

遥感图像因子分析的环境意义

王铮 梅安新 刘树人

(华东师范大学应用遥感所)

王学林 高原

(云南省计算中心)

1988年11月7日收稿

摘 要

本文是一份实验和理论分析报告。六种地理环境类型的遥感图像用因子分析算法作了处理。并介绍了图像因素和 Tasseled Cap 空间基之间的关系。一般来说第一因素矢量和 SB 最相似,而第二因素矢量和 GV 最相似。但在平原农业环境出现相反的结果。

为分析实验的成果,我们试图从理论上进行探讨。假设地面地理特征是一个二维零均值的平稳随机过程,IFOV 卷积效应使初级环境景观因子信号被增强,而二级环境因子相对地在传感器的观察下是递减的。

在第二步工作中,发展了一种基于环境景观学概念的方法,它相当于图像处理的奇异值分解(SVD 变换),它将用来处理遥感图像的环境信息。

关键词 遥感图像 因子分析 环境景观信号 景观滤波

因子分析^[1]在图像处理学中被称为奇异值分解(SVD)^[2],它在算法上类似于 KL 变换,但由于把特征值用作因子乘到由 KL 变换得出来的特征矢量上,使得最终得到的特征矢量的模,正比于特征图像信号功率,从而从信息学的角度看更为合理,尽管有一些实验提示了一些线索^[3],但这种信息提取所具有的环境遥感意义至今尚不明确,因此本文试图从理论角度来寻求这一问题的答案。

一、实验研究

实验选用了 MSS 图像,图像为 1985 年 2 月 18 日的昆明幅,原因是昆明地区地貌分异大,包括湖泊(水体)、平原山地等多种自然环境,2 月中旬对于“四季如春”的昆明来说,有裸露的荒山和茂密的林地,农田农作类型多。植被的这种特性,更丰富了实验区的环境类型。

在实验区内,我们对其中的六种陆地地理环境类型的图像进行了因子分析,从而探讨图像因子分析的环境意义。各小区的数据是按小区范围从 CCT 磁带上获取的,具体作法是按野外圈定的小区界线在图像上圈出小区界限,将圈出小区的 MSS 数据单独读成一个数据文件,完成小区数据采样。这一实验结果如下:

(1) 中山山地针阔混交林

对于本环境类型,发现若按95%的累计权重为标准,本环境可分解为2个因子(L_1 , L_2),其中因子 L_1 的权重0.810, L_2 的权重0.16。

(2) 中山山地灌木林草地(草坡)

本环境图像被分解为二因子,其中因子 L_1 权重0.873, L_2 权重0.080。

(3) 石灰岩丘陵灌木林环境

二因子图像, L_1 权重0.911, L_2 权重0.050。

(4) 丘陵山地草坡

二因子图像, L_1 权重0.860, L_2 权重0.094。

(5) 湖积冲积平原农田

二因子图像, L_1 权重0.667, L_2 权重0.307。

(6) 河谷—丘陵旱地梯田农田地

二因子图像, L_1 权重0.667, L_2 权重0.297。

为了发现各环境图像各自的因子 L_1, L_2 的环境意义,我们将 $\{L_i\}$ 各因子与 Tasseled Cap 变换^[4]的各分量作了相似分析。为了后继理论分析的必要,我们将相似度定义作:

$$r_{ij} = \frac{|(L_i, C_j)|}{\|L_i\| \|C_j\|} \quad (1)$$

式中 L_i 是第 i 个因子在 MSS 图像(线性)空间中的矢量表示, (\cdot, \cdot) 是内积记号, $\|\cdot\|$ 是矢量模的记号, $|\cdot|$ 是绝对值记号。 r_{ij} 相当于在 MSS 空间观察矢量 L_i 和矢量 C_j 的夹角余弦值,当两个矢量重合,夹角余弦绝对值 r_{ij} 为1,重合的矢量表示它们有相同的地理环境学意义,因为这时的因子图像 L_i 和 Tasseled Cap 图像是同一张图像,当 $r_{ij} = 0$,即二矢量 L_i 和 C_j 相互垂直,表示它们反映的信息在数学框架内是独立的,因而对应于不同的环境机制。

我们采用了 Landsat 5 资料,因未能见到 NASA 的 Landsat 5 的变换资料,只好代以采用同类型的 Landsat 4 的 Tasseled Cap 变换。它的具体形式是^[4]:

$$\begin{bmatrix} SB \\ GV \\ YI \\ NS \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.378 & 0.585 & 0.693 & 0.187 \\ -0.317 & -0.638 & 0.623 & 0.315 \\ -0.869 & -0.491 & 0.060 & 0.001 \\ 0.031 & -0.098 & -0.357 & 0.931 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} MSS 4 \\ MSS 5 \\ MSS 6 \\ MSS 7 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 SB 称为亮度,反映的是地理环境图像的土壤—地貌背景, GV 是绿色度,反映植被信息, YI 被称为黄色度,反映水分和大气水分的信息, NS 为“噪声”,也称“无信息”。

将实验区内各陆地环境的 L_i 与 SB, GV 作相似分析结果由表1给出,这个表的结果反映了各地理环境 L_1, L_2 与 SB 或 GV 最为相似,从而揭示 L_i 的环境学意义。

从表1可以发现,对于五种山地环境来说, L_1 矢量几乎与 SB 重合(≥ 0.912),其夹角约在 $25^\circ-27^\circ$ 之间, L_2 矢量则几乎与 GV 矢量重合,夹角约在 $13^\circ-30^\circ$ 之间,反映了山地环境中陆地环境的因子 L_1 等价于土壤—地貌因子,第二个因子 L_2 等价于植被因子。但是对于平原农田环境来说,这种 L_i 的环境学特性却发生了变化, L_1 与 GV 矢量相似,其夹角为 19.5° , L_2 反倒与 SB 相似性最好,夹角约为 26.6° 。引人注目的是山地

农田环境(环境6)并没有出现平原农田环境的“反常特性”,而仍然遵循 L_1 与 SB 最相似, L_2 与 GV 最相似的“正常特性”。

再注意各山地环境中因子 L_i 的权重是有意义的,随着林分质量或植被盖度的增大, L_1 的权重在减少, L_2 的权重在增加,而当地形地貌分异增加时, L_1 的权重在增加, L_2 的权重在减少,如在地貌分异最小的湖积平原上,与 SB 最相似的因子的权重为 0.307,此后增加到河谷地区的 0.667,再上升为中山山地的 0.810,0.873,最高的是内部微地貌变异最频繁和最随机的石灰岩灌丛区的 0.911。

表 1 陆地环境的图像 L_i 与 Tasseled Cap 变换因子的最大相似度
Table 1 The most similar degrees of the image factors of environment and the bases of Tasseled Cap transformation

	环境 1		环境 2		环境 3		环境 4		环境 5		环境 6	
	SB	GV	SB	GV	SB	GV	SB	GV	SB	GV	SB	GV
L_1	0.914	—	0.925	—	0.922	—	0.924	—	—	0.953	0.912	—
L_2	—	0.979	—	0.889	—	0.917	—	0.908	0.914	—	—	0.961

这里的实验结果揭示, L_1 , L_2 反映了地理环境内部,土壤—地貌景观和植被景观的内部分异信息。

二、理论模型

我们知道统一的地理环境,是由各种环境要素土壤、植被、含水性、微地貌构成的,用数学的观点看,土壤等就构成了一个(拓扑)空间的基,这个地理环境,就是一个“流形”。遥感过程将环境景观转化成为图像场 $(x, y; n)$,这里 n 是波段数,也就构成了一个从“流形”到欧氏空间中的映照, $\{MSS_i\}$ 是这个空间的基, $\{SB, GV, YI, NS\}$ 是这个空间的另一组基,同理 $\{L_i\}$ 也是它的一组基,以后简称环境因子,记这个因子空间为 L ,则存在一个从 MSS 空间到 L 空间的数学变换(准确的数学概念称提升) A ,使得下式成立

$$Z = LA \quad (3)$$

式中 Z 为 $N_1N_2 \times n$ 的阵, L 是 $N_1N_2 \times m$ 的阵, A 是 $m \times n$ 的阵, N_1N_2 为像元数, N_1 为行数, N_2 为列数, m 为景观空间 L 的基,也即环境因子数, n 为遥感器的通道数。这里假定从 Z 到 L 的变换是线性的,它的提出是根据 Tasseled Cap 变换,主成分分析等成功运用的事实,这一事实证实,即使变换 A 是非线性的,但它的线性部分也是最主要的。

将(3)变形可得

$$L = ZA^+ \quad (4)$$

其中 A^+ 是 A 的广义逆矩阵, $A^+ = A'(AA')^{-1}$,由(4)可以求出景观空间 L 的基 L_i 来。为求出 L ,需要求出 A ,于是将(3)式转置后再乘(3)式得

$$Z'Z = A'L'A \quad (5)$$

注意到我们约定 $\{L_i\}$ 是基,所以 $L'L$ 为单位阵,这样有:

$$Z'Z = A'A \quad (6)$$

(6)式是求出矩阵 A 的不定方程,为此引入新的条件: L_i 为信号能量最大的基, L_i 表示信号能量第 i 大的基,这就是因子分析算法,这时有变换阵 A 为

$$A = (r_1, r_2, \dots, r_m) \begin{pmatrix} \sqrt{\lambda_1} & & & \\ & \sqrt{\lambda_2} & & \\ & & \dots & \\ & & & \sqrt{\lambda_m} \end{pmatrix} \quad (7)$$

其中 r_i 是 $Z'Z$ 的特征向量, λ_i 是 r_i 对应的特征值, r_i 的排列是 $\lambda_i > \lambda_{i+1}$ 。如果 A 仅取前面一个阵,则 A 对应于主成分变换^[5]。

三、算法的分析

为了寻找因子分析算法的环境学意义,我们需要进一步分析遥感的信息传输过程,为此我们引入了一个概念——景观滤波。

令 $\sigma(u, v)$ 表示遥感器遥感的地域内的地貌、地质、土壤、植被、水体等形成的统一的散射特征,我们称之为环境的景观散射特性,因为它是环境“外表”的表现,并把其包含的信息称为景观信息。这里 u, v 是观察地域的全局坐标,又记 $f(u, v)$ 为遥感器的响应函数,即

$$f(u, v) = \begin{cases} 1 & (u, v) \in IFOV \\ 0 & \text{其它} \end{cases} \quad (8)$$

其中 $IFOV$ 为瞬时视场(传感器的),以 $C(\lambda)$ 记传感器关于中心波长 λ 的传输特性,则地面的环境景观信号 $\sigma(u, v)$ 经过遥感器系统传输后得到的图像遥感信号(即遥感图像)为

$$Z(u, v) = C(\lambda)f(u, v)*\sigma(u, v) \quad (9)$$

式中 $Z(u, v)$ 为图像信号, $*$ 为卷积符号, $C(\lambda)$ 为传输因子。

本文引入另一个假设,局部地域内的景观信号是平稳随机过程。事实上文献[6]实验过地形(微地貌)是平稳随机过程,从地理环境学研究我们知道,把景观局限在一个地带及亚地带范围内,决定景观分异的条件主要是地貌,因而有理由认为景观信号是平稳随机过程。关于这个假定,我们在这里只不过是把它明确化,事实上遥感图像处理中广泛应用的各种滤波算法。其可行性离不开这种假定。文献[7]则明确地提出过这个假定。因此点 (u, v) 的邻域 (x, y) 来说,有

$$\sigma(x, y) = \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{j=0}^{N_1-1} \sum_{k=0}^{N_2-1} F(j, k) \exp\{i(\omega_x x + \omega_y y)\} \quad (10)$$

这里 x, y 是局部地域坐标, $F(j, k)$ 是图像场的离散采样值。

$$\omega_x = \frac{2\pi}{N_1} j, \omega_y = \frac{2\pi}{N_2} k,$$

代表了不同地面信号频率(这个频率是空间随机过程频率,而不是光波的振荡频率)将(10)代入(9)则得:

$$Z(u, v) = C(\lambda) \iint_{IFOV} \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{j=0}^{N_1-1} \sum_{k=0}^{N_2-1} Z(j, k) \cdot \exp \left\{ \frac{2\pi i}{N_1} (u-x)j + \frac{2\pi i}{N_2} (v-y)k \right\} dx dy \quad (11)$$

式(11)引用了(8)式,而在 $IFOV$ 外,积分为零,不必写出。

于是对(11)作积分可得

$$Z(u, v) = C(\lambda) \frac{1}{N_1 N_2} \sum_{j=0}^{N_1-1} \sum_{k=0}^{N_2-1} F(j, k) \exp \left\{ 2\pi i \left[\frac{j}{N_1} u + \frac{k}{N_2} v \right] \right\} f_i(j, k) \quad (12)$$

式中 $f_i(j, k)$ 是遥感器的传递函数

$$f_i(j, k) = \frac{N_1 N_2}{\pi j k} \sin \frac{\pi}{N_1} j \sin \frac{\pi}{N_2} k \quad (13)$$

众所周知,它是一个低通滤波器。也就是说,(12)指出,在遥感过程中景观的低频信号被加强了,高频信号被削弱了。如果景观信号最初有同样强度的信号形式,则经遥感过程后,图像信号中的强信号,一般对应于低频景观信号,弱信号,对应于高频景观信号。这个过程就是遥感器的景观滤波。根据上一节中算法的设计,我们把 $\{L_i\}$ 按信号强度排序,所以 L_1 对应低频景观, L_2 对应中频景观, L_3 对应较高频景观,余此类推。

问题归结为景观频率的地理环境学意义。我们知道地理学中,早就发现存在不同尺度的地域分异现象,大尺度的地域分异现象空间变化慢,较大范围内稳定,是一种低频现象;小尺度的分异现象,空间变异快,小范围内就有重复现象发生,因而是种高频现象。比如,一般讲土被的变化比植被变化要慢得多,而地貌变化与土被变化有“共轭性”,趋于一致,这就是说环境景观的要素土被,植被具有不同的空间频率;不仅光谱强度是土被,植被的信息载体,空间频率也是它们的信息载体。在我们的研究区内,我们发现沟谷出现的频率为2—6条/千米(因基底岩性而异),而植被变换的频率较高,除农田外,一般在水平距离80米范围内至少出现一次植物群丛变化,这就是说在二个像元范围内至少含包一次植被空间分异过程,而在三个像元以上的范围内才可见一次地形—土被分异,这一事实说明在我国山地的自然条件下,土被—地貌环境信号的空间频率比植被的环境信号的空间频率来得低,但它们又可落在遥感器的选频(空间频率)范围内,使之可被观察到。至此我们得出一个重要结果,遥感器在山地条件下增强了土被和地貌环境景观信号,削弱了植被环境景观信号。这里有一点要补充说明,必须在概念上分植被物理信号与植被景观信号等,因为土被,地貌控制着植物的生境,所以植物长势差异以及农民因地制宜选择品种和植物群丛优势种替代等产生的植物物理信号的差异,也包含了土被的景观信息。在实际的地学工作中,人们早已应用这一原理,例如从常绿阔叶林推断下覆土壤为砖红壤等等。

至此我们已经可以解释第一节所发现的实验结果。由于遥感器的“景观滤波”效应,在山地环境遥感中,土被—地貌变异的景观信号被加强了,而植被景观信号相形之下变弱了,又由于因子分析算法上的特殊处理,使得第一因子图像 L_1 与 SB 相似反映土被—地貌信息,第二因子图像 L_2 与 GV 相似反映植被信息。在平原环境遥感中,植被分异形成的景观成了图像范围内的低频景观,表现为主因子 L_1 的图像,而次级微地貌景观成为

高频景观,其图像表现为次因子图像。前者对应于正常现象,后者对应于“反常”现象。在文献[3]中, Huete, A. R, 也发现了完全类似的实验结果。

理论的结果还可以推广到解释水体遥感特性,限于篇幅另文讨论。

三、结 语

(1) 图像因子分析的地理环境学意义是,将地理环境按环境景观基 L_i 分开,实现综合景观的“景观分解”,其第一个景观基在山区代表地貌—土被景观,在平原则代表植被景观特征。对于第二个景观基来说,其意义正好与第一个基相反。

有意义的是,从因子分析得到的图像分析植被状况,对平原环境来说应重视第一个因子,对山地环境来说,应重视第二个因子;对土被状况而言,这种条件正好相反。

(2) 本文揭示,遥感作为一种宏观的地理环境观察手段,对从实验角度研究地理学—环境学的某些理论问题比如景观,提供了一种有价值的手段。

参 考 文 献

- [1] 余金生、李裕伟,地质因子分析,地质出版社,1985年。
- [2] Pratl, W. K, Digital Image Processing, 264—266, John Wiley & Sons, 1978.
- [3] Huete, A. R, Separation of Soil-plant Spectrul Mixtures by Factor Analysis, Remote Sensing of Enviroment, 19(3), 237—251, 1986.
- [4] Crist, E. P, etc, Comparision of the Dimensionality and Features of Simulated Landsat-4 MSS and TM Data,Remote Sensing of Environment; 4(1—3), 235—246, 1984.
- [5] 张光庭、方开泰,多元统计分析引论,328—339,科学出版社,1982年。
- [6] 彭嘉雄、张天序,地形的统计模型研究,宇航学报: (3),14—21,1984。
- [7] 曾小明、方有清,马尔可夫平稳随机域模型与遥感图像,环境遥感: 3(1),63—70,1988。

THE ENVIRONMENT MEANING OF FACTOR ANALYSIS OF REMOTE SENSING IMAGES

Wang Zheng Mei Anxing Liu Suren

(*Applied Remote Sensing Institute, ECNU, Shanghai*)

Wang Xueling Gao Yuan

(*Yunnan Computation Center, Kunming*)

Abstract

In this paper, experiments and theory analysis were made. The remote sensing images of 6 geographical environment were processed with factor analysis algorithm, the results were stated in table 1. Results introduced the relationship of image factors and the bases of Tasseled Cap space. Generally, the first factor vector most similar to SB and second factor vector most similar to GV, as for plain agricultural environments (environment 5 in the table), inverse results appeared.

To analyze the experimental results, we developed a kind of theory to explore these results with physical geographical theory.

In first work, the unequivalency of the response to geographical landscapes of the sensor has been discovered, with using the supposing that ground geographical feature is 2-dimension zero mean stationary stochastic processes and the effect of IFOV's convolution integral. It shows that the signal of primary environment landscape factor would be increased and secondary environment landscape factor would relatively be decreased under the observation of the sensor. The gain factor is $\sin\omega_x \sin\omega_y / \omega_x \omega_y$, where ω_x and ω_y are angular frequency of space, and X, Y are defined as the sweeping direction of the sensor and the moving direction of the sensor, respectively.

In second work, a concept of resolution of an environment landscape, was developed dependent on the discovery. A method that equivalent to SVD transformation of image processing has been developed, it would be used to process the environment information of remote sensing images.

Key words remote sensing images factor analysis environment landscape signal landscape filtering