面积减少量居前 3 位,分别减少了 0.5644、0.2833、0.2804,而茶园与居住地面积却分别增加了 0.7285、0.0814km<sup>2</sup>。因此,毁林种茶是造成武夷山风景名胜区景观格局变化的主要原因;③不同干扰程度下景观格局变化模拟结果表明了武夷山风景名胜区景观多样性与均匀度均随着干扰强度的增大而增大,而优势度恰好相反,从而提供了一个证明“干扰是导致景观多样性增大”论断的有力实例。

**关键词:**武夷山风景名胜区;景观;空间格局;干扰;模拟

## Modeling landscape pattern dynamics and their effects under different disturbances in Wuyishan Scenery District

HE Dong-Jin<sup>1</sup>, HONG Wei<sup>1\*</sup>, HU Hai-Qing<sup>2</sup>, WU Cheng-Zhen<sup>1</sup>, CHEN Xian-Zhen<sup>3</sup> (1. Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Northeast Forestry University, Harbing 150040, China; 3. Administration Committee of Wuyishan Scenery District, Wuyishan 354300, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(8): 1602~1610.

**Abstract:** Located in the northwestern part of Fujian Province, Wuyi Mountain is the most outstanding area for biodiversity conservation in southeast China and a refuge for a large number of ancient, relict species, many of them endemic to China. In December 1999, Wuyi Mountain was included on the World Natural and Cultural Heritage List by the 23rd Session of the World Heritage Committee of the UNESCO, being given the comment “a natural landscape so unique, rare and marvelous, is the beauty of nature and embodiment of the harmonious relations between human being and environment”. Covering a total area of 999.75 square kilometers, Wuyi Mountain is now the largest of China’s World Heritage sites. The nominated area is divided into 4 parts, with the Biodiversity Preserve to the west, Nine-twist Stream Ecological Preserve in the center, Natural Beauty & Cultural Landscape Preserve to the east (i. e. Wuyishan Scenery District) and the ancient Chencun Minyue Relics to the southeast.

**基金项目:**福建省自然科学基金资助项目(C0310018);福建省科技厅重大资助项目(2001F007)

**收稿日期:**2003-08-19; **修订日期:**2004-02-20

**作者简介:**何东进(1969~),男,福建福鼎人,博士,教授,从事数量生态与景观生态学研究。

\* **通讯作者** Author for correspondence

**Foundation item:** the Provincial Natural Science Foundation of Fujian, China (No. C0310018) and the Key Project of the Provincial Science and Technology Department of Fujian, China (No. 2001F007)

**Received date:** 2003-08-19; **Accepted date:** 2004-02-20

**Biography:** HE Dong-Jin, Ph. D., Professor, mainly engaged in mathematical ecology and landscape ecology. E-mail: hedongjin1009@sina.com

Spatial landscape pattern mainly refers to the spatial distribution of patches in different sizes and shapes across the landscape, which results from the interaction of various ecological processes and forces. Study on landscape pattern changes and on the effects of landscape pattern distribution is very important for understanding the dynamic processes of landscape resources. It is also critical for appropriate ecological planning and landscape design. For this reason, landscape pattern dynamic is a key research area in landscape ecology. In this study, the Wuyishan Scenery District, one of the four sub-region in Wuyi Mountain, was chosen to study landscape pattern dynamic and their effects under different disturbances. This sub-region had been disturbed most severely as compared to the other three sub-regions in Wuyi Mountain, although in general all of the four regions have been well protected under strict management measure required for protecting a world heritage site. According to widely accepted landscape ecological classification principles, Wuyishan Scenery District was divided into 10 types of landscapes. They are *Pinus massoniana* forest, *Cunninghamia lanceolata* forest, economic forest, Bamboo forest, broad leafed forest, *Camellia sinensis* plantation, farmland, river, residential area and bare land. Landscape indices including landscape diversity index, dominance index, evenness index, and fragmentation index were used to analyze the changes of spatial pattern for these 10 types of landscapes from 1996 to 2001. Based upon this analysis, the compartment theory was applied to simulate landscape dynamics under different disturbance scenarios in the next five decades.

The results from this study show that the number of patches of Wuyishan Scenery District increased from 421 in 1996 to 452 in 2001. In other words, the degree of landscape fragmentation had increased over time. Analysis of the mean patch shape index indicates that *Pinus massoniana* forest has the most complex patch shape while residential area has the simplest one. In addition, average patch shape index for all landscape types except river are on decreasing trends. In the same five year period, the landscape diversity had decreased from 0.6066 in 1996 to 0.6028 in 2001, while the dominance index and evenness index had increased by 0.0038 and by 0.0026, respectively. However, even though these changes were underway, the overall landscape spatial pattern had not been significantly altered from 1996 to 2001, *Pinus massoniana* forest which was the matrix landscape in 1996, was still the dominant landscape in 2001. It comprised 60.42% of the total area in 1996 and 60.01% in 2001. Similarly, farmland and *Camellia sinensis* plantation were the second and the third major landscapes, respectively, both in 1996 and 2001. This suggests that as one of the World's natural and cultural heritages, Wuyishan Scenery District, has been well protected in the five years of the study period. On the other hand, the landscape sizes for all types of landscape except river had changed, *Cunninghamia lanceolata* forest, farmland and *Pinus massoniana* forest decreased by 0.5044, 0.2833, and 0.2804 km<sup>2</sup>, respectively, while *Camellia sinensis* plantation and residential area increased by 0.7285 and 0.0814 km<sup>2</sup>, respectively. It was determined that the major reason for the landscape pattern changes was the expansion of *Camellia sinensis* plantations. Transformation matrices from the simulation for the study area in the next 5 decades based on the compartment theory suggest that landscape diversity index and evenness index increased while dominance index decrease as the distribution intensify. This illustrates the theory that disturbance usually increases the landscape diversity.

**Key words:** Wuyishan Scenery District; landscape; spatial pattern; disturbance; simulation

文章编号: 1000-0933(2004)08-1602-09 中图分类号: Q149 文献标识码: A

景观空间格局是大小和形状不一的景观嵌块体在景观空间上的排列<sup>[1]</sup>。它是景观异质性的具体体现者,同时又是多种生态过程在不同尺度上作用的最终结果<sup>[2]</sup>。景观空间格局直接影响着景观内各种变化(能量流、物质流和物种流)<sup>[3]</sup>,制约着多种生态过程,与景观抗干扰能力、恢复能力、稳定性、生物多样性有着密切的联系<sup>[4]</sup>。同时,景观格局又是在不断变化发展的,现有的景观格局是在过去景观流的基础上形成的<sup>[5]</sup>,并受到多种干扰因素(自然的和人为的)的作用。干扰是自然界的一种普遍现象,它是自然生态系统演替过程中的一个重要组成部分<sup>[6~8]</sup>,研究不同尺度干扰所产生的生态效应有着十分重要的意义<sup>[9]</sup>。干扰具有双重性<sup>[9]</sup>,景观水平上不同性质的干扰尤其是负面效应的干扰对现实生态系统将产生巨大的破坏,并使生态系统受到干扰后难以得到恢复或重建,但在实际中开展景观尺度生态干扰的研究实例极少。有鉴于此,本文以武夷山风景名胜景区为研究对象,运用多种景观格局指数分析了研究区不同时期的景观格局变化,在此基础上,通过设计3种干扰强度,建立不同干扰方式下的景观分室模型,并用计算机技术对干扰给景观格局变化所产生的影响进行模拟,这不仅有助于揭示景观格局演替的规律和机制,而且对于预测景观的未来变化趋势,进而实现景观资源的可持续利用、促进景观生态规划与建设,有效地保护世界文化与自然遗产——武夷山具有极其重要的意义。

1 研究区概况

武夷山位于我国福建省西北部,东经  $117^{\circ}24'12''\sim 118^{\circ}02'50''$ ,北纬  $27^{\circ}32'36''\sim 27^{\circ}55'15''$ ,总面积  $999.75\text{km}^2$ ,包括东部自然与文化景观(即风景名胜区)、中部九曲溪生态、西部生物多样性以及城村闽越王城遗址等 4 个保护区,平均海拔  $1200\text{m}$ ,中山地貌,属典型的亚热带季风气候,年平均气温在  $8.5\sim 18\text{C}$ ,年降雨量一般在  $1486\sim 2150\text{mm}$ ,局部地方高达  $3000\text{mm}$  以上,年蒸发量为  $1000\text{mm}$  左右,相对湿度  $78\%\sim 84\%$ ,无霜期  $253\sim 272\text{d}$ 。武夷山不仅是“罕见的自然美地带”和“尚存的珍稀或濒危动植物的栖息地”,同时又是全球同纬度带最完整、最典型、面积最大的中亚热带原生性森林生态系统,是世界生物多样性保护的关键地区。1987 年加入联合国教科文组织《人与生物圈计划》,1999 年 12 月被列入《世界文化与自然遗产名录》,是我国继泰山、黄山、峨眉山——乐山大佛之后第 4 个被列入世界双重遗产名录。其中,武夷山风景名胜区面积约  $70\text{km}^2$ ,属低山丘陵地域,是典型的中亚热带湿润季风气候。地质地貌属红色砂砾岩分布区,地层构造为中生代白垩纪、是第三纪系沉积的“赤石群碎屑岩”地层。年平均气温  $18.5\text{C}$ ,年均降水量  $2146\text{mm}$  左右,年均相对湿度  $78\%$ ,多雾。冬季温暖,夏季日温偏高,水质达到国家优良标准。武夷山风景名胜区的自然景观以秀、拔、奇、伟为特色,自古即被誉为“人间仙境”。在景区中巧布着“三三秀水”和“六六奇峰”,还有 99 险岩、60 怪石、72 奇洞、18 幽洞,这些山水花木、云雨岚雾、飞鸟鸣虫相互结合,构成景区一幅绝妙的自然风光图画。世界旅游组织执委会主席比阿丽兹·巴尔特曾题词赞扬:“未受污染的武夷山风景区是世界环境保护的典范。”因此,武夷山历来倍受学者的重视,并涌现出大量有关武夷山的研究成果<sup>[10~14]</sup>。近年来,笔者曾运用景观生态学的理论与方法对武夷山风景名胜区进行了初步的研究<sup>[15~18]</sup>。

2 研究方法

2.1 研究资料与景观类型划分

以武夷山风景名胜区 1996 年和 2001 年森林资源分布图(1:10000)为基础资料,依据景观类型划分方法<sup>[19,20]</sup>,将武夷山风景名胜区划分为 10 个景观类型,即马尾松林景观(A)、杉木林景观(B)、经济林景观(C)、竹林景观(D)、阔叶林景观(E)、茶园景观(F)、农田景观(G)、河流景观(H)、居住地景观(I)和裸地景观(J)。将不同时期的森林资源分布图输入计算机,获取各景观类型斑块的基本信息,开展景观空间格局分析。

2.2 景观空间格局分析方法

景观空间格局分析方法是指用来研究景观结构组成特征和空间配置关系的分析。景观格局变化的定量分析可以从景观指数的变化上反映出来<sup>[21,22]</sup>,根据研究区特点,选择平均斑块形状指数<sup>[23,24]</sup>、斑块密度<sup>[22]</sup>、破碎度指数<sup>[25]</sup>、多样性指数与优势度指数<sup>[4,26]</sup>、均匀度指数<sup>[27]</sup>等景观格局定量指标作为测定武夷山风景名胜区景观空间格局的定量指标,各指标的含义及计算方法详见相关文献。

2.3 景观空间格局变化模拟方法

分室模型是生态学中广泛应用的一种模型,在生态系统的养份循环与能量动态等方面得到十分有效的利用<sup>[28~32]</sup>,但未见其在景观生态学中的应用报道,因此,笔者把分室理论引入到景观生态学研究,用于模拟景观格局在不同干扰条件下的变化趋势。分室模型的方法如下:

将各类型景观视为分室,则各分室(类型)的面积  $x_i(i=1,\cdots,n$ ,这里  $n=10$ )的动态变化在数学上可描述为:

$$\frac{dx_i}{dt} = \text{流入} - \text{流出} \tag{1}$$

流入可分为从系统外部的获得( $U_{0j}$ )和系统其它分室(类型)的获得( $F_{ij}, i=1,\cdots,n, i\neq j$ );流出也可分为转移到系统外部( $F_{j0}$ )和转移到系统其它分室(类型)( $F_{ji}, i=1,\cdots,n, i\neq j$ ),于是(1)式可写成:

$$\frac{dx_i}{dt} = \left( U_{0j} + \sum_{\substack{i=1 \\ j\neq i}}^n F_{ij} \right) - \left( F_{j0} + \sum_{\substack{i=1 \\ j\neq i}}^n F_{ji} \right) \tag{2}$$

式中, $F_{ij}$ 表示  $j$  分室(类型)流入  $i$  分室(类型)的流量。物质在一定时间里的转移量称为流量,这里假定它只与源的物质成正比,即:

$$F_{ij} = f_{ij}x_i, \quad F_{ji} = f_{ji}x_j \tag{3}$$

因此(2)式可写成:

$$\frac{dx_i}{dt} = \left( U_{0j} + \sum_{\substack{i=1 \\ j\neq i}}^n f_{ij}x_i \right) - \left( f_{j0}x_j + \sum_{\substack{i=1 \\ j\neq i}}^n f_{ji}x_j \right) \tag{4}$$

式中, $f_{ij}$ 定义为周转率,它表示物质从  $i$  分室(类型)向  $j$  分室(类型)的流通性。

3 研究结果

3.1 景观空间格局变化分析

3.1.1 斑块面积数据 1996 和 2001 年武夷山风景名胜区景观总面积均为  $69.9354\text{km}^2$ ,除河流景观外,各景观类型斑块面积均发生一定的变化(表 1,图 1a)。在 10 种景观类型中,面积减少的类型有马尾松林、杉木林、经济林、阔叶林、农田与裸地,其

中杉木林、农田与马尾松林的面积减少量居前3位,分别减少了0.5644、0.2833、0.2804,面积增大的类型有茶园、居住地与竹林,分别增加了0.7285、0.0814、0.0116km<sup>2</sup>,其中,茶园面积增加量占面积增加总量的88%以上。可见,5a间武夷山风景名胜区杉木林等景观类型面积的减少与茶园的发展有着十分密切的联系,造成这种变化趋势的主要原因与茶叶在武夷山中的地位息息相关。武夷山有着渊源流长的茶历史和丰厚的茶文化,武夷山孕育的武夷岩茶品质优异,驰名中外,是世界四大茶类中的中小叶种茶树之代表,又是乌龙茶之始祖,位居中国十大名茶之前茅<sup>[33]</sup>,因此,茶叶是当地农民的主要生活来源之一,从而导致不少的森林被毁,取而代之的是各品种的茶园,特别是1991~1993年间,为发展茶叶大面积的天然林(马尾松林与阔叶林)被毁,1995年政府采取了相关政策后才使这种现象得到较为有效的遏止,但毁林种茶现象仍明显存在,5年间茶园斑块数增加了21块,因此,它仍是造成武夷山风景名胜区景观破坏的主要原因。此外,1996~2001年农田面积减少量占第2位,除部分流向居住地外,主要与农民弃农种茶有关。

**3.1.2 斑块形状的变化** 平均斑块形状指数是斑块周长与等面积的圆周长之比,代表斑块形状与圆形相差的程度。该指数最小值为1,其值越接近1,表示斑块形状与圆形越相近;其值越大,则斑块形状与圆形相差越大,形状越不规则<sup>[23,24]</sup>。从表1与图1b可知,除河流外,无论是1996年还是2001年,均是马尾松林景观的平均斑块形状指数最大,其形状最为复杂,而居住地景观平均形状指数最小,其形状最为规则,这也说明了天然林景观与人工景观之间在形状上存在着显著的差异。但是,各景观类型的形状指数(除河流外)均有所下降(表1、图1b),表明各景观类型正朝着规则化的方向发展。河流的平均形状指数在10种景观类型中居首位(6.1948),其主要原因在于河流景观的特殊性。在武夷山风景名胜区内共有3条溪流:东面崇阳溪、北面黄柏溪和中部的九曲溪。流经风景区内的河流总长度为23.507km,流域面积为3.4665km<sup>2</sup>,河流形状曲折多弯,尤其是九曲溪。九曲溪全长62.8km,流经景区段的约9.5km,是典型的幼年期河流,河床谷底横剖面呈V字型,谷地底部海拔400~800m。由于受峰岩控制,溪流发育成曲折多弯形状,5km长的直距弯曲成九曲十八弯,弯曲距离9.5km,弯曲系数达1.9,河床坡降为16.2%,平均河流宽度约7m<sup>[33]</sup>,因此,其形状瘦长弯曲与圆形差异最大。

表1 1996~2001武夷山风景名胜区景观结构指数\*  
Table 1 Structure indices of landscape from 1996~2001 in Wuyishan Scenery District

类型 Type	年份 Year	A <sub>j</sub>	PA <sub>i</sub>	MA <sub>i</sub>	N <sub>i</sub>	MSI <sub>i</sub>	PD <sub>i</sub>	FN <sub>i</sub>
A	1996	42.2517	60.42	1.6901	25	2.9598	0.5917	0.00048
	2001	41.9713	60.01	1.7488	24	2.1859	0.5718	0.00047
B	1996	1.7510	2.50	0.0565	31	1.4851	17.7042	0.01458
	2001	1.1866	1.70	0.0516	23	1.2625	19.3837	0.01578
C	1996	1.5465	2.21	0.0469	33	1.3820	21.3379	0.01761
	2001	1.4299	2.04	0.0477	30	1.3812	20.9792	0.01726
D	1996	0.6952	0.99	0.0772	9	1.3692	12.9464	0.00979
	2001	0.7068	1.01	0.0589	12	1.2220	16.9779	0.01324
E	1996	1.9925	2.85	0.0996	20	1.6079	10.0375	0.00811
	2001	1.9307	2.76	0.0965	20	1.4823	10.3592	0.00837
F	1996	6.8947	9.86	0.0457	151	1.6298	21.9010	0.1851
	2001	8.1662	11.68	0.0475	172	1.6220	21.0623	0.01782
G	1996	9.2980	13.30	0.1011	92	2.3185	9.8946	0.00833
	2001	9.0147	12.89	0.0911	99	2.1033	10.9821	0.0825
H	1996	3.4665	4.96	3.4665	1	6.1948	0.2885	0
	2001	3.4665	4.96	3.4665	1	6.1948	0.2885	0
I	1996	1.1791	1.69	0.0236	50	1.2092	42.4067	0.03536
	2001	1.2605	1.80	0.0203	62	1.1751	49.1850	0.04118
J	1996	0.8602	1.23	0.0956	9	2.5287	10.4631	0.00791
	2001	0.8022	1.15	0.0891	9	2.3162	11.2198	0.00819

A<sub>i</sub>:面积 Area(km<sup>2</sup>);PA<sub>i</sub>:面积比例 Proportion of area(%);N<sub>i</sub>:斑块数(个)Number of patches(piece);MA<sub>i</sub>:斑块平均面积(km<sup>2</sup>/个)Mean patches size(km<sup>2</sup>/piece);MSI<sub>i</sub>:平均斑块形状指数 Mean patch shape index;PD<sub>i</sub>:斑块密度(个/km<sup>2</sup>)Patch density(piece/km<sup>2</sup>);FN<sub>i</sub>:破碎度指数 Fragmentation index; \* A:马尾松林 *Pinus massoniana* forest;B:杉木林 *Cunninghamia lanceolata* forest;C:经济林 Economic forest;D:竹林 Bamboo forest;E:阔叶林 Broad leaved forest;F:茶园 *Camellia sinensis* plantation;G:农田 Farmland;H:河流 River;I:居住地 Residential area;J:裸地 Bare area;下同 the same below

**3.1.3 景观破碎化程度的变化** 测定景观破碎化程度有多种指标,本文选择斑块数、斑块平均面积、斑块密度与破碎度指数等指标来反映景观破碎化程度。在10种景观类型中,除阔叶林、河流与裸地景观的斑块数保持不变外,其余7类景观斑块数均有所变化。斑块数增加景观类型有茶园(21块)、居住地(12块)、农田(7块)和竹林(3块),占据前3位的皆为人工或半人工景观,可见,人为干扰将



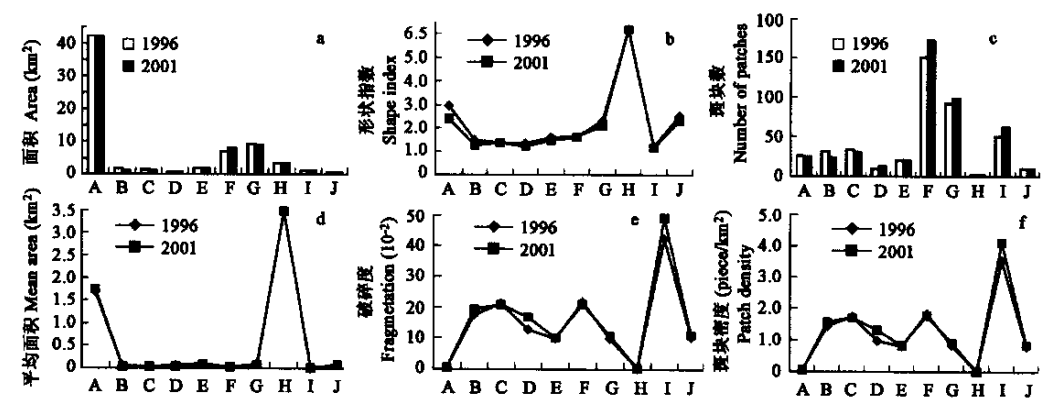


图1 1996年和2001年武夷山风景名胜区在景观面积(a)、平均斑块形状指数(b)、斑块数(c)、平均斑块面积(d)、斑块密度(e)、破碎度(f)等方面的比较

Fig. 1 Comparisons of patch area(a), patch number(b), mean patch area(c), mean patch shape index(d), patch density(e), fragmentation index(f) of Wuyishan Scenery District in 1996 and 2001

导致景观破碎化程度的加剧。斑块数减少的景观类型有杉木林(8块)、经济林(3块)和马尾松林(1块),杉木林不仅是斑块数量减少最多,同时也是面积减少最多的类型,说明在过去的5a中,杉木林受到较为严重的破坏。从森林资源分布图可以看出,消失的杉木林多与茶园、居住地与农田毗邻,因此,杉木林减少的主要原因应该是人类破坏活动造成的。从平均斑块面积、斑块密度与破碎度指数3个破碎化指标的结果(表1、图1d~图1e)来看,除个别指标或年份上农田、阔叶林与裸地景观的破碎化程度大小顺序在它们之间相互调换外,1996与2001年各景观类型的破碎化程度从小到大的顺序均为:河流<马尾松林<农田<阔叶林<裸地<竹林<杉木林<茶园<居住地,可见,作为典型人工景观的居住地始终是破碎化程度最高的景观类型,从而与前面所述的人为干扰是导致景观破碎化加剧的结果相吻合。1996~2001年,除河流景观各指标值不变外,马尾松林与茶园的斑块平均面积有所增大,而其余7类景观斑块平均面积均下降。相应地,在斑块密度与破碎度指标上,马尾松林与茶园指标值变小,而其余7类景观的值有所增加。

3.1.4 景观总体格局的变化 用景观多样性、优势度、均匀度与破碎度4个指标测度景观总体格局的变化(表2)。从表2可知,1996~2001年武夷山风景名胜区景观多样性有所减小,而优势度、均匀度与破碎度均有所增加,但4个指标的变化幅度都很小。

综合以上分析可以得出,1996~2001年武夷山风景名胜区景观格局总体上基本保持不变,仍是以天然马尾松林为基质景观(面积比例1996年为60.42%、2001年为60.01%,表1),其它景观镶嵌其中的景观格局,说明了武夷山风景名胜区在这5a中受到较好的保护,但从局部上看,各类型景观存在着变化,不断扩大茶园面积是导致武夷山风景名胜区景观格局变化的主要原因,因此,在今后的保护中发展茶叶要慎之又慎。

3.2 景观空间格局变化趋势与模拟分析

3.2.1 景观空间格局的变化趋势 表3是武夷山风景名胜区1996~2001年景观动态转移矩阵。由表3可以看出,除杉木林外,其余9类景观的面积转移概率均大于85%,这也说明了各景观观类型在5a间未受到严重的破坏。如果将某一景观类型向其它每一景观类型的转化视为输出通道,相反方向的视为输入通道,那么从表3还可以发现,武夷山风景名胜区景观变化的主要输出通道为马尾松林与杉木林,而主要输入通道为茶园、马尾松林与居住地,从而从另一侧面反映了风景区景观格局的变化趋势。

3.2.2 景观空间格局变化模拟模型 以表3中各景观类型平均每年面积转移概率矩阵为基础,可以得到每年第*i*类型景观(分室)转向其它景观类型(分室)的面积转移量以及其它景观类型(分室)转向第*i*类型景观(分室)的面积转移量,从而运用分室理论即可求得景观空间变化模拟模型(5)~(14),记为模型II,利用它可以对现有干扰强度下武夷山风景名胜区景观格局的变化进行动态模拟。此外,通过改变模型(II)中的部分参数,可以实现不同干扰强度下景观格局的变化模拟分析。

表2 1996~2001年武夷山风景名胜区景观多样性、优势度、均匀度和破碎度指数

Table 2 The diversity, dominance, evenness and fragmentation indices of Wuyishan Scenery District in 1996 and 2001

年份 Year	多样性指数 Landscape diversity	优势度 Dominance index	均匀度 Evenness index	破碎度 Fragmentation index
1996	0.6066	0.3934	0.4009	0.00511
2001	0.6028	0.3972	0.4035	0.00549

表31996~2001年武夷山风景名胜区景观动态转移矩阵

Table 3The transformation matrix of Wuyishan Scenery District among landscapes in 1996 and 2001

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
A	$\frac{98.0812}{19.6162}$	$\frac{0.1659}{0.0332}$	$\frac{0.0232}{0.0046}$	$\frac{0.0275}{0.0055}$	$\frac{0.4208}{0.0842}$	$\frac{1.2201}{0.2440}$	$\frac{0.0613}{0.0123}$	—	—	—
B	$\frac{9.4917}{1.8983}$	$\frac{63.7636}{12.7528}$	—	—	—	$\frac{22.7127}{4.5425}$	$\frac{3.0840}{0.6168}$	—	$\frac{0.9480}{0.1896}$	—
C	$\frac{6.1494}{1.2299}$	—	$\frac{91.8267}{18.3653}$	—	—	$\frac{1.7459}{0.3492}$	—	—	$\frac{0.2780}{0.0566}$	—
D	—	—	—	$\frac{100.00}{20.00}$	—	—	—	—	—	—
E	$\frac{1.8018}{0.3604}$	—	—	—	$\frac{87.9749}{17.5949}$	$\frac{10.2233}{2.0447}$	—	—	—	—
F	$\frac{0.1044}{0.0209}$	—	—	—	—	$\frac{99.7723}{19.9544}$	—	—	$\frac{0.1233}{0.0247}$	—
G	$\frac{2.4306}{0.4861}$	—	—	—	—	$\frac{0.9174}{0.1835}$	$\frac{95.9561}{19.1912}$	—	$\frac{0.6958}{0.1392}$	—
H	—	—	—	—	—	—	—	$\frac{100.00}{20.00}$	—	—
I	—	—	—	—	—	—	$\frac{1.0856}{0.2171}$	—	$\frac{98.9144}{19.7829}$	—
J	—	—	—	—	—	$\frac{6.7426}{1.3485}$	—	—	—	$\frac{93.2574}{18.6515}$

$$dx_1/dt = 0.018983x_2 + 0.012299x_3 + 0.003604x_5 + 0.000209x_6 + 0.004861x_7 - 0.003838x_1$$
$$dx_2/dt = 0.000332x_1 - 0.072472x_2$$
$$dx_3/dt = 0.000046x_1 - 0.016347x_3$$
$$dx_4/dt = 0.000055x_1$$
$$dx_5/dt = 0.000842x_1 - 0.024051x_5$$
$$dx_6/dt = 0.002441x_1 + 0.045425x_2 + 0.003492x_3 + 0.020447x_5 + 0.001835x_7 + 0.013485x_{10} - 0.000456x_6$$
$$dx_7/dt = 0.000123x_1 + 0.006168x_2 + 0.002171x_9 - 0.008088x_7$$
$$dx_8/dt = 0$$
$$dx_9/dt = 0.001896x_2 + 0.000556x_3 + 0.000247x_6 + 0.001392x_7 - 0.002171x_9$$
$$dx_{10}/dt = -0.013485x_{10}$$

式中,  $x_i(i = 1 \sim 10)$  分别代表马尾松林、杉木林、经济林、竹林、阔叶林、茶园、农田、河流、居住地与裸地等 10 类景观的面积。

3.2.3 景观空间格局变化模拟分析 为了探讨不同干扰强度对景观格局变化的影响, 分别从 3 个格局指数来衡量。

(1) 不改变景观类型数量情况下, 在该条件下设计了 3 种干扰方式: (1) 降低人为干扰强度, 令天然林景观(包括马尾松林、杉木林、经济林、竹林与阔叶林)向人工景观(包括茶园、农田与居住地)的面积转移概率为 0, 其它类型间的转移概率保持不变, 可用模型(I)来模拟, 干扰强度亦用(I)表示。模型(I)由模型(II)中的(8)、(12)、(14)式与下列的(15)~(21)式构成; (2) 保持现有的干扰强度不变, 用模型(II)进行模拟, 同样, 干扰强度用(II)表示; (3) 加大人为干扰强度, 令人工景观向天然林景观的面积转移概率为 0, 其它类型间转移概率保持不变, 可用模型(III)来模拟, 干扰强度用(III)表示。模型(III)由模型(II)中的(6)~(9)式、(12)~(14)式和下列的(22)~(24)式构成。

$$dx_1/dt = 0.018983x_2 + 0.012299x_3 + 0.003604x_5 + 0.000209x_6 + 0.004861x_7 - 0.001275x_1$$
$$dx_2/dt = 0.000332x_1 - 0.018983x_2$$
$$dx_3/dt = 0.000046x_1 - 0.01289x_3$$
$$dx_5/dt = 0.000842x_1 - 0.003604x_5$$
$$dx_6/dt = 0.001835x_7 + 0.013485x_{10} - 0.000456x_6$$
$$dx_7/dt = 0.002171x_9 - 0.008088x_7$$
$$dx_9/dt = 0.001392x_7 - 0.002171x_9$$

$$dx_1/dt = 0.018983x_2 + 0.012299x_3 + 0.003604x_5 - 0.003838x_1$$

(22)

$$dx_6/dt = 0.002441x_1 + 0.045425x_2 + 0.003492x_3 + 0.020447x_5 + 0.001835x_7 + 0.013485x_{10} - 0.000247x_6$$

(23)

$$dx_7/dt = 0.000123x_1 + 0.006168x_2 + 0.002171x_9 - 0.003277x_7$$

(24)

利用模型(I)、(II)、(III)分别对武夷山风景名胜区在3种干扰强度下1996~2046年的景观格局变化动态进行模拟,结果见图2。

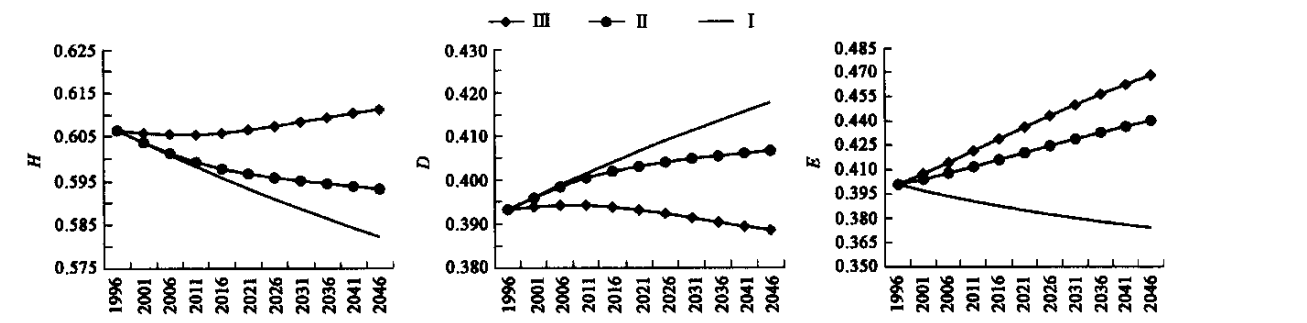


图2 武夷山风景名胜区景观多样性(H)、优势度(D)和均匀度(E)模拟结果

Fig. 2 The simulative results of landscape diversity(H),dominance index(D) and evenness index(E) of Wuyishan Scenery District

从图2中景观多样性的变化趋势来看,3种干扰方式下武夷山风景名胜区在未来50年内景观多样性均发生变化,但不同干扰尺度所产生的影响存在着显著的差异。保持现有的人为干扰强度(II)和降低人为干扰强度(I),景观多样性随时间的变化都呈现出不断减小的趋势,在干扰强度(I)下,景观多样性下降的幅度在初期与干扰强度(II)相近,但随着时间的推移,其下降的幅度要比干扰强度(II)下要快得多。在加大干扰强度(III)条件下,景观多样性的变化出现先降后升的趋势,在最初的10年左右,景观多样性缓慢下降,在紧接着3~5年时间内,景观多样性基本保持稳定状态,随后景观多样性不断上升。可见,干扰强度对景观多样性的影响是明显的,而且,干扰强度愈大,景观多样性亦愈大,即景观多样性随干扰强度增大呈增大的趋势。优势度指数表征的意义恰好与多样性指数相反,多样性指数越大,其优势度越小。因此,在不同干扰强度下,优势度的变化趋势恰好与景观多样性的变化趋势相反,即优势度指数随着干扰强度的增大而减小。均匀度是描述景观中不同景观类型的分配均匀程度。从图2可知,均匀度的变化与景观多样性、优势度不完全一样,在干扰强度(I)下,景观均匀度随时间的变化不断变小,而在干扰强度(II)与干扰强度(III)下,均匀度皆随时时间的变化而不断递增。对武夷山风景名胜区而言,3种干扰强度的比较结果是干扰强度越大,均匀度亦越大。

(2)改变景观类型数量情况下,人类活动对景观的影响不仅会造成景观的破碎化,而且亦会造成景观在类型组成上的变化。为了探讨改变景观类型数量对景观格局的影响,进一步将基质景观马尾松景观划分成4个二级景观类型,即马尾松幼龄林景观(A<sub>1</sub>,年龄在1~20a之间)、马尾松中龄林景观(A<sub>2</sub>,年龄在21~40a之间)、马尾松近成熟林景观(A<sub>3</sub>,年龄在41~50a之间)和马尾松成熟林景观(A<sub>4</sub>,年龄在≥51a),以2001年为例,二级景观马尾松林的面积组成见表3。这样,一级景观共有10种景观类型,而二级景观共有13种景观类型,进一步计算二级景观类型下各景观格局指数(表4)。表4的结果显示,二级景观类型的景观多样性指数与均匀度指数与一级景观类型相应的景观多样性与均匀度相比都明显得到提高,相反,优势度则明显下降,此外,破碎度亦有所提高。从而表明了人类干扰,尤其是改变景观类型的组成,将显著的提高(或降低)景观多样性。一般地说,若干扰导致景观类型丰富度的增加,则景观多样性亦随之增加,反之,则景观多样性随着降低。

4 小结与讨论

武夷山不仅是我国珍贵的文化与自然遗产,同时也是世界珍贵的财富,运用景观生态学的原理与方法开展武夷山的保护研究不仅意义重大,而且十分必要。选择武夷山4个保护区中受人类活动干扰最为强烈的风景名胜区内为研究对象,对武夷山保护来说具有典型性与代表性。

表3 马尾松林二级景观类型及其面积分配(2001年)  
Table 3 The second-grade landscape types and area distribution of Pinus massoniana forest in the Wuyishan Scenery District(2001)

	A <sub>1</sub>	A <sub>2</sub>	A <sub>3</sub>	A <sub>4</sub>
面积 Area(km <sup>2</sup> )	4.0588	8.8461	11.9078	17.1586
所占比例 Proportion of area(%)	5.80	12.65	17.03	24.53

表4 不同等级下武夷山风景名胜区景观格局指数(2001年)  
Table 4 The diversity,dominance,evenness and fragmentation indices under different grade of landscapes in Wuyishan Scenery District (2001)

等级 Grade	H	D	E	FN
一级景观 First-grade landscape	0.6028	0.3972	0.4035	0.00511
二级景观 Second-grade landscape	0.9357	0.1782	0.7575	0.00641

运用多种景观格局指数对武夷山风景名胜区不同时期景观格局进行了测度,结果表明:1996~2001 年武夷山风景名胜区在景观多样性、优势度、均匀度及破碎度等方面尽管有一些变化,但这种变化十分微小,景观格局总体上基本保持不变,仍是以天然马尾松林为基质景观,其它景观镶嵌其中的景观格局,从而表明武夷山风景名胜区在这 5 年中受到良好的保护。但从局部分析仍可发现,武夷山风景名胜区景观格局变化与发展茶叶生产有着密切的关系,是引起景观破碎度呈增大趋势的主要原因,因此,在今后的保护中必须协调好二者之间的关系。

人类活动影响景观多样性已是一个勿容置疑的客观事实,但人类活动怎样影响景观多样性,不同的研究结果存在较大的差异。有学者认为随着人类活动干扰程度的增强,会造成景观多样性的降低<sup>[26,34,35]</sup>,但亦有认为人类活动干扰程度的加强会导致景观多样性的增加<sup>[36,37]</sup>。本研究表明,如果人类干扰导致景观类型丰富度的增加,则景观多样性亦随之增加;如果人类干扰不改变景观类型的丰富度,则景观多样性随着干扰强度的增加而增加,从而为验证“干扰将增加景观多样性”的论断提供了一个有力的实例。

干扰的生态学意义是多方面的,干扰对景观的影响十分复杂<sup>[9]</sup>。本文借助分室理论开展干扰强度对景观空间格局的影响,结果表明分室理论不仅可以揭示不同干扰强度下景观格局的变化动态,而且可以有效地预测研究区未来景观的变化趋势,从而为开展景观生态规划与景观生态建设提供可靠的信息,因此,具有广泛的应用前景。当然,探讨干扰所引起的生态效应必须限制在景观变化所能承受的范围内,即干扰研究的个案本身存在尺度效应,超过这个尺度,探讨干扰的生态效应将失去应有的意义。

## References:

- [1] Wu Y G, Li H B. Theoretical developments of landscape ecology. In: Liu J G ed. *Advances in modern ecology*. Beijing: Chinese Science & Technology Press, 1992. 30~39.
- [2] Xiao D N, Bu R C, Li X Z. Spatial ecology and landscape heterogeneity. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, **17**(5): 453~461.
- [3] Turner M G. Spatial simulation of landscape changes in Georgia: a comparison of 3 transition models. *Landscape Ecology*, 1987, **1**: 29~36.
- [4] Fu B J. The spatial pattern analysis of agricultural landscape in the loess area. *Acta Ecologica Sinica*, 1995, **15**(2): 113~120.
- [5] Ding S Y, Qian L X, Cao X X, et al. Forest landscape patterns dynamic of Yihe-louhe river basin. *Acta Geographica Sinica*, 2003, **58**(3): 354~362.
- [6] Pickett STA & PS White. *The ecology of natural disturbance and patch dynamic*. Orlando: Academic Press INC. , 1985.
- [7] Hobbs R J & L Atkins. The effect of disturbance and nutrient addition on native and introduced annuals in western Australian wheatbelt. *Australian Journal of Ecology*, 1988, **13**: 171~179.
- [8] Farina A. *Principles and Method in Landscape Ecology*. London: Chapman and Hall, 1998.
- [9] Chen L D, Fu B J. Ecological significance, characteristics and types of disturbance. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, **20**(4): 583~586.
- [10] Lin P. *Wuyishan research series——Forest ecosystem*(I). Xiamen: Xiamen University Press, 1998.
- [11] He J Y. *Wuyishan research series——Natural resources*. Xiamen: Xiamen University Press, 1998.
- [12] He D J, Hong W, Wu C Z, et al. Study on biomass and energy distribution of natural *Phyllostachys heterocycla* cv. *Pubescens* in Wuyi mountain and its comparison with high-yield forest. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2003, **23**(2): 291~296.
- [13] Wu C Z, Hong W. Dynamics of litter fall in *Cunninghamia lanceolata* forest using wave-type time series analysis. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2002, **10**(3): 201~206.
- [14] Bi X L, Hong W, Wu C Z, Yan S J. Life table analysis of *Castanopsis carlesii* population in Wuyi mountain. *Journal of Tropical and Subtropical Botany*, 2001, **9**(3): 23~27.
- [15] He D J, Hong W, Fu H Q, et al. Study on the landscape ecological characteristics of Wuyishan Scenery District. *Journal of Northeast Forestry University*, 2003, **31**(5): 24~26.
- [16] He D J, Hong W, Fu H Q, et al. Study on the patches characteristics of landscape elements in the Wuyishan Scenery District. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2003, **9**(6): 574~577.
- [17] He D J, Hong W, Fu H Q, et al. Patch size distribution and its hierarchical effect of main landscape types in the Wuyishan Scenery District. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, **15**(1): 21~25.
- [18] He D J, Hong W, Fu H Q, et al. Study on the spatial pattern of the Wuyishan Scenery District. *Scientia Silvae Sinicae*, 2004, **40**(1): 174~179.
- [19] Wang Y L. The theory and methods of landscape ecological classification. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 1996, **7**(Sup): 121~126.
- [20] Xiao D N, Zhong L S. Ecological principles of landscape classification and assessment. *Chin. J. Appl. Ecol.*, 1998, **9**(2): 217~221.
- [21] Wang X Z, Helge Bruehlheide, Michael Runge, et al. A quantitative analysis of the landscape pattern around Qira oasis based on remote sensing data. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(9): 1491~1499.
- [22] Xiao D N ed. *Landscape ecology: Theory, Methods and Application*. Beijing: China Forest Press, 1991. 92~99.
- [23] Forman R T & M Godron. *Landscape Ecology*. New York: Wiley & Sons, 1986.
- [24] Carrere V. Development of multiple source data processing for structural analysis at a regional scale. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1990, **56**: 587~595.
- [25] Turner M G. Spatial and temporal analysis of landscape patterns. *Landscape Ecology*, 1990, **4**(1): 21~30.
- [26] Chen L D, Fu B J. Analysis of impact of human activity on landscape structure in yellow river delta. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, **16**(4):



337~344.

[27] Tang L J. The spatial pattern analysis of landscape and the landscape planning in Sheshan scenic spot. *Acta Geographica Sinica*, 1998, **53** (5): 429~437.

[28] Chen X Y, Pan W C. Dynamic properties of nitrogen in the Chinese fir plantation ecosystem. *Acta Ecologica Sinica*, 1989, **9**(3): 201~206.

[29] Huang D M, Zhao S L. Compartment modeling of energy dynamics in Kobresia Humilis meadow. *Acta Ecologica Sinica*, 1992, **12**(2): 119~124.

[30] He D J, Hong W, Wu C Z. Study on the energy dynamic pattern in *Phyllostachys pubescens* ecosystem. *Journal of Bamboo Research*, 2001, **19** (1): 63~67.

[31] He D J, Hong W, Wu C Z. The new compartment model of energy dynamic in *Phyllostachys heterocycta* (Carr.) Mitford cv. *pubescens* ecosystem. *Journal of Plant resources and Environment*, 2001, **9**(4): 9~13.

[32] Hong W, Chen H, Xiao H. Study on system dynamic feature of forest land. In: Hong W, Lin SZ eds. *Studies of Mathematical Forestry*. Chengdu: Chengdu Electronic Science & Technology University Press, 1993. 280~284.

[33] Wu B C ed. *The World's Heritage—Wuyi Mountain*. Fuzhou: Fujian People's Press, 1999.

[34] Jia B Q, Ci R J, Yang X H, *et al.* A study on the landscape pattern change of oasis in arid land. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(1): 34~40.

[35] Wang X L, Xiao D N, Bu R C, *et al.* Analysis on landscape patterns of Lianhe delta wetland. *Acta Ecologica Sinica*, 1997, **17**(3): 315~323.

[36] Xiao D N, Zhao Y, Sun Z W, *et al.* Study on the variation of landscape pattern in the west suburbs of Shenyang. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1990, **1**(1): 75~84.

[37] Xiao H, Ouyang Z Y, Zhao J Z, *et al.* Analysis of landscape spatial structure in Hainan island. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(1): 20~27.

参考文献:

[1] 伍业纲, 李海滨. 景观生态学的理论发展. 见: 刘建国主编, 当代生态学博论. 北京: 中国科学技术出版社, 1992. 30~39.

[2] 肖笃宁, 布仁仓, 李秀珍. 生态空间理论与景观异质性. 生态学报, 1997, **17**(5): 453~461.

[4] 傅伯杰. 黄土区农业景观空间格局分析. 生态学报, 1995, **15**(2): 113~120.

[5] 丁圣彦, 钱乐祥, 曹新向, 等. 伊洛河流域典型地区森林景观格局动态. 地理学报, 2003, **58**(3): 354~362.

[9] 陈利顶, 傅伯杰. 干扰的类型、特征及其生态学意义. 生态学报, 2000, **20**(4): 581~586.

[10] 林鹏. 武夷山研究——森林生态系统(I). 厦门: 厦门大学出版社, 1998.

[11] 何建源. 武夷山研究——自然资源卷. 厦门: 厦门大学出版社, 1998.

[12] 何东进, 洪伟, 吴承祯, 等. 武夷山毛竹天然林生物量与能量分配规律及其与人工林的比较研究. 西北植物学报, 2003, **23**(2): 291~296.

[13] 吴承祯, 洪伟. 武夷山杉木林凋落物动态初探. 热带亚热带植物学报, 2002, **10**(3): 201~206.

[14] 毕晓丽, 洪伟, 吴承祯, 等. 武夷山米槠种群生命表分析. 热带亚热带植物学报, 2001, **9**(3): 23~27.

[15] 何东进, 洪伟, 胡海清, 等. 武夷山风景名胜区景观生态特征. 东北林业大学学报, 2003, **31**(5): 24~26.

[16] 何东进, 洪伟, 胡海清, 等. 武夷山风景名胜区景观要素斑块特征分析. 应用与环境生物学报, 2003, **9**(6): 574~577.

[17] 何东进, 洪伟, 胡海清, 等. 武夷山景区主要景观类型斑块大小分布规律及其等级效应分析. 应用生态学报, 2004, **15**(1): 21~25.

[18] 何东进, 洪伟, 胡海清, 等. 武夷山风景名胜区景观空间格局研究. 林业科学, 2004, **40**(1): 174~179.

[19] 王仰麟. 景观生态分类的理论与方法. 应用生态学报, 1996, **7**(增): 121~126.

[20] 肖笃宁, 钟林生. 景观分类与评价的生态原则. 应用生态学报, 1998, **9**(2): 217~221.

[21] 王兮之, Helge Bruelheide, Michael Runge, 等. 基于遥感数据的塔南策勒荒漠——绿洲景观格局分析. 生态学报, 2002, **22**(9): 1491~1499.

[22] 肖笃宁主编. 景观生态学的理论、方法及应用. 北京: 中国林业出版社, 1991.

[26] 陈利顶, 傅伯杰. 黄河三角洲地区人类活动对景观结构的影响分析. 生态学报, 1996, **16**(4): 337~344.

[27] 唐礼俊. 余山风景区景观空间格局分析及其规划初探. 地理学报, 1998, **53**(5): 429~437.

[28] 谌小勇, 潘维伟. 杉木人工林生态系统中氮素的动态特征. 生态学报, 1989, **9**(3): 201~206.

[29] 黄大明, 赵松龄. 矮蒿草甸能量动态的分室模型研究. 生态学报, 1992, **12**(2): 119~124.

[30] 何东进, 洪伟, 吴承祯. 毛竹林生态系统能量动态规律的研究. 竹子研究汇刊, 2001, **19**(1): 63~67.

[31] 何东进, 洪伟, 吴承祯. 毛竹林生态系统能量动态分室新模型. 植物资源与环境学报, 2001, **9**(4): 9~13.

[32] 洪伟, 陈辉, 肖红. 林业用地系统动态特征的研究. 见: 洪伟, 林思祖编著. 计量林学研究. 成都: 电子科技大学出版社, 1993. 280~284.

[33] 吴邦才主编. 世界遗产武夷山. 福州: 福建人民出版社, 1999.

[34] 贾宝全, 慈龙骏, 任一萍. 绿洲景观动态变化分析. 生态学报, 2001, **21**(11): 1947~1951.

[35] 王宪礼, 肖笃宁, 布仁仓, 等. 辽河湿地三角洲的景观格局分析. 生态学报, 1997, **17**(3): 315~323.

[36] 肖笃宁, 赵羿, 孙中伟, 等. 沈阳西郊景观结构变化的研究. 应用生态学报, 1990, **1**(1): 75~84.

[37] 肖寒, 欧阳志云, 赵景柱, 等. 海南岛景观空间结构分析. 生态学报, 2001, **21**(1): 20~27.