

森林资源遥感估测的重要进展

赵宪文, 李崇贵, 斯林, 田永林, 袁凯先

(中国林业科学研究院, 北京 100091)

[摘要] 传统的森林资源调查是一项费时、费力, 需大量经费的工作。20世纪70年代末, 遥感技术被引入中国。以中国林科院为主的一批林业科学工作者, 积极将其应用于森林资源调查工作, 特别是森林蓄积量的估测。研究了比值项的作用, 确定用定量因子和定性因子联合估测森林蓄积量多元估计方程的形式, 以及在中国不同气候带的应用。指出遥感调查方法比传统方法节约经费1/3~1/2。

近年来, 用近代统计学和非参数方法进行了新的探索和深入研究, 解决了一些在林业资源调查中应用遥感技术的重要问题, 为建立以遥感技术为主要技术手段的新的森林资源估测体系提供有力支持。

[关键词] 遥感调查; 非参数估计; 森林蓄积量; 近代统计学

1 背景

森林资源是一切林业经营活动的基础, 对它的估测是要经常进行的。森林蓄积量和面积估计是它的主要内容。传统方法进行资源调查是一项劳动强度大、耗资大的工作。航天遥感技术出现后为资源调查工作提供了新的可能性。自20世纪70年代末, 中国林业工作者开始了一系列关于航天遥感技术应用于森林资源调查的研究。森林蓄积量估测研究历程如下:

1979—1982年 形成方法雏形;

1984年 比值项筛选, 比值项作用及最优比值项选择;

1986年 样本形状、组织方法, 分流域建立方程, 与航空资料以及航天与航空资料相结合的方法比较, 初步比较(估计误差);

1989年 三种方法估计精度的进一步比较, 成本初步分析, 样本数量研究, 比值项作用的进一

步验证;

1990年 在河北省试验;

1991年 在广东省试验;

1994—1995年 成本细部分析, 用于二类调查试验;

1995年 在云南省实验;

1995年 通过估计森林蓄积量估计森林内枯落物;

1995—1996年 估计森林郁闭度(在热带林区);

1997—1999年 在云南、广西、内蒙试验并推广;

2000年 形成可运行软件。

经过多年研究, 确定了用定性因子和定量因子共同建立蓄积估计方程的思路。此方法在温带、亚热带和热带都进行了试验。结果列于表1。

实践表明, 用遥感方法估测森林资源可以节省工作量和经费, 大约相当于传统方法的1/3。

表1 三种地带估测结果比较

Table 1 The comparison of the estimation results of three kinds of district

试验区	温带 (河北)	亚热带 (广东)	热带和亚热带 (云南)
单波段值与蓄积量的复相关系数	0.48	0.59	0.40
加比值项后的复相关系数	0.73	0.83	0.60
估计蓄积量最佳波段比	$\xi_{TM_{\frac{4}{3}}}$, $\xi_{TM_{\frac{4-3}{4+3}}}$	$\xi_{MSS_{\frac{7-5}{7+3}}}$, $\xi_{MSS_{\frac{4 \times 5}{7}}}$	$\xi_{TM_{\frac{5+7-2}{7+2}}}$, $\xi_{TM_{\frac{7}{3}}}$
按流域进行估测的复相关系数	0.84	未作	未作

近年来,在上述研究的基础上,用近代统计学的手段进行了新的探索和深入研究。解决了一些遥感在林业资源调查中应用的重要问题,如地面样地与遥感图像配准,减少地面工作,资源落实到地段,快速选取该区最优方程,并在选取方程自变量时排除了在遥感数据中难以确定的因子(如龄组、郁闭度等)。从理论和实际应用中确认了遥感信息在森林蓄积量估测中的主导作用。为遥感技术应用于森林资源估测打下基础,为建立以遥感技术为主要技术手段的新的森林资源估测体系提供有力支持。

2 问题与方法

2.1 遥感定量因子是不是估计森林蓄积量的主要因子?

近年来一些中国科技工作者也采用了多元估计的方法,甚至还有人采用了仅用定性因子对蓄积量进行估计的方法(相当于20世纪70年代编制数量化航空材积表那样)。因为这样做,可以从地形图上直接得到定性因子,而省去从遥感图像上读出一系列波段值的繁琐操作。但是此法最大的弊病在于舍弃了航天遥感图像所提供给我们的最重要的信息,没有充分利用航天遥感信息。为此在这方面进行了深入的研究。

近代回归分析的岭迹法(ridge trace)^[1],能够克服最小二乘(LS)估计在因子间有复共线性而出现病态时没有最优解的不利影响,确定出对因变量估计最有作用的因子。

具体做法是借助岭迹分析法来选择对蓄积估测的有效因子。结果是:蓄积量估测式中以遥感数据可得到的定量因子为主,在定性因子中只有郁闭度起关键作用,进而对郁闭度进行估测。在对郁闭度的估测式中仍以遥感数据中可得到的定量因子为主,而在定性因子中地类(只分有林与无林两类中

的有林地)和坡向起关键作用,而这两项定性因子也都是从遥感数据中可以得到的。至此可得出两点结论:

(1) 遥感定量数据在蓄积量和郁闭度估测中有主导作用。

(2) 蓄积量和郁闭度估测的定量因子和定性因子全部可以从遥感数据中获得。

2.2 最优方程的选择

在确定了哪些因子起主导作用后,接下来的问题是要选多少变量去建立方程,即怎样选择“最优”变量子集。据文献[1]的研究表明:选择回归自变量时基本原则应是少而精。丢掉一些变量总会使剩余变量回归系数LS估计和预测的方差减少。但这时的估计和预测一般是有偏差的。如果丢掉的那些变量确实影响比较少,则剩余变量的回归系数LS估计和预测的均方误差减少^[2]。下面给出自变量选择准则。

LS估计有多种自变量选择准则^[3],考虑其有效性和便于计算机编程,在此采用平均残差平方和(Residual Mean Squares, RMS)准则,按回归树原理,从所有可能的自变量子集中选择影响蓄积估测的主要因子子集。当自变量个数为 q 时,平均残差平方和的表达式为

$$R_q = \frac{\mathbf{V}^T (\mathbf{I} - \mathbf{X}_q (\mathbf{X}_q^T \mathbf{X}_q)^{-1} \mathbf{X}_q^T) \mathbf{V}}{n - q} \quad (1)$$

式中,分子 $\mathbf{V}^T (\mathbf{I} - \mathbf{X}_q (\mathbf{X}_q^T \mathbf{X}_q)^{-1} \mathbf{X}_q^T) \mathbf{V}$ 为蓄积残差平方和,且 $R_{q+1} \leq R_q$,即LS估计蓄积残差平方和随自变量个数的增加而减小,其在回归方程中包含对蓄积估计有影响的全部自变量时达到最小值。按上式选择自变量时,随着自变量个数 q 的增加, $(n - q)^{-1}$ 将增大,但开始时分子减小更多,故总起来 R_q 将逐渐减小。当自变量增加到一定程度,重要的自变量基本上都已选上了,此时再增加自变量,分子减少不多,以至于抵消不了

$(n - q)^{-1}$ 的增加，最终还是导致了 R_q 的增加。到达最小值后，又逐渐增大（见图 1）。依 RMS 准则，其最小值对应的变量子集即为影响蓄积估测的主要因子子集。据此已经编制出选取最优方程软件，4 h 可筛选 200 万个方程，保证了选取的方程最优，并能反映该地区的森林资源概况。

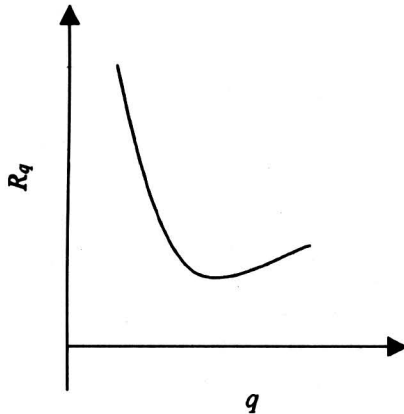


图 1 R_q 随 q 的变化曲线

Fig.1 The changing curve of R_q with q

2.3 减少地面工作量的研究

用遥感数据进行森林资源估测（尤其是森林蓄积量估测）的宗旨是提高调查质量、减少野外工作量、减少开支。因此从常规调查的样地数量中能减少多少样地仍能满足精度要求是林业科学工作者以及生产单位所关心的^[4]。

以云南思茅地区 1992 年的 1 幅 TM 遥感图像及其对应林区当年一类样地调查资料为例进行研究。采用随机起点等间隔抽样的方法，分别抽取 30% 及 50% 的样地来建立估测方程，用所建立的方程预报其余未抽样地的郁闭度或蓄积，分析其精度状况。

以 1/4 幅 TM 遥感区域包含的 129 个样地进行研究，在进行估测时，先建立郁闭度估测方程，再建立蓄积估测方程，在利用蓄积估测方程预报蓄积时，方程中的郁闭度是利用郁闭度估测方程预报的。郁闭度与蓄积估测方程分别为：

$$\begin{aligned} \tilde{V}_{\text{郁闭度}} = & 0.29069 + 0.00070\xi_{\text{TM1}} + 0.00002\xi_{\text{TM4}} - \\ & 0.16138\xi_{\text{TM5}} + 0.15972\xi_{\text{TM7}} + \\ & 0.04341\xi_{\text{TM}_{\frac{4-3}{4+3}}} - 0.00492\xi_{\text{TM}_{\frac{4+5-2}{4+5+2}}} + \\ & 0.28339\xi_{\text{有林地}} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\tilde{V}_{\text{蓄积}} = 4.88633 + 0.11763\xi_{\text{TM3}} - 1.90290\xi_{\text{TM4}} +$$

$$\begin{aligned} & 0.98726\xi_{\text{TM5}} - 0.70765\xi_{\text{TM7}} + \\ & 2.61069\xi_{\text{TM}_{\frac{7}{3}}} + 1.38221\xi_{\text{TM}_{\frac{4 \times 3}{7}}} - \\ & 0.68508\xi_{\text{TM}_{\frac{4+5-2}{4+5+2}}} + 0.70212\xi_{\text{海拔}} + \\ & 0.28939\xi_{\text{有林地}} - 0.43233\xi_{\text{阴坡}} + \\ & 5.17685\xi_{\text{郁闭度}} \end{aligned} \quad (3)$$

设郁闭度实测值为 $V_{\text{郁闭度}}$ ，按式（4）计算郁闭度总预报偏差的相对误差和预报偏差中误差。

总预报偏差的相对误差：

$$\frac{\left| \sum_{i=1}^m \tilde{V}_{\text{郁闭度}_i} - \sum_{i=1}^m V_{\text{郁闭度}_i} \right|}{\sum_{i=1}^m V_{\text{郁闭度}_i}} \times 100(\%) \quad (4)$$

预报偏差中误差：

$$\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \left[\tilde{V}_{\text{郁闭度}_i} - \frac{\sum_{i=1}^m V_{\text{郁闭度}_i}}{m} \right]^2}{m}} \quad (5)$$

式中， m 为被预报的样地总数。

按（4）、（5）式的形式分别计算郁闭度和蓄积的预报精度，总郁闭度预报偏差的相对误差及预报偏差的误差分别为 3.405%，0.131 m³。蓄积预报误差分别为 7.788%，4.731 m³。

通过研究有以下小结：

- 1) 以少量地面样地对应的遥感和 GIS 信息为基础，建立以像元为单位的森林郁闭度及蓄积估测方程，可有效预报森林郁闭度及总蓄积。
- 2) 通过实例验证了抽取传统方法 30%~40% 的样地，就能有效监测森林郁闭度及总蓄积。

2.4 地面样地与卫星数据相应位置的配准

这是一个至关重要的问题，如果不能配准将会动摇用遥感数据估计森林资源的基础。本研究通过 GPS 与 GIS 技术的引入解决了这一问题。其技术要点如下：

- 1) 图像几何精校正时，灰度重采样宜采用双线性内插法。
- 2) 每次仅对 1/4 幅卫星图像校正。
- 3) 现地必须用 GPS 卫星定位接收机对样地或校正点定位。

现以实例说明：整幅图像所选的校正点数为 242 个，1/4 幅及 1/2 幅所选校正点分别为 56 和 145 个。3 幅值图像（即整幅、1/2 幅及 1/4 幅图像，以下同）。校正精度状况如下：

- 1) 分析表明：在 3 幅值遥感图像中，整幅值

的纵横向及点位误差分布离散程度最大, 1/2 幅值次之, 1/4 幅值分布效果最好。

2) 整幅图像校正时, 随着校正点的增加, 其所在区域的已有校正点精度将不断提高, 但 1 幅图内别的区域以前所选校正点的误差可能出现增大现象。这主要是使用不同图幅 1:50 000 地形图所选的校正点, 因各种误差积累, 导致校正点之间内符合精度降低所致。整幅图像校正, 当遥感图像对应林区为山区时, 若采用 1:50 000 地形图选择校正用控制点, 无论选择多少点, 总有少量校正点误差超过 1 个像元, 有个别点甚至达到 2~3 个像元。

3) 1/4 及 1/2 幅值, 因范围小, 地形、地貌变化幅度不大, 选用校正点的地形图分幅数少, 不同校正点之间的内符合精度偏差不大(误差积累不很显著), 校正误差不超过 1 个像元, 且 1/4 图幅各校正点的纵横向及点位误差明显比 1/2 图幅小。

根据以上分析及实际校正精度状况, 当采用 1:50 000 地形图校正 TM 遥感图像时, 受地形图测绘误差、校正点刺点、图解、遥感图像上对点误差及多幅地形图误差积累的影响, 校正点本身的误差已达到或超过一个像元。森林资源调查方形样地边长一般为 28.28m, 与 TM 图像空间分辨率相当。若采用 30m×30m 空间分辨率的 TM 图像进行资源监测, 为准确提取样地对应的遥感信息, 几何精校正精度需达到一个像元以内。因此, 最好对整幅遥感图像进行切割, 使几何精校正精度达到一个像元以内。在配准的基础上, 在 GIS 的支持下提取各样点对应遥感图像的一系列的灰度值及有关信息, 建立估测方程。

2.5 资源估测精度能在多大的面积上落实

这是资源调查中又一个令人关注的问题。常规方法是提供总体精度、没有地段精度。而近期开发地区小地域的精度是有重要作用的。本研究结果表明: 神经网络模型在不低于 6 个样地时, 能保证其估测区域精度^[1]。因此建议在资源调查中应用方法如下:

1) 在近 3~5 年内不开发、经营的区域, 可用此法将蓄积估测精度落实到林班。因为, 在林班为 200 hm² 时, 可包含 6 个系统布点样地(据现有规程要求, 系统布设局级控制样地为 1 km×1 km)。

此方法较原方法优越之处在于提供了小地段区域内可靠的蓄积估测精度。不同之处是要分片计算出每 200 hm² 的蓄积估测精度, 而不是仅给出一个

总精度。其组成树种的蓄积, 可参考建模的 6 个样地进行分配。

2) 在近期急待开发地区, 为将蓄积估测值落实到小班, 仍须用原有方法, 即: 进行小班角规辅助目测蓄积、样地总控、按权修正。

在有特殊要求的地段(如某些小班需要专门提出精度要求, 且面积较大的)则可布(补)设随机样地, 使该地段总点数不低于 6 个, 则可给出该地段的估计精度。

2.6 面积研究

面积是森林资源的重要组成部分, 面积的不准确也会影响到总蓄积的精度。因此面积估测始终是遥感科学工作者关注的重点。但 20 多年来, 没有重大突破。

本次研究在面积方面有两点探索:

1) 从分形的理念出发, 将分形维数值引入到综合纹理分类中去, 提高了以往只用灰度进行分类的效率。

2) 用中分辨率卫星影像(TM)对低分辨率卫星数据(NOAA)校正也引入了分形的方法, 对大区域乃至全球的分类估测给予了有力支持。

3 应用实例

因篇幅所限在此仅给出用岭迹法估计最优变量的例子。

3.1 变量设置

遥感数据所能提供的信息包括: 各波段的灰度值、灰度比值及色彩等。地形图和样地能提供的信息包括: 样地的纵横坐标、海拔、地类、坡度、坡向、郁闭度等。因变量是地面样地蓄积量的测定值。当以 TM 为遥感信息源时, 根据已有文献[4], 自变量设置如表 2 所示。

设置依据可概括如下:

1) 考虑 TM 遥感数据各波段的特点及植物的波谱反射特征与植物分布密度呈线性相关, 可设置 ξ_{TM1} 、 ξ_{TM2} 、 ξ_{TM3} 、 ξ_{TM4} 、 ξ_{TM5} 、 ξ_{TM7} 、 $\xi_{TM\frac{4}{3}}$ 、 $\xi_{TM\frac{4-3}{4+3}}$ 、 $\xi_{TM\frac{7}{3}}$ 、 $\xi_{TM\frac{4\times 3}{7}}$ 、 $\xi_{TM\frac{4+5-2}{4+5+2}}$ 、 $\xi_{TM\frac{3}{\Sigma}}$ 为变量。其中 $\xi_{TM\frac{4}{3}}$ 为 TM 第 4 波段与第 3 波段灰度值的比值, $\xi_{TM\frac{4-3}{4+3}}$ 为 TM 第 4 波段减第 3 波段与第 4 波段加第 3 波段灰度值的比值, 其他比值的含义可依此类推, $\xi_{\Sigma} = \xi_{TM1} + \xi_{TM2} + \xi_{TM3} + \xi_{TM4} + \xi_{TM5} + \xi_{TM7}$ 。

表 2 蓄积估测方程中可供选择的自变量
Table 2 The selectable arguments for the estimation of forest stock

编号	变量类型	编号	变量类型
1	常数项	11	$\xi_{TM\frac{4 \times 3}{7}}$
2	ξ_{TM1}	12	$\xi_{TM\frac{4+5-2}{4+5+2}}$
3	ξ_{TM2}	13	$\xi_{TM\Sigma}$
4	ξ_{TM3}	14	$\xi_{\text{纵坐标 (km)}}$
5	ξ_{TM4}	15	$\xi_{\text{横坐标 (km)}}$
6	ξ_{TM5}	16	$\xi_{\text{海拔 (km)}}$
7	ξ_{TM7}	17	$\xi_{\text{有林地}}$
8	$\xi_{TM\frac{4}{3}}$	18	$\xi_{\text{阴坡}}$
9	$\xi_{TM\frac{4-3}{4+3}}$	19	$\xi_{\text{阳坡}}$
10	$\xi_{TM\frac{7}{3}}$	20	$\xi_{\text{郁闭度}}$

2) 考虑森林在自然状态下或一定区域范围内呈连续分布，郁闭度及蓄积与地理位置有一定的相关关系，设置了样地的纵、横坐标为可选变量。

3) 森林种类及生长状况与海拔有较大的相关性，故设置海拔高为可供选择的变量。

4) 地类包括有林地、疏林地、宜林地等诸多类型，考虑设置变量在 TM 遥感图像上的可获取性，仅将地类划分为有林地和无林地。按数量化方法处理后，作为影响蓄积估测的变量。具体划分时，将疏林地、宜林地及其他类型全部划归无林地。

5) 坡向划分为阴坡、阳坡及无坡向 3 大类。将东、北、东北及西北划为阴坡，将西、南、东南及西南划为阳坡，无坡向单独一类，按数量化方法处理后，作为可供选择的变量。

6) 郁闭度直接反映森林生长状况，可作为影响蓄积估测的重要变量，但它也需通过样地对应的遥感和其他信息确定。

3.2 变量选择

据文献[1, 4]中所述的选择原则分别按 LS 估计和岭估计方法进行。

3.2.1 基础数据 读取 1991 年 1/4TM 思茅幅 (轨

道号 130-44) 遥感图像所含 129 个样地，表 2 中所列 19 个因子的值，经中心标准化后，由观测阵计算方阵 $X^T X$ ，如表 3 所示。

3.2.2 岭估计法 由方阵 $X^T X$ 计算 19 个因子的特征根及各特征根对应的特征向量，如表 4、表 5 所示。表 4 中有几个参选因子的特征根很小，意味着 X 呈病态，LS 估计性质变坏。

由特征分析法^[2]，可找出在 12 个遥感因子间存在下列 3 个近似线性关系：

$$0.1382 \xi_{TM2} - 0.7616 \xi_{TM3} + 0.4513 \xi_{TM7} - 0.2449 \xi_{TM\frac{7}{3}} - 0.1366 \xi_{TM\frac{4+5-2}{4+5+2}} + 0.3036 \xi_{TM\Sigma} \approx 0, \quad (6)$$

$$0.1083 \xi_{TM1} - 0.1469 \xi_{TM2} - 0.3035 \xi_{TM4} + 0.5346 \xi_{TM5} - 0.1623 \xi_{TM7} + 0.1741 \xi_{TM\frac{4}{3}} + 0.5578 \xi_{TM\frac{4-3}{4+3}} - 0.2084 \xi_{TM\frac{4+5-2}{4+5+2}} + 0.4095 \xi_{TM\Sigma} \approx 0, \quad (7)$$

$$0.4586 \xi_{TM1} - 0.5705 \xi_{TM2} - 0.1752 \xi_{TM3} + 0.1061 \xi_{TM4} - 0.1424 \xi_{TM5} + 0.2176 \xi_{TM\frac{4}{3}} - 0.2692 \xi_{TM\frac{4-3}{4+3}} + 0.4665 \xi_{TM\frac{7}{3}} + 0.1634 \xi_{TM\frac{4 \times 3}{7}} - 0.1102 \xi_{TM\frac{4+5-2}{4+5+2}} + 0.1338 \xi_{TM\Sigma} \approx 0. \quad (8)$$

以蓄积为因变量，可绘出如图 2 所示的 19 个因子的岭迹。其中的图 2 A 为 12 个遥感因子影响蓄积估测的岭迹，图 2 B 为郁闭度和其他定性、定量因子的岭迹。分析岭迹图和复共线关系可得，影响蓄积估测的主要遥感和定性因子为： ξ_{TM3} 、 ξ_{TM4} 、 ξ_{TM5} 、 ξ_{TM7} 、 $\xi_{TM\frac{7}{3}}$ 、 $\xi_{TM\frac{4 \times 3}{7}}$ 、 $\xi_{TM\frac{4+5-2}{4+5+2}}$ 、海拔、有林地、阴坡、郁闭度。从待定参数的岭估计值可知，在所有因子中郁闭度对蓄积估测影响最大。

借助岭迹图及特征分析^[2]可有效地选择影响蓄积估测的主要遥感和录入 GIS 中的信息。岭迹分析选择自变量应遵循下列原则：

1) 去掉岭回归系数比较稳定且绝对值比较小的自变量。在计算各待定参数的岭估计值时，观测阵 X 已进行了中心标准化，因此，各自变量的岭回归系数可直接比较大小。

2) 去掉岭回归系数不稳定但随岭参数 k 的增加迅速趋于 0 的自变量。

表3 方阵 $X^T X$ 的值
Table 3 The value of square matrix $X^T X$

参选因子	ξ_{TM1}	ξ_{TM2}	ξ_{TM3}	ξ_{TM4}	ξ_{TM5}	ξ_{TM7}	$\xi_{TM\frac{4}{3}}$	$\xi_{TM\frac{4-3}{4+3}}$	$\xi_{TM\frac{7}{3}}$	$\xi_{TM\frac{4 \times 3}{7}}$
ξ_{TM1}	129.000	123.633	120.503	52.204	104.317	111.869	-58.361	-66.912	86.215	-44.929
ξ_{TM2}	123.633	129.000	123.665	69.840	114.338	117.737	-44.964	-54.260	96.599	-38.678
ξ_{TM3}	120.503	123.665	129.000	53.346	111.350	121.199	-63.609	-73.540	95.215	-53.334
ξ_{TM4}	52.204	69.840	53.346	129.000	90.034	63.679	71.554	63.147	82.209	37.805
ξ_{TM5}	104.317	114.338	111.350	90.034	129.000	122.803	-17.605	-23.698	121.192	-45.744
ξ_{TM7}	111.869	117.737	121.199	63.679	122.803	129.000	-48.974	-55.151	115.348	-64.374
$\xi_{TM\frac{4}{3}}$	-58.361	-44.964	-63.609	71.554	-17.605	-48.974	129.000	125.289	-13.284	89.908
$\xi_{TM\frac{4-3}{4+3}}$	-66.912	-54.260	-73.540	63.147	-23.698	-55.151	125.289	129.000	-15.013	81.748
$\xi_{TM\frac{7}{3}}$	86.215	96.599	95.215	82.209	121.192	115.348	-13.284	-15.013	129.000	-65.837
$\xi_{TM\frac{4 \times 3}{7}}$	-44.929	-38.678	-53.334	37.805	-45.744	-64.374	89.908	81.748	-65.837	129.000
$\xi_{TM\frac{4+5-2}{4+5+2}}$	38.483	54.495	45.140	115.098	89.511	63.731	67.952	64.665	93.917	7.334
$\xi_{TM\frac{3}{\Sigma}}$	59.976	49.690	69.229	-57.542	9.194	39.501	-114.424	-120.773	-4.674	-53.232
$\xi_{纵坐标}$	16.009	17.415	22.45	-7.733	5.507	14.285	-29.150	-29.764	2.737	-13.898
$\xi_{横坐标}$	-27.998	-19.117	-12.679	-1.303	-8.284	-9.309	8.116	8.763	1.747	-6.847
$\xi_{海拔}$	-66.689	-58.577	-63.559	3.942	-42.926	-54.976	66.056	68.341	-33.547	40.340
$\xi_{有林地}$	-29.239	-30.726	-42.188	8.865	-31.604	-41.144	45.273	52.878	-31.884	45.408
$\xi_{阴坡}$	-36.567	-37.145	-44.056	-9.532	-40.808	-43.577	38.032	38.013	-39.247	37.787
$\xi_{阳坡}$	-15.332	-12.523	-15.291	10.644	-2.381	-11.787	16.923	21.815	0.929	2.476
$\xi_{郁闭度}$	-32.582	-35.573	-47.237	7.093	-38.174	-46.991	50.782	56.478	-39.150	53.566

(续表3)

参选因子	$\xi_{TM\frac{4+5-2}{4+5+2}}$	$\xi_{TM\frac{3}{\Sigma}}$	$\xi_{纵坐标}$	$\xi_{横坐标}$	$\xi_{海拔}$	$\xi_{有林地}$	$\xi_{阴坡}$	$\xi_{阳坡}$	$\xi_{郁闭度}$
ξ_{TM1}	38.483	59.976	16.009	-27.998	-66.689	-29.239	-36.567	-15.332	-32.582
ξ_{TM2}	54.495	49.690	17.415	-19.117	-58.577	-30.726	-37.145	-12.523	-35.573
ξ_{TM3}	45.140	69.229	22.450	-12.679	-63.559	-42.187	-44.056	-15.291	-47.237
ξ_{TM4}	115.098	-57.542	-7.733	-1.303	3.942	8.865	-9.5315	10.644	7.093
ξ_{TM5}	89.511	9.194	5.507	-8.284	-42.926	-31.604	-40.808	-2.381	-38.174
ξ_{TM7}	63.731	39.501	14.285	-9.309	-54.976	-41.144	-43.577	-11.787	-46.991
$\xi_{TM\frac{4}{3}}$	67.952	-114.424	-29.150	8.116	66.056	45.273	38.032	16.923	50.782
$\xi_{TM\frac{4-3}{4+3}}$	64.665	-120.773	-29.764	8.763	68.341	52.878	38.013	21.815	56.478
$\xi_{TM\frac{7}{3}}$	93.917	-4.674	2.737	1.747	-33.547	-31.884	-39.247	0.929	-39.150
$\xi_{TM\frac{4 \times 3}{7}}$	7.3339	-53.2325	-13.8984	-6.8472	40.340	45.4077	37.787	2.476	53.566
$\xi_{TM\frac{4+5-2}{4+5+2}}$	129.000	-66.9935	-14.0181	5.6842	14.442	8.0838	-11.250	16.032	4.996
$\xi_{TM\frac{3}{\Sigma}}$	-66.9935	129.000	35.8853	-3.9795	-62.051	-42.7779	-32.213	-21.301	-45.389
$\xi_{纵坐标}$	-14.0181	35.8853	129.000	20.5324	7.0164	-6.1878	2.6941	-0.079	-5.652
$\xi_{横坐标}$	5.6842	-3.9795	20.5324	129.000	14.384	-13.2007	-11.586	19.528	-15.811
$\xi_{海拔}$	14.4421	-62.0511	7.0164	14.384	129.000	64.9399	55.767	53.946	61.114
$\xi_{有林地}$	8.0838	-42.7779	-6.1878	-13.2007	64.940	129.000	33.415	40.4326	117.960
$\xi_{阴坡}$	-11.2501	-32.2134	2.6941	-11.5858	55.767	33.4152	129.000	-72.6833	42.690
$\xi_{阳坡}$	16.0322	-21.3013	-0.0799	19.5282	53.946	40.4326	-72.683	129.000	26.169
$\xi_{郁闭度}$	4.9962	-45.3895	-5.6515	-15.8108	61.114	117.960	42.690	26.169	129.000

表 4 蓄积估测各参选因子的特征根

Table 4 The eigen root of each argument influencing the estimation of forest stock

参选因子	特征根	参选因子	特征根	参选因子	特征根
ξ_{TM1}	1.3173	$\xi_{TM\frac{4-3}{4+3}}$	5.5423	$\xi_{海拔}$	154.4520
ξ_{TM2}	1.6431	$\xi_{TM\frac{7}{3}}$	10.2413	$\xi_{有林地}$	214.5628
ξ_{TM3}	2.0552	$\xi_{TM\frac{4 \times 3}{7}}$	12.3904	$\xi_{阴坡}$	215.5771
ξ_{TM4}	0.1366	$\xi_{TM\frac{4+5-2}{4+5+2}}$	18.3510	$\xi_{阳坡}$	574.3378
ξ_{TM5}	0.3387	$\xi_{TM\frac{3}{2}}$	64.3139	$\xi_{郁闭度}$	962.8094
ξ_{TM7}	2.7813	$\xi_{纵坐标}$	87.3878		
$\xi_{TM\frac{4}{3}}$	4.7293	$\xi_{横坐标}$	118.0324		

表 5 蓄积估测各特征根对应的特征向量

Table 5 The eigenvector corresponding to all eigen roots for forest stock

ξ_{TM1}	ξ_{TM2}	ξ_{TM3}	ξ_{TM4}	ξ_{TM5}	ξ_{TM7}	$\xi_{TM\frac{4}{3}}$	$\xi_{TM\frac{4-3}{4+3}}$	$\xi_{TM\frac{7}{3}}$
0.2000	-0.0601	-0.1195	0.0655	0.1083	0.4586	0.1558	0.3188	0.1251
-0.4242	0.0421	-0.2249	0.1382	-0.1469	-0.5705	0.2361	-0.2312	-0.0255
0.1914	0.1739	0.2514	-0.7616	0.0400	-0.1752	0.1150	0.0871	0.0448
0.4523	-0.2059	0.0686	0.0890	-0.3035	0.1061	-0.1611	-0.5633	-0.1257
-0.0581	-0.5678	0.1439	0.0895	0.5346	-0.1424	-0.2492	0.1071	-0.0541
0.1899	0.4878	0.2544	0.4513	-0.1623	0.0273	0.0637	0.1589	0.0602
-0.3705	0.0262	0.5637	0.0355	0.1741	0.2176	0.4572	-0.1147	0.1061
0.3332	0.4286	-0.283	0.0147	0.5578	-0.2692	0.0430	-0.0285	-0.0454
-0.3760	0.2144	-0.3778	-0.2449	0.0677	0.4665	-0.0943	-0.2931	-0.0387
-0.1989	0.0630	-0.2536	-0.0602	-0.0508	0.1634	-0.2132	0.2230	-0.0321
-0.1291	-0.0275	-0.0941	0.1366	-0.2084	-0.1102	-0.1261	0.4912	0.0549
-0.0488	0.1399	-0.0035	0.3036	0.4095	0.1338	-0.0124	-0.2468	-0.0362
-0.0203	0.0014	0.0174	-0.0030	0.0021	0.0038	-0.0049	0.0338	-0.0158
0.0096	-0.0201	-0.0157	-0.0017	-0.0060	0.0038	0.0212	0.0411	0.0180
0.1359	-0.1744	-0.2449	0.0196	-0.0128	0.0394	0.3355	0.0065	0.1124
-0.0103	-0.0181	0.0374	-0.0060	-0.0165	0.0536	0.1733	0.0939	-0.6764
-0.1199	0.1779	0.2262	-0.0158	0.0127	-0.0146	-0.4468	-0.0215	-0.1014
-0.1328	0.2076	0.234	-0.0193	0.0166	-0.0174	-0.4199	-0.0186	-0.0192
-0.0011	-0.0323	-0.0156	-0.0015	0.0113	-0.0461	-0.1198	-0.1381	0.6766

(续表 5)

$\zeta_{TM_{\frac{4 \times 3}{7}}}$	$\zeta_{TM_{\frac{4+5-2}{4+5+2}}}$	$\zeta_{TM_{\frac{3}{\Sigma}}}$	$\zeta_{\text{纵坐标}}$	$\zeta_{\text{横坐标}}$	$\zeta_{\text{海拔}}$	$\zeta_{\text{有林地}}$	$\zeta_{\text{阴坡}}$	$\zeta_{\text{阳坡}}$	$\zeta_{\text{郁闭度}}$
-0.3839	-0.4749	0.0985	-0.0528	0.1237	-0.0585	0.1058	0.2176	0.0669	-0.3273
-0.1172	-0.2675	0.1485	-0.0506	0.1477	0.0027	0.0792	0.1695	0.128	-0.3295
0.0252	0.205	0.1705	-0.06	0.103	0.0404	0.0831	0.1218	0.0591	-0.3491
-0.1167	0.0707	0.0425	-0.0087	0.2301	0.0229	-0.0684	0.0197	0.4329	-0.1073
0.3163	-0.0425	0.0103	0.0058	-0.0736	0.0254	0.0087	0.0027	0.244	-0.3085
0.4946	0.0049	0.0302	-0.0166	-0.1079	0.0505	0.0407	0.0399	0.1316	-0.3421
-0.0895	0.0015	-0.0025	0.0417	0.1427	-0.0001	-0.1625	-0.0455	0.3546	0.2182
-0.1028	-0.1027	-0.1283	0.043	0.0407	-0.0083	-0.1292	-0.0698	0.3431	0.2369
0.1409	0.0501	-0.1379	0.0237	-0.3053	0.0752	-0.0117	-0.1021	0.2453	-0.2829
0.3672	0.0641	0.2478	-0.0626	0.6606	-0.0865	-0.0861	0.1833	0.1643	0.2167
-0.4084	0.4973	-0.0708	0.0176	-0.0952	0.0557	-0.0605	-0.0905	0.431	-0.1005
-0.2373	0.5279	0.237	-0.1119	0.1965	0.0406	0.1523	0.1236	-0.3398	-0.2001
-0.0024	-0.0277	-0.4137	0.4545	0.3285	0.675	0.2081	0.0502	-0.0822	-0.0566
0.0006	-0.1143	0.0707	-0.719	0.0869	0.514	-0.0005	-0.4348	-0.0046	0.0283
0.147	0.1039	0.6045	0.2702	-0.2603	0.2965	0.2514	-0.0222	0.146	0.2286
0.0357	0.0539	-0.1879	-0.2538	-0.1104	-0.0482	0.488	0.2951	0.1473	0.1824
-0.1777	-0.1832	0.284	-0.0324	-0.2786	0.3678	-0.2549	0.49	0.0258	0.1623
-0.1607	-0.2133	0.2367	0.188	0.0742	-0.1628	0.5559	-0.4368	0.096	0.0522
0.0576	0.0657	-0.2544	-0.269	-0.0667	-0.0375	0.416	0.3502	0.1407	0.1983

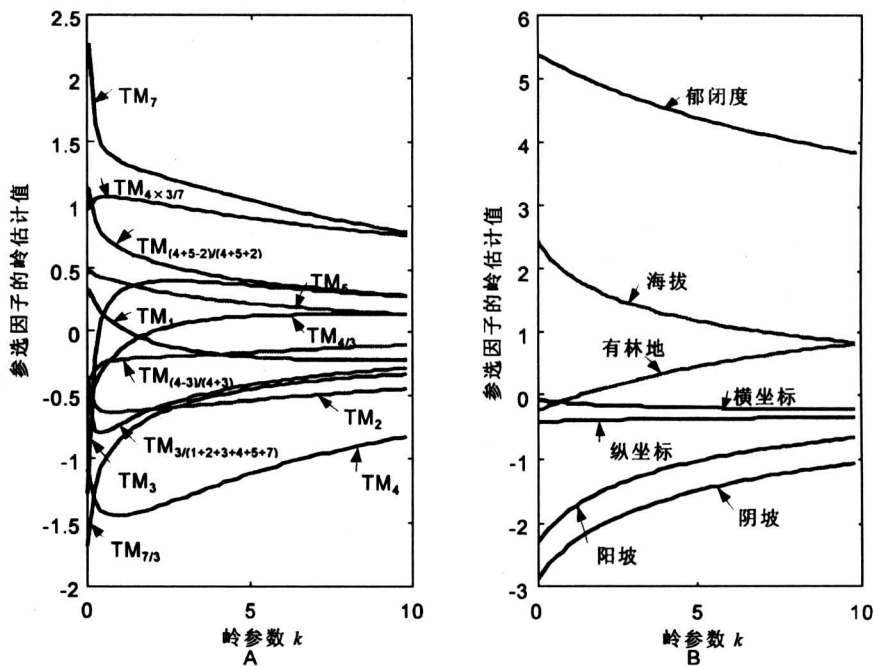


图 2 1/4 遥感区域蓄积估测参选因子岭迹

Fig.2 The ridge trace of all arguments influencing stock estimation of one-fourth RS region

3) 根据方阵 $X^T X$ 的特征根, 借助接近于 0 的特征根, 分析所设置的影响蓄积估测的变量间可能存在的近似线性关系。由近似线性关系, 结合近似线性关系中所含变量的岭迹, 去掉一个或多个具有不稳定岭回归系数的自变量。除去掉岭回归系数很小的自变量外, 一般有多少个近似线性关系, 就应去掉多少个自变量。

为便于比较仍用此例, 用平均残差平方和准则分析变量选择情况。

3.2.3 平均残差平方和法 分析了不包括 1 个变量的所有可能的组合, 不同变量个数 q 对应的子集数 τ , 每一变量数对应的主要因子子集的平均残差平方和及复相关系数如表 6。

表 6 1/4TM 遥感图像蓄积估测不同 q 值对应的主要因子子集及相应的 R_q

Table 6 The main variable subset and R_q of different q in one-fourth TM RS region

q	不同 q 值对应的最优自变量编号	R_q	τ	复相关系数
2	1, 20	12.1033	190	0.8276
3	1, 14, 20	11.9867	1140	0.8329
4	1, 2, 18, 20	11.8644	4845	0.8343
5	1, 17, 18, 19, 20	11.2257	15504	0.8306
6	1, 14, 17, 18, 19, 20	11.0382	38760	0.8338
7	1, 10, 14, 17, 18, 19, 20	10.9585	77520	0.8354
8	1, 6, 10, 14, 17, 18, 19, 20	10.9227	125970	0.8355
9	1, 5, 6, 11, 14, 17, 18, 19, 20	10.8530	167960	0.8389
10	1, 4, 5, 11, 13, 14, 17, 18, 19, 20	10.8358	184756	0.8435
11	1, 3, 4, 5, 11, 13, 14, 17, 18, 19, 20	10.8787	167960	0.8497
12	1, 5, 7, 10, 11, 12, 13, 14, 17, 18, 19, 20	10.9508	125970	0.8488
13	1, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 17, 18, 19, 20	11.0320	77520	0.8490
14	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 20	11.1191	38760	0.8455
15	1, 3, 4, 6, 7, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20	11.2073	15504	0.8598
16	1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 14, 16, 17, 18, 19, 20	11.3009	4845	0.8592
17	1, 2, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20	11.3967	1140	0.8593
18	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20	11.4960	190	0.8593
19	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20	11.5996	20	0.8593
20	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20	11.7048	1	0.8594

从表 6 可看出, 当 $q=10$ 时, 对应的主要因子子集的平均残差平方和最小。因此影响蓄积估测的主要遥感和 GIS 信息为:

ξ_{TM3} 、 ξ_{TM4} 、 $\xi_{TM\frac{4 \times 3}{7}}$ 、 $\xi_{TM\frac{3}{2}}$ 、 $\xi_{\text{纵坐标}}$ 、 $\xi_{\text{海拔}}$ 、 $\xi_{\text{阴坡}}$ 、 $\xi_{\text{阳坡}}$ 及 $\xi_{\text{郁闭度}}$ 。

与岭迹分析结果相比, 绝大部分信息相同, 但有一定的偏差。从岭迹图上分析, 纵坐标对蓄积估测影响很小, 平均残差平方和准则所得结果却包含此因子, 有些不合理。因此在实际工作中, 原则上

应采用岭迹分析进行变量选择, 平均残差平方和准则可作为参考。

3.3 预报实例

据上述方法得到, (当岭参数 $k=1.20$) LS 估计及岭估计的蓄积估测方程为:

$$\begin{aligned} \tilde{V} = & 4.8863 + 0.1176\xi_{TM3} - 1.9029\xi_{TM4} + \\ & 0.9873\xi_{TM5} - 0.7077\xi_{TM7} + 2.610\xi_{TM\frac{7}{3}} + \\ & 1.3822\xi_{TM\frac{4 \times 3}{7}} - 0.6851\xi_{TM\frac{4+5-2}{4+5+2}} \end{aligned}$$

$$0.7021\xi_{\text{海拔}} + 0.2894\xi_{\text{有林地}} - 0.4323\xi_{\text{阴坡}} + 5.1769\xi_{\text{郁闭度}}, \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \hat{V} = & 4.8863 - 0.4944\xi_{\text{TM3}} - 0.8620\xi_{\text{TM4}} + \\ & 0.4219\xi_{\text{TM5}} + 0.7016\xi_{\text{TM7}} + 0.9311\xi_{\text{TM}_3^7} + \\ & 0.5696\xi_{\text{TM}^{\frac{4 \times 3}{7}}} - 0.5163\xi_{\text{TM}^{\frac{4+5-2}{4+5+2}}} + \\ & 0.5485\xi_{\text{海拔}} + 0.9975\xi_{\text{有林地}} - 0.4414\xi_{\text{阴坡}} + \\ & 4.3509\xi_{\text{郁闭度}}. \quad (10) \end{aligned}$$

LS估计对其余86个样地总蓄积预报偏差相对误差为7.79%，各样地蓄积预报偏差中误差4.731 m³。岭估计对其余86个样地总蓄积预报偏差相对误差为4.26%，各样地蓄积预报偏差中误差为4.668 m³。岭估计对每一样地的预报基本都优于LS估计。在进行蓄积预报时，被预报样地的郁闭度不是实测值，而是通过郁闭度估测方程预报的值，即先预报郁闭度，再预报蓄积。

4 结论与展望

4.1 结论

1) 岭估计可以克服LS估计的缺点，准确选择出本区的遥感估测森林资源的最优方程。随本研究推出的软件保证了它的快速实现。研究表明：卫星遥感数据是估测森林蓄积量的基本因子。卫星影像可作为森林资源调查的基本数据源和工作草图。本研究排除了在卫星数据上难以确定的因子作估计方程式中的自变量。使卫星数据用于估测森林蓄积量和郁闭度变得易操作。

2) 在GPS的支持下，经过坐标系转换（已提供程序）可将地面样地与卫星影像的相应位置很好配准（误差1个像元）。在GIS、DEM的参与下解决了公里网交叉点以及任一点位的卫星影像灰度值的读取问题（有程序），为资源估计的自动化提供了依据。

3) 稳健估计克服了“异常值”的影响，同时研究表明可以节省1/3地面工作。探讨了郁闭度与蓄积量之间的关系。

4) 用分形的理念改善了计算机分类以及对低分辨率卫星影像分类的校正，为宏观（地区乃至全球）的森林监测提供了支持。

5) 通过神经网络方法的引入，研究了估测精度落实到地段的可能性。结果表明，用一类调查样地可以给出每200 hm²的估计精度，对特殊需要小班，能布（补）设到6个样地（随机），就可以给出其估计精度。

4.2 展望

1) 经过20多年的研究积累以及近年的深入研究，解决了遥感数据估计森林资源的一系列关键问题。为改进森林资源调查体系、吸纳新技术提供了有力的保障。森林资源调查体系的改革将迅速到来。为此本研究提出了森林资源遥感调查的建议规程蓝本，为改革实施给出了具体的参照。

2) 遥感技术诞生20多年来，它以现势性好，信息丰富，调绘、转绘方便易行，节约大量野外和内业工作，受到林业工作者的欢迎。随着遥感技术应用于林业资源调查研究工作的进展，相信它在不久的将来将会在调查中发挥主导作用。

参考文献

- [1] 赵宪文, 李崇贵. 基于‘3S’的森林资源定量估测[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001
- [2] 陈希孺, 王松桂. 近代回归分析[M]. 合肥: 安徽教育出版社, 1987
- [3] 唐守正. 多元统计分析方法[M]. 北京: 中国林业出版社, 1989
- [4] 赵宪文. 林业遥感定量估测[M]. 北京: 中国林业出版社, 1997

Important Progress in Estimating Forest Resources

Zhao Xianwen, Li Chonggui, Si Lin, Tian Yonglin, Yuan Kaixian

(Chinese Academy of Forestry, Beijing, 100091 China)

[Abstract] Traditional forest resources inventory is a hard mission, which needs much time, work and money. At the end of 1970s, remote sensing technology was introduced into China and has been used since then in the activities of forest resource inventory, especially in estimating forest stock volume. they include: Estimating volume stock of forest using quantitative value and qualitative factors of satellite data; Application of above-men-

(cont. on p. 28)

四维地震”^①等新技术将使物探方法向纵深发展,使其能够在地下储层描述,及油田开采方面提供重要信息、帮助我们吧油田开发好,从而提高最终油气采收率,这将产生重大的经济效益。

参考文献

- [1] 邱中建, 龚再生主编. 中国油气勘探[M]. 石油工业出版社. 地质出版社, 1999

Geophysical Prospecting Technology Drastically Propelled Chinese Petroleum Industry Forward

Li Qingzhong

(Bureau of Geophysical Prospecting, Hebei Zhuozhou 072751, China)

[Abstract] Geophysical prospecting technique is now the main approach to explore oil and gas fields. In China, oil fields such as Karamai, Daqing, Shengli and Liaohe were all found by geophysical method. Especially 3-D seismic survey played a great role in oil exploration.

[Key words] geophysical prospecting; oil field; 3-D seismic survey

(cont. from p. 24)

tioned techniques in different climate zones in China (The method has been spreaded over 7 million hectares in China); Estimating forestland, including area of fragments woodland and index of forest network etc. Through careful analysis of precision against costs, it is indicated that remote sensing method can save 1/3 to 1/2 budget in comparison with the traditional method.

In recent years, based on the previous study and by using modern statistic measure, new exploration and deeper study were done. These studies have solved some key problems in application of remote sensing in forestry resource inventory, such as calibrating remote sensing image against sampling plots on the ground, decreasing field work, increasing accuracy of stock volume on compartment, fast selecting optimal function, and avoiding factors that are hard to be determined by remote sensing data (such as age group, crown canopy, etc.). Both theoretical and practical applications have confirmed that remote sensing information play a leading role in estimating forest stock volume.

These discussed studies have made a good basis for the application of remote sensing in forest inventory, and given strong support for establishing a new system of forest inventory, which use remote sensing technology as primary measure.

At the end of this paper, a frame of new system of forest resource inventory is put forward, and suggestion on key problem in the new system is discussed.

[Key words] inventory by remote sensing; non-parameter estimation; forest stock volume; modern statistics

① Jack I. Time-lapse seismic in reservoir management. 1998 Distinguished Instructor Short Course—Society of Exploration Geophysicists