

doi: 10. 6046/gtzyyg. 2017. 04. 02

引用格式:刘紫涵,吴艳兰. 遥感图像云检测方法研究进展[J]. 国土资源遥感,2017,29(4):6-12. (Liu Z H, Wu Y L. A review of cloud detection methods in remote sensing images[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2017, 29(4): 6-12.)

遥感图像云检测方法研究进展

刘紫涵, 吴艳兰

(安徽大学资源与环境工程学院,合肥 230601)

摘要: 云层遮挡是影响遥感图像质量的主要因素,对受云层遮挡的遥感图像进行云检测是遥感数据修复过程中需解决的首要问题。在参考国内外大量文献的基础上,分析了云检测方法的研究现状,对现有的检测方法进行分类和综述,并重点介绍几种常用卫星数据的云检测方法,通过对不同云检测方法的比较,总结了现有云检测方法存在的问题以及发展趋势。

关键词: 遥感; 图像; 云检测; 传感器; 综述

中图法分类号: TP 751.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-070X(2017)04-0006-07

0 引言

遥感影像已广泛应用于地球资源调查、自然灾害预测和环境污染监测等方面,但由于传感器受大气密度和云层变化等影响较大,许多影像存在云层遮挡问题^[1]。根据国际卫星云气候计划流量数据(international satellite cloud climatology project-flux data, ISCCP-FD)提供的全球云量数据显示,地球表面 66% 以上区域经常被云覆盖^[2]。云层使得我们获得的地物信息衰减,甚至损失^[3],而对气象学者而言,通过研究云的分布可以发现极端气候现象及其变化规律^[4]。为此,众多学者针对云的特性进行了云检测方法的研究^[5]。云检测被看作影像进行后续识别、分类和解译的关键^[6],是遥感影像资料修复工作的基础之一,更是生产时空无缝遥感产品的前提保证。尽管大量针对遥感云检测的方法被提出来,但对这些方法的总结综述性论文还较少^[5],尤其是对不同传感器间遥感云检测方法的比较和综合评价更为稀少。因此,本文参考了大量国内外的相关文献,对遥感影像云检测方法现状进行分类和讨论,并归纳了几种常用遥感图像的云检测方法。

1 遥感图像云检测技术现状

国内外学者针对云检测做了不少研究,也取得

了较大的成功,并早在 1983 年就将云检测技术作为世界气候研究计划的重要组成部分^[7]。目前云检测方法多为阈值法,如 Kegelmeyer^[8]使用简单像元作为阈值进行云检测,该方法简单易行,但准确率偏低。后续的多组阈值法^[9]、自动云覆盖估算(automated cloud cover assessment, ACCA)^[10]、双通道动态阈值检测法^[11]和通道综合运算检测法^[12]等方法相继被提出并用于云检测研究。这些基于光谱特征的阈值法在一定程度上提高了云检测的精度,但往往会带来云检测的遗漏或者错判,而且多组综合阈值的设定会使检测速度变慢^[5]。为此,一些基于纹理特征^[13]和统计特征^[14]等方法也被运用到云检测中,并在中巴资源 02B 卫星中得到了实际应用。此外,人工神经网络等因其在时间和地区上具有良好的普适性也常用于云检测研究,该类方法通过训练数据集可以在一定程度上解决阈值法的时空局限性难题^[15]。

无论哪种方法都不可能适用于所有传感器和所有下垫面情况^[16],即使同一种方法同一种传感器在白天和晚上也可能产生不一样的效果^[17]。各种方法在实际应用中往往不是单独使用,而是多光谱、多特征和多方法的综合应用,如通过增加其他信息(如地表温度和多时相信息等)或结合其他技术(如超像素分割^[18]和纹理分析^[19]等),从而提高阈值法的检测精度。但这些方法大多针对特定遥感数据的特定波段,且阈值选择通常难以把握。各种方法虽

收稿日期: 2016-07-21; 修订日期: 2016-11-13

基金项目: 安徽省自然科学基金面上项目“面向海洋划界的海岸线曲折度与长度量算研究”(编号: 1308085MD52)和安徽大学研究生学术创新研究强化项目“风云静止卫星地表温度产品空值数据稳健修复”(编号: yqh100254)共同资助。

第一作者: 刘紫涵(1990-),男,硕士研究生,主要从事遥感图像处理方面的研究。Email: rs312lzh@yeah.net。

然在各自应用上都取得了一定成功,但大多十分依赖于先验知识。

2 遥感图像云检测方法分类

2.1 云检测基本方法

迄今为止,前人已发展了多种云检测基本方法,主要分为阈值法、纹理分析法和统计学方法 3 大类。阈值法的关键在于阈值的选取,随着云检测精度要求的提高,云检测使用的阈值也由早期的固定阈值逐步发展为动态阈值、自适应阈值和多波段组合阈值^[13-14, 20]等。纹理分析法本质是利用了目标物内部属性的相似性和目标物之间边界的不连续^[17],如曹琼等^[13]和 Christodoulou 等^[21]分别基于 2 个和多个纹理特征量进行云检测的研究。用于云检测的统计学方法主要分为统计方程法和聚类分析法。统计方程法利用样本数据建立模拟公式计算云的反射率或亮温来进行云检测^[22];聚类分析法是根据不同地物类型的像元观测值存在着明显差别的原理实现云检测,最常使用的有 C 均值聚类、ISODATA 聚类以及目前比较热门的模糊聚类等^[23]。

2.2 云检测综合智能方法

常用的综合智能法主要包括人工神经网络、支持向量机(support vector machine, SVM)和模糊逻辑算法等。人工神经网络主要使用自组织特征映射(self-organizing feature map, SOM)、概率神经网络(probabilistic neural network, PNN)和最大似然分类(maximum likelihood classification, MLC)3 种神经网络进行云和地面的区分^[7, 15];后续学者在此基础上又发展了多层感知神经网络等云检测方法^[24]。20 世纪 90 年代发展起来的 SVM 算法也已经被应用到云检测上,并且比起基于常规的分类检测方法具有明显的优势^[25]。此外,模糊逻辑算法作为一种具有决策能力的监督学习方法,以模糊集合论作为基础,根据隶属度的大小,通过调整输入数据特性达到对云最优化的分类^[26]。

3 几种常用卫星数据的云检测方法

3.1 Aqua 卫星数据云检测

载在地球观测系统(earth observation system, EOS)Aqua 卫星上的中分辨率成像光谱仪(moderate resolution imaging spectroradiometer, MODIS)和大气红外探测器(atmospheric infrared sounder, AIRS)为我们提供了丰富的多光谱红外观测资料^[27]。然而,该仪器获得的卫星数据受云影响非常明显,如何在

数据使用前进行云检测一直是学者关注的焦点之一。国际上比较流行的是 MODIS Cloud Mask 云检测方法,该方法利用 MOD35 的 19 个通道数据和地形等辅助数据,根据不同的路径采用不同的云检测方法^[17]。但此方法使用了较多的波段数量和相关辅助数据,导致检测结果容易受到地表类型等因素的影响。针对不同的下垫面,赫英明等^[28]利用 SVM 的 MODIS 数据分类方法对陆地和海洋进行了云检测实验,尽管达到了检测目的,但该方法表现出一定的地域局限性和对先验知识较显著的依赖性。为了改善先验知识限制的问题,也有学者提出基于模糊集合理论的模糊 C 均值聚类法,但该算法仍需进一步改进对辐射特征相似的冰雪和云的区分方法^[29]。此外,基于多时相信息的方法也被运用在 FORMOSAT-2, VENμS, Landsat 和 Sentinel-2 等影像的云检测研究中^[30-31]。与相对成熟的 MODIS 云检测方法及 MODIS 单视场的云检测产品相比,至今还没有更好的 AIRS 云检测方法。目前 AIRS 上的云检测还依赖于低光谱分辨率探测器上提供的有限的云特性^[32]。随着 MODIS 已能提供较成熟的云检测产品,一些学者提出将 AIRS 与 MODIS 的像素点进行空间匹配后, AIRS 视野的云检测效果与 MODIS 云检测产品结果能很好地对应,而且该方法与 MODIS 云检测产品精度紧密相关,若 MODIS 云检测有 5% 的误差, AIRS 云检测误差就会达到 5.62%^[32-33]。因此进一步提高其精确度,还需后续更深入的研究。

3.2 Landsat 卫星数据云检测

Landsat 陆地卫星系列提供了大量地球资源观测数据,加之其开放的获取政策使得该数据成为目前应用最广的地球资源数据之一^[34],因此对其云检测算法的研究就显得相当重要。针对 Landsat 卫星数据云检测中遇到的难题,国内外学者进行了许多相关研究。Vermote 等^[35]利用 LEDAPS 大气校正工具生成一个内部云掩模实现云检测,并作为 NASA 官方软件工具免费下载和推广; Irish^[10]提出了适用于地球大部分地区的自动云覆盖估算方法,但该方法在南极洲会把高亮度的雪误判成云。后续的大多方法都是基于以上 2 种经典方法展开的,其中值得一提的是:Zhu 等^[34]提出了一种面向对象的 Fmask(function of mask)云检测方法,该方法利用云匹配技术和云层高度迭代算法进行云检测研究。经验证明, Fmask 方法检测云层的总体精度(96.41%)高于 ACCA 方法(84.8%),同时检测标准差(3.2%)也低于 ACCA 方法(11.9%),但 Fmask 方法对薄云的检测率有待进一步的提高。Zhu 等^[3]和蒋慢慢等^[36]在 Fmask 方法基础上分别提出的基于时间序

列的 Tmask (multitemporal mask) 和基于主成分变换的 PCA_Fmask 云检测方法,都相应提高了遥感影像云检测精度;Zhu 等^[37]通过增加 Sentinel-2 数据也实现了对薄卷云的有效检测。此外,其他诸如经验阈值^[38]、非监督分类^[39]和几何学模型^[27]的方法也被运用到 Landsat 卫星数据的云检测中,并取得了一定的效果。

3.3 静止卫星数据云检测

常用的静止卫星有美国的地球静止轨道环境业务卫星 (geostationary operational environmental satellites, GOES) 系列、欧洲第二代静止轨道气象卫星 (meteosat second generation, MSG)、日本地球静止气象卫星 (geostationary meteorological satellite, GMS) 和我国的风云二号气象卫星 (FY-2) 等。地球静止卫星具有能短时间内对所研究区域进行连续观测的优势,在周期短、变化快和尺度小的灾害性天气系统的监测预报中起着非常重要的作用^[11],因此基于静止卫星的云检测研究尤为重要。自 20 世纪 70 年代开始,国际上就利用 GOES 系列卫星开展云检测研究。早期研究大多针对下垫面单一的海洋地区影像,利用阈值法进行云检测取得了较好效果,进而逐渐转换到陆地影像^[40]。针对陆地影像,一些改进的基于光谱阈值检测法在白天的效果比较明显,但对于夜间的云检测精度往往不高^[11,21],而且精度与季节、下垫面的地物类型及其异质性有关。为此,一些更稳健的方法(时空动态阈值、局部自适应阈值和贝叶斯概率阈值等方法)应运而生^[20,41]。后来多阈值与其他方法^[42-43]或与其他卫星资料^[44]结合的方法也被引入到云检测研究中,并取得了不错的效果。但由于阈值的选取带有明显的经验性,并且检测中需要用到较多的阈值,给业务化应用带来了诸多不便,因此优化通道组合和减少阈值设置成为新的研究方向。郭洪涛等^[45]利用 FY-2C 和多功能传送卫星 (multi-functional transport satellite, MT-SAT) 等数据以及其他辅助资料,综合采用优化的 ISCCP 法、多通道阈值法和空间纹理法等提出了一种综合优化方法,云检测准确率达到了 90% 以上。传统的云检测方法更偏重于应用云的辐射特征,由于静止卫星时间分辨率较高,如何充分利用多时相信息进行云检测,是一个重要的研究思路。杨昌军等^[46]利用 FY-2C 时间序列数据资料进行了云检测的尝试,但静止卫星高时间分辨率特征的应用至今仍较少见,因此将静止卫星时间序列云图应用于云检测还需要进一步的研究和推广。

3.4 新一代观测卫星数据云检测

为提出温室气体效应对策,解决碳循环研究过

程中数据的来源问题,日本和美国相继发射了温室气体观测卫星 (greenhouse gases observing satellite, GOSAT)、轨道碳观测者 (orbiting carbon observatory, OTC) 以及轨道碳观测者 2 号 (orbiting carbon observatory-2, OTC-2)。然而,由于云等大气因素的影响,无法获取准确的温室效应气体含量,因此进行有效的云检测至关重要。GOSAT 荷载的云和气溶胶成像仪 (cloud and aerosol imager, CAI) 可以直接观测会导致测量误差的云层和气溶胶,提高温室气体的观测精度^[47]。针对 GOSAT 数据,Taylor 等^[48]提出的 TANSO-CAI 和 TANSO-FTS 检测法在海洋地区的云检测准确度达到了 90%,并在 OTC-2 中得到了相同的实验结果。

4 云检测效果验证与方法比较

4.1 云检测方法定性比较

由于不同云检测方法所适用的条件不同,直接比较不同方法的性能优劣有一定难度。本文拟从复杂度、普适性和效率 3 个方面定性地比较阈值法、统计学和神经网络 3 种云检测方法的优缺点,如表 1 所示。

表 1 不同方法的定性比较
Tab.1 Comparison of different methods

方法	复杂度	普适性	效率
阈值法	较低	较低	较高
统计学方法	适中	适中	适中
神经网络方法	较高	较高	较低

统计学方法和阈值方法简单、易于实现,而神经网络方法最复杂^[49]。方法复杂度往往决定着方法效率,因此在方法效率上,一般是阈值法效率较高,其次是统计学方法,最后是神经网络方法。当然这种顺序并不是绝对的,如在需要利用统计分析来设定多组阈值时,阈值法的检测速度也会很慢。此外,传感器的波段设置和下垫面的地物类型都会影响云检测效果,神经网络因其可以智能地训练数据集,在普适性方面优于统计学方法和阈值法。

4.2 云检测效果验证

验证任何一个云检测方法是一项艰巨的工作,一般检测方法验证只能通过雷达或气象站等地面观测仪器获取的数据来进行定量比较。这就要求地面测量应与卫星观测具有相同观测时间和云成分,目前这方面的工作已经取得较大的进展^[20]。也有一些学者认为上述要求比较严格,有时难以满足,就提出了目视判读的验证方法。该方法主要利用相应传感器的不同波段合成来显示影像云信息,例如:针

对 ASTER 数据的云检测效果,利用其假彩色合成数据(15 m 空间分辨率的 RGB 波段)和 MODIS 云掩模产品与不同的 ASTER 数据云检测方法比较,来验证该方法的性能^[20]。

目前多源资料应用(跨卫星载荷、多光谱、不同空间分辨率和多时相等)和综合性方法(阈值、统计和人工智能)都是云检测方法方向,每种方法有针对性地解决部分问题,并据此获得期望的精度,因此对于同一数据不同云检测方法的比较相对容易,但不同数据间的比较则相对困难。由于不同云检测方法适应性不同,本节选择常见的极轨卫星和静止卫星的云检测精度进行简单的比较。在极轨卫星云检测方面,Liu 等^[50]提出的云掩模算法对 MODIS 数据检测准确度可以达到 92%; Taylor 等^[47-48]对 GOSAT 和 OTC-2 这 2 种数据云检测可以得到 90% 的准确度;谈建国等^[51]针对 NOAA 多个时相的 AVHRR 资料,建立的云检测模型整体精度可以达到 90% 以上。此外,一些学者对其他极轨卫星数据的云检测尝试,准确度也较高,如 SPOT 数据检测精度可达 85% 以上^[52]。与极轨卫星相比,静止卫星云检测方法较为单一,以多阈值法与其他方法相结合的方法为主^[44]。杨昌军^[53]利用中国区域站点资料云检测得到 2007 年 1 月和 6 月的准确率分别为 71.15% 和 75.77%;将时间序列应用于 FY-2C 云检测,其准确率分别为 72.89% 和 79.94%,与目前业务云检测相比,利用静止卫星高时间分辨率特征在一定程度上改善了云检测精度;将韦伯定律应用于 FY-2C 云检测,2007 年 1 月和 6 月中国区域检测的准确率分别为 72.34% 和 80.05%;而将韦伯比和时较差结合时,其准确率分别为 73.67% 和 81.02%,对比发现综合方法对云检测精度也有进一步的提高。文雄飞等^[54]针对 FY-2C 数据提出一种基于云指数的云检测方法总体精度夏季能够达到 86.78%,冬季能够达到 75.15%。师春香等^[55]采用多阈值和人工神经网络相结合的方法对 GMS 红外云图进行自动检测试验正确率为 61%。Bley 等^[44]在欧洲气象卫星组织技术的基础上提出 HRV (high resolution visible) 阈值法,将 MSG 数据云检测准确度由 75% 提高到 85%。

总体来说,极轨卫星数据的云检测精度一般要高于静止卫星数据。当然这也不是绝对的,如 Xu 等^[43]利用同一模型,针对 GOES 数据云检测精度比 MODIS 数据高了 10%;郭洪涛等^[45]找到了卫星云图云检测的一种综合优化方法,云检测准确率平均达到 90% 以上。可以看出综合方法在云检测方面具有显著的优势,这也是未来云检测技术的重要研

究方向。

5 存在的问题与发展趋势

作为遥感图像后续利用的基础性工作之一,遥感云检测一直是具有挑战的研究方向。随着遥感技术和信号理论不断发展,遥感云检测方法层出不穷^[56],阈值法因算法简单依然是遥感云检测的常用方法,并趋向于多种检测方法相结合,各类综合智能方法在云检测上也展现了非常大的潜力。尽管遥感图像云检测技术取得了较大的发展,但仍存在一些有待解决的问题,主要包括以下几个方面:

1) 各种云检测方法普适性不强,不同方法应用条件和适用范围都有所不同,如常用遥感传感器云检测方法研究中,以 MODIS 和 Landsat 数据研究最多,也都能达到较高的精度,但这些方法并不适用于静止卫星的云检测。即使是同一方法,针对白天和晚上的图像,其云检测效果也有差异。很难找到一种通用方法能适用于所有卫星传感器图像。这一难点需要学者们今后开展进一步的研究来克服。

2) 云检测精度会因为高亮地表被误判为云而降低,但这一技术难题或许可以通过卫星传感器与地面观测资料的空间匹配来解决,即在实际应用中综合使用卫星资料、中国地面气候资料、ISCCP 云量数据集、探空资料和地形资料进行云检测。

3) 各类方法在厚云区域的检测效果都比较好,但对于薄云或透明云而言,各类检测方法往往存在漏检、误检等情况。

得益于计算机技术在遥感领域应用的不断发展,统计方法、人工神经网络、支持向量机和模糊逻辑算法等原来较难实现的方法也得到了开发和广泛使用。这些方法在一定程度上弥补了传统云检测方法检测精度低的缺陷,但往往因为方法复杂度较高而难以实现,检测效率有待继续提高,在实际应用中受到了一定的限制。如何进一步提高现有云检测方法的普适性,降低误检率和漏检率,并设计相应的优化算法实现批量、实时、高效的云检测,获取时空无缝遥感定量产品,提高云检测业务化生产能力是今后的研究趋势和主攻方向。

参考文献 (References):

[1] 李志军,王卫华,牛照东,等. 城区红外遥感云层检测技术[J]. 中国激光,2012,39(11):1108006.
Li Z J, Wang W H, Niu Z D, et al. Cloud recognition from infrared remote sensing images under city background[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(11):1108006.
[2] Zhang Y C, Rossow W B, Lacis A A, et al. Calculation of radiative

- fluxes from the surface to top of atmosphere based on ISCCP and other global data sets: Refinements of the radiative transfer model and the input data[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2004, 109 (D19): D19105.
- [3] Zhu Z, Woodcock C E. Automated cloud, cloud shadow, and snow detection in multitemporal Landsat data: An algorithm designed specifically for monitoring land cover change[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 152: 217–234.
- [4] 陆雅君, 陈刚毅, 龚克坚, 等. 测云方法研究进展[J]. *气象科技*, 2012, 40(5): 689–697.
- Lu Y J, Chen G Y, Gong K J, et al. Overview of researches on cloud sounding methods[J]. *Meteorological Science and Technology*, 2012, 40(5): 689–697.
- [5] 侯舒维, 孙文方, 郑小松. 遥感图像云检测方法综述[J]. *空间电子技术*, 2014, 11(3): 68–76, 86.
- Hou S W, Sun W F, Zheng X S. Overview of cloud detection methods in remote sensing images[J]. *Space Electronic Technology*, 2014, 11(3): 68–76, 86.
- [6] 李 微, 方圣辉, 佘袁勇, 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(11): 435–438, 443.
- Li W, Fang S H, Dian Y Y, et al. Cloud detection in MODIS data based on spectrum analysis[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2005, 30(11): 435–438, 443.
- [7] Kotarba A Z. Evaluation of ISCCP cloud amount with MODIS observations[J]. *Atmospheric Research*, 2015, 153: 310–317.
- [8] Kegelmeyer W P Jr. Extraction of Cloud Statistics from Whole Sky Imaging Cameras[R]. Livermore, CA, United States: Sandia National Labs, 1994.
- [9] Baum B A, Trepte Q. A grouped threshold approach for scene identification in AVHRR imagery[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1999, 16(6): 793–800.
- [10] Irish R R. Landsat 7 automatic cloud cover assessment[C]//Proceedings of SPIE Algorithms for Multispectral, Hyperspectral, and Ultraspectral Imagery VI. Orlando, FL: SPIE, 2000, 4049: 348–355.
- [11] 刘 希, 许健民, 杜秉玉. 用双通道动态阈值对 GMS-5 图像进行自动云检测[J]. *应用气象学报*, 2005, 16(4): 434–444.
- Liu X, Xu J M, Du B Y. A bi-channel dynamic threshold algorithm used in automatically identifying clouds on GMS-5 imagery[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2005, 16(4): 434–444.
- [12] 马 芳, 张 强, 郭 锐, 等. 多通道卫星云图云检测方法的研究[J]. *大气科学*, 2007, 31(1): 119–128.
- Ma F, Zhang Q, Guo N, et al. The study of cloud detection with multi-channel data of satellite[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2007, 31(1): 119–128.
- [13] 曹 琼, 郑 红, 李行善. 一种基于纹理特征的卫星遥感图像云探测方法[J]. *航空学报*, 2007, 28(3): 661–666.
- Cao Q, Zheng H, Li X S. Method for detecting cloud in satellite remote sensing image based on texture[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2007, 28(3): 661–666.
- [14] 单 娜, 郑天垚, 王贞松. 快速高准确度云检测算法及其应用[J]. *遥感学报*, 2009, 13(6): 1138–1155.
- Shan N, Zheng T Y, Wang Z S. High-speed and high-accuracy algorithm for cloud detection and its application[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(6): 1138–1155.
- [15] Liu Y, Xia J, Shi C X, et al. An improved cloud classification algorithm for China's FY-2C multi-channel images using artificial neural network[J]. *Sensors*, 2009, 9(7): 5558–5579.
- [16] 陈振炜, 张 过, 宁津生, 等. 资源三号测绘卫星自动云检测[J]. *测绘学报*, 2015, 44(3): 292–300.
- Chen Z W, Zhang G, Ning J S, et al. An automatic cloud detection method for ZY-3 satellite[J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2015, 44(3): 292–300.
- [17] Jedlovac G. Automated detection of clouds in satellite imagery[M]//Jedlovac G. *Advances in Geoscience and Remote Sensing*. InTech Open Access Publisher, 2009.
- [18] Liu S, Zhang L B, Zhang Z, et al. Automatic cloud detection for all-sky images using superpixel segmentation[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2015, 12(2): 354–358.
- [19] 刘龙飞, 陈云浩, 李 京. 遥感影像纹理分析方法综述与展望[J]. *遥感技术与应用*, 2003, 18(6): 441–447.
- Liu L F, Chen Y H, Li J. Texture analysis methods used in remote sensing images[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2003, 18(6): 441–447.
- [20] Jedlovac G J, Haines S L, Lafontaine F J. Spatial and temporal varying thresholds for cloud detection in GOES imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2008, 46(6): 1705–1717.
- [21] Christodoulou C I, Michaelides S C, Pattichis C S. Multifeature texture analysis for the classification of clouds in satellite imagery[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(11): 2662–2668.
- [22] Molnar G, Coakley J A Jr. Retrieval of cloud cover from satellite imagery data: A statistical approach[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1985, 90(D7): 12960–12970.
- [23] 刘志刚, 李元祥, 黄 峰. 基于动态聚类的 MODIS 云检测算法[J]. *遥感信息*, 2007(4): 33–35, 75.
- Liu Z G, Li Y X, Huang F. Cloud detection of MODIS satellite images based on dynamical cluster[J]. *Remote Sensing Information*, 2007(4): 33–35, 75.
- [24] Zhang W D, He M X, Mak M W. Cloud detection using probabilistic neural networks[C]//Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Sydney, NSW, Australia: IEEE, 2001, 5: 2373–2375.
- [25] Li P F, Dong L M, Xiao H C, et al. A cloud image detection method based on SVM vector machine[J]. *Neurocomputing*, 2015, 169: 34–42.
- [26] 李 爽, 丁圣彦, 许叔明. 遥感影像分类方法比较研究[J]. *河南大学学报(自然科学版)*, 2002, 32(2): 70–73.
- Li S, Ding S Y, Xu S M. The comparative study of remote sensing image classification[J]. *Journal of Henan University(Natural Science)*, 2002, 32(2): 70–73.
- [27] Susskind J, Barnett C D, Blaisdell J M. Retrieval of atmospheric and surface parameters from AIRS/AMSU/HSB data in the presence of clouds[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(2): 390–409.
- [28] 赫英明, 王汉杰, 姜祝辉. 支持向量机在云检测中的应用[J]. *解放军理工大学学报(自然科学版)*, 2009, 10(2): 191–194.

- He Y M, Wang H J, Jiang Z H. Application of support vector machines in cloud detection[J]. Journal of PLA University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2009, 10(2): 191 – 194.
- [29] 潘 聪, 夏 斌, 陈 彧, 等. 基于模糊聚类的 MODIS 云检测算法研究[J]. 微计算机信息, 2009, 25(4): 124 – 125.
- Pan C, Xia B, Chen Y, et al. Cloud detection of MODIS data based on FCM[J]. Microcomputer Information, 2009, 25(4): 124 – 125.
- [30] Hilker T, Lyapustin A I, Tucker C J, et al. Remote sensing of tropical ecosystems: Atmospheric correction and cloud masking matter [J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 127: 370 – 384.
- [31] Hagolle O, Huc M, Pascual D V, et al. A multi – temporal method for cloud detection, applied to FORMOSAT – 2, VEN μ S, LANDSAT and SENTINEL – 2 images[J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(8): 1747 – 1755.
- [32] 王丹凤, 张记龙, 王志斌, 等. 基于 MODIS 云产品的 AIRS 像素云检测[J]. 国土资源遥感, 2013, 25(1): 13 – 17. doi:10. 6046/gtzyyg. 2013. 01. 03.
- Wang D F, Zhang J L, Wang Z B, et al. AIRS pixel cloud detection using MODIS cloud products [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2013, 25(1): 13 – 17. doi:10. 6046/gtzyyg. 2013. 01. 03.
- [33] 卢 娟, 严 卫, 何锡玉. 利用 MODIS 云检测产品客观确定 AIRS 云检测[J]. 气象科技, 2007, 35(5): 740 – 743.
- Lu X, Yan W, He X Y. Objective identification of AIRS cloud mask with MODIS cloud products[J]. Meteorological Science and Technology, 2007, 35(5): 740 – 743.
- [34] Zhu Z, Woodcock C E. Object – based cloud and cloud shadow detection in Landsat imagery [J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 118: 83 – 94.
- [35] Vermote E, El Saleous N. LEDAPS surface reflectance product description, version 2.0[Z]. 2007.
- [36] 蒋慢慢, 邵振峰. 采用主成分分析的改进云检测算法[J]. 测绘科学, 2015, 40(2): 150 – 154.
- Jiang M M, Shao Z F. Advanced algorithm of PCA – based Fmask cloud detection[J]. Science of Surveying and Mapping, 2015, 40(2): 150 – 154.
- [37] Zhu Z, Wang S X, Woodcock C E. Improvement and expansion of the Fmask algorithm: Cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4 – 7, 8, and Sentinel 2 images [J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 159: 269 – 277.
- [38] Shao Z F, Hou J H, Jiang M M, et al. Cloud detection in Landsat imagery for Antarctic region using multispectral thresholds [C]// Proceedings of Remote Sensing of the Atmosphere, Clouds, and Precipitation. Beijing, China: SPIE, 2014, 9259: 92590P.
- [39] Sano E E, Ferreira L G, Asner G P, et al. Spatial and temporal probabilities of obtaining cloud – free Landsat images over the Brazilian tropical savanna [J]. International Journal of Remote Sensing, 2007, 28(12): 2739 – 2752.
- [40] Escrig H, Batlles F J, Alonso J, et al. Cloud detection, classification and motion estimation using geostationary satellite imagery for cloud cover forecast [J]. Energy, 2013, 55: 853 – 859.
- [41] Maturi E, Harris A, Mittaz J, et al. NOAA’s sea surface temperature products from operational geostationary satellites [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2008, 89(12): 1877 – 1888.
- [42] Peak J E, Tag P M. Toward automated interpretation of satellite imagery for navy shipboard applications [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1992, 73(7): 995 – 1008.
- [43] Xu W, Wooster M J, Roberts G, et al. New GOES imager algorithms for cloud and active fire detection and fire radiative power assessment across North, South and Central America [J]. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(9): 1876 – 1895.
- [44] Bley S, Deneke H. A threshold – based cloud mask for the high – resolution visible channel of Meteosat Second Generation SEVIRI [J]. Atmospheric Measurement Techniques, 2013, 6: 2713 – 2723.
- [45] 郭洪涛, 王 毅, 刘向培, 等. 卫星云图云检测的一种综合优化方法[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2010, 11(2): 221 – 227.
- Guo H T, Wang Y, Liu X P, et al. Integrated optimal method of cloud detection with meteorological satellite data [J]. Journal of PLA University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2010, 11(2): 221 – 227.
- [46] 杨昌军, 许健民, 赵凤生. 时间序列在 FY2C 云检测中的应用 [J]. 大气与环境光学学报, 2008, 3(5): 377 – 391.
- Yang C J, Xu J M, Zhao F S. Application of time series in FY2C cloud detection [J]. Journal of Atmospheric and Environmental Optics, 2008, 3(5): 377 – 391.
- [47] Taylor T E, O’Dell C W, O’Brien D M, et al. Comparison of cloud – screening methods applied to GOSAT near – infrared spectra [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2012, 50(1): 295 – 309.
- [48] Taylor T E, O’Dell C W, Cronk H Q, et al. Evaluation of cloud and aerosol screening of early orbiting carbon observatory – 2 observations with collocated MODIS measurements [C]// AGU Fall Meeting Abstracts. Washington, DC: AGU, 2014.
- [49] Schröder M, Bennartz R, Schüller L, et al. Generating cloudmasks in spatial high – resolution observations of clouds using texture and radiance information [J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(20): 4247 – 4261.
- [50] Liu R G, Liu Y. Generation of new cloud masks from MODIS land surface reflectance products [J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 133: 21 – 37.
- [51] 谈建国, 周红妹, 陆 贤, 等. NOAA 卫星云检测和云修复业务应用系统的研制和建立 [J]. 遥感技术与应用, 2000, 15(4): 228 – 231.
- Tan J G, Zhou H M, Lu X, et al. Research and establishment in operation system of cloud detection and rehabilitation applied to NOAA satellite [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2000, 15(4): 228 – 231.
- [52] Fisher A. Cloud and cloud – shadow detection in SPOT5 HRG imagery with automated morphological feature extraction [J]. Remote Sensing, 2014, 6(1): 776 – 800.
- [53] 杨昌军. 韦伯定律及时间序列在 FY2C 云检测中的应用研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2007.
- Yang C J. Study on the Application of Weber’s Law and Time Series in FY2C Cloud Detection [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2007.
- [54] 文雄飞, 董新奕, 刘良明. “云指数法”云检测研究 [J]. 武汉大

学学报(信息科学版),2009,34(7):838-841.

Wen X F,Dong X Y,Liu L M. Cloud index method for cloud detection[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2009,34(7):838-841.

[55] 师春香,吴蓉璋,项续康. 多阈值和神经网络卫星云图云系自动分割试验[J]. 应用气象学报,2001,12(1):70-78.

Shi C X,Wu R Z,Xiang X K. Automatic segmentation of satellite image using hierarchical threshold and neural network[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology,2001,12(1):70-78.

[56] 韩自发. 基于稀疏表示的遥感图像去云方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学,2013.

Han Z F. Study on Removing Cloud from Remote Sensing Image Based on Sparse Representation[D]. Harbin:Harbin Engineering University,2013.

A review of cloud detection methods in remote sensing images

LIU Zihan, WU Yanlan

(School of Resources and Environmental Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: Cloud cover is the main factor affecting the quality of remote sensing image. Cloud detection for remote sensing images is one of the principal problems that must be solved in remote sensing data restoration processing. On the basis of extensive investigation of existing articles, the research status of cloud detection is analyzed, and then a classification and comprehensive overview of cloud detection methods is presented, the cloud detection methods for several kinds of commonly used satellite data are also given. By comparing the cloud detection methods, the existing problems and development trend of cloud detection method are discussed.

Keywords: remote sensing; image; cloud detection; sensor; review

(责任编辑: 张 仙)

=====

下期要目

王海庆	山西某地矿业开发占用土地状况遥感监测
袁春琦	基于主动深度学习的极化 SAR 图像分类
尤 慧	基于 MODIS - EVI 时序数据的江汉平原油菜种植分布信息提取
张春桂	基于 FY - 2E 卫星数据的福建沿海海雾遥感监测
彭秋志	基于 MODIS 数据的东江流域云干扰时空特征分析
刘 斌	基于 DMSP/OLS 夜间灯光影像的 2000—2013 年鄂尔多斯市城市扩张遥感制图与驱动因子分析
尹凌宇	利用 KPCA 法检测高分一号影像中的森林覆盖变化方法
陆 坤	基于 GF - 2 的孕穗期小麦叶面积指数反演模型研究——以河北省廊坊市为例
郑凯端	长三角地区一次严重雾霾事件的多源遥感监测研究
王俊霞	基于多源遥感数据的旱情评价研究——以河南省为例
庞海洋	ENDSI 增强型雪指数提取积雪研究
华俊玮	基于随机森林算法的地表温度降尺度研究
田洁玫	高标准粮田区鹤壁市土地利用情景模拟预测研究
杨 敏	基于 FSDAF 方法融合生成高时空分辨率地表温度的验证
王彦佐	内存数据库在 ZY1 - 02C 海量数据空间检索中的应用