

K-T 变换的林学意义及其在森林蓄积量估算中的应用

张友静 方有清

(河海大学) (南京林业大学)

1991年9月2日收稿

摘 要

本文讨论了 K-T 变换在林学方面的意义,它可以用于森林信息分析。就 K-T 的特征空间而言,其林学意义是很明确的,森林具有较高的绿度、湿度和较低的亮度,它们在光谱空间具有相对稳定的位置,利用这一特殊性质,即可用反射光谱描述森林的林学意义及其环境特征。

本文还用 K-T 变换特性构造了浙江省临安县森林蓄积量的遥感估算模型,它在结构上考虑了林学和环境特征,从而使模型具有一定的物理含义。模型经试验,其结果较为理想,对主要立地类型、其平均森林蓄积量估算精度达到 90% 左右,可以用于我国南方山区。

关键词 林学 环境 森林蓄积量 遥感估算模型

一、前 言

利用陆地卫星数据进行森林信息分析及蓄积量估算,国内外许多学者进行了多方面的探讨,并取得了一定成果。但这类试验多集中在地形平坦、林相整齐的地区。对于地形破碎、地类复杂、林相不齐的我国南方山地,则研究甚少,且精度较低。究其原因,在很大程度上是对森林光谱信息的物理意义缺乏深入地研究。对遥感数据的分析,应将光谱信息综合成与自然景物特征相联系的信息,使之具有明确的物理意义。在此基础上,运用林学和其它专业知识对遥感信息进行数据分析,从而建立起光谱信息与林学特征之间的关系。

Kauth 和 Thomas (1976 年)根据 MSS 数据研制的穗帽变换(K-T 变换)成功地建立起光谱综合信息与自然景物特征间的联系^[1]。Crist 和 Cicone (1984 年)将 K-T 变换的概念推广到 TM 数据,并在农作物长势监测上得到进一步应用^[2]。但 K-T 变换源于环境背景相对简单的农田,且研究对象为相对均一的农作物。因此,Crist 等推求的 K-T 变换矩阵能否适用于南方山地森林信息分析和蓄积量模拟,目前尚未见到有系统报道。我们根据 K-T 变换的原理,对浙江省临安县的 TM 数据进行了分析。在对 CCT 数据进行地形辐射校正的基础上,推求了有利于森林信息提取的变换矩阵,分析了变换空间的数据结构,明确了变换各特征的林学意义,并利用新的特征光谱表述了森林的生物学特征和所处的环境特征,从而建立起森林蓄积量估算模型。

二、K-T 变换及其林学意义

(一) K-T 变换

K-T 变换是个线性变换,可由下式表示:

$$Y = R^T X + A \quad (1)$$

式中:

X 为数据向量; A 为增益向量; R 为变换矩阵; Y 为变换后的数据向量。

由式(1)可见 K-T 变换的关键在于求取变换矩阵 R 。如果 R 按方差大小排列,则为 K-L 变换;如果按自然地物求取特征向量则为 K-T 变换。K-T 变换矩阵可由下式求得:

设原空间波段数为 n , 则变换空间第 m 特征,第 i 元素为:

$$t_i = (X_m - X_s)_i - \sum_{j=1}^{m-1} (D_{m,j} \cdot R_{j,i}) \quad (2)$$

式中: X_m 为第 m 特征中相应地物的亮度值; X_s 为裸露土壤亮度值; $R_{j,i}$ 为变换矩阵元素,可由下式确定。令 T 为标准化因子,即:

$$T = \left(\sum_{i=1}^n t_i^2 \right)^{1/2}$$

则:

$$R_{m,i} = t_i / T$$

而 $D_{k,i}$ 则定义为:

$$D_{k,i} = \sum_{i=1}^n (X_k - X_s)_i \cdot R_{j,i} \quad (3)$$

式中: $k = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, (m-1)$ 。

该矩阵各向量均为正交,即满足:

$$\sum_{i=1}^n R_{k,i} \cdot R_{j,i} = \begin{cases} 0 & \text{当 } k \neq j \\ 1 & \text{当 } k = j \end{cases} \quad (4)$$

当 $m = 1$ 时, $j = 0, D_{k,i} = 0$, 式(2)即为

$$t_i = (X_m - X_s)_i \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

则可求出 R_{ji} 。

根据 1984 年 8 月临安县 CCT 数据,我们采集了裸土、水体、农作物、森林、居民点等典型地物数据,通过式(2)求得 K-T 变换矩阵如表 1 所示。

(二) K-T 变换各特征的林学意义

表中第一轴为亮度 (B), 它是 TM 各波段亮度值的线性函数,可由下式表述:

表 1 K-T 变换矩阵
Table 1 K-T Transformation Matrix

	TM2	TM3	TM4	TM5	TM7
第一轴	0.22	0.45	0.52	0.51	0.26
二	-0.20	-0.43	0.76	-0.30	-0.02
三	0.26	0.58	0.15	-0.60	-0.36
四	0.65	-0.35	0.03	0.17	-0.37
五	0.52	-0.20	-0.04	0.02	0.67

表 2 不同郁闭度下亮度水平比较
Table 2 Comparison of Brightness

样地号	坡度	坡向	郁闭度	蓄积量	亮度	类型
26	24	80	0.4	4.13	121	杉
27	26	110	0.9	13.84	102	松

$$B = \sum_{i=1}^n R_{1,i} \cdot X_i$$

由表(1)可见, TM3, 4, 5 波段亮度贡献最大。

对森林而言, 郁闭度大的林地, 虽有近红外叶绿素的高反射, 但因林木阴影效应而降低了林地反射总水平。表(2)是两方样地的亮度水平比较。由表可见, 在其它因素相近的条件下, 由于郁闭度和蓄积量的差异, 郁闭度小的林地, 亮度水平较高。

式(5)可近似地表述亮度(B)与蓄积量(VOL)的关系:

$$VOL = 186.5 - 1.36 \cdot B \quad (5)$$

(该式相关系数为 $R = -0.62$) 由此可见, 亮度与蓄积量(或郁闭度)成反比。

因此, 在相同照度、相近环境条件下, 由于郁闭度(蓄积量)不同, 亮度也不同, 其原因在于林木阴影对入射照度的低反射, 而降低了林地反射总水平。在相同郁闭度条件下, 由于林分类型的生态习性不同, 亮度水平也不同。例如, 杉木林由于偏暗, 喜湿, 在其它条件相似的情况下, 其亮度水平低于马尾松林。

第二轴为绿度特征。它命名于表(1)中 TM4 与 TM3 的差值。绿色植被对近红外光的强烈反射和对红光的吸收, 构成了绿色植被的共同特征。与 Crist 等变换矩阵不同的是, Crist 等认为在该特征中 TM5 的中红外反射对绿色影响甚微, 其系数为 0.084。我们认为这一观点不能适于森林及其环境特征。林地郁闭度小, 如疏林地, 其中红外反射甚强, 绿度较小。而郁闭度大的林地, 绿度较大。同时因生境湿润, 中红外反射较低。因此, TM5 波段亮度应与绿度成反比, 即系数的符号应为负。表 3 是不同郁闭度样地上绿度水平的比较。由表可见, 206 号样地郁闭度较大, 样地相对湿润, 中红外反射较低, 绿度也大。若按 Crist 变换矩阵计算, 206 号样地绿度水平低于 217 号样地。这就不符合绿度的概念, 也难以应用于森林信息的分析与提取。应该指出, 中红外反射并不直接作用于叶绿素反射, 而是通过水分条件间接影响绿度水平。

第三轴为湿度(W)。由于两个中红外波段对土壤及植被的水分极为敏感, 故命名为

湿度。例如水体在所有地物中具有最大的湿度(参见图 3)。林地与疏林地比较,林地湿度较大。表 3 最后一列为不同郁闭度条件下的湿度比较。由表可见,郁闭度大的林地湿度远高于疏林地。

在条件相近的不同林分类型情况下,由于生态习性不同,其湿度水平也有差异。表 4 是条件相近的杉木和马尾松林分。由于马尾松林分相对干燥,其亮度偏大,而湿度偏小。同理,可知一般情况下,阔叶林的湿度大于针叶林。

表 3 不同郁闭度下绿度水平比较
Table 3 Comparison of Greenness

样地号	郁闭度	蓄积量 m^3	单位亮度的绿度	TM5	单位湿度
217	0.1	0.08	0.42	84	0.06
206	0.61	1.56	0.45	59	0.18

表 4 不同生态习性林分的湿度比较
Table 4 Comparison of Wetness

样地号	郁闭度	蓄积量	亮 度	湿 度	林分类型
49	0.74	8.15	104	29	杉木
122	0.80	7.01	107	25	马尾松

第四轴、第五轴的确切含义尚不清楚,由于其方差甚小(标准差分别为 2.49, 1.97),故所含信息也较少。另一方面,由于第四轴与亮度(B)的相关系数为 0.56,故可能是亮度的补充;第五轴与湿度的相关系数为 0.71,故可能是湿度轴的补充。显然,这是统计意义上的分析,其确切意义尚待开发,但全部归为噪音值得商榷。

(三) 变换空间数据结构的林学分析

由于 TM 数据一般只有三个独立特征,因而在变换空间中可定义两个相互垂直的平面。即由亮度轴和绿度轴构成植被平面;由亮度轴和湿度轴构成土壤平面,如图 1 所示。各地物依其自身特征及环境背景在三维空间中占据一定的位置。

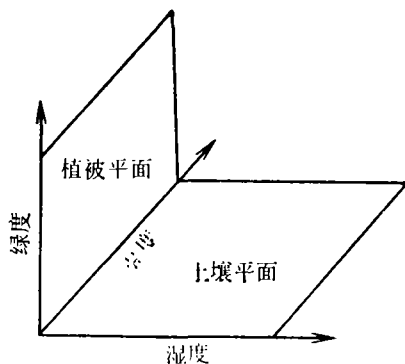


图 1 绿度、湿度和亮度三轴相互垂直构成的平面
Fig. 1 Vegetation plane and soil plane

图 2 是临安县 1983 年 3 月典型地物在植被平面上的分布。由图可见,裸露土壤从潮湿到干燥,形成平行于亮度轴的条带。生长有植被的地物在该条带上分布。森林以其高绿度、低亮度而分布于小麦左侧。疏林、灌、草因亮度大,绿度小而分布于森林的右下方。造林地随着枝叶的生长而逐渐郁闭,其轨迹从森林集群的右下方顺时针转动。当其完全郁闭时,其阴影反射甚小,绿度增大而趋于右上方。据此可粗略地提取林分的龄组特征和郁闭状况。

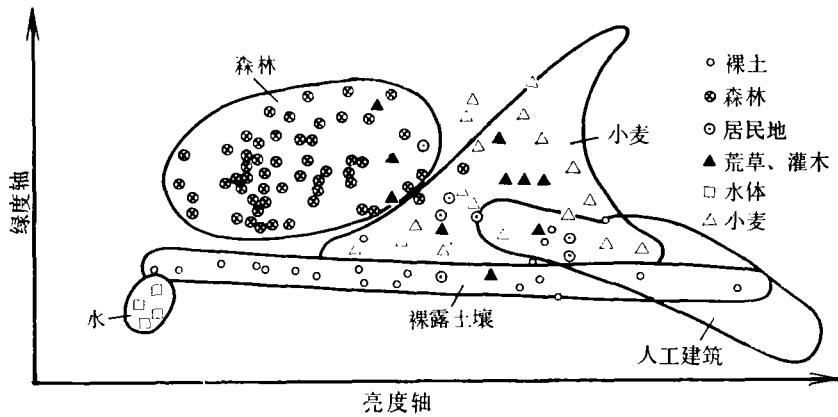


图2 临安县主要典型地物在植被平面上的分布

Fig. 2 Distribution of typical classes on vegetation plane

图3为典型地物在土壤平面的分布。水体具有最高的湿度和最低的亮度，而分布在图的左上方。森林以其低亮度、高湿度而分布于农作物的上方，并随林地及叶面湿润状况和郁闭度的大小而呈椭圆型分布。其长轴平行于亮度，反映郁闭状况；短轴与湿度轴平行反映水分差异。

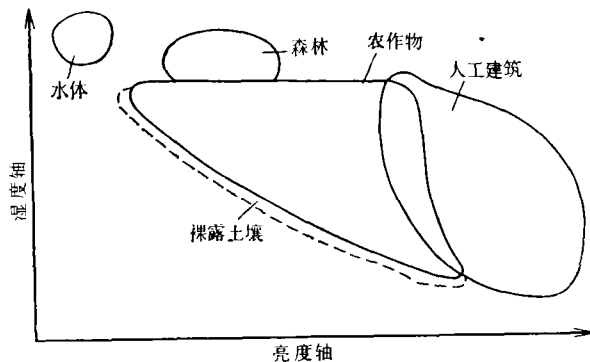


图3 临安县主要典型地物在土壤平面上的分布

Fig. 3 Distribution of typical classes on soil plane

综上所述,各地物在特征空间中均按各自特点分布。森林低亮度、高湿度的特征使其呈椭球型分布于三维空间的左上方。这一分布特征来自于森林本身的特点,因而不随时间、空间变化,变化的只是椭球的大小。这就是 K-T 变换具有时、空不变性的根本原因。这一原理为我们进行森林资源和环境的监测提供了基本依据。

从上述分析还可知 K-T 变换的林学意义是明确的,它改变了常规的纯光谱分析方法,而将综合光谱与地物及环境特征联系起来。例如,我们不仅可利用绿度描述森林的叶绿素反射水平,还可用湿度描述林分的湿润状况。

三、森林蓄积量遥感估算

(一) 估算方法

航天遥感目前的发展水平尚不能直接得出林分测树因子,因而多采用遥感方法求取与蓄积量有关的林分特征来间接估算蓄积量。同时,在方法上也由于影响蓄积量的因素颇多,难以用测树学方法建立明确的数理方程,而多采用经验分析方法和统计方法。表5是这些方法估算蓄积量的结果。由表可见,各种方法估算结果都不太理想。究其原因在于经验方法虽有一定的物理意义,但只能描述多因素的某个方面。线性回归方法只是多因素的罗列,而无物理意义。目前应用较多的数量化方法,其前提建立在准确分类基础之上。而准确地提取林分类型、龄组等特征,在地形破碎,地类复杂的南方山地目前尚难实现。另一方面,在选择相关因素上,目前一般仅模拟与蓄积量有关的林学特征,而忽略了对林木生长有重要作用的环境特征,也是精度不高的原因。根据上述情况,我们从森林蓄积量的林学特征和环境特征两方面来构造模型。

表 5 常规方法估算蓄积量结果
Table 5 Estimate results with common method

计算方法	R (相关系数)
多元线性回归 (TM 5 个波段)	0.64
多元线性回归 (K-T 5 个波段)	0.65
2. (TM5-TM3)	0.62
2. (TM4-TM3)	0.54
TM5/TM3	0.37
(TM4 + TM3)/(TM4-TM3)	0.32

(二) 估算模型

森林蓄积量遥感估算模型的结构可用下式表示,即:

$$VOL = f(F, E) \quad (6)$$

式中 F 、 E 分别为林分特征和环境特征, VOL 为蓄积量。

在林分特征模拟上,由于绿度 G' 主要取决于叶绿素反射水平和叶面反射状况,故可视为林学特征之一。令:

$$G = G'/B$$

G 的物理意义为单位亮度的绿度值。其目的在于消除林木阴影造成的绿度差异,突出森林信息。郁闭度是重要林分要素,与蓄积量有一定关系,两者共同构成林分特征。

在环境因素方面,主要模拟林分生长的水热条件。由于湿度 W' 反映了林分的水分条件,因而可令:

$$W = W'/B$$

作为林分水分或林分湿润状况的指标;样点的太阳入射角 θ 是该点坡度、坡向的综合指标,反映了该点接受太阳辐射的状况,因而可视为热量指标。两者之积可间接表示林分的水热条件。

因此森林蓄积量估算模型应与 W, θ, G, C 有关:

$$VOL = f(W, \theta, G, C) \quad (7)$$

其中 W 为湿度指标, θ 可由下式确定:

$$\cos \theta = \cos \theta_z \cdot \cos S + \sin \theta_z \cdot \sin S \cdot \cos(\beta - \beta')$$

式中 θ_z, β' 为太阳高度角和方位角, S, β 为样地点的坡度、坡向。

G , 为绿度指标;

C 为林分郁闭度。

根据式 (7) 可设林分要素与环境要素模拟值愈大, 蓄积量愈大; 反之愈小。考虑两要素的交互作用, 并选择适当函数, 式 (7) 为:

$$VOL = a_0 + a_1[W^2 * e^\theta] + a_2[\log G * e^c] + a_3[W^2 * e^\theta] * [\log G * e^c] \quad (8)$$

其中右边第二项为环境要素, 第三项为林分要素。表 6 为式 (8) 的精度:

表 6 式 (8) 的精度
Table 6 The model precise

	R	S_y	F
式 (8)	0.855	1.549	444
式 (9)	0.851	1.567	860

对比表 5 和表 6 可见精度有了较大的提高。究其原因在于式 (8) 不仅考虑了模型的非线性因素, 更重要的是在模型的结构上考虑了林学特性和环境特征两个方面, 从而使模型具有一定的物理含义。

考虑到模型中前两个要素与交互作用项的相关性, 并从简化计算角度出发, 式 (8) 可变为:

$$VOL = b_0 + b_1 * [W^2 * e^\theta] * [\log G * e^c] \quad (9)$$

该式即为我们进行森林蓄积量估算的模型。式 (9) 精度见表 6。

(三) 结果与讨论

在图像处理系统上, 将 TM CCT 数据进行几何校正、与公里网配准后, 输出样地点及其邻点的像元亮度值。经均衡化处理、地形辐射校正、K-T 变换后, 输入式 (9) 得出各样地点蓄积量的计算值。整个工作流程见图 4。

表 7 各林分类型蓄积量计算成果
Table 7 Calculation results of standing classes

	阔叶林	杉木林	马尾松林	竹林*	经济林*	疏林灌丛*
实测值	93.43/31**	188.04/94**	429.68/116**	45.06/28**	19.00/29**	36.38/32**
计算值	106.83	210.59	399.65	41.28	20.70	32.54
相对误差(%)	-14.4	-12.0	7	8.3	9.0	10.6

* 指该林分类型中含有阔、杉、马尾松林木。 **/下指样地数。

对比蓄积量计算值与实测值发现, 除少数点外, 60% 的计算值计算误差小于 1.0 m^3 。个别样地误差较大的原因一是实测资料提供可能有误差; 其次可能因资料与图像数据相

类型分别建立蓄积量估算模型,并考虑林龄因素,则估算精度可望进一步提高。

3. Crist 等的 K-T 变换矩阵是以农作物为对象建立的,不宜直接移用于山地森林特征分析。同时,由于绿度含义的广泛性,因而难以完整地描述林分的特征。如能构造一个新的特征,使其能有效地表述各林分因子,则肯定会大大提高蓄积量估算精度。

参 考 文 献

- [1] R. J. Kauth and G. S. Thomas, The Tasseled cap—A Graphic Description of the Spectral—Temporal Development of Agricultural Crops as Seen by Landsat, Proceedings of Remotely sensed Data; Purdue University West Lafayette Indiana, pp. 4B41—4B51, 1976.
- [2] E. P. Crist and R. C. Cicone, A Physically-Based Transformation of The TM Data—The TM Tasseled Cap, IEEE GE-23, pp. 256—263.
- [3] 于天旭,利用 DTM 和陆地卫星 TM 数据提取植被定量信息,南京大学学报(地理版),1989 年。

K-T TRANSFORMATION'S FORESTRY SIGNIFICANCE AND APPLICATION OF IT TO REMOTELY SENSED ESTIMATE OF STAND VOLUME

Zhang Youjing
(He Hai University)

Fang Youqing
(Nanjing Forestry University)

Abstract

K-T transformation's forestry significance is discussed in this paper. The idea of the transformation can be applied to the forestry analysis. On the K-T feature space, the forestry significance is obvious and the forest is of higher greenness, wettness and lower brightness. And it occupies relative fixed place. By this specific property, forest and its environment characteristic can be described with their reflective spectrum.

In this paper, remotely sensed estimate model of stand volume is developed with K-T transformation's features in Linan county, Zhejiang province. It includes forest and environment characteristic, and is of physical meaning. The model is demonstrated satisfactorily by the experiments. The average estimate precise of stand volume is 90% for the primary stand classes, It can be applied to the South-China mountain.

Key words Forestry Environment Stand volume Remotely sensed stimate model