

基于 MODIS 数据的洪涝灾情监测关键技术研究进展

李士进^{1 2} , 艾 萍¹ , 朱跃龙² , 陈 喜¹

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室 , 江苏 南京 210098 ;
2. 河海大学计算机及信息工程学院 , 江苏 南京 210098)

摘要 : 对近年来报道的基于 MODIS 数据的洪涝灾情监测关键技术进行了综述 , 主要包括水体提取、云检测和土地覆盖分类。水体提取主要困难在于波段选择和云的干扰 , 云检测也只能部分解决问题 , 还需要进一步研究。土地覆盖分类可以提供大范围变化监测 , 但在特征选择和分类器设计上还有很长的路要走。

关键词 : MODIS ; 灾情监测 ; 水体提取 ; 云检测 ; 土地覆盖分类

中图分类号 : TV877 文献标识码 : A 文章编号 : 1006-7647(2007) S2-0001-04

洪涝灾害是最频发的自然灾害之一 , 严重影响国民经济的发展 , 危害人民的生命财产安全 , 破坏生态环境。一般情况下 , 防汛人员为了掌握洪涝灾害的现状和发展 , 迅速合理地预估洪涝灾害可能造成的经济损失 , 及时组织防汛抢险救灾 , 一方面要充分了解 and 准确掌握灾区基本情况、现状工情和对洪涝灾害的敏感程度 ; 另一方面还须及时把握风情、雨情、水情、灾情的实况资料 , 以及云图、天气图和气象预报资料。由于受到洪涝灾害统计和分析手段落后的约束 , 防汛部门往往很难及时掌握灾情的实况 , 降低了对灾情情势预估的可靠性 , 不利于制定合理的防灾减灾方案 , 常常影响抗洪抢险工作。

以往用于洪水监测的遥感资料有 NOAA-AVHRR , TM , SPOT , SAR 等信息。NOAA 卫星能昼夜获取信息 , 是应用最广的数据 , 可作洪水动态监测的理想资料 , 但空间分辨率较低(1.1 km)。TM 和 SPOT 影像具有多波段、多时相的优点 , 分辨率适中(TM 为 30 m , SPOT 为 20 m) , 可有效地获取地面覆被信息和洪水信息 , 但时间分辨率较低(TM 为 16 d , SPOT 为 26 d) , 扫描宽度较小(TM 为 185 km , SPOT 为 60 km) , 且数据非免费接收 , 不易获得大范围的同步监测资料。利用机载侧视雷达系统 SAR , 分辨率达 10 m , 甚至 3 m , 但影像获取费用很高 , 飞行受天气影响大 , 在特大洪水应急中才使用^[1]。

MODIS 是当前世界上新一代“ 图谱合一 ” 的光学遥感仪器 , 具有 36 个光谱通道 , 分布在 0.4 ~ 14 μm

的电磁波谱范围内 , 多波段数据可以同时提供反映陆地、云边界、云特性、海洋水色、浮游植物、大气中水汽、地表温度、云顶温度、大气温度、臭氧等特征的信息 , 并且 MODIS 仪器的地面分辨率分别为 250 m , 500 m 和 1000 m , 高于 NOAA/AVHRR 影像的 1.1 km , 从而能够提供更多的地面信息^[2]。文献 [3] 总结了 MODIS 数据的 3 个主要特点 : ① MODIS 数据涉及的波段范围广(36 个波段 , 0.4 ~ 14 μm)、空间分辨率比 NOAA-AVHRR 有较大的进展(250 m , 500 m 和 1000 m) ; ② Terra 和 Aqua 都是太阳同步极轨卫星 , 可以得到每天最少 2 次白天和 2 次夜晚的更新数据 , 这样的数据更新频率对实时地球观测(如洪水监测) 有较大的实用价值 ; ③ NASA 对 MODIS 数据实行全球免费接收的政策。以上特点决定了 MODIS 在灾情动态监测中的可行性和适用性 , 从而对实时洪灾应急处理有较大的实用价值。

文献 [4] 和文献 [5] 分别介绍了利用 MODIS 遥感数据监测土壤水分与干旱以及 MODIS 在水文水资源中的应用进展 , 但对洪涝灾情监测方面未进行详细讨论。本文主要综述了应用 MODIS 数据进行洪涝灾情监测所涉及的几项关键技术 : 水体提取/识别、云检测、土地覆盖分类 , 并指出下一步研究与应用中需要注意的一些问题。

1 水体提取

目前水体提取方法主要有阈值法和以神经网络

为代表的综合多个波段信息的特征识别法。利用 MODIS 数据进行水体提取已经报道的方法主要是阈值法^[6]。根据水体的波谱特性以及 MODIS 遥感数据 36 个通道的波长分布,可以分析并确定适合于水体信息提取的波段。

MODIS 数据的第 1 波段是红光区(0.62 ~ 0.67 μm)第 2 波段是近红外区(0.841 ~ 0.876 μm)。在波段 2 波长范围内,植被的反射率明显高于水体的反射率,而在波段 1 波长范围内,水体的反射率高于植被的反射率。为了增强水陆反差,选用归一化植被指数 $NDVI$ (normalized difference vegetation index)来进行处理,其计算公式为

$$NDVI = \frac{C_2 - C_1}{C_2 + C_1} \quad (1)$$

式中: C_1 为 MODIS 数据第 1 波段的地表反射率; C_2 为 MODIS 数据第 2 波段的地表反射率。在归一化植被指数图像中,水体的 $NDVI$ 值很低,为负值,而植被、土壤的则较高,图像直方图表现为典型的双峰分布。因此通过阈值来区分水体和植被、土壤。在此基础上即可算出水面的像元数,再将像元数乘以每个像元所覆盖的实际面积(这里每个像元为 0.0625 km^2),即可得到水面面积。通过上述分析和处理,可以建立长期的洪灾水体识别影像库。任取两幅经过严格配准的影像分析即可监测水体范围的变化情况。丁莉东等^[7]提出利用谱间关系法进行 MODIS 图像的水体提取。虽然该方法比归一化植被指数法快速,但有把云错误地当作水体提取的缺点。

李登科等^[8,9]研究了高泥沙含量洪水的 MODIS 遥感识别及其在 2003 年渭河洪涝灾害动态监测中的应用。黄土高原水土流失严重,特别是多暴雨诱发洪涝灾害期间,渭河水泥沙含量极高。这些泥沙物质大量进入水体,引起水体的光谱特性发生变化。在较高分辨率的 MODIS 光谱通道中,进行洪涝灾害监测的最佳通道是 2、5 和 6 通道,它们在区分含泥沙量较少的水体时,比其他通道具有明显的优势,但反映含泥沙量比较高的水体和陆地边界不十分清晰。文章提出通过与其他通道的假彩色合成可以进行清楚地区分,但没有进行自动识别,而是通过人眼目视解译。作者认为,假彩色合成图像或植被指数分类图像可以清楚地反映含泥沙量比较大的水体和陆地边界,具有很好的视觉效果,可对洪水淹没区进行人机交互目视解译,但要进行计算机自动分类还是采用植被指数图像比较适宜。

目前,在 MODIS 数据中水体提取方法比较成熟,但是在恶劣天气情况下,特别是有云时水体提取比较困难,从报道文献看,只有文献 9 进行了分析,

当云层比较薄时,地表反射有一部分可以通过云层,此时在通道 1、2 图像上可看到云层下显现的地表,虽然水陆边界没有晴空条件下明显,但仍然可以辨别。若水体上有薄云,则该区域的反射率会随之提高,往往高于薄云附近的晴空陆地的反射率。该问题比较复杂,需要进行深入研究。

2 云检测

为有效消除云的干扰,更好地从遥感图像上提取水体、植被等信息,首先需要进行云区识别,即进行云像元检测,以达到去云的目的。

文献 10 以内蒙古自治区锡林浩特地区为研究区,选择了与云存在密切关系的 7 个波段数据(1、2、18、20、29、31、32),运用一种基于空间结构分析和神经网络的云自动检测算法,即根据图像中各像元的统计特征,通过空间结构滤波算法来研究图像中云的纹理统计特征,首先确定云的边界,在此基础上,再将云的纹理结构特征与光谱特征相结合,采用神经网络算法进行云的识别。由于该方法很好地确定了厚云、薄云及其边界,从而使云的检测更详细、直观,检测结果更加客观,其效果优于单纯采用光谱特征的方法。

文献 11 提出了一种针对我国东南沿海的、简单有效的云检测算法,该算法能够实现对 MODIS 白天图像的自动云检测。输入数据有:经过辐射校正和几何校正的 MODIS1B 通道 1、2、4、5、6、9、17、18、20、22、26、27、31、35,以及一些辅助数据,如太阳和卫星的高度角和方位角、地表高程、水陆标记数据等。首先要进行水陆判识,然后根据下垫面的类型选用相应的云检测方法,依次进行高云检测、中云检测和低云检测。为了尽量减少晴空信息的损失,该文还设置了晴空修复,制定了一些启发性规则,将错划为云的晴空像元纠正过来。该方法最大的缺陷是需要输入的辅助数据比较多,实际应用中对用户要求比较高。

文献 12 针对以往云检测中阈值的缺陷,即阈值的确定具有一定的主观性,而且也有时间和区域上的局限性(由于不同时相、不同地区的光谱性质的差异,其云检测阈值也不可能相同),提出了基于人工神经网络的云检测方法,选择的特征有:可见光波段 0.66 和 0.87 的反射率,近红外 1.38 μm 归一化雪盖指数(0.55 和 1.6);红外波段 11 和 12 以及 11 与 8.6、3.7 和 6.7 的亮温差。最后收集了 8500 多个样本,6000 个用于训练,2500 进行测试,测试正确率 90.12%。但是对真实图像的测试结果未报道,只报道说检测时间能够满足业务要求。

云检测中必须进行像元的水陆判识,云的存在给水陆判识带来了困难。因此,云检测中总是利用水陆标识数据辅助云检测。文献[13]讨论了缺少水陆标识数据的云检测方法,并证明了该方法对我国东南省份的MODIS数据比较适用。

由于可见光和红外波段自身的缺陷,厚云下的像元是不可见的,因而无法进行水陆判识;薄云和云边缘检测是云检测中的难点之一,获取薄云和云边缘对应的下垫面的水陆信息是进行更细致云检测的基本要求。鉴于此,提出如下设想:首先,选用一种简单、有效的方法进行厚云检测,或称之为粗云检测。之后,剩下的即为薄云、云边缘或晴空像元。再选用适当的方法对该部分进行水陆判识。最后便可根据像元的不同类型选用相应的检测方法及阈值进行进一步的云检测,或称之为细云检测。文献[13]对厚云检测是通过将通道1进行阈值化,而细云检测是通过对不同情形进行分析,分别从9种不同算法中选择合适的,具体和文献[12]中方法类似。

文献[14]总结了云、雪、植被、沙漠、水体等目标的光谱特性以及云和不同目标间的光谱差异,结合MODIS影像的波段范围,提出了一种对不同下垫面通用的多光谱云检测算法,具体选择了1、6、26这3个通道的数据,在云检测前进行了归一化,最后设置了4个阈值,分别区分云、植被(包括沙漠)、裸地、雪以及水体。

文献[15]用第20波段数据检测厚云,用第20波段与第31波段所反演的亮度温度差检测薄云。由于陆地和海洋存在较大的差异,因此选取的阈值也有所不同^[10],可以采用温度直方图统计曲线来确定。

总之,云检测已经取得了很大进展,有些方法(如阈值法)已经进入实际业务应用。但是在洪涝灾害发生时,天气一般比较恶劣,阈值往往会失效,如何在这样的条件下进行正确的云检测仍然需要进一步研究。

3 土地覆盖分类

传统上对土地利用/覆盖信息的获取主要来源于上报统计资料或实地调查。由于人为因素,统计资料精度很低,实地调查又因费时且耗资巨大而难以快速地获取大面积信息,使防洪救灾决策部门和防洪研究机构不能及时了解实际的土地利用状况。当前利用遥感技术进行覆盖分类多利用NOAA-AVHRR数据配合TM或SPOT数据产生归一化植被指数产品,而MODIS的归一化植被指数产品是对当前NOAA-AVHRR归一化植被指数产品的改进。MODIS植被指数提供的另一种产品增强植被指数可

以提高对高生物量区的敏感度。归一化植被指数与增强植被指数互为补充可以很好地获取地面覆盖的情况,而且MODIS成像面积大,时间分辨率较高,更有利于获取宏观同步信息和捕捉地面快速动态变化信息,实现对土地覆盖的动态监测,建立土地覆盖分类影像库。进一步复合更高分辨率的TM或SPOT资料,更适合对土地覆盖变化进行更详细的动态监测,从而可以用于灾情粗评估。

本文主要考虑基于MODIS数据的土地覆盖分类,这可以为粗略进行灾后评估提供良好的依据,不至于被地方上报数据所误导。

文献[16]针对宏观土地覆盖遥感分类的现状,充分利用MODIS相对于AVHRR数据具有的多光谱和分辨率优势,提出了利用MODIS数据进行分类特征选择与提取并结合多时相特征进行宏观土地覆盖分类的分类方法,并在山东省进行了分类试验,得出以下结论:不同比例下的训练样本与验证样本影响着总体分类精度;从MODIS数据中得到的植被指数、白天地表温度、水体指数、纹理特征、局部平稳(homogeneity)等可以作为分类特征配合参与到多波段地表反射率 $Ref1-7$ 遥感影像中,能明显提高分类精度,而土壤亮度指数则没有贡献;各分类特征对不同地物类别具有不同的分离度,在提高某些类别的分离性时,有可能降低了其他类别的分离性。试验结果表明:在没有其他非遥感信息的前提下,仅利用MODIS遥感自身信息对宏观土地覆盖分类就可达到较高精度。

文献[17]研究了决策树在土地覆盖分类中的应用,引入boosting和bagging技术,探究了这些决策树分类算法与新技术在遥感影像分类方面的潜力,以华北地区MODIS 250m分辨率影像进行了土地覆盖决策树分类试验与分析。研究结果表明,决策树在满足充分训练样本的条件下,相对于传统方法如最大似然法(MLC)能明显提高分类精度;另外在决策树CART中引入boosting技术,能明显提高那些较难识别类别的分类准确率(从18.5%提高到25.6%)^[17]。

中分辨率(250m和500m)MODIS数据比1km分辨率的AVHRR具有更高的空间和光谱分辨率,在区域尺度上土地利用/土地覆盖分类中得到了广泛的应用。文献[18]主要探讨了如何在生物保护中利用MODIS数据获得区域土地覆被分类信息,采用决策树和最大似然法相结合的分类方法,对MODIS数据(1~7波段)进行了生物保护区域土地覆被分类制图,并利用Landsat TM土地覆被制图作为参考数据对MODIS数据土地覆被制图进行了精度评价。

结果表明,利用 MODIS 数据在区域尺度上可以获取令人满意的土地覆被分类。

文献 19 研究以 MODIS 数据产品(1~7 波段)为信息源,用神经网络分类中的反向传播网络(BP)算法对新疆进行了土地利用分类研究。以新疆石河子为实验区,比较了 BP 算法与最大似然法的分类精度,前者的精度提高近 10%。研究结果表明,250 m MODIS 数据对新疆地区土地利用的类别信息获取比较实用;BP 算法对中分辨率的 MODIS 数据能取得较高的分类精度。

鉴于传统变化监测方法存在的缺陷,文献 20 研究尝试了一种对强制性组合后的多时相遥感数据进行分类的方法——多时相直接分类法。该方法的基本原理是:在两个不同时相的遥感数据中,若土地利用/土地覆盖没有发生变化,则同一地面具有相同的地面目标。在此基础上,组合图像相同的地物将反映出相似的光谱特征,从而保证了组合图像的光谱稳定性。但当两个数据存在较大的差异时,受实际土地利用/土地覆盖变化的影响,两时相数据在相同位置处将对应不同的地面目标,导致光谱特征的不一致,使得该处的组合图像出现光谱突变(变异),从而可以监测出变化信息。具体思路是:先将多时相遥感数据进行组合,然后再对该包含了多时相信息的图像进行非监督分类,获取较为准确可靠的变化监测结果。

由于不同尺度、不同空间分辨率及不同地物类别的复杂程度,造成了遥感影像数据在时空分布及区域上的差异,对地物的分类也由于遥感数据特点不同而造成不同分类器性能存在差别,从传统分类器和新兴分类器的实践来看,并不存在一种最优分类器能达到对不同层次地物类别的最佳识别。例如全球 MODIS 土地覆盖分类产品中采用了决策树和 Fuzzy ARTMAP 方法,但对中国区域分类表现甚差。文献 21 在区域尺度上采用这些国际上流行的分类器进行研究和相互比较,以探讨其对遥感影像的实际应用能力。

应用 MODIS 250 m 分辨率遥感影像对华北地区分别采用最大似然法、Parzen 窗、CART 决策树、BP 神经网络、Fuzzy ARTMAP 神经网络等 5 种分类方法进行区域尺度上土地覆盖制图的比较试验。结果表明:Parzen 窗法分类性能最优,CART 和 BP 其次,Fuzzy ARTMAP 表现较差;CART 决策树具有较好的鲁棒性,但缺点是样本代价较大;BP 神经网络分类器能达到较高精度,但缺点是需较高质量的样本,网络结构参数难以确定,造成其稳健性较差;Fuzzy ARTMAP 则未能表现出理想结果。

通过以上研究可以发现,几乎所有的分类器都被用来对遥感影像,特别是土地覆盖进行分类,但是这些方法并没有在统一的测试数据集上进行实验(文献 21 可以说是一个例外),并且以往的研究也发现,单个分类器在不同地面覆盖上的能力是不同的,如何结合各种分类器的优点,组合出性能更加优越的分类器是值得研究的问题。模式识别领域中对字符识别、人脸识别已经有很多成果,而在遥感影像分类中报道并不多。这需要引起广大遥感界研究人员的注意。

4 结 语

由于 MODIS 影像具有较高的空间和时间分辨率,光谱信息丰富,数据免费接收,非常适合于自然灾害的大面积监测。EOS 计划专门组建了 MODIS 资料处理和应用的国际研究队伍,成员来自国际知名研究机构的科学家,未来将有更加广泛的研究与应用前景。若 MODIS 数据能与 TM、SPOT 或 SAR 数据进行信息融合,将获得更加准确的洪水信息。

今后的发展趋势是利用早期在其他遥感影像处理分析中获得的方法和经验来指导 MODIS 影像的处理和分析,同时还要结合其他领域的知识,特别是模式识别和人工智能领域的新方法和新技术。

参考文献:

- [1] 彭定志,郭生练,黄玉芳,等.基于 MODIS 和 GIS 的洪灾监测评估系统[J].武汉大学学报(工学版),2004,37(4):7-10.
- [2] 刘玉洁,杨忠东.MODIS 遥感信息处理原理与算法[M].北京:科学出版社,2001.
- [3] 吴赛,张秋文.基于 MODIS 遥感数据的水体提取方法及模型研究[J].计算机与数字工程,2005,33(7):1-4.
- [4] 余万明,叶彩华.MODIS 资料遥感监测土壤水分与干旱研究进展[J].河南气象,2006(1):44-46.
- [5] 彭定志,熊立华,郭生练,等.MODIS 在水文水资源中的应用与展望[J].水科学进展,2004,15(9):683-688.
- [6] 蒯晓童,陈德清,陈子丹.MODIS 数据在水利中的应用[J].地理空间信息,2006,4(2):41-43.
- [7] 丁莉东,吴昊,王长健,等.基于谱间关系的 MODIS 遥感影像水体提取研究[J].测绘与空间地理信息,2006,29(6):25-27.
- [8] 李登科.高泥沙含量洪水的 MODIS 遥感识别[J].灾害学,2005,20(3):29-36.
- [9] 张树誉,李登科,李星敏,等.MODIS 资料在 2003 渭河洪涝灾害动态监测中的应用[J].气象科学,2005,25(2):173-178.
- [10] 宋小宁,赵英时.MODIS 图象的云检测及分析[J].中国图象图形学报,2003,8A(9):1079-1083.

(下转第 45 页)

7.34 亿 m³ 8.18 亿 m³ ,保证率 95% 时全市总供水量分别为 6.39 亿 m³ 8.13 亿 m³ 8.91 亿 m³ ,水资源配置工程累计静态总投资为 24.91 亿元(不含污水处理厂及污水管网投资 14.44 亿元和五源河橡胶坝投资 120 万元 ,这两部分与水环境整治工程投资重复) ,为海口市未来 25 年时间跨度的水资源优化配置和工程布局、实施步骤等提供科学依据。

f. 分析和给出包括南渡江防洪(潮)工程、城市防洪(潮)排涝工程、海堤工程和水库除险加固工程在内的全市防洪(潮)减灾体系建设工程规划和实施方案 ,预计到 2020 年规划工程累计静态总投资 13.88 亿元(含病险水库除险加固工程投资 1.69 亿元) ,为海口市建设与经济社会发展相适应的防洪(潮)减灾体系提供了重要依据。

g. 分析和给出包括水务信息基础设施、水务应用体系、水务信息化建设保障环境等在内的全市水务信息化服务体系建设规划与实施方案 ,预计到 2020 年全市水务信息化建设累计静态总投资为 6523 万元 ,其中信息基础设施总投资 3723 万元 ,业务应用系统总投资 2540 万元 ,保障环境总投资 260 万元。

h. 分析和给出包括水务管理政策法规体系框架 ,近期需制定和修订的法规、规章以及需要研究和探讨的政策法规等在内的海口市水务管理政策法规体系建设规划成果 ,为海口市建设完备的水务一体化的政策法规体系提供了科学依据。

4 结 语

随着经济社会的快速发展 ,尤其是城市化、工业化和产业化的迅猛发展 ,我国在水系建设和保护、修

复中普遍存在规划不协调、建设不配套、管理不统一的问题。为了适应我国城乡水务一体化管理和建设的需求 ,水系综合规划工作显得十分重要和迫切。本文通过海口市水系综合规划研究 ,得出以下主要结论和建议 :①水系规划要容纳吸收相关规划(如农业规划、土地利用规划、防洪规划、供水规划等) ,并与区域或流域水资源综合规划相衔接 ,与城市总体规划相协调和统一 ;②规划中应体现多水源、多用户、多目标 ,并面向河道内与河道外生态环境用水需求的水资源优化配置思想。水资源优化配置是保障水的各种功能协调发展的有效手段 ,是可持续利用水资源的可靠保障 ;③水环境的整治、修复和保护要与水景观建设统一规划、同步实施。水环境治理的重点是污染源治理、截污、河网水系整治等 ,构建水安全、水环境、水景观、水文化、水经济、水生态相互协调和有机组合的水生态环境系统 ;④水系规划的同时 ,要研究水务一体化管理的政策法规与规划的保障体系建设 ,以确保规划成果落到实处。

参考文献 :

[1] 邵益生. 城市水系统控制与规划原理[J]. 城市规划 , 2004 ,10 :62-67.
[2] 段武舰. 水系对城市化作用的再认识[J]. 中国勘察设计 , 2003(7) :77-78.
[3] 陈庆秋 ,薛建枫 ,周永章. 珠江三角洲城市水系统的可持续性评价[J]. 中国给水排水 , 2005 ,21(7) :101-103.
[4] 陈庆秋 ,薛建枫 ,周永章. 城市水系统环境可持续性评价框架[J]. 中国水利 , 2004(3) :6-10.
[5] 雷彩虹 ,孙颖. 生态城市建设中的水系统规划[J]. 水利科技与经济 , 2006 ,12(3) :150-152.

(收稿日期 2007-01-22 编辑 骆超)

(上接第 4 页)

[11] 王家成 ,杨世植 ,麻金继 ,等. 东南沿海 MODIS 图像自动云检测的实现[J]. 武汉大学学报 :信息科学版 , 2006 ,31(3) :270-273.
[12] 康晓光 ,孙龙祥. 基于人工神经网络的云自动检测算法[J]. 解放军理工大学学报 :自然科学版 , 2005 ,6(5) :506-510.
[13] 王家成 ,杨世植 ,麻金继 ,等. 缺少水陆标识数据情况下 MODIS 图像云检测的实现[J]. 遥感信息 , 2005(5) :19-21.
[14] 李微 ,方圣辉 ,佃袁勇 ,等. 基于光谱分析的 MODIS 云检测算法研究[J]. 武汉大学学报 :信息科学版 , 2005 ,30(5) :435-439.
[15] 蒋耿明 ,牛铮 ,阮伟利 ,等. MODIS 影像合成算法研究和实现[J]. 国土资源遥感 , 2004 ,15(2) :11-15.
[16] 刘勇宏 ,牛铮. 基于 MODIS 遥感数据的宏观土地覆盖特

征分类方法与精度分析研究[J]. 遥感技术与应用 , 2004 ,19(4) :217-224.
[17] 刘勇宏 ,牛铮 ,王长耀. 基于 MODIS 数据的决策树分类方法研究与应用[J]. 遥感学报 , 2005 ,9(4) :405-412.
[18] 刘伟 ,冯学智 ,肖鹏峰 ,等. 基于 MODIS 数据的生物保护区域土地覆被分类[J]. 江西师范大学学报 :自然科学版 , 2006 ,30(2) :201-205.
[19] 骆成凤 ,王长耀 ,刘永洪 ,等. 利用 BP 算法进行新疆 MODIS 数据土地利用分类研究[J]. 干旱区地理 , 2005 ,28(2) :258-263.
[20] 张红 ,舒宁 ,刘刚. 多时相组合分类法在土地利用动态监测中的应用[J]. 武汉大学学报 :信息科学版 , 2005 ,30(2) :131-134.
[21] 刘勇洪 ,牛铮 ,徐永明. 多种分类器在华北地区土地覆盖遥感分类中的性能评价[J]. 中国科学院研究生院学报 , 2005 ,22(6) :724-732.

(收稿日期 2007-01-23 编辑 熊水斌)