

土地覆盖变化遥感检测方法

李月臣^{1,2}, 杨 华^{2,3}, 刘春霞², 赵纯勇²

(1. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京师范大学资源学院, 北京 100875;

2 重庆师范大学地理科学学院, 重庆 400047; 3 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045)

摘 要: 土地覆盖变化对促进全球变化研究具有十分重要的意义。遥感技术是土地覆盖变化研究最有力的技术手段。各国学者发展了众多的变化检测方法, 研究表明每种方法都具有优势与不足。实际研究中通常同时比较几种检测方法, 选择其中最优的进行特定目的研究。在总结前人研究的基础上, 对变化检测研究中的遥感数据预处理、主要变化检测方法、变化检测阈值确定、变化类型分析以及检测精度检验等内容进行了系统的阐述, 以期对土地覆盖变化研究能够起到积极作用。

关键词: 土地覆盖; 变化检测; 遥感

中图分类号: Q 149; TP79

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2006)01-0209-08

Methods of Land-cover Change Detection Based on Remote Sensing Technology

LI Yue-chen^{1,2}, YANG Hua^{2,3}, LI Chun-xia², ZHAO Chun-yong²

(1. College of Resources Science & Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2 College of Geography Science, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China;

3 Faculty of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: Land-cover change detection is extremely important for researching global change. Remote sensing is primary technology used for change detection. In recent decades, many change detection methods have been developed. Previous researches have shown that each method has its own merits. In practice, different algorithms are often compared to find the best change detection results for a specific application and it involves many factors. The purpose of the review paper, which comprehensive exploration of all the major contents in the land-cover change detection based on remote sensing technology such as data pre-processing, major change detection methods, threshold problem, change type determining and accuracy assessment, is to promote the research of land-cover change detection.

Key words: land-cover; change detection; remote sensing

随着全球变化研究的深入, 人们越来越认识到作为人类社会和自然界交互作用界面的土地覆盖具有重要的社会经济意义和生态环境价值, 它对全球能量平衡、生物地球化学循环、水循环、气候变化等产生着最直接的影响^[1,2]。其动态监测一直是国内外研究的热点。由于遥感信息的周期性和连续性, 动态监测一直是其最主要的应用领域。因此, 遥感技术成为土地覆盖变化研究最有力的技术手段。

最近 20 年来, 各国学者相继发展了许多基于遥感技术的变化检测方法^[3,4,5]。而且随着土地覆盖变化的复杂性以及遥感数据多样性的增加, 新的变化检测方法不断涌现^[5]。主要可以分为两类^[4]: 一类是基于双时相(Bi-temporal)遥感数据的变化检测方法; 另一类是基于遥感数据时间序列曲线(Temporal trajectory or Time profile)的变化检测方法。由于土地覆盖变化受到空间、时间、光谱以及被识别的专题特征等多种复杂因素的影响, 许多研究都表明, 任何变化检测方法都有其优势与不足, 没有一种方法最优并适合于所有情

况^[6]。即使在相同的环境下, 不同的方法得到的检测结果也各不相同, 甚至出现争议性的结论。因此, 总结前人的研究成果, 对土地覆盖变化遥感检测方法进行有效的归纳, 有助于更好的理解各种变化检测方法的适用性, 促进土地覆盖变化研究不断发展。基于上述分析, 本文从数据预处理、主要变化检测方法总结、检测阈值确定方法介绍、变化类型分析以及检测精度检验等完整的体系对土地覆盖变化遥感检测方法进行了系统的阐述。

1 数据预处理

遥感数据质量是影响土地覆盖变化检测精度的重要因素。数据本身固有的噪音严重影响变化检测能力, 甚至产生虚假变化信息。因此, 变化检测必须充分考虑遥感数据的时间、空间、光谱和辐射特征以及大气条件、土壤湿度等重要的环境要素。在遥感数据处理过程中, 有两个过程尤为重要^[5]。一是遥感影像的几何校正和配准。一般要求几何校正误差控

收稿日期: 2005-03-31

基金项目: 中国科学院杰出海外学者基金(2001- 1- 13)

作者简介: 李月臣(1974-), 男, 山东德州人, 博士生, 主要在北京师范大学资源学院和重庆市GIS应用研究重点实验室从事资源环境遥感与GIS研究。

制在 0.5 个像元内, 空间分辨率高于 5 m 的要求误差小于等于 0.2 个像元。影像间配准要求误差小于 0.5 个像元, 影像与地图间配准精度要求为 0.5~0.75 mm, 否则将会产生大量伪变化信息影响检测结果^[7]。二是遥感影像的大气与辐射纠正。目前, 已经发展了许多方法如相对辐射定标、6S 等进行大气和辐射校正^[8~10]。变化检测中, 一般只需要进行相对辐射校正, 即把目标图像的辐射属性调整到与参考图像一致, 而不必进行绝对校正。Collins 等^[11]对三种不同程度的辐射校正(无辐射校正、相对辐射校正、绝对辐射校正)进行了比较研究, 结果表明, 与绝对辐射校正相比相对辐射校正精度与之相当且更容易应用。

基于时间序列曲线的变化检测方法, 主要是通过比较各种变化检测指标的年际曲线或生长期曲线的差异获取变化信息。^[12]研究表明植被指数能够更为敏感的反映土地覆盖的变化特征信息。因此, 除了上述数据处理外, 建立高质量 NDVI 时间序列数据成为该方法成功应用的一个关键问题。目前, 最为常用的是最大值合成法(MVC)^[13]。MVC 方法在一定程度上能够克服云覆盖等引起的误差。但是这种方法如果合成时间间隔过长, 会忽略一些重要的变化, 而且无法克服 NDVI 数值偏高的误差。针对 MVC 方法的不足, Viovy 等^[14]提出了 BISE (Best Index Slope Extraction) 方法。BISE 方法能够同时有效抑制 NDVI 偏高以及云覆盖引起的 NDVI 偏低的误差。但是该方法对 sliding period 和阈值十分敏感。二者的确定主要根据主观判断, 对研究者的经验依赖较强。此外, 一些学者利用傅立叶变换建立高质量 NDVI 时间序列数据集^[15]。但傅立叶变换对于不规则或非对称性 NDVI 数据序列则明显不足。Chen 等^[16]提出了一种基于 Savitzky-Golay 滤波方法重建 NDVI 时间序列数据。该方法首先对明显的云覆盖点进行线性内差, 根据 NDVI 时间序列曲线的平均趋势确定各点权重, 利用 Savitzky-Golay 滤波方法进行迭代运算, 最终建立起高质量 NDVI 时间序列数据集。该方法简单易行, 大多商业软件都包含该滤波函数, 且研究结果优于 BISE 方法和傅立叶变换, 是一种有效的时间序列数据处理方法。

2 土地覆盖变化遥感检测方法

2.1 基于双时相遥感数据的变化检测方法

2.1.1 基于图像代数运算的检测方法

这类方法主要包括单变量图像差值法、图像回归法、图像比值法、背景相减法 and 变化矢量分析法(CVA)。在应用过程中适宜的波段或植被指数的选取以及合理阈值的确定对检测结果产生着重要影响。

(1) 单变量图像差值法。单变量图像差值法是最为常用的一种变化检测方法, 其基本原理是将精确校正后的两个时相的遥感影像数据或转换图像进行逐像元相减得到一幅差异图像^[3]。理论上, 差异图像中像元值接近 0 的认为是非变化区域, 而大于或小于 0 的像元认为是变化区域。Miller 等^[17]利用 Landsat 图像差值法成功的对泰国北部的热带森林变化进行了研究; Hame^[18]和 Fung^[19]通过比较分析 TM 数据各个波段发现, 两个时相的 TM 3 差值包含最丰富的植被覆盖变化信息; Ingram 等^[20]在进行图像差值前加入了一个标准化过程, 在一定程度上提高了检测精度; 此后 Yasuoka^[21], Coppin 等^[22]也分别提出不同的标准化方法对图像差值法进行了改进。

图像差值法相对简单、直接, 结果也容易解释。但是由于混合像元以及校正误差的存在会对检测精度造成影响。此

外, 由于两组不同的绝对数值能产生相同的差值, 这也使得差值法有时无法适当处理变化探测中所涉及到的所有因素^[3~5, 23]。

(2) 图像回归法。图像回归法首先假定 t_1 时相的像元值是 t_2 时相像元值的一个线性函数, 通过最小二乘法来进行回归, 然后用回归方程计算出的预测值减去 t_1 时相的原始像元值, 从而获得两时相的回归残差图像^[3]。Burns 等^[24]用三次线性回归方程分别对两个时相 MSS 数据对应波段进行回归分析来进行土地覆盖变化研究, 结果表明绿光波段(MSS4)较其他几个波段能更好的反映土地覆盖变化特征, 但是精度仍较低; Singh^[25]的研究表明基于 MSS5 的图像回归方法在热带森林地区的覆盖变化研究中能够达到最大检测精度。

回归法能够很好的体现不同时相遥感影像像元均值和方差的差异, 此外, 经过回归处理后的遥感数据在一定程度上类似于进行了相对辐射校正, 因而能减弱多时相数据中由于大气条件和太阳高度角的不同所带来的不利影响^[5, 23]。其关键问题是如何确定回归方程的维数和合理的变化阈值。

(3) 图像比值法。比值处理是辨识变化区域相对较快的方法^[4]。它是将多时相遥感影像按波段进行逐像元相除。经过辐射校正后, 影像中未发生变化的像元其比值应近似为 1, 变化像元的比值将明显高于或低于 1。Howarth 等^[26]研究发现 MSS5 比值图像对反映水体变化比较敏感, 而 MSS7 比值图像则能很好的反映植被覆盖变化。Stow 等^[27]研究结果表明多时相、多传感器图像比值法是一种有效的土地覆盖变化检测方法, 其变化检测精度要高于主成分分析法(PCA)。比值法的理论假设是比值图像呈正态分布, 但该假设并不总是满足, 使得以均值和标准偏差作为指标划分变化、未变化像元时, 会在均值的两端分割出面积不相等的区域, 因此造成两端不相等的错误概率^[23]。Riordan^[28]指出比值法中如果比值图像直方图呈非正态分布, 采用以标准差为基础的经验阈值实际是一种病态统计。因此, 如何确定位于均值两侧的变化阈值成为比值法最为关键的问题。

(4) 背景相减法。在变化探测分析时, 背景相减法把非变化区作为背景。从原始图像中减去背景图像得到差异图像进行变化检测分析^[3]。一般在做减法前要对影像做相对辐射校正处理, 该方法原理简单, 但是由于其检测精度较低, 因此实际应用较少^[5]。

(5) 变化向量分析法。变化向量分析是描述从时相 1 到时相 2 光谱向量变化的方向和大小变化检测方法。当一种地物随时间变化时其光谱空间向量也随之发生变化, 当光谱变化信息大于背景信息阈值时, 则表明发生了变化。变化向量 ΔG 包含了两幅图像中所有变化信息, 变化强度由变化向量的模 $|\Delta G|$ 决定。 $|\Delta G|$ 越大, 表明图像的差异越大, 变化发生的可能性越大。因此, 检举变化和非变化像元, 可根据变化强度的大小, 设定阈值来实现。向量的指向由一系列的角度定义。它表示某点土地覆盖向另一特定类型的转变^[16]。

20 世纪 70 年代末美国密歇根环境研究所首次应用 CVA 方法研究了空间景观的变化特征^[4]。此后, CVA 方法成功的应用于多次土地覆盖变化检测中。Michalek 等^[29]基于 TM 数据应用 CVA 方法对多米尼加共和国海岸红树林生态系统动态变化进行了研究; Lambin 等^[30]将上述应用于多光谱空间的变化向量分析技术扩展到多时相空间中, 他们通过对具有高时间频率的 AVHRR 数据的时间发展曲线进行年度间对比, 探查了 1987 年 7 月至 1989 年 6 月间西非的土地覆盖变化过程。由于利用了丰富的季节信息, 多时相变

化矢量分析能够更加敏感地探测出来自植被物候、初级生产力以及生态系统动力学方面的细微变化。

CVA 方法使用欧氏距离度量变化强度, 所以各种不同时间传感器、植被物候、大气条件和土壤水分等差异导致的“干扰噪声”信息也常常同时被探测到^[16]。CVA 能够应用较多甚至所有的波段信息, 避免了其他方法因波段选择不当而导致的误差。它不仅能够提供土地覆盖变化的位置信息, 而且还可以提供变化像元的类型信息。因此, 被认为是一种非常具有潜力的分析方法, 正越来越受到人们的重视。

2.1.2 基于数理转换的检测方法

转换法主要包括主成分分析(PCA)、缨帽变换(KT)、GS 变换、Chi 平方变换等。其中, PCA 和 KT 在土地覆盖变化检测中应用较广, GS 变换和 Chi 平方变换由于比较复杂, 在绝大多数商业遥感图像处理软件中无法实现, 实际中应用较少。

(1) 主成分分析法。主成分分析是一种对多维特征空间数据进行压缩与综合的多元数理统计方法。应用在遥感监测特征选取中, 主要是在尽可能不损失原始多波段土地覆盖遥感监测信息的状况下, 剔除多余波段特征, 选择有效特征成分参与变化检测。主成分变换实质是对多波段数字图像实施特定的线性 K-L 变换处理, 将多波段遥感数据信息影射到主成分空间。其几何意义是把原始特征空间的特征轴旋转到平行于混合集群结构轴的方向上, 获得新的特征轴。新的特征轴具有对原始数据压缩及提取变化信息更有效的作用。原始光谱特征向量通过正交变换可以得到同维新特征向量。在所获得的主分量中, 主要组分往往代表影像数据中并非由土地覆盖变化导致的差异, 称为稳定组分; 次要组分一般能增强两景影像间的光谱对比度, 称为变化组分^[23]。在变化探测研究中, 多时相遥感数据的主成分有时是作为图像差值法或回归法的输入参数^[31], 即每个时相的数据先独立作主成分分析后再进行差值或回归分析, 求出变化信息。

也可以先将多时相数据强制性地组合成单一的遥感数据组, 再对该数据组进行主成分分析^[19]。Fung 等^[19]利用图像差值法、PCA 和 KT 变换进行土地覆盖变化研究, 发现近红外波段和绿光波段能够检测作物类型变化以及植被和非植被的变化特征; Guirguis 等^[32]对标准 PCA 法、非标准 PCA 法、图像差值和比值法进行了比较, 发现标准 PCA 能够更好的揭示土地覆盖变化信息。其他的相关研究也得出了相同的结论^[33, 34]。PCA 的优点是能够分离信息、减少相关、突出不同的地物目标; 另外, 它对辐射差异具有自动校正的功能, 因此无须再做辐射归一化处理。不足之处在于其是基于纯粹的统计关系, 产生的分量的物理意义不明确, 应用于不同的状况时各分量的物理意义不尽相同, 且变化信息提取比较复杂, 主成分数量的确定主要依据经验判断, 没有明确的方法。因此, 当研究者对研究区情况不熟悉时, PCA 方法不适宜用来进行土地覆盖变化检测。

(2) 缨帽变换。缨帽变换的原理与主成分分析相似, 区别在于旋转之后的坐标轴并不指向主成分分量, 而是指向其他方向, 这个方向与植物生长和土壤有着密切关系。KT 变换较 PCA 的一个优点在于 KT 变换系数相对独立于图像场景, 变化检测主要利用三个分量即亮度、绿度和湿度。Fung^[19]的研究给不同时相的光谱波段分别赋予符号相反的缨帽系数, 然后再经过 G-S 过程将派生出的矢量正交化, 从而生成三个变化图像: 亮度变化(ΔB)、绿度变化(ΔG)和湿度变化(ΔW); Ridd 等^[35]运用了另一种缨帽变化探测方法, 首先采用 Crist 和 Cicone^[36]提出的变换系数分别求出每个时相的亮度、绿度和湿度图像, 然后再相减生成相应 ΔB 、

ΔG 和 ΔW 的变化图像。

2.1.3 基于分类的检测方法

基于分类的变化检测方法是基于图像分类的基础上进行的。这些方法的优点是能够提供详细的土地覆盖变化方向信息, 并且能够降低多时相遥感数据间大气条件和环境差异的影响。但是, 对分类训练样本的数量和质量要求较高。因此, 在实际应用中这类方法往往由于耗费大量时间且缺乏高质量训练样本数据而无法获取满意的变化检测效果^[5]。分类后比较法是这类方法中最为常见的, 也是目前土地覆盖变化检测中广泛应用的方法之一, 此外, 近几年随着人工神经网络(ANN)技术应用领域的不断扩大, 其在土地覆盖变化检测中的应用逐渐引起人们的注意。

(1) 分类后比较法。分类后比较法是最直接的动态监测方法, 主要是通过比较两个时相的图像单独分类结果, 获得变化信息。分类后比较法最成功的应用是 Hall 等^[37]的研究。研究中他们使用 PIF(pseudo-invariant-feature-based)方法对 1973 年和 1983 年的遥感影像进行辐射校正, 然后利用 1983 年的地面数据对分类器进行训练后, 分别对两个时相的遥感影像进行分类, 并在此基础上计算了各种覆盖类型的变化率。

分类后比较法有利于获得变化区域内部的子区域信息, 并有利于减少不同时相图像的大气辐射和传感器差异产生的误差; 通过选择合适的分类方法还可以克服地形因素引起的伪变化。但是, 该方法每一单独分类中的误差会在空间比较过程中被进一步放大, 夸大了变化区域; 同时, 由于对历史遥感影像进行分类存在较大难度, 严重影响了变化检测的精度。尽管分类后比较法存在精度方面的缺陷, 但由于其方法简单, 故目前仍被广泛应用^[23]。

(2) 人工神经网络。人工神经网络是由大量神经元相互连接组成的网络结构, 其信息处理是由神经元之间的相互作用来实现的。人工神经网络在遥感中主要是用于遥感影像的分类、专题信息提取等领域。在土地覆盖变化检测中输入的训练数据是变化区域的光谱特征, 利用后向传播算法训练神经网络, 最终输出变化区域。研究证明, 神经网络在土地覆盖变化检测中能够获得较高的检测精度, 特别是当分类数据明显偏离正态分布时, 其优势更为突出。Liu 等^[38]的研究结果表明 ANN 方法较分类后比较法检测精度可以提高 20%~30%。因此, 最近几年利用 ANN 进行土地覆盖变化检测的研究引起了人们的注意^[39]。ANN 是个灰箱系统, 隐含层的运算机制无法获知, 对训练数据的数量和质量要求较高, 需要较长的训练时间; 并且大多数图像处理软件中无法实现。

除了以上介绍的常用的土地覆盖变化遥感检测方法, 许多学者还发展了其他变化检测方法。主要包括基于空间相互关系的变化检测方法^[40]、基于知识的图像识别方法^[41]、植被指数、地表温度、空间结构综合法^[42]、普通线性模型^[43]、基于结构的检测方法^[44]等。这些方法一般针对特定检测情况, 普适性较差, 所以实际应用较少。以上介绍的变化检测方法, 有的仅能检测“change/no-change”信息, 如图像差值法、图像比值法、PCA 等; 有的既能检测“change/no-change”信息又能检测“from-to”变化信息, 如分类后比较法、CVA 等。目前, 土地覆盖变化遥感检测方法有几十种, 每种方法究竟最适用于何种特定的研究区或检测目的仍然没有明确的答案。变化检测方法的选取主要依赖分析者对检测方法的认知程度、遥感数据处理知识、使用的数据类型以及研究区的特点等因素。现有的检测方法中最为常用的有图像差值法、PCA、

CVA 和分类后比较法。在实际变化检测研究中,通常同时选取几种检测方法应用于同一地区,然后根据定性或定量的精度评价选取一个相对适宜的方法。以往的研究表明两种或多种方法相结合进行变化检测分析能够提高检测精度。Silapaswan 等^[45]应用 CVA、非监督分类以及人工判读方法进行土地覆盖变化研究时发现,与使用单一的检测方法相比,CVA 与非监督分类相结合具有更强的变化检测能力;Petit 等^[46]在研究赞比亚东南部地区的土地覆盖变化时综合使用了图像差值法和分类后比较法,认为这种混合方法比分类后比较法能够更好的检测土地覆盖变化信息。

2.2 基于高时间频率遥感影像时间序列曲线的土地覆盖变化检测方法

近些年,随着土地覆盖变化检测研究的深入,人们发现基于高时间频率遥感数据时间序列曲线的变化检测方法能够更敏感的检测出植被初级生产力、植被物候以及植被生态系统等的细微变化,对现有的基于高、中空间分辨率的土地覆盖变化检测方法是一种有效的补充^[4]。

基于时间序列曲线的变化检测方法主要是通过比较各种变化检测指标的年际曲线或生长期曲线的差异获取覆盖变化信息。数据源高时间频率的内在属性使这种方法不仅能检测土地覆盖变化,而且可以有效描述地表植被生态系统的物候变化。当变化检测指标曲线偏离正常值(根据不同的研究目标可以是均值或设定的最佳值)时,季节性变化或年际变化就被检测到^[42]。一些研究者先后开展了相关研究。Myneni 等^[47]、Plisnier 等^[48]用月植被指数减去时间序列平均植被指数,除以整个序列植被指数的标准差作为指标进行了土地覆盖变化研究;Andres 等^[49]应用傅立叶变换对 AVHRR 数据进行分析,研究了巴西亚马孙河地区的森林覆盖变化,结果表明该方法能够很好的检测森林的季节和季内变化。目前,标准主成分分析(SPCA)和CVA 方法是基于遥感数据时间序列曲线进行土地覆盖变化分析的最为常用的两种方法。

基于地区或洲际尺度遥感影像时间序列曲线的标准主成分分析方法在分析植被生产力变化、植被季节变化、传感器造成的误差以及各种气候事件引起的植被指数的变化等方面具有很强的优势。Eastman 等^[50]利用 SPCA 方法分析了非洲 1986~1988 36 个月 NDVI 时间序列数据发现,第一个主成分代表与季节无关的 NDVI 特征;第二、三、四主成分表征了季节因素引起的 NDVI 的变化;第五和第六主成分解释了传感器引起的 NDVI 的变异;第七、八主成分则揭示了厄尔尼诺和南方涛动等重大气候事件引起的 NDVI 的变动。结果表明 SPCA 是一个较为理想的分析时间序列数据变化特征的方法;Young 等^[51]基于 AVHRR/NDVI 时间序列数据,利用图像差值法和 SPCA 法分析了中国 1982~1992 年 11 年间的土地覆盖变化情况。第一主成分代表中国 11 年 NDVI 整体分布特征;二、三主成分代表空间校正、辐射定标等误差信息;第四主成分解释了 1982~1992 年的土地覆盖变化信息。Lambin 等^[30,42]对 CVA 方法进行了扩展,应用于基于时间序列遥感影像的变化检测分析中。在研究中 Lambin 等把 NDVI 以及其他合成指标的年内时间序列曲线看成一个多维空间,利用 CVA 方法计算两年 NDVI 等检测指标的时间序列曲线的变化向量。变化向量的模代表了土地覆盖变化的强度,变化向量的角度代表变化的方向。由于比传统方法(不同年份或季节只有一景孤立数据)利用了丰富得多的季节信息。因此,这种多时相变化矢量分析方法能够更加敏感地探测出来自植被物候、初级生产力以及生态系统

动力学方面的细微变化。

目前,提供高时间频率遥感数据的传感器主要有 NOAA/AVHRR、SPOT/VGT、MODIS、ASTER、SeaWiFS 等。这些传感器克服了高空间分辨率数据获取周期长,时间频率低的缺点,使得基于这些数据的土地覆盖变化检测更能快速有效检测大范围土地覆盖变化信息,并可以区分季相差异与其他变化信息。不足之处在于空间分辨率较低,限制了对变化类型的检测分析。

3 变化检测阈值确定方法

以上总结的变化检测方法,大多数的核心问题是如何确定一个合理的阈值来检举变化区域。阈值确定的是否科学决定着各种方法检测精度的高低。因此,变化和非变化像元之间的最优阈值确定被公认为是土地覆盖变化检测中的最关键和具有挑战性问题。目前,变化检测阈值确定方法主要可以分为两类:

3.1 经验阈值法

经验阈值法是一种人工交互式的阈值确定方法。研究者首先根据对研究区的先验知识选择一个经验阈值,然后根据检测精度不断调整取值直至满意为止。最常用的是 n 倍标准差法。这种方法首先假设研究区只有少量地方的覆盖类型发生了变化,并且差异图像呈正态分布,在此假设下,变化阈值可以根据下式确定:

$$T = mean \pm n\sigma \quad (1)$$

式中: T ——阈值; $mean$ ——差异图像的均值; n ——常数; σ ——差异图像的标准差。上式中关键问题是如何确定 n 的取值,许多学者试图确定一个具有普适性的 n 值,实际证明,随着研究区的差异以及研究对象和目的的不同, n 的取值皆有不同。Nelson^[52]在对森林覆盖变化的研究中发现 n 的最佳取值在 0.5~1; Ridd 等^[35]在研究盐湖城地区时发现变化检测精度最大时 n 的取值范围是 0.9~1.4。其他学者的相关研究中 n 的取值也不尽相同。人工交互式的经验阈值法存在着许多缺点,一方面这种方法严重依赖于研究者的经验知识,阈值的确定主观性比较强,降低了该方法的通用性;另一方面 trial- and- error 式的确定方法需要大量时间,大大增加了工作量。

3.2 自动、半自动阈值确定法

针对经验阈值确定方法的不足之处,许多学者对变化检测中自动或半自动阈值确定问题进行了研究。Chen 等^[16]提出了一种双窗口变步长阈值搜索法应用于 CVA 方法中,对北京市海淀区进行了土地覆盖变化检测,取得了满意的结果。该方法假设在包含不同变化类型的典型变化训练样区能够确定某一阈值,使变化的检测精度达到最大,该阈值在整幅图像上也能使检测精度达到最大。首先通过人机交互选择若干典型变化区为训练样区。在这些典型变化区外部通过 buffer 分析设置外边界,构成“双窗口”,以步长 $P_1 = (b - a) / n$ (n 为可任意设定的正整数, $[a, b]$ 为整景图像的变化强度范围)在 $[a, b]$ 范围内设定阈值分别为 $b - P_1, b - 2P_1, \dots$, 以各阈值为标准从训练样区变化强度图象中判定出变化象元和非变化象元;计算某一阈值 k 下的检验成功率 L_k 。如果搜寻出的检测成功率最大时对应的阈值为 k ,则在 $[k - P_1, k + P_1]$ 范围内,减小步长 (n 增大)开始下一次搜寻;当搜寻范围内的各阈值所对应的最大成功率与最小成功率之差小于某一给定常数 δ 即可得到变化检测的最佳阈值。

双窗口变步长阈值搜索法的优点在于: (1) 通过选择典型变化区来搜寻阈值,便于对阈值所对应的变化检验精度的

进行实时评价; (2) 双窗口的设计, 可防止阈值过小可能带来的过饱和现象发生; (3) 变步长搜寻可大大提高阈值搜寻效率。可以认为双窗口变步长阈值搜寻算法是一种实用、高效的阈值确定方法。但它对典型变化区的选择要求较高, 要求 (1) 尽可能包含各种变化类型; (2) 典型变化区内均为变化象元, 不含非变化象元; (3) 典型变化区最好为“岛状”, 即典型变化区被非变化象元所包围。实际研究中很难完全满足这些要求, 而且该方法一般适用于基于较高空间分辨率遥感影像的土地覆盖变化检测, 对低空间分辨率遥感影像应用困难。

Bruzzone 等^[53, 54]提出了基于贝叶斯理论的最小误差、最小成本的自动阈值确定方法。Bruzzone 等的研究假设差异图像的直方图为混合高斯分布。首先根据直方图中值确定出最可能变化 (S_c) 和最可能没有发生变化 (S_n) 的区域 (图 1)。利用 S_c 和 S_n 初始化混合高斯分布函数的参数, 通过 EM 算法估计出最佳参数, 利用最小错误率判别准则求出检测阈值。尽管自动阈值确定方法较为复杂, 但是能够克服传统人工交互式经验阈值法的缺点, 在一定程度上提高了变化检测的精度, 具有更高的适用性, 是目前变化检测阈值确定方法的重要研究方向。

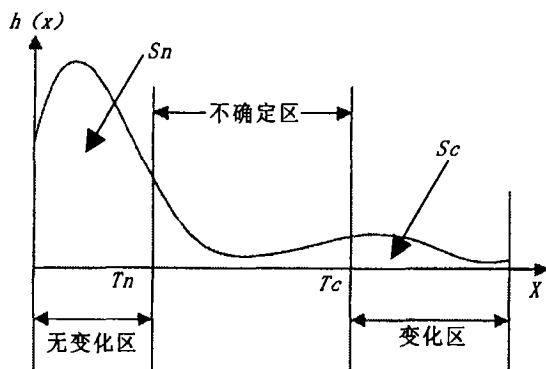


图 1 基于贝叶斯理论的自动阈值确定方法

4 变化类型确定方法

现有研究中对变化类型的判定基本上归纳为 3 种方法:

4.1 多维向量空间的三角函数法

Chen 等^[16]参考图像分类, 结合变化向量方向余弦最小距离分类确定变化类型。认为在多维向量空间中, 向量的方向可以通过向量的一系列余弦函数定义。包含了变化类型信息的变化向量方向也可以通过向量和每一个光谱轴之间的方向余弦函数定义。表示向量方向的方向余弦可以将变化向量的方向表达为多维方向余弦空间中的惟一点, 所有变化像元都能在该多维空间中找到其对应点。假设已知该多维空间中若干特征点 (类别中心点) 及其所对应的变化类型, 则可以根据各变化像元与特征点的相似性, 利用具有类别中心点的监督分类技术确定出各变化像元的变化类型。在应用该方法对北京市海淀区进行了实验研究中, 取得了较为满意的结果。变化类型的判断精度达到 70% 以上。该方法特别适用于具有遥感数据但地面辅助资料在部分年段缺失情况下的土地覆盖变化监测。但是该方法基于土地覆盖类型的光谱差值向量与光谱变化向量的等价性假设, 因此, 严格的辐射校正和提高参考图像分类精度是该方法成功的关键。

4.2 多时相空间的主成分分析法

Townshend 等^[55]1985 年利用 PCA 方法分析了年内多时相植被指数数据, 认为洲际尺度 NDVI 时间序列数据可以识别两个主要的变化方向, 即 NDVI 的年际变化和季节变化

方向; Lambin 等^[30]利用 CVA 方法分析了苏丹萨赫勒地区 1987 年到 1989 年每月合成 NDVI 时间序列曲线, 然后利用 PCA 方法对变化矢量进行分析。与 Townshend 等不同之处在于 Lambin 等侧重于分析多时相 NDVI 数据变化矢量的方向问题。通过分析确定出该地区的土地覆盖变化可以分为四种变化强度类型和四种主要的变化过程类型。

4.3 高于二维空间的波段符号组合法

目前, 在多数的研究应用中, 变化类型的识别主要通过计算每个波段的“+”“-”符号组合 (+ 代表增加, - 代表减少) 结合目视解译进行。Johnson 等^[56]利用多光谱波段 TM 数据对该方法进行了深入分析。应用这种常规的符号组合法判断变化类型时, 常常出现以下两个问题: 一是当计算波段数为 n 时, 组合法只能表示 2^n 种符号。如果某一区域中有 m 种土地覆盖类型并且各种土地覆盖变化都可能发生, 那么该区域土地覆盖变化类型的总数就是 $m \times (m - 1)$, 因此, 很有可能出现一种符号代表多种土地覆盖变化类型的情况, 从而导致对变化类型的错误判断。二是随着计算波段的增加, 符号组合将呈几何级数增加, 变化类型判断变得十分困难^[16]。

5 变化检测精度评价^[5]

土地覆盖变化遥感检测分析中精度评价是一个非常重要的内容和过程。它对分析选用的检测方法和指标以及检测结果是否正确起着决定性的作用。目前, 常用的评价指标主要有总体精度、用户精度、制图精度和 Kappa 系数等。许多文献都有关于这些评价指标与方法的含义与计算方法的介绍。如 Smits 等^[57]、Foody^[58]总结了单时相遥感数据分析的精度评价方法, 并讨论了与之相关的一些具体问题。Congalton 等^[59]在“Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices”一书中系统阐述了精度评价的基本概念以及进行遥感数据精度评价的原则和实际操作问题。

由于多时相地面实测数据获取问题, 对土地覆盖变化检测进行精度评价十分困难。以往的变化检测研究无法给出定量的评价结果。现有的精度评价方法和指标多是针对单时相遥感数据设计的。实际应用中误差矩阵是最主要的变化检测结果评价方法, 上文提及的各种精度评价指标都可以通过误差矩阵计算获得。为了正确建立误差矩阵, 必需考虑以下几个因素^[60]: (1) 地面实测数据的收集; (2) 分类方案; (3) 样点选取方案; (4) 空间自相关; (5) 样点大小和采样单元。近些年, 一些新的方法也被用来对土地覆盖变化检测结果进行分析与评价。Morissette 等^[61]利用精度评价曲线分析了基于遥感数据的变化检测结果; Lowell^[62]发展了一种基于面积的土地覆盖变化检测精度评价方法; Biging 等^[63]在其专著“Accuracy assessment of remote sensing-derived change detection”中重点介绍了土地覆盖变化检测的精度评价方法。在书中作者详细分析了影响评价精度的各种数据处理要素, 介绍了建立误差矩阵的样点选取方法, 对各种评价方法的适用性进行了分析并举例说明各种评价方法的实际应用。

6 结论与讨论

土地覆盖变化遥感检测研究中, 数据预处理是保证变化检测精度的前提。除了进行几何校正与配准、大气与辐射校正或标准化等处理工作外, 针对不同的数据源和研究目的, 还要进行许多特定的数据处理工作。这些过程对后续的变化检测研究具有十分重要的意义。变化检测的一个核心问题是如何选择有效的变化检测方法。任何单一的变化检测方法都

无法满足各种变化检测分析的需要,各种方法应该是一种有效的补充关系,如何整合各种方法的优势,进行各种尺度范围的变化检测分析将是今后一个重要的研究方向。

目前,大多数变化检测方法都涉及检举变化与非变化像元的阈值确定问题。由于当前通常使用的经验阈值法,虽然简单明晰但存在许多不足之处,自动或半自动阈值确定方法成为一个研究热点问题。研究的关键问题是如何克服目前自动、半自动阈值法普遍过于复杂的缺点,发展相对简单易行的阈值确定方法。一个成功的土地覆盖变化检测分析除了能够检测出变化/非变化信息外,还要能够提供详细的变化轨迹和类型。这对分析土地覆盖变化对其他环境要素的影响具有重要意义。当前,土地覆盖变化遥感检测仍然是研究的热

参考文献:

- [1] Nobre, C A, Sellers, P J, Shukla, J. Amazonian deforestation and regional climate change[J]. *Journal of Climate*, 1991, 4 (10): 957
- [2] Nemani, R, Running, S W. Implementation of a hierarchical global vegetation classification in ecosystem function models[J]. *Journal of Vegetation Science*, 1996, 7 (3): 337- 346
- [3] Singh A. Digital change detection techniques using remotely-sensed data[J]. *Int J. Remote Sensing*, 1989, 10 (6): 989- 1003
- [4] Coppin P, Jonckheere I, Nackaerts K, et al Digital change detection methods in ecosystem monitoring: a review[J]. *Int J. Remote Sensing*, 2004, 25 (9): 1565- 1596
- [5] Lu D, Mause P, Brondizio, et al Change detection techniques[J]. *Int J. Remote Sensing*, 2004, 25 (12): 2365- 2407
- [6] Johnson R, Kasischke E S. Change vector analysis: a technique for the multispectral monitoring for land cover and condition[J]. *Int J. Remote Sensing*, 1998, 19 (3): 411- 426
- [7] Townshend, J, Justice, C, Gurney, C, et al The effect of image misregistration on the detection of vegetation change[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, 30: 1054- 1060
- [8] Gilabert, M, Conese, C, Maselli, F. An atmospheric correction method for the automatic retrieval of surface reflectance from TM images[J]. *Int J. Remote Sensing*, 1994, 15: 2065- 2086
- [9] Tokola, T, Lofman, S, Erkkila, A. Relative calibration of multitemporal Landsat data for forest cover change detection[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1999, 68: 1- 11
- [10] Yang, X, LO, C. Relative radiometric normalization performance for change detection from multi-date satellite images[J]. *PE&RS*, 2000, 66: 967- 980
- [11] Collins, J, Woodcock, C. An assessment of several linear change detection techniques for mapping forest mortality using multitemporal Landsat TM data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 56: 66- 77
- [12] Townshend, J, Justice, C, Kalb, V. Characterization and classification of South America land cover types using satellite data[J]. *Int J. Remote Sensing*, 1987, 8: 1189- 1207
- [13] Holben, B. Characteristic of maximum value composite images for temporal AVHRR data[J]. *Int J. Remote Sensing*, 1986, 7(11): 1417- 1434
- [14] Vivy, N, Arino, O, Aubevard. The best index slope extraction (BIS): A method for reducing noise in NDVI time-series[J]. *Int J. Remote Sensing*, 1992, 13(8): 1585- 1590
- [15] Roerink, G, Menenti, M, Verhoef, W. Reconstructing cloudfree NDVI composites using Fourier analysis of time series[J]. *Int J. Remote Sensing*, 2000, 21(9): 1911- 1917
- [16] Chen Jin, Per Jonsson, Masayuki Tamura, et al A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky-Golay filter[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, 91: 332- 344
- [17] Miller L, Nualchawee, Tom C. Analysis of the dynamics of shifting cultivation in the tropical forests of northern Thailand using landscape modeling and classification of Landsat imagery[Z]. NASA technical memorandum 79545, Goddard Space Flight Centre, Greenbelt, Maryland, U. S. A. , 1978
- [18] Hame, T. Satellite image aided change detection. In Remote sensing-aided forest inventory[R]. Research Notes No. 19, Department of Forest Mensuration and Management, University of Helsinki, Helsinki, Finland, 1986 47- 60
- [19] Fung Tung. An assessment of TM imagery for land-cover change detection[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28 (4): 681- 684
- [20] Ingram K, Knapp E, Robinson J. Change detection technique development for improved urbanized area delineation[Z]. technical memorandum CSC/TM - 81/6087, Computer Sciences Corporation, Silver Springs, Maryland, U. S. A. , 1981
- [21] Yasuoka, Y. Detection of land-cover changes from remotely sensed images using spectral signature similarity[A]. *Proceedings of the 9th Asian Conference on Remote Sensing*[C]. November, 1988 G31- G36
- [22] Coppin, P, Bauer, M. Processing of multitemporal Landsat TM imagery to optimise extraction of forest cover change

- features[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1994, 32: 918- 927.
- [23] 周斌 针对土地覆盖变化的多时相遥感探测方法[J]. 矿物学报, 2000, 20(2): 165- 171.
- [24] Burns, G, Joyce, A. Evaluation of land cover change detection techniques using Landsat MSS data[A]. Proceedings of the 7th PECORA Symposium, Sioux Falls[C]. SD, U SA (Bethesda, MD: A SPRS), 1981. 252- 260
- [25] Singh, A. Change detection in the tropical forest environment of northeastern India using Landsat[A]. In: Remote sensing and tropical land management[M]. Edited by M J Eden, J T Parry. London: John W iley & Sonos, 1986. 237- 254
- [26] Howarth, P, Wickware, G. Procedures for change detection using Landsat[J]. Int J. Remote Sensing, 1981, 2: 277- 291.
- [27] Stow, D, Collins, D, McKinsey, D. Land use change detection based on multi-date imagery from different satellite sensor systems[J]. Geocarto International, 1990, 5: 3- 12
- [28] Jordan C. Change detection for resource inventories using digital remote sensing data[A]. Proceedings of the Workshop on In- Place Resource Inventories: Principles and Practices[C]. University of Maine, Orono, ME, U SA (Bethesda, MD: SAF), 1981, pp. 278- 283
- [29] Michalek, J, Wagner T, J. Luczkovich J, et al. Multispectral change vector analysis for monitoring coastal Marine environments[J]. PE&RS, 1993, 59(3): 381- 384
- [30] Lambin E, Strahler A. Change-vector analysis in multitemporal space: a tool to detect and categorize and cover change processing using high temporal-resolution satellite data[J]. Remote Sensing of Environment, 1994, 48: 231- 244
- [31] Yuan D, Elvidge C. Land Cover Change Detection Pilot Study: Washington D. C. Area Experiments[J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 66: 166- 178
- [32] Guirguis, S, Hassan, H, Elraey, M, et al. Multitemporal change of Lake Burullus, Egypt, from 1983 to 1991[J]. Int J. Remote Sensing, 1996, 17: 2915- 2921.
- [33] Singh, A, Harrison, A. Standardized principal components[J]. Int J. Remote Sensing, 1985, 6: 883- 896
- [34] Fung, T, Ledrew, E. The application of principal component analysis to change detection[J]. PE&RS, 1987, 53: 1649- 1658
- [35] Ridd M, Liu J. A comparison of four algorithms for change detection in an urban environment[J]. Remote Sensing of Environment, 1998, 63: 95- 100
- [36] Crist E, Cicone R. Application of the Tasseled Cap concept to simulated thematic mapper data[J]. PE&RS, 1984, 50(3): 343- 362
- [37] Hall, F, Botkin, D, Strebel, D, Woods, K, et al. Large-scale patterns of forest succession as determined by remote sensing[J]. Ecology, 1991, 72: 628- 640
- [38] Liu, X, Lathrop, R G JR. Urban change detection based on an artificial neural network[J]. Int J. Remote Sensing, , 2002, 23: 2513- 2518
- [39] Dai X, Khorram S. Remotely sensed change detection based on artificial neural networks[J]. PE&RS, 1999, 65: 1187- 1194
- [40] Henebry, G. Detecting change in grasslands using measures of spatial dependence with Landsat TM data[J]. Remote Sensing of Environment, 1993, 46: 223- 234
- [41] Wane, F. A knowledge-based vision system for detecting land change at urban fringes[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1993, 31: 136- 145
- [42] Lambin, E, Strahler, A. Indicators of land-cover change for change vector analysis in multitemporal space at coarse spatial scales[J]. Int J. Remote Sensing, 1994, 15: 2099- 2119
- [43] Morissette, J, Khorram, S, Mace T. Land-cover change detection enhanced with generalized linear models[J]. Int J. Remote Sensing, 1999, 20: 2703- 2721.
- [44] Read, J, Lam, N. Spatial methods for characterizing land cover and detecting land cover changes for the tropics[J]. Int J. Remote Sensing, 2002, 23: 2457- 2474
- [45] Silapaswan, C, Verbyla, D, McGuire, A. Land cover change on the Seward Peninsula: the use of remote sensing to evaluate the potential influences of climate warming on historical vegetation dynamics[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2001, 27: 542- 554
- [46] Petit, C, Scudder, T, Lambin E. Quantifying processes of land-cover change by remote sensing: resettlement and rapid land-cover change in southeastern Zambia[J]. Int J. Remote Sensing, 2001, 22: 3435- 3456
- [47] Myneni, R, Keeling, C, Tucker C, et al. Increased plant growth in the northern high latitudes from 1981 to 1991[J]. Nature, 1997. 386: 698- 702
- [48] Plisnier, P, Serneels, S, Lambin E. Impact of ENSO on East African ecosystems: multivariate analysis based on climatic and remote sensing data[J]. Global Ecology and Biogeography Letters, 2000, 9: 481- 497.
- [49] Andres, L, Salas, W, Skole D. Fourier analysis of multitemporal AVHRR data applied to a land cover classification[J]. Int J. Remote Sensing, 1994, 15: 1115- 1121.
- [50] Eastman, J R, Fulk, M. Long sequence time series evaluation using standardized principal components[J]. PE&RS,

1993, 59: 991- 996

[51] Young, S, Wang C. Land-cover change analysis of China using global scale Pathfinder AVHRR Landover (PAL) data, 1982- 92[J]. Int. J. Remote Sensing, 2001, 22: 1457- 1477.

[52] Nelson R. Detecting forest canopy change due to insect activity using Landsat MSS[J]. PE&RS, 1983, 49: 1303- 1314

[53] Bruzzone, L., Fernandez Prieto, D. Automatic analysis of the difference image for unsupervised change detection[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2000a, 38: 1171- 1182

[54] Bruzzone, L., Fernandez Prieto, D. A minimum-cost thresholding technique for unsupervised change detection[J]. Int. J. Remote Sensing, 2000b, 21: 3539- 3544

[55] Townshend R, Goff T, Tucker C. Multitemporal dimensionality of images of normalized difference vegetation index at continental scales[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1985, 23: 888- 895

[56] Johnson R, Kasischke E. Change vector analysis: a technique for the multispectral monitoring for land cover and condition[J]. Int. J. Remote Sensing, 1998, 19 (3): 411- 426

[57] Smits, P., Dellepiane, S., Schowengerdt R. Quality assessment of image classification algorithms for land-cover mapping: a review and a proposal for a cost-based approach[J]. Int. J. Remote Sensing, 1999, 20: 1461- 1486

[58] Foody, G. Status of land cover classification accuracy assessment[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 80: 185- 201.

[59] Congalton, R., Green, K. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: principles and Practices[M]. Boca Raton, FL, USA: CRC/ Lewis Press, 1999

[60] Congalton, R., Plourde, L. Quality assurance and accuracy assessment of information derived from remotely sensed data [A]. In: Manual of Geospatial Science and Technology[M]. Edited by J Bossler. London: Taylor & Francis, 2002, 349- 361.

[61] Morissette, J., Khorram S., Mace T. Land-cover change detection enhanced with generalized linear models[J]. Int. J. Remote Sensing, 1999, 20: 2703- 2721.

[62] Lowell, K. An area-based accuracy assessment methodology for digital change maps[J]. Int. J. Remote Sensing, 2001, 22: 3571- 3596

[63] Biging, G., Chrisman N., Colby D., et al. Accuracy assessment of remote sensing-detected change detection [A]. Monograph Series[M]. Edited by S. Khorram, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS), MD, USA, 1999

(上接第 188 页)

表 7 各种林分林地土壤抗冲系数与其相关因子的灰色关联分析结果

$\zeta_j(k)$	抗冲系数	土壤		孔隙度		< 1 mm		1~ 3 mm		稳渗率	有机质含量
		厚度	容重	非毛管	毛管	根重	根长	根重	根长		
针阔混交林	0.689	0.688	0.925	0.799	0.851	0.585	0.962	0.556	0.556	0.586	0.576
阔叶林	0.416	0.974	0.837	0.395	0.466	0.453	0.371	0.463	0.452	0.494	0.530
楠竹林	0.533	0.982	0.436	0.521	0.734	0.336	0.436	0.336	0.340	0.611	0.652
灌木林	0.505	0.717	0.500	0.536	0.511	0.957	0.692	1.000	0.938	0.478	0.773
λ_j	0.535	0.841	0.674	0.563	0.641	0.583	0.615	0.589	0.571	0.542	0.633

(3) 随着时间和冲刷水量的增加, 可以看出各类土壤的抗冲性呈增加趋势, 这说明, 在 1 min 7.69 L 的冲刷情况下, 土壤就易被冲走了。除楠竹林外, 各林分林地土壤在不同冲刷时间和冲刷水量下, 其抗冲系数均大于农地(1.2~ 1.9 倍)。

参考文献:

[1] 方学敏, 万兆惠, 徐永年. 土壤抗蚀性研究现状综述[J]. 泥沙研究, 1997, (2): 87- 91.

[2] 李勇, 吴钦孝, 朱显谟, 等. 黄土高原植物根系提高土壤抗冲性的有效性[J]. 水土保持学报, 1990, 4(3): 1- 5.

[3] 刘玉成, 钟章成, 等. 缙云山自然保护区植被概况[A]. 见: 钟章成. 常绿阔叶林生态学研究[M]. 重庆: 西南师范大学出版社, 1988. 315- 326.

[4] 王忠林, 李会科, 贺秀贤. 渭北塬花椒地埂林土壤抗蚀抗冲性研究[J]. 水土保持研究, 2000, 7(1): 33- 37.

[5] 吴钦孝, 李勇. 黄土高原植物根系提高土壤抗冲性能的研究. 草本植物根系提高表层土壤抗菌素冲刷力的试验分析[J]. 水土保持学报, 1990, 4(1): 11- 16.

[6] 周佩华, 武春龙. 黄土高原抗冲性的试验研究方法探讨[J]. 水土保持学报, 1993, 7(1), 29- 34.

[7] 蒋定生, 李新华, 范兴科, 等. 论晋陕蒙接壤地区土壤的抗冲性与水土保持措施体系的配置[J]. 水土保持学报, 1995, 9(1): 1- 7.

[8] 蒋定生, 范兴科, 等. 黄土高原水土流失严重地区土壤抗冲性的水平和垂直变化规律研究[J]. 水土保持学报, 1995, 9(2): 1- 8.

[9] 罗天成, 徐国新. 灰色关联度分析与应用[M]. 南京: 江苏科技出版社, 1989.

(4) 由土壤抗蚀抗冲性的相关因子的灰色关联度看出, 抗蚀指数与其相关因子毛管孔隙度, 稳渗率, 非毛管孔隙度, < 1 mm 根长关系最密切。每个因子与抗蚀指数、抗冲系数的灰色关联度值都大于 0.5, 林地土壤抗蚀抗冲性的强弱是这些因子综合作用的结果。