

# 利用马尔可夫模型预测福州市植被动态变化

沙晋明<sup>1,2</sup>, 李小梅<sup>2</sup>, 杨武年<sup>1</sup>, 江振蓝<sup>2</sup>

(1. 成都理工大学 遥感所, 四川 成都 610001; 2 福建师范大学 地理学院, 福建 福州 350007)

**摘 要:** 利用遥感信息手段提取了 1988 年、2000 年福州市典型样区内植被类型变化状况, 并验证了植被类型的变化具有马尔可夫特性。利用马尔可夫预测模型预测了福州市未来 50 a 内的植被类型动态变化。研究表明, 茂密林、针阔混交林和灌木林的面积比例将有一定幅度的增加, 而经济林、禾本科农作物和裸地面积将有一定比例的减少。由此可见福州市经过若干年的生态建设, 植被生物量从整体上来看, 呈现增加趋势, 生态环境状况趋于良好。

**关键词:** 植被; 遥感; 马尔柯夫模型

文献标识码: A

文章编号: 1000—288X (2004) 05—0005—05

中图分类号: Q 948 15

## Dynam ic Change Prediction of Vegetation in Fuzhou City by Markov's Models

SHA Jin-ming<sup>1</sup>, LI Xiao-mei<sup>2</sup>, YANG Wu-nian<sup>1</sup>, JIANG Zhen-lan<sup>2</sup>

(1. Remote Sensing Institute of Chengdu Science and Engineering University, Chengdu 610001, Sichuan Province, China;

2 The Geography Department of Fujian Normal University, Fuzhou 350007, Fujian Province, China)

**Abstract:** According to the remote sensing image information of 1998 and 2000 in Fujian Province, the changing state of vegetation species in typical districts of Fuzhou City was drawn, and it was proved that the changing of vegetation species accords with Markov's course. The dynamic change of vegetation species of Fuzhou City in the following 50 years was predicted by Markov's model. The result indicated that the area proportion of dense woods, mixed needle leaf and broad leaf forest and bush of woods had certain increase, and the area proportion on the economic forest, grass family crops and naked land will have certain reduction. Therefore after the ecological construction for several years, the vegetation productivity of Fuzhou City from the whole aspect, will present the increasing trend and ecological environment towards good condition.

**Keywords:** vegetation; remote sensing; Markov's prediction models

## 1 前 言

几种用于生态环境研究的模型在生态环境和资源要素系统相互作用的研究中, 经常使用和比较成熟的生态环境模型, 大致有生物物理模型、生物地理模型、生物地球化学模型、陆地生态系统变化对气候的反馈、马尔可夫模型。

马尔可夫模型是俄国数学家 Markov. A. A 于 1907 年用数学方法研究布朗运动过程时发现的一种随机运动规律。20 世纪 40 年代 A. N. 卡尔曼哥隆等人又发展了马尔可夫理论。到目前为止, 这个理论已广泛用于植被、土地、水利、地质、经济学、运筹学等领域的预测研究<sup>[1—10]</sup>。在植被群落演替方面, 马尔柯夫预测模型得到广泛应用<sup>[8]</sup>。20 世纪 80 年代, 马氏链模型在我国得到应用。阳含熙等<sup>[2]</sup>成功地应用该模型

研究了长白山自然保护区阔叶红松林森林生态系统的演替趋势。陈建忠等<sup>[8]</sup>根据森林资源连续清查的固定样地调查资料, 应用马氏模型对福建南平地区的树种结构进行了预测, 并根据预测结果提出了相应的调整措施。全志杰等<sup>[4]</sup>根据六盘山自然保护区 2 个时期的遥感资料, 运用马氏模型预测了森林资源类型的动态变化。郑元润<sup>[10]</sup>依据 38 个样地的演替资料, 采用母树树冠下各物种幼苗、幼树及小径木的胸高断面积比例作为转移概率, 用马尔可夫链描述了群落的演替过程, 预测了达到平衡状态时各群落的组成状况。在土地利用方面, 徐岚<sup>[3]</sup>等较早在国内应用马氏模型来预测土地利用格局的变化, 熊云波<sup>[9]</sup>等以近 50 a 来上海市中心城区的土地利用矢量图为基础资料, 研究了上海市中心城区的扩展动态。可见, 马尔可夫模型在生态环境预测问题时具有一定的有效性和适用性。

收稿日期: 2003-05-09

资助项目: 科技部国际合作项目中—匈国际合作项目; 国家遥感测绘重点实验室项目; 福建省国际合作重点项目“基于 GIS 的生态环境中植被覆盖变化及水热状况的定量遥感”。

本研究利用遥感影像资料,通过遥感提取技术,得到不同时段内各类生态环境要素的变化特征,利用马氏预测模型预测这些环境要素的演变趋势,在各个环境要素预测基础上,对区域综合生态环境的演变趋势作一预测,为生态环境建设和生态环境保护提供策略上的指导,同时为生态环境预测和全球环境变化下的生态环境响应等研究提供有益的范例。

### 1.1 马尔可夫原理

马尔可夫过程的基本假定条件为:预测期系统状态数保持不变,系统状态转移概率矩阵不随时间变化,状态转移仅受前一状态影响,即无后效性。马尔柯夫链是时间和状态都是离散的马尔柯夫过程,在马尔可夫链中,系统状态的转移可用概率矩阵  $P$  表示:

$$P = (P_{ij}) = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1N} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2N} \\ M & M & M & M \\ P_{N1} & P_{N2} & \dots & P_{NN} \end{bmatrix}$$

系统从  $t$  到  $t+1$  时刻,状态  $E_i$  转移为  $E_j$  的频数  $n_{ij}$  与  $E_i$  状态频数  $n_i$  之比,则为其的转移概率:

$$P_{ij} = n_{ij} / \sum_{j=1}^m n_{ij}$$

从任何一个状态出发,经过一次转移,必然出现该系统所有状态中的一个,故用方程组则表示为:

$$A(1) = A(0)P$$

依此类推,  $n = n-1$  时,  $A(n) = A(0)P^n$

上述式子即为马尔可夫预测模型,可以根据初始时刻各种状态的概率,通过状态转移概率矩阵,预测以后任一时刻状态的概率。

### 1.2 马尔可夫稳定状态预测

如果随即过程的概率分布及数字特征均与时间无关,随机过程就成为平稳过程,其状态就为稳定状态,这时的转移概率称为稳定状态转移概率,也是各状态的最终占有率。根据马尔可夫链的极限性质,当  $n$  时,  $P^n$  趋于惟一的极限矩阵  $A$ , 即

$$\lim_{n \rightarrow \infty} p_{rs}^{(n)} = a_s, a_s = 0$$

$$a_s = \sum_{r=0}^{m-1} a_r p_{rs}$$

$$\sum_{s=0}^{m-1} a_s = 1$$

求解上方程组便可以得到稳定状态时各状态的占有率。

### 1.3 马尔可夫的独立假设检验

运用马尔可夫链理论,首先要判断转移概率矩阵是否具有马尔可夫链性质,需要从统计上进行假设检验。通常用统计量  $\lambda$  来检验这种假设:

$$-2\ln\lambda = 2 \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m n_{ij} \ln(P_{ij}/P_j)$$

其中

$$P_j = \sum_{i=1}^m n_{ij} / \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m n_{ij}$$

$-2\ln\lambda$  近似于  $(m-1)^2$  自由度的  $\chi^2$  分布;  $n_{ij}$  为转移频数;  $P_{ij}$  为转移概率。

若  $-2\ln\lambda$  所计算出的数值大于根据自由度  $(m-1)^2$  适当选取置信度下  $\chi^2$  分布表中所列数值,则该假设不能成立,说明所研究的事物状态之间具有马尔可夫链性质。

## 2 马尔可夫模型在福州市植被遥感监测上的应用

### 2.1 植被遥感及等级划分

植被遥感中所用到的植被指数按其发展阶段可分为 3 类:第 1 类植被指数基于波段的线性组合(差或和)或原始波段的比值,由经验方法发展的,没有考虑大气影响、土壤亮度和土壤颜色,也没有考虑土壤、植被间的相互作用。它们表现了严重的应用限制性,这是由于它们是针对特定的遥感器(Landsat MSS)并为明确特定应用而设计的。第 2 类植被指数大都基于物理知识,将电磁波辐射、大气、植被覆盖和土壤背景的相互作用结合在一起考虑,并通过数学和物理及逻辑经验以及通过模拟将原植被指数不断改进而发展的(如 PV I, SAV I, MSAVI, TSAVI, ARVI, GEMI, AVI, NDVI 等)。它们普遍基于反射率值、遥感器定标和大气影响并形成理论方法,解决与植被指数相关的但仍未解决的一系列问题。第 3 类植被指数是针对高光谱遥感及热红外遥感而发展的植被指数(如 DVI, Ts—V I, PRI 等)。

为了估算和监测植被覆盖,发展了比值植被指数(RVI)。但 RVI 对大气影响敏感,而且当植被覆盖不够浓密时(小于 50%),它的分辨能力也很弱,只有在植被覆盖浓密的情况下效果最好。归一化差异植被指数(NDVI)对绿色植被表现敏感,它可以对农作物和半干旱地区降水量进行预测,该指数常被用来进行区域和全球的植被状态研究。对低密度植被覆盖,NDVI 对于观测和照明几何非常敏感。但在农作物生长的初始季节,将过高估计植被覆盖的百分比;在农作物生长的结束季节,将产生估计低值。继之,将各波段反射率以不同形式进行组合来消除外在的影响因素,如遥感器定标、大气、观测和照明几何条件等。这些线性组合或波段比值的指数发展满足特定的遥感应用,如作物产量、森林开发、植被管理和探测等。农业植被指数(AVI)针对作物生长阶段测量绿色植被;多时相

植被指数 (MTVI), 将 2 个不同日期的数值简单相减, 是为了观测 2 个日期植被覆盖条件的变化和作物类型的分类, 并用来探测由于火灾和土地流失造成的森林覆盖变化。归一化差异绿度指数 (NDGI), 可用来对不同活力植被形式进行检验。归一化差异指数 (NDI) 建立了光谱反射率和棉花作物残余物的表面覆盖率的关系, 以用来对作物残余物的制图。

近些年来, 随着高光谱分辨率遥感的发展以及热红外遥感技术的应用, 又发展了红边植被指数、导数植被指数 (DVI)、温度植被指数 ( $T_s-V_i$ )、生理反射植被指数 (PRI)。“红边”的一般定义为叶绿素吸收红边斜率的拐点。红边位置灵敏于叶绿素  $a, b$  的浓度和植被叶细胞的结构。为获取红边位置信息, Miller 等<sup>[2]</sup>用一个倒高斯模型拟合红边斜率。导数植被指数由于它能压缩背景噪音对目标信号的影响或不理想的低频信号, 被应用在目前的高光谱遥感研究中, 尤其是在利用高光谱遥感提取植被化学成分信息方面得到成功的应用。近年来的经验研究表明: 热红外辐射和植被指数在大尺度范围遥感应用中可提高土地覆盖的制图和监测精度。生理反射植被指数是针对高光谱遥感的特点, 对植被生化特性的短期变化进行了探测<sup>[3]</sup>。

这些植被指数是近几年来基于遥感技术的发展和应用的深入而产生的新的表现形式。尽管许多新的植被指数考虑了土壤、大气等多种因素并且得到了发展, 但是目前应用最广范的还是 NDVI, 并经常用 NDVI 作为参考来评价基于遥感影像和地面测量或模拟的新的植被指数, NDVI 在植被指数中仍占有较为重要的位置。

本研究以福州市为研究区域, 遥感影像资料为福州幅 2 个时相的 TM 影像, 成像时间分别为 1988-04-09 及 2000-05-04。影像分辨率为 30m。背景资料为 1:100 000 比例尺的县界图, 1:100 000 比例尺的地形图, 1:100 000 比例尺的土地利用现状图。利用 ENV I、ARCVIEW 和 ARC/INFO 软件, 对遥感数据

进行处理。处理主要包括投影转换、影像对影像校正、影像与地形的校正、研究区提取等过程。

根据福州市的植被种类和环境特征, 将构成主要生态景观的植被按生物量的大小划分为 6 类, 反映在遥感影像上主要表现为植被指数的差异。植被类型的主要特征和划分依据见表 1。

表 1 福州市典型样区各种植被类型的等级划分

等级	名 称	颜色	植被覆盖和植被类型
I	茂密林区	海蓝	典型植被为阔叶林: 甜槠、米槠、青冈、南岭栲、闽粤栲, 覆盖率 90%; 山地矮林、刺叶栎、冬青、南岭杜鹃, 覆盖率 90% ~ 80%。
II	针阔混交林	绛红	针叶林 (马尾松、杉木、油松), 部分阔叶林
III	灌木林	褐色	山地草丛、灌木丛
IV	经济林	黄	芒果、相思树、经济型果树
V	农作物	蓝	农用作物、水生植物等
VI	裸 地	红	植被稀少的裸地、沙滩、建成区

2.2 转移概率的确定

通过野外调查、目视解译及图像分类等方法, 分析 1988 年和 2000 年的福州市遥感影像资料, 选择了 11 022.89 km<sup>2</sup> 的区域作为典型研究区。在 1988 年遥感影像图上选择代表 6 个植被等级的区域, 进行采样, 分别计算各种植被覆盖类型的像元数, 每个像元代表的面积范围为 900m<sup>2</sup>。

表 2 为 1988、2000 年各种植被类型的像元数, 以及占整个采样面积的百分率。将 2000 年的遥感影像图叠加在 1988 年影像图上, 以 1988 年各种植被类型的范围为边界, 在 2000 年遥感图上分别计算植被覆盖类型的转化像元数, 得到 1988—2000 年间福州市典型样区植被转移频数矩阵 (表 3)。根据公式 (1) 计算出 1988—2000 年间福州市典型样区植被类型转移概率矩阵 (表 4)。将 12 a 间的转移概率进行平均化, 计算年均转移概率矩阵 (表 5)。

表 2 1988、2000 年各种植被类型的面积与比例

年份	项 目	I	II	III	IV	V	VI
1988	像元数	526 613	2 975 945	4 532 684	3 342 641	551 539	318 240
	面积/hm <sup>2</sup>	47 395.14	267 835.04	407 941.60	300 837.71	49 638.48	28 641.62
	比例/%	4.30	24.30	37.01	27.29	4.50	2.60
2000	像元数	320 114	4 461 862	3 463 246	3 371 492	354 161	276 787
	面积/hm <sup>2</sup>	28 810.22	401 567.59	311 692.17	303 434.25	31 874.53	24 910.82
	比例/%	2.61	36.43	28.28	27.53	2.89	2.26

表 3 1988—2000 年福州市典型样区植被类型转移频数矩阵

项目	I	II	III	IV	V	VI
I	130 175	50 175	340 584	6 051	62	32
II	161 916	946 771	1 779 058	90 021	560	254
III	21 935	2 412 077	1 138 343	957 726	5 348	1 269
IV	6 035	992 409	186 814	2 020 649	124 939	14 755
V	228	60 600	20 138	275 089	163 927	32 045
VI	108	3 781	1 376	24 941	59 639	228 677

表 4 1988—2000 年福州市典型样区植被类型转移状况矩阵

项目	I	II	III	IV	V	VI
I	0.247 0	0.095 2	0.646 2	0.011 5	0.000 1	0.000 1
II	0.054 4	0.317 9	0.597 3	0.030 2	0.000 2	0.000 1
III	0.004 8	0.531 7	0.250 9	0.211 1	0.001 2	0.000 3
IV	0.001 8	0.296 6	0.055 8	0.604 0	0.037 3	0.004 4
V	0.000 4	0.109 8	0.036 5	0.498 3	0.297 0	0.058 0
VI	0.000 3	0.011 9	0.004 3	0.078 3	0.187 2	0.717 9

表 5 1988—2000 年福州市典型区植被类型平均转移概率矩阵

项目	I	II	III	IV	V	VI
I	0.937 2	0.007 9	0.053 8	0.001 0	0.000 0	0.000 0
II	0.004 5	0.943 2	0.049 8	0.002 5	0.000 0	0.000 0
III	0.000 4	0.044 3	0.937 6	0.017 6	0.000 1	0.000 0
IV	0.000 2	0.024 7	0.004 7	0.967 0	0.003 1	0.000 4
V	0.000 0	0.009 1	0.003 0	0.041 5	0.941 4	0.004 8
VI	0.000 0	0.001 0	0.000 4	0.006 5	0.015 6	0.976 5

据表 2, 1988—2000 年间, 福州市植被覆盖类型发生了较大的变化。其中变化最大的是针阔混交林和灌木林, 针阔混交林的面积比例有大幅度上涨, 从 24.3% 增加到 36.43%; 而灌木林的比例有大幅度下降, 从 37.01% 下降到 28.28%。植被覆盖类型的动态变化不仅与人类活动有关, 同时也与植被群落的自然演替有关。从群落方面来看, 灌木丛本身处于植被演替的初级阶段, 具有不稳定特性, 在灌木丛中各种树种存在一定的竞争关系。具有优势竞争力的树种会逐渐代替生长力不强的树种, 导致群落结构的变化。针阔混交林比灌木林更具有有一定的稳定性, 但群落的自然演替往往需要较长时间, 在 12 a 时间内, 植被类型的大幅度变化必与人类活动有关。针叶林如马尾松是典型的速生林, 可以广泛应用于工业生产中, 如造纸轻工等行业。因此不可否认针阔混交林的大面积增长主要是在原灌木林地上发展起来的。

表 2 表明, 茂密林区所占的面积比例有所下降, 从 4.30% 下降到 2.61%。茂密林区一般生长在人类干扰较少的深山老林区, 主要树种为中亚热带的典型

植被常绿阔叶林, 该植被群落处于较稳定的状态。茂密林区面积的下降预示着人类活动范围的进一步扩大, 使这些稳定群落受到一定的干扰。由表 2 可以看出, 农田面积有所减少, 裸地面积和经济林面积基本保持稳定。根据表 4, 可以得到福州市植被类型之间的动态转化特征图 1。

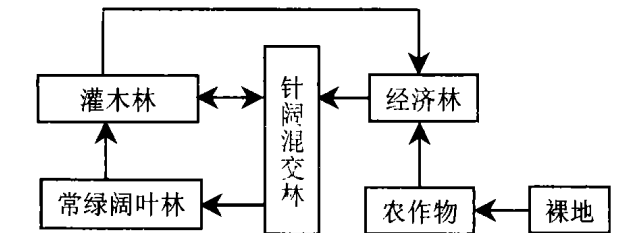


图 1 福州市 1988—2000 年植被类型动态转化图

图 1 表明针阔混交林主要源自于灌木林和经济林, 灌木林转化为针阔混交林主要是自然演替结果, 经济林的退化和利用也可导致针阔混交林的形成; 灌木林主要是茂密林, 针阔混交林经过采伐后形成; 经济林一部分是在原来种植条件较好的农田上发展过来的, 另一部分是灌木林经人为开发投入而转化过来的; 此外, 处于地势较低的沙滩、裸地经过开垦转化为可利用的农田。由图 1 可知, 生态景观中各种植被类型的出现并不是孤立的, 其数量的消长和变化受其它植被类型的增加或减少所制约。

### 2.3 随机过程检验

根据马尔可夫的独立假设检验公式, 计算得到  $-2\ln\lambda = 8.900\,047$ , 根据表 1, 植被类型为 6 种(即 6 种状态), 序列自由度为 25, 选择置信水平  $\sigma = 0.05$  时, 查  $\chi^2$  分布表得 37.652, 显然  $8.900\,047 > 37.652$ , 可以拒绝独立假设, 说明不同年份植被覆盖类型之间存在一定的相关性, 即状态之间有关联。事实上, 植被覆盖类型的变化在很大程度上具有继承性, 主要是因为植被生长受环境条件的制约。

### 2.4 预测结果

根据预测模型中公式(7)分别计算从 2000 年到 2010, 2020, 2030, 2040, 2050 年的植被转移概率矩阵, 以 2000 年各种植被类型百分率作为初始状态量, 乘各预测年份的转移概率矩阵, 可以得到预测年份的植被类型百分率(表 6)。根据公式(8), 可以计算出植被达到稳定状态时的百分率。

地球表面植被覆盖类型与可固定的太阳能有直接关系, 显然植物固定的太阳能越多, 形成的地球表面生物量越大。进一步, 生物量的大小与植被的生态环境功能有直接关系。研究表明植被生物量大小顺序

为: 常绿阔叶林> 针阔混交林> 马尾松林 杉木林<sup>[16—17]</sup>。对黄山松群落(海拔 1 200m)能量的研究表明<sup>[16]</sup>, 黄山松群落生产力分布大小是乔木层> 灌木层> 草本层, 生产力的大小直接决定着生物量的多少, 因而可以粗略认为乔木生物量> 灌木> 草本。因此, 福州市不同植被类型的生物量大小顺序为: 茂密林> 针阔混交林> 灌木林> 经济林> 农田禾本科作物> 裸地。

表 6 福州市植被动态变化预测结果

年份	I	II	III	IV	V	VI
2010	2 73	36 04	30 49	26 18	2 54	2 02
2020	2 79	36 15	31 77	25 23	2 27	1 79
2030	2 84	36 38	32 50	24 61	2 07	1 60
2040	2 87	36 60	32 97	24 19	1 93	1 44
2050	2 89	36 78	33 29	23 90	1 83	1 30
...	...	...	...	...	...	...
稳定态	2 98	37 42	34 21	23 19	1 49	0 72

由表 6 可见, 若植被类型的平均转移概率矩阵保持不变, 在未来 50 a 内(或达到稳定状态), 茂密林、针阔混交林和灌木林的面积比例将有一定幅度的增加; 而经济林、禾本科农作物和裸地面积将有一定比例减少。上述结果表明福州市经过若干年的生态建设, 植被生物量从整体上来看, 呈现增加趋势, 生态环境状况趋于良好。尽管随着经济发展, 建成区面积不断增加, 城市化速度加快, 但城市绿地面积不断增加, 城市生态公园数量不断增多, 城市的生态环境条件越来越好。裸地面积随生态省建设数量势必减少。同时随着城市建设, 农田面积也有一定程度减少。而茂密林经过长时间的养育和保护, 加上针阔混交林的进一步演替, 面积有所增加, 表明植被群落更趋于稳定状态。

3 结 论

- (1) 由于植被生长受环境条件的制约, 同时植被覆盖类型的变化在很大程度上具有继承性, 因此不同年份植被覆盖类型之间存在关联关系。
- (2) 1988—2000 年福州市植被类型的变化显示, 12 a 间针阔混交林的面积比例有大幅度上涨, 从 24.3% 增加到 36.43%, 而灌木林的比例有大幅度下降, 从 37.01% 下降到 28.28%。这种变化除了植被的自然演替以外, 主要是由于人类活动所导致。
- (3) 福州市植被类型之间的动态转化特征图表明生态景观中各种植被类型的消长并不是孤立的, 其数量的变化受其它植被类型的变化所制约。

(4) 预测结果显示未来 50 a 内, 植被类型的变化较稳定, 茂密林、针阔混交林和灌木林的面积比例将有一定幅度的增加, 而经济林、禾本科农作物和裸地面积将有一定比例的减少。由此可见福州市经过若干年的生态建设, 植被生物量从整体上来看, 呈现增加趋势, 生态环境状况趋于良好。

[ 参 考 文 献 ]

- [1] 丛沛桐, 赵则海, 张文辉, 等. 东灵山辽东栎群落演替的连续时间马尔可夫过程研究[J]. 木本植物研究, 2000, 20(4): 438—443
- [2] 阳含熙, 潘愉德, 伍业钢. 长白山阔叶红松林马氏链模型[J]. 生态学报, 1988, 8(3): 211—219
- [3] 徐岚, 赵羿. 利用马尔可夫过程预测东陵区土地利用格局的变化[J]. 应用生态学报, 1993, 4(3): 272—277
- [4] 全志杰, 褚泓阳, 李云科, 等. 六盘山森林资源动态遥感与 GIS 监测及其马尔可夫链预估[J]. 国土资源遥感, 1996, 29(3): 40—44
- [5] 宋印胜. 马尔可夫链模型在地下水水位预测中的应用[J]. 山东地质, 1998, 14(1): 34—40
- [6] 钱家忠, 朱学愚, 吴剑锋. 地下水资源评价中降水量的时间序列—马尔可夫模型[J]. 地理科学, 2001, 21(4): 350—353
- [7] 李卫东, 李保国, 石元春. 应用 Markov 链理论定量描述区域冲积土壤质地层次的垂向变化特征[J]. 土壤学报, 1999, 36(1): 15—23
- [8] 陈建忠, 周世勇, 徐福余. Markov 过程在森林资源结构动态预测中的应用——以福建省南平地区的树种结构为例[J]. 应用生态学报, 1994, 5(3): 232—236
- [9] 熊云波, 吴玉鸣. GIS 支持下土地利用空间演变过程的马尔可夫模拟研究——以上海市中心城区为例[J]. 南阳师范大学学报(自然科学版), 2002, 6(1): 87—92
- [10] 郑元润. 大青沟森林群落演替预测研究[J]. 林业科学, 1999(2): 23—28
- [11] 毛文永. 生态环境影响评价概论[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1998: 28
- [12] 肖笃宁, 李秀珍, 高峻, 等. 景观生态学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 3—4, 84—87
- [13] 桑卫国, 马克平, 陈灵芝, 等. 森林动态模型概论[J]. 植物学通报, 1999(3).
- [14] 林益明, 林鹏, 李振基, 等. 武夷山甜槠群落的生物量和生产力[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 1996, 35(2): 269—275
- [15] 冯宗炜, 陈楚莹, 张家武, 等. 湖南会同县两个森林群落的生物生产力[J]. 植物生态学与地植物学丛刊, 1982, 6(4): 257—266
- [16] 林鹏, 林益明, 李振基, 等. 武夷山黄山松群落能量的研究[J]. 生态学报, 1999, 19(4): 504—508