第 22 卷第 10 期
2002 年 10 月

生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA

Vol. 22, No. 10
Oct., 2002

基于遥感的植被覆盖变化景观分析
——以北京海淀区为例

陈云浩，李晓兵*，史培军

（北京师范大学资源科学研究所，北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室，北京 100875）

摘要：提出了基于土地利用分类的植被覆盖度计算的亚象元模型，针对不同的植被覆盖类型，综合利用“等密度模型”和“变密度模型”计算植被覆盖度，使其能有效地从遥感数据中提取植被覆盖信息。在 GIS 的支持下，应用该模型对北京海淀区 1975 年、1991 年和 1999 年 5 月份植被覆盖度进行计算，并着重对其景观变化过程进行了分析。研究结果表明：1975 至 1999 年来，海淀区植被覆盖整体表现为增加趋势，但空间格局分布不均衡，全植被覆盖区和高植被覆盖区过分集中在西北部狭长地带，东南部则多为低植被覆盖区，反映出北京海淀区土地利用的结构特征。

关键词：覆盖变化；植被覆盖度；亚象元模型；景观分析；遥感数据；北京海淀区

Landscape Spatial-Temporal Pattern Analysis on Change in the Fraction of Green Vegetation Based on Remotely Sensed Data: A Case Study in Haidian District, Beijing

CHEN Yun-Hao, LI Xiao-Bing, SHI Pei-Jun (*Institute of Resources Science, Beijing Normal University; Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Ministry of Education of China, Beijing Normal University, Beijing* 100875, *China*). ***Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(10): 1581～1586.**

Abstract: Modern land surface parameterizations (LSP) in numerical weather prediction and general circulation models require specification of two major vegetation characteristics—— vegetation type and vegetation amount. Vegetation amount is parameterized through the fraction of green vegetation and the leaf area index, the number of leaf layer of the vegetated part. The fraction of green vegetation, the radio of vegetation occupying a unit area, is a very important parameter in development of climatic and ecological models. However, on-ground fieldwork surveys of the fraction of green vegetation are time consuming and expensive and produce low-precision results. Estimation of the fraction of green vegetation using remotely sensed data may be a more efficient approach.

The main goal of the current work was to explore the potential of deriving the fraction of green vegetation from normalized difference vegetation index (*NDVI*) using remotely sensed data, such as TM and MSS data. As each pixel of a satellite image represents a mosaic of structures on the ground surface, the sub-pixel models, including a “dense vegetation model” and a “nondense vegetation model”, for the fraction of green vegetation estimation have been developed. The choice between the “dense vegetation model” and the “nondense vegetation model” would depend upon the structure of vegetation, which is geographic region and vegetation type-specific. In this paper, a simplified approach, depending on the value of leaf area index, was used concerning the spatial resolution of satellite sensor data. The utility of different sub-pixel models for the fraction of green vegetation estimation based on land cover classification

基金项目：国家自然科学基金项目(30000027)；北京师范大学“高等学校骨干教师资助计划”资助项目

收稿日期：2001-03-14；**修订日期**：2002-02-10

作者简介：陈云浩，男，安徽人，博士。从事资源环境遥感研究。

万方数据

* **通讯作者** Author for correspondence

was also described.

The accuracy of the model was checked, and the regression analysis was carried out to find the linear trend and bias of the curve from the 1:1 line. As a result, estimated fraction of green vegetation values are highly correlated with those observed at the ground ($r^2=0.79$, $p<0.005$, $n=31$). Comparison of the estimated fraction of green vegetation values and observed data demonstrated that this approach may be an important tool for solving monitoring of the regional fraction of green vegetation over large areas.

The fraction of green vegetation of Haidian district in May, 1975, 1991 and 1999 were calculated using this method in Beijing. The landscape spatial-temporal patterns of change in the fraction of green vegetation and its driving processes during this period were also discussed, based on the change matrix in this paper.

In the present study, this model seems to be a viable method for the fraction of green vegetation estimation over a regional area. The results of this study are valuable for conservation land planning and prediction of change in the fraction of green vegetation and can be reference for estimating the fraction of green vegetation in other areas.

Key words: land cover change; fraction of green vegetation; sub-pixel model; landscape spatial-temporal pattern analysis ; remotely sensed data; haidian district, Beijing

文章编号:1000-0933(2002)10-1581-06 **中图分类号**:Q149,Q947 **文献标识码**:A

在数值气象预报和大气环流模型中,植被类型与植被数量是十分重要的地表参数。植被数量的主要通过植被的覆盖度 f_g(水平密度)和植被叶面指数 LAI(垂直密度)来表示。植被覆盖度被定义为植被投影面积在单位面积上所占比例[1]。植被覆盖度的定量信息是许多全球、区域变化监测模型中所需的重要信息,是描述生态系统的重要基础数据。获取地表植被覆盖及其变化信息,对于揭示地表空间变化规律,探讨变化的驱动因子,分析评价区域生态环境具有重要现实意义。测量植被覆盖度 f_g 的方法可分为地表实测和遥感监测两类。由于全球/季节的植被分布是变化的,导致 f_g 具有显著的时空分异特性,因而利用遥感资料已成为估算 f_g(尤其对大面积)的主要手段。

当前有效估算植被覆盖度的方法大体为两种:植被指数法[2]和混合象元法[3]。前种方法依赖于对特定区域的实测数据和卫星传感器,有一定的参考价值,但推广应用却受到诸多限制。后种方法以 Gutman 提出的混合象元模型为代表,文中利用 NOAA 数据以等密度模型研究全球植被覆盖度[1]。本文在分析植被覆盖度计算的混合象元模型的基础上,着重分析了植被变密度条件下的覆盖度计算模型及参数的选取。并针对城市区域植被覆盖特征,在对研究区土地利用/覆盖类型进行分类基础上,发展了一套基于亚象元分解的植被覆盖度 f_g 计算方法。应用该方法对海淀区植被覆盖度进行计算,利用转移矩阵分析了 1975 年、1991 年和 1999 年该区植被覆盖的空间格局和变化特征。

2 植被覆盖度遥感模型

2.1 计算模型

Price 指出具有相同 $NDVI$ 值的象元往往对应于不同的植被亚象元结构[4]。象元按其亚象元类型一般可分为"均一象元"和"混合象元"两类。"均一象元类型"假设象元完全被一定厚度的植被覆盖,其植被覆盖度的求取最简单,$f_g=1$。"混合象元"对应复杂的细部结构,认为象元由多种地物构成,其亚象元结构可归纳以下结构类型:

等密度模型(Dense Vegetation Model) 假设象元中植被覆盖部分其植被类型一致且密度相同。象元的 $NDVI$ 值为植被部分的 $NDVI$ 值与非植被部分的 $NDVI$ 值之和,且 $LAI\rightarrow\infty$(即 $NDVI\rightarrow NDVI_\infty$),设植被覆盖度为 f_g,于是有 $NDVI=f_gNDVI_\infty+(1-f_g)NDVI_0$,即:

万方数据

$$f_g=\frac{NDVI-NDVI_0}{NDVI_\infty-NDVI_0} \tag{1}$$

上式给出了混合象元植被等密度条件下，可通过 $NDVI_0$ 和 $NDVI_\infty$ 来计算植被覆盖度的方法。

变密度模型(Nondense Vegetation Model)　假设象元中植被覆盖部分其植被类型一致但密度有不同变化，由于 $LAI<<\infty$，设植被覆盖度为 f_g，于是有 $NDVI=f_gNDVI_g+(1-f_g)NDVI_0$，即

$$f_g=\frac{NDVI-NDVI_0}{NDVI_g-NDVI_0} \tag{2}$$

其中 $NDVI_g=NDVI_\infty-(NDVI_\infty-NDVI_0)\exp(-k\ LAI)$。可见混合象元植被变密度条件下，植被覆盖度的计算不仅需要 $NDVI_0$、$NDVI_\infty$，还需要确定消光指数 k 和叶面指数 LAI。

2.2　计算步骤

通过分析可以看出 LAI 值的大小是选择密度、非密度模型的关键。参考 Gutman 的研究[1]，本文对研究区典型地物进行分析，结果表明：当 $LAI>3.5$ 后应用密度模型的计算误差可忽略。因此本文以 $LAI=3.5$ 作为选择密度、非密度模型的阈值，发展了一套计算植被覆盖度的亚象元模型。其流程如图 1 所示，包括：图像预处理，LAI 计算，计算模型选择，参数确定，区域 f_g 计算和后处理等步骤。

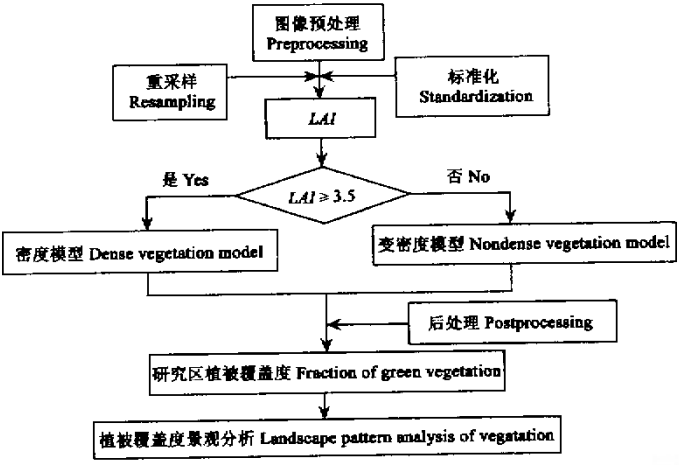


图 1　植被覆盖度计算流程

Fig. 1　Flow chart of vegetation fraction calculation

2.2.1　图像预处理　选择北京市海淀区为研究区，选用完全覆盖研究区的晴空 Landsat TM 资料(1999-05-24；1991-05-06)和 Landsat MSS 资料(1975-05-06)为基本数据源。以 1∶5 万的地形图为基准，利用二次多项式和双线形内插法对图像进行了几何校正，经重新选点检验，误差在一个象元内。以 1991-05-06 TM 数据为基准，应用 SCR(Scattergram Controlled Regression)方法[3]，以一次线形回归形式，对不同时期的遥感影像做简易标准化处理，以消除可能的物候状况差异。为了统计分析的一致性，对数据进行统一分辨率处理，将空间分辨率重采样至 79m。

2.2.2　LAI 计算　植被 LAI 的计算选用 Price 模型[4]，该方法的主要思想是利用卫星传感器所探测到的地物反射信息可算出 LAI。最终的 LAI 与卫星数据的灰度值 DN_i 的关系可描述为下式(这里 $i=1$、2，对于 TM 对应于 3、4 波段；对于 MSS 取 2、3 波段)：

$$DN_{si}=\frac{DN_i(e^{2c_iLAI}-r_{\infty i}^2)+DN_{\infty i}(1-e^{2c_iLAI})}{1-r_{\infty i}^2e^{2c_iLAI}-DN_ir_{\infty i}^2(1-e^{2c_iLAI})/DN_{\infty i}} \tag{3}$$

其中，s 指土壤，$DN_{\infty i}$ 可从遥感资料中读取，r_∞，高密度植被覆盖区的地物反射值，$r_{\infty 1}$、$r_{\infty 2}$ 据 Price 研究可分别取 0.05 和 0.7。系数 c_1 和 c_2 用于描述辐射能量穿透叶面时的衰减性质，其大小取决于植被类型。将上式代入土壤线性方程，即可将 LAI 表示为图象的灰度量化值 DN_i 和 c_1、c_2 的函数关系式。

万方数据

$$DN_{si} = a'DN_{s1} + b' \tag{4}$$

式中，参数 a'，b' 可从可见光和近红外波段的散点图，通过回归法求取。

在给定 c_1、c_2 值的情况下，通过对(3)式变换可以将与图象的灰度量化值 DN_i 和 c_1、c_2 的函数关系式转化为一个多项式方程，从而求出 LAI。

2.2.3 计算模型及参数确定 根据 LAI 的大小选择 f_g 计算模型，当象元 $LAI \geqslant 3.5$ 时，用密度模型；当象元 $LAI < 3.5$ 时，用非密度模型。两模型共同需要确定的参数：$NDVI_0$ 和 $NDVI_\infty$，可根据定义直接根据遥感资料进行计算，而非密度模型所需的 LAI 已由(3)和(4)计算出。此外，根据 Baret、Choudhury 等人的研究[6,7]，本文取消光系数 $k=1$。

2.2.4 后处理 在计算出研究区植被覆盖度后，可进一步根据 f_g 的高低将植被划分为不同覆盖等级。将 $f_g=0$，定义为无植被覆盖；$30\% \geqslant f_g > 0$，定义为低植被覆盖；$60\% \geqslant f_g > 30\%$，定义为中植被覆盖；$90\% > f_g \geqslant 60\%$，定义为高植被覆盖；$f_g > 90\%$，定义为全植被覆盖。按上述定义可形成研究区植被覆盖等级图，由于图象中存在有面积很小的图斑，有必要进行处理以保证统计分析的可行性。对于面积小于 4 个象元($25600m^2$)进行删除，删除后的小图斑合并到相邻面积最大的图斑中。

本文使用图象处理软件为 ERDAS IMAGINE8.4 和 ARC/INFO 8.0，统计分析在 Excel 软件下进行。

3 结果分析

3.1 植被覆盖度

应用图 1 所示亚象元模型分别对海淀区 1975 年、1991 年和 1999 年 5 月份的植被覆盖度进行计算，结果如图版 I 所示。

从图版 I 可以看出 1975 年至 1999 年，海淀区植被覆盖度显著的变化在于：(1)总体植被覆盖度不断增加，且其中高植被覆盖增加幅度较大。(2)格局也在不断变化，如在 1975 年中部和东部存在许多中等植被覆盖区，而到 1991 年和 1999 年变成了低植被覆盖，反映出 24a 来城市用地结构的调整过程。

为了定量分析上述植被覆盖度方法的准确性，利用 1999 年 5 月下旬，在研究区内进行的植被覆盖度实测资料为参照，对计算结果进行精度检验。在实测植被覆盖度过程中，采用在不同的植被覆盖类型随机采样，用与实测相应经纬度的象元计算值进行比较，验证遥感模型的精度。从图 2 中实测值与观测值的拟合线可以发现：该模型都具有较高的精度，可以满足后续分析的精度要求。

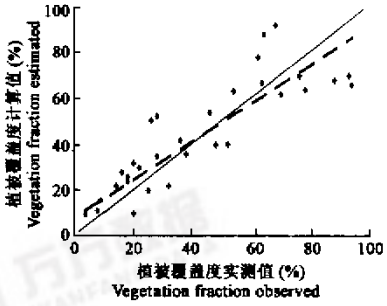


图 2 计算值与观测值的关系图

Fig. 2 Relationship between vegetation fraction observed and estimated from remotely sensed data

实线表示 1:1 线，虚线表示计算值与观测值的拟合：$y=0.91x+0.58$，$R^2=0.79$，$n=31$ The solid line corresponds to the 1:1 relation and the dashed line to the regression equation

3.2 海淀区植被覆盖的空间格局

根据上节定义，将植被覆盖划分为无植被覆盖、低植被覆盖、中植被覆盖、高植被覆盖和全植被覆盖等 5 种类型。为定量分析 f_g 空间格局的变化，在植被覆盖等级图的基础上，进行栅矢转换，形成不同斑块的矢量图，然后求取不同景观类型的特征参数。

从表 1 可以看出，海淀区植被覆盖等级从 1975 年到 1999 年，整体表现为不断破碎化的趋势。全区的斑块数有明显增加，同时平均斑块面积也从 $0.16km^2$ 减至 1991 年的 $0.12km^2$ 和 1999 年的 $0.11km^2$。由于研究区西部为山区，而北部尚保留一部分的农田区，因而大斑块主要集中在这些地区，也反映出距离城区越远植被覆盖度越高的特点。

3.3 植被覆盖变化景观分析

植被覆盖动态演变过程实质上是不同植被覆盖等级之间复杂的相互转化过程，是自然因素和人为活

万方数据

动双重作用的结果，景观组分变化的细节信息可灵敏地体现社会经济活动中景观管理的政策特点。为了分析不同植被覆盖等级的动态变化、类型间的组分转化过程，本文在 ARC/INFO 平台支持下，利用 Gird 模块中的地图代数功能实现了对景观转移概率的计算。具体步骤如下：

表 1　海淀区各时期植被覆盖等级的空间景观特征

Table 1　The landscape characteristics of vegetation cover fraction grade in Haidian District in 1975，1991，1999

时期 Time	植被覆盖等级 Types	面积 Area (km^2)	斑块数 Patchs	斑块平均面积 Averaged area of patch (km^2)	多样性指数 Diversity index
1975	1	9.37	240	0.03	1.63
	2	104.69	927	0.11	
	3	227.93	296	0.77	
	4	78.43	876	0.09	
	5	5.58	161	0.04	
	合计/平均 Sum / Average	426.00	2600	0.16	
1991	1	60.67	1175	0.05	1.95
	2	154.95	583	0.27	
	3	122.60	980	0.13	
	4	79.48	638	0.12	
	5	8.29	150	0.06	
	合计/平均 Sum / Average	426.00	3526	0.12	
1999	1	55.56	1103	0.05	2.10
	2	150.29	789	0.19	
	3	107.68	996	0.11	
	4	81.25	755	0.11	
	5	31.22	239	0.13	
	合计/平均 Sum / Average	426.00	3882	0.11	

表中编号 The number in the table is：1，无植被覆盖 No vegetation；2，低植被覆盖 Low coverage；3，中植被覆盖 Medium coverage；4，高植被覆盖 High coverage；5，全植被覆盖 Full coverage

(1)对不同类型赋予不同的数值，以 Grid 形式输出。

(2)对不同年度的 Grid 进行代数乘运算。

(3)将不同年度的 Grid 进行代数加，所得出的结果包含了类型变化。

(4)在 ARC/INFO 下进行栅矢转换，其属性表中记录了对应栅格类型。

(5)对矢量文件中的面积项进行面积换算，进行统计分析。

最终景观变化过程由图版Ⅱ给出。

图版Ⅱ中小于 $1km^2$ 的变化未列入。可以看出，研究区从 1975 年到 1999 年，植被覆盖等级变化有以下特点：

(1)无植被覆盖、低植被覆盖和全植被覆盖区总体上属于增加型，中植被覆盖为减少型，而高植被覆盖区则基本保持不变。

(2)高植被覆盖的变化幅度最大，由 $5.58km^2$ 增加到 $8.29\ km^2$ 和 $31.22\ km^2$，相应的年变化率为 3.04%(1975～1991 年)和 34.57%(1991～1999 年)。在第 1 阶段分别从中植被覆盖和高植被覆盖向全植被覆盖区转移了 $4.25\ km^2$ 和 $2.84\ km^2$，在第 2 阶段向全植被覆盖转移的主要是高植被覆盖，8a 共转移了 $24.69\ km^2$，导致了全植被覆盖区面积的迅速扩大。

(3)中植被覆盖面积持续减少，从 $227.93\ km^2$ 到 $122.60\ km^2$ 再到 $107.68\ km^2$，24a 来共损失了 $120.25\ km^2$，为总面积的 28%。其中在第 1 阶段，主要从中植被覆盖向无植被覆盖、低植被覆盖和高植被覆盖分别转出 $26.49\ km^2$、$49.32\ km^2$ 和 $50.31\ km^2$，是造成中植被覆盖面积减少的重要原因。

(4)无植被覆盖区从 1975 年的 $9.37\ km^2$ 猛增到 1991 年的 $60.37\ km^2$，增加了 6.4 倍。原因在于期间田间养鱼塘的增加和大量建成区(建筑工地)形成的无植被区，导致上述现象的产生。在第 1 阶段，从低植被

万方数据

覆盖和中植被覆盖转入 18.66 km^2 和 26.49 km^2。在第 2 阶段,从低植被覆盖和中植被覆盖转入无植被覆盖区的面积分别为 19.96 km^2 和 6.24 km^2,可见低、中植被覆盖是向无植被覆盖区转移的主要渠道。

4 结论

(1)本文提出了基于土地利用分类的植被覆盖度计算的亚象元模型,并通过对模型计算结果的检验精度,表明该方法满足区域植被覆盖度信息提取的精度要求。

(2)利用该模型对研究区 1975 年、1991 年和 1999 年 5 月份的植被覆盖度进行计算,并在 GIS 的支持下,实现了对海淀区植被覆盖等级的空间景观变化的景观分析。发现非农业用地的扩张和土地利用结构调整,是导致该区植被覆盖等级变化的主要原因。

(3)在 GIS 支持下,实现了对景观转移概率的计算。通过类型间的组分转移细节,分析了 24a 来海淀区植被覆盖度变化过程和特征。

参考文献

[1] Gutman G, IgnatovA. The derivation of the green vegetation fraction from NOAA/AVHRR data for use in numerical weather prediction models. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, **19**: 1533～1543.

[2] Purevdorj T, Tateishi R, Ishiyama T, *et al*. Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, **19**: 3519～3535.

[3] Quarmby N A, Townshend J R G, Settle J J, *et al*. Linear mixture modelling applied to AHVRR data for crop area estimation. *International Journal of Remote Sensing*, 1992, **13**: 415～425.

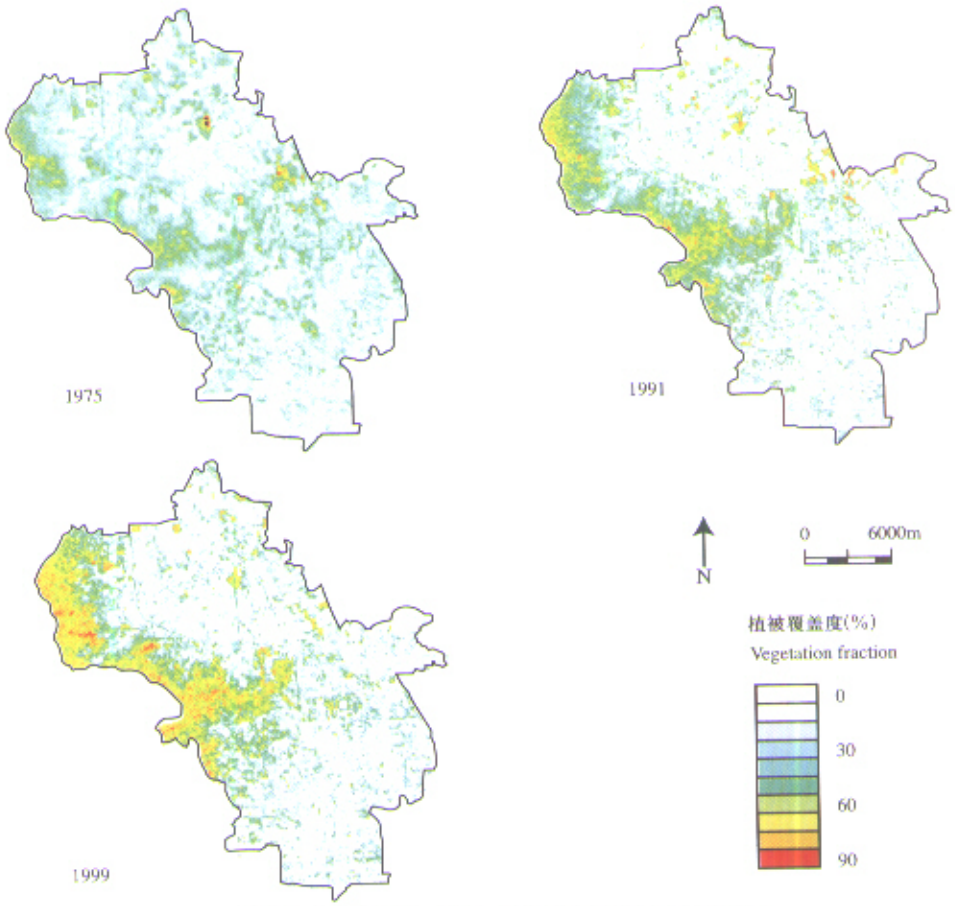
[4] Price J C. Estimating leaf area index from satellite data. I. E. E. E. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1993, **31**: 727～734.

[5] Christopher D E, Ding Y. Relative radiometric normalization of landsat multispectral scannerdata using an automatic scattergram-controlled regression. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1995, **61**: 1015～1026.

[6] Baret F, Guyot G. Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote sensing of environment*, 1991, **35**: 161～173.

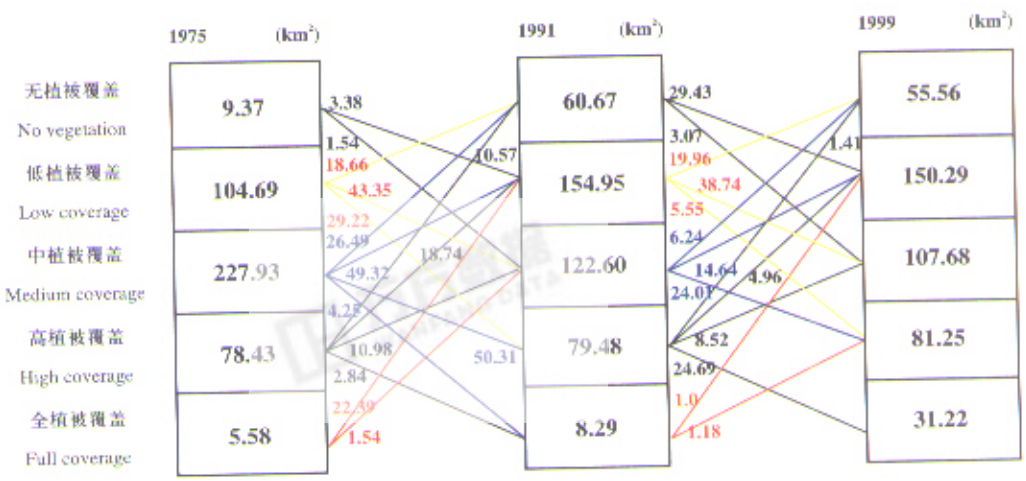
[7] Choudhury B J, Nizam U A, Sherwood B I, *et al*. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. *Remote sensing of environment*, 1994, **50**: 1～17.

万方数据



图版 I 海淀区1975、1991、1999年5月植被覆盖度计算结果

Plate I The distribution of vegetation froction of Haidian District, Beijing in 1975, 1991, 1999



图版 II 海淀区1975～1999年植被覆盖等级转移过程

Plate II The vegetation cover fraction grade change form 1975 to 1999 in Haidian District, Beijing

万方数据