

基于 HJ-1A/1B CCD 数据的海南岛水体提取研究^{*}

李海亮¹, 汪秀华², 罗红霞¹, 田光辉³

- (1. 中国热带农业科学院科技信息研究所//海南省热带作物信息技术应用
研究重点实验室, 海南 儋州 571737;
2. 中国热带农业科学院科技处, 海南 海口 571101;
3. 海南省气象科学研究所, 海南 海口 570203)

摘 要: 基于 HJ-1A/1B CCD 数据, 选取海南岛内 300 个训练样本, 分别计算了利用归一化差异水体指数、基于蓝光的归一化差异水体指数和混合水体指数 3 种指数模型识别水体时, 对林地、耕地、道路和居民地的区分度。结果表明, 在应用 HJ-1CCD 数据进行水体识别时, 混合水体指数模型的区分度最高(综合区分度为 34.16%), 是海南岛水体识别的最优模型。并确定了混合水体指数模型的最佳识别阈值(168.54)。利用混合水体指数模型高效地提取了 2014 年 2 月 24 日及 9 月 24 日海南岛的水体信息, 全岛水域面积分别为 677.41 km² 和 698.62 km²。经验证, 水体提取总体精度达 92.00%, 混合水体指数模型具有水陆区分度较大和水体提取精度较高的优点, 可以用来提取海南岛的水体信息。该文为海南岛水资源的优化配置与管理、洪涝灾害动态监测提供参考。

关键词: HJ-1A/1B CCD; 水体指数; 水体识别; CIWI; 海南岛

中图分类号: S127 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2016)01-0149-06

HJ-1A/1B CCD data-based water extraction in Hainan Island

LI Hailiang¹, WANG Xiuhua², LUO Hongxia¹, TIAN Guanghui³

- (1. Institute of Scientific and Technical Information, Chinese Academy of Tropical
Agricultural Sciences // Key Laboratory of Practical Research on Tropical
Crops Information Technology in Hainan, Danzhou 571737, China;
2. Department of Science and Technology, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences,
Haikou 571101, China;
3. Hainan Institute of Meteorological Sciences, Haikou 570203, China)

Abstract: The normalized difference water index (NDWI), normalized difference water index based on blue light (NDWI-B) and combined index of NDVI and NIR were applied to water body identification (CIWI), and the discrimination to farmlands, roadways and settlement places was calculated using HJ-1A/1B CCD data of 300 samples from the Hainan Island. The discrimination of CIWI water index model is the highest, with the comprehensive discrimination of 34.61% and it is the optimal model of water recognition in the Hainan Island. The best recognition threshold of CIWI water index model (168.54) was confirmed. It was used to extract water information on 24th of February and 24th of September, 2014 efficiently, with the total island water area of 677.41 km² and 698.62 km² respectively. The total accuracy of water extraction reaches 92.00%. The CIWI water index model has the advantages of large discrimination

^{*} 收稿日期: 2015-04-08

基金项目: 海南省自然科学基金资助项目(612119); 海南省气象局科研基金资助项目(HNQXZD201409)

作者简介: 李海亮(1977年生), 男; 研究方向: 热带农业遥感; E-mail: fondgis@163.com

of land and water and high precision extraction of water area, which can be used to extract water information of Hainan Island. This paper provides reference for optimized allocation and management and dynamic monitoring of flood disaster for water resources in Hainan Island.

Key words: HJ-1A/1B CCD; water index; water extraction; CIWI; Hainan Island

水体信息提取是水资源管理的一个重要内容,也是洪涝灾害监测的重要支撑^[1]。传统的水体信息提取方法工作量大、成本高、人为因素影响大,卫星遥感对地观测具有宏观性、周期性、及时性、准确性等特点。快速、准确地利用遥感影像及水体识别模型提取水体信息已成为水资源管理、洪涝灾害监测等领域的重要技术手段^[2]。

水体遥感识别的常用方法主要有单波段法、多波段法、水体指数法、微波遥感后向散射系数法等。单波段法是选择水体表征最明显的某些单一波段的阈值为识别参数,用阈值法识别水体的方法^[3-6]。单波段法简单易行,但进行水体识别时存在较多的混淆信息,水体识别精度低。多波段法是分析水体在多波段的值域特征,选择波段组合,并通过阈值识别水体的方法^[7-10]。多波段法水体识别精度比单波段法有所提高,但波段组合的选取和阈值的确定较为复杂,在利用多波段法提取水体时裸地的排除较为困难。微波遥感后向散射系数法是利用非水体对入射微波产生较强的后向散射被雷达天线接收,在 SAR 图像上形成较明亮的影像,与水体暗黑色影像形成鲜明对比,从而实现水体识别的方法^[11-13]。微波遥感后向散射系数法可以有效地排除云的干扰,但雷达数据不易获取,提取成本较高。水体指数法是基于多波段的水体光谱特征分析,构建水体指数模型,利用波段运算结果,并通过阈值实现水体识别的方法^[14-18]。水体指数法是多波段法的改进,随着水体指数模型的发展,水体提取的精度有所提高,但各种模型均存在着一定的缺陷与不足,对所用数据及研究区的特点均有不同程度的适用差别。

环境减灾卫星数据主要应用于农业灾害与生态环境监测两个方面^[19-22]。本文利用空间分辨为 30 m 的 HJ-1A/1B 数据,选取研究区一定量的训练样本,通过对 NDWI、NDWI-B 和 CIWI 三种水体指数模型的分析,选择基于 HJ-1A/1B 数据的最优水体识别模型,并确定水体识别阈值,高效地提取海南岛水体信息。为海南省洪涝灾害动态监测业务化运行提供数据和技术支持,为政府水资源利用、防灾减灾决策提供科学依据。

1 研究区与数据

1.1 研究区域

海南岛总面积约 3.39 万 km²,地处 108°37' - 111°03'E, 18°10' - 20°10'N, 位于热带北缘。整个岛屿呈 NE-SW 向延伸的椭圆形,地势中间高四周低,以岛中部的五指山为中心,向四周渐形成山地、丘陵、台地、平原的环形地貌(图 1)。岛内比较大的河流大都发源于中部山区,呈辐射状由中部向四周独流入海。全岛独流入海的河流共 154 条,其中集水面积超过 100 km² 的有 39 条,集水面积超过 500 km² 的河流有 18 条。南渡江、昌化江、万泉河为海南岛 3 大河流,集水面积均超过 3 000 km²,3 条河流域面积占全岛面积的 47%。全岛河川径流量为 388 亿 m³,约为全国总径流量的 1.1%。人均占有的河川径流量为 4 940 m³。海南岛属于典型的东亚季风型气候,同时又具有明显的热带气候特征,降水丰富且不均匀,台风暴雨多,极易发生洪涝。1949 - 1979 年,海南岛共出现洪涝灾害 20 次。20 世纪 80 年代以来发生次数增多,给海南岛造成重大损失^[23]。

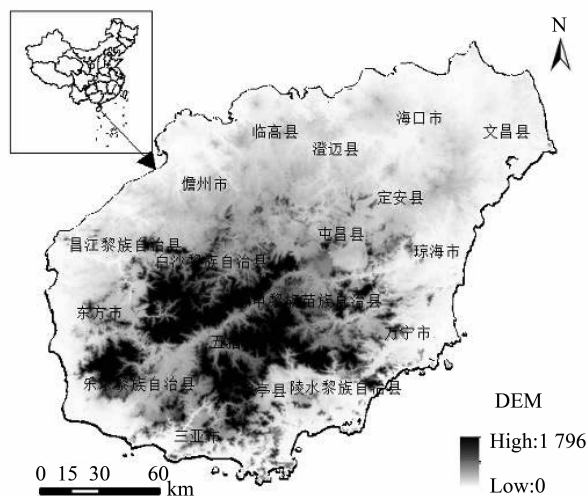


图 1 研究区位置

Fig. 1 Research region

1.2 数据来源与处理

1.2.1 遥感数据 本文所用环境减灾卫星数据来自中国资源卫星应用中心网站。分别选取 2014 年

2 月 24 日和 9 月 24 日覆盖海南岛的各两景 HJ-1A/1B CCD 影像。获取的数据属于二级产品，已经经过辐射粗校正和几何粗校正，需要对该数据做进一步的辐射校正（辐射定标、大气校正）和几何精校正等预处理。数据预处理过程为：① 辐射定标：利用中国资源卫星应用中心提供的辐射定标系数、大气层外太阳辐照度和影像头文件提供的相关参数，应用转换公式将 CCD 图像的 DN（digital number）值转换为图像的辐射亮度，再将辐射亮度转化为大气层顶的表现反射率^[24]。② 大气校正：应用 6S 辐射传输模型建立查找表对 HJ-1A/1B CCD 第 1-4 波段的反射率进行大气校正^[25]。③ 几何精校正：采用 GPS 实测地面控制点进行几何精校正，定位精度控制在一个像素之内。④ 镶嵌与裁剪：将经过辐射校正和几何精校正的 HJ-1A/1B CCD 影像进行镶嵌，用海南岛数字边界裁剪得到海南岛区域范围内的 HJ-1A/1B CCD 最终影像。

1.2.2 样本数据 2014 年 9 月 24 日前后，在研究区内，使用 GPS 实地选取水体样本 100 个，林地、耕地、道路、居民地样本各 50 个（图 2）。并进行遥感信息、样本数据的融合。

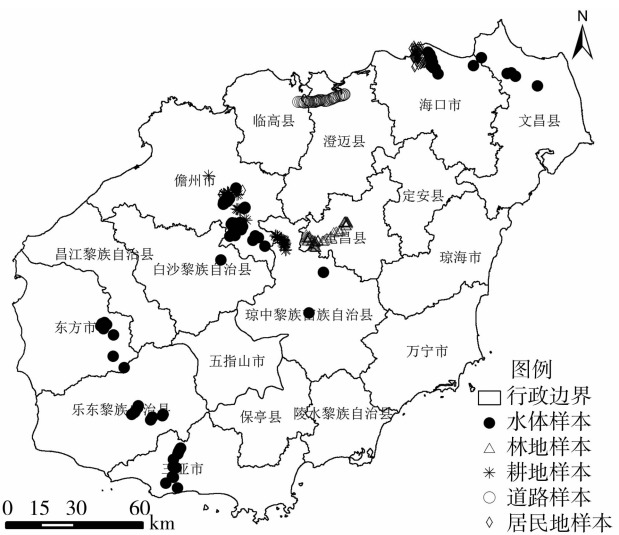


图 2 样本分布图
Fig. 2 Locations of sampling points

2 研究方法

2.1 水体指数模型

2.1.1 归一化差异水体指数 水体独特的谱间关系特征，利用多个波段的综合特点提取水体是近年的研究重点。谱间关系法是利用水体和非水体在不同波段（或不同波段组合）之间光谱特征的差

异，建立逻辑判断公式，对水体与非水体进行区分。最早最具代表性的水体指数是由 Mcfeeters 提出的归一化差异水体指数 NDWI^[26]，其计算公式如下

$$NDWI = \frac{\rho(GREEN) - \rho(NIR)}{\rho(GREEN) + \rho(NIR)} \tag{1}$$

式中 $\rho(GREEN)$ 、 $\rho(NIR)$ 分别为绿光和近红外波段的反射率，即分别为 HJ-1A/1B CCD 影像中第 2、4 波段的反射率。NDWI 为归一化差异水体指数，取 -1~1。由于水体的反射从可见光到中红外波段逐渐减弱，在近红外波段范围内几乎无反射，而植被在近红外波段的反射率一般最强。因此用可见光波段和近红外波段的反差构成的 NDWI 在抑制植被影响的同时增强了水体目标的表达（水体 NDWI 值大，植被 NDWI 值小）。根据 NDWI 的计算原理，水体的 NDWI 指数较高，理论数值大于 0；其他地物的 NDWI 小于 0，且最小值不小于 -1。

2.1.2 基于蓝光的归一化差异水体指数 NDWI 指数能把植被、耕地与水体区分，但湿地是纯水体、植被、土壤的混合体，其光谱特征包含了三者的特点，不易被提取出来。根据光谱分析，在归一化差异水体指数模型中用蓝光代替绿光可以将湿地与植被、耕地等区分出来。由此建立基于蓝光波段的归一化差异水体指数模型 NDWI-B^[1]，其计算公式如下：

$$NDWI - B = \frac{\rho(BLUE) - \rho(NIR)}{\rho(BLUE) + \rho(NIR)} \tag{2}$$

式中， $\rho(BLUE)$ 、 $\rho(NIR)$ 分别为蓝光和近红外的反射率，即分别为 HJ-1A/1B CCD 影像中第 1、4 波段的反射率。根据 NDWI-B 的计算原理，水体的 NDWI-B 值最大，湿地的 NDWI-B 值其次，其他地物的 NDWI-B 最小。

2.1.3 混合水体指数 NDWI 指数能很好地区分水体与植被，但不能有效地区分水体与城镇。根据分析发现，在近红外波段城镇的反射率最高，水体的反射率最低，城镇与水体光谱差异最大，易于区分水体与城镇。据此，先用近红外通道的反射率与反射率均值的比值构建无量纲数，再将其与 NDVI 求和，使水体保持在低值区，城镇处于高值区，植被介于两者之间，从而增强三者之间的差异。由此定义混合水体指数模型 CIWI^[17]，其计算公式如下：

$$CIWI = \frac{\rho(NIR) - \rho(RED)}{\rho(NIR) + \rho(RED)} \cdot C + \frac{\rho(NIR)}{\rho(NIR)} \cdot C + C \tag{3}$$

式中， $\rho(RED)$ 、 $\rho(NIR)$ 分别为红光和近红外的

反射率，即分别为 HJ-1A/1B CCD 影像中第 3、4 波段的反射率； $\bar{\rho}(\text{NIR})$ 为近红外反射率均值；C 为常数。

2.2 模型优选及阈值设定

为了表达水体提取模型识别水体和非水体目标的能力，引入区分度 DD (Division Degree)^[17]，其计算公式为：

$$DD = \frac{|\overline{WI_n} - \overline{WI_w}|}{\overline{WI_n} + \overline{WI_w}} \times 100\% \tag{4}$$

式中， $\overline{WI_n}$ 、 $\overline{WI_w}$ 分别表示非水体和水体的水体指数均值，DD 反映了水体指数中水体与非水体的差异程度，DD 越大表示两者可分离程度高，DD 越小则表示两者难于区分。

通常应用阈值法对水体指数划分不同的取值范围，将水体目标和非水体目标分离。本文根据前人经验^[25]及数据直方图特点，通过采样点的水体指数值与地物类型的反复比对寻找水体指数模型的合理阈值，使之在提取研究区水体时破碎图斑较少、水体目标与非水体目标能较好地分离。

2.3 精度验证

遥感数据分类的不确定性通常用误差矩阵来度量，从误差矩阵中可以计算出分类精度的指标。误差矩阵有时也称为混淆矩阵，是一个用于表示分为某一类别的样本个数与地面检验为该类别数的比较阵列。根据误差矩阵可以导出若干关于总体分类或对于某一类别分类的精度描述指标^[27]。总体精度用误差矩阵内对角线元素之和除以总的采样个数来表示的，表 1 中该值为 $(45 + 61 + 70) / 200 = 88.00\%$ ，即总体分类精度为 88.00%。为描述对某一类别的分类精度，定义了生产者精度和用户精度。类别 A 的生产者精度定义为：类别 A 的正确分类个数除以对于类别 A 的总采样个数（即 A 的列总和）。表 1 中类别 A 生产者精度为： $45 / 50 = 90.00\%$ 。该指标指出了地面采样点被正确地分类的概率。另一方面，类别 A 的用户精度定义为：正确分类为 A 的个数除以分为类别 A 的总和（即 A 的行总和）。表 1 中类别 A 用户精度为 $45 / 52 = 86.50\%$ 。该指标指出一个采样分类点表示实际地面真实情况的百分比。

3 结果与分析

3.1 最优模型及水体提取阈值

为了便于比较和分析，对 NDWI、NDWI-B 两种水体指数进行放大和平移^[17]。修正后的计算公式如下：

$$NDWI = \left[\frac{\rho(\text{GREEN}) - \rho(\text{NIR})}{\rho(\text{GREEN}) + \rho(\text{NIR})} + 1 \right] \cdot C \tag{5}$$
$$NDWI - B = \left[\frac{\rho(\text{BLUE}) - \rho(\text{NIR})}{\rho(\text{BLUE}) + \rho(\text{NIR})} + 1 \right] \cdot C \tag{6}$$

表 1 误差矩阵实例

Table 1 Example of error matrix					个
项目	地面真实数据				
	A	B	C	合计	
A	45	2	5	52	
B	3	61	5	69	
C	2	7	70	79	
合计	50	70	80	200	

式中，C 为常数，为保证各类水体指数处于正值区间，本文 C 取值为 100，同时公式（3）中的常数 C 也取值为 100。

为系统地比较 3 种水体指数的水体提取效果，本文以水体为提取目标，以耕地、林地、道路、居民地为背景地物，计算相关区分度 DD 值。由表 2，CIWI 在提取水体时，对林地、耕地、道路和居民地的区分度均高于 NDWI 和 NDWI-B，综合区分度为 34.16%。应用 HJ-1A/1B CCD 数据提取水体时，CIWI 模型要优于 NDWI 模型和 NDWI-B 模型，因此本文选用 CIWI 模型进行海南岛的水体提取。通过采样点的水体指数值与地物类型的反复比对，发现阈值设定为 168.54 时提取的水体目标效果最佳。

表 2 3 种水体指数提取水体的区分度¹⁾

水体指数	to recognize the water				%
	林地	耕地	道路	居民地	综合
NDWI	38.59	35.94	16.90	15.24	25.77
NDWI-B	38.40	36.82	25.56	25.52	31.30
CIWI	42.76	39.35	28.53	27.34	34.16

1) 水体样本数 100 个，林地、耕地、道路、居民地样本各 50 个。

3.2 水体提取精度验证

以 2014 年 9 月 24 日 HJ-1A/1B CCD 数据为数据源，以 168.54 为阈值，使用 CIWI 模型提取海南岛水体信息，结合实测样本数据，利用误差矩阵原理制作水体识别精度验证数据。由表 3，水体、林地、耕地、道路、居民地的生产者精度分别为 95.00%、100.00%、94.00%、86.00%、82.00%，说明水体、林地、耕地、道路、居民地被正确分类的概率较高。另一方面水体与非水体的用户精度分别

为 83.33%、97.31%，说明水体、非水体分类点表示实际地面真实情况的百分比较高。水体提取总体精度达 92.00%。综上所述以 168.54 为阈值利

用 CIWI 模型提取水体精度较高，可以用来提取海南岛的水体信息。

表 3 水体提取精度验证数据¹⁾
Table 3 Accuracy verification for water extraction

项目		实测数据/个						用户精度/%
		水体	林地	耕地	道路	居民地	合计	
提取结果 /个	水体	95	0	3	7	9	114	83.33
	非水体	5	50	47	43	41	186	97.31
	合计	100	50	50	50	50	300	—
生产者精度/%		95.00	100.00	94.00	86.00	82.00	—	—
总体精度/%		92.00						

1) 水体样本 100 个,林地、耕地、道路、居民地样本各 50 个

3.3 海南岛水体提取结果

以海南岛 2014 年 2 月 24 日及 9 月 24 日的 HJ-1A/1B CCD 数据为数据源，以 168.54 为阈值，利用 CIWI 模型分别提取海南岛枯水季和丰水季的水体信息。提取结果如图 3，经统计，丰水季（9 月 24 日）全岛水域面积为 698.62 km²，较枯水季（2 月 24 日）大 21.21 km²。9 月 24 日，儋州拥有海南岛最大的水库（松涛水库），水域面积为

159.18 km²，居全岛第 1 位；东方拥有海南岛第 2 大水库（大广坝水库），水域面积 89.01 km²，居全岛第 2 位；文昌拥有大量的鱼塘，水域面积 88.62 km²，居全岛第 3 位。水域面积后 3 位的市县分别是保亭、琼中、五指山。研究发现，由于 HJ-1A/1B CCD 数据空间分辨为 30 m，一些细小的水渠、溪流没有被有效提取。

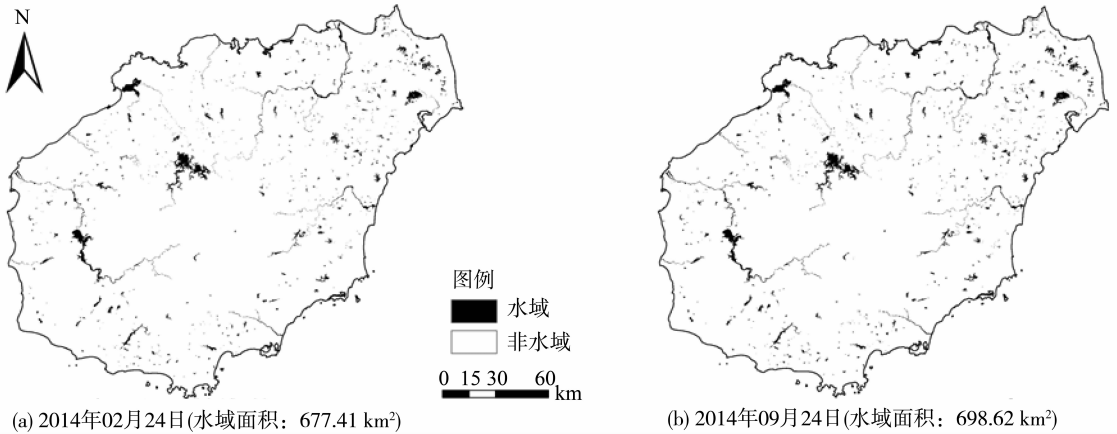


图 3 海南岛水体分布图（2014 年 2 月 24 日及 9 月 24 日）
Fig. 3 Water extraction results in Hainan Island on Feb. 24th and Sept. 24th, 2014

4 结 论

本文，用空间分辨为 30 m 的 HJ-1A/1B CCD 数据，选取研究区 300 个训练样本，利用区分度 DD 比较分析了 NDWI、NDWI-B 和 CIWI 三种指数模型的水体识别效果。结果表明，在应用 HJ-1CCD 数据进行水体识别时，CIWI 水体指数模型的区分度最高（综合区分度为 34.16%），是海南岛

水体识别的最优模型。通过采样点的水体指数值与地物类型的反复比对，确定了 CIWI 水体指数模型的水体识别阈值为 168.54。经实测样本数据验证，水体、林地、耕地、道路、居民地的生产者精度分别为 95.00%、100.00%、94.00%、86.00%、82.00%，水体与非水体的用户精度分别为 83.33%、97.31%，水体提取总体精度达 92.00%，说明 CIWI 模型提取水体精度较高，可

以用来提取海南岛的水体信息。利用 CIWI 模型高效地提取了 2014 年 2 月 24 日及 9 月 24 日海南岛的水体信息, 全岛水域面积分别为 677.41 km^2 和 698.62 km^2 。丰水季 (9 月 24 日) 水域面积较枯水季 (2 月 24 日) 水域面积大 21.21 km^2 , 岛内水域面积前 3 位的市县分别为儋州、东方、文昌, 水域面积后 3 位的市县分别是保亭、琼中、五指山。研究发现 CIWI 模型能有效地提取分散水体 (如鱼塘、小型水库等), 但由于 HJ-1A/1B CCD 数据空间分辨为 30 m , CIWI 模型在提取细小的水渠、溪流时效果不佳, 有离散及丢失的现象。研究还发现 CIWI 模型在提取纯净水体时效果良好, 但在提取混合像元、湿地时区分度不高。因此, 为了满足洪涝灾害监测的要求, 今后应在如何区分混合像元、精确提取湿地等方面做进一步的探讨。

参考文献:

- [1] 曲伟, 路京选, 李琳, 等. 环境减灾小卫星影像水体和湿地自动提取方法研究[J]. 遥感信息, 2011(4): 28-33.
- [2] 李海亮, 戴声佩, 胡盛红, 等. 海南岛农业干旱综合监测研究[J]. 中山大学学报 (自然科学版), 2012, 51(6): 126-130.
- [3] SHIH S F. Comparison of ELAS classifications and density slicing Landsat data for water surface area assessment [C] // JOHNSON A I. Hydrologic applications of space technology (Publication No 160). Intl Assoc Hydrological Sci, 1985.
- [4] BARTON I J, BATHOLS J M. Monitoring floods with AVHRR[J]. Remote Sensing of Environment, 1989, 30(1): 89-94.
- [5] 陆家驹, 李士鸿. TM 资料水体识别技术的改进[J]. 环境遥感, 1992, 7(1): 17-23.
- [6] 范磊, 刘婷. CBERS-02 星 CCD 数据在水灾监测中的应用——以河南新蔡县为例[J]. 河南理工大学学报 (自然科学版), 2009, 28(3): 312-315.
- [7] 张淑杰. 洪涝灾害遥感监测与灾情评价方法研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2005.
- [8] 王随霞. 基于 MODIS 数据的黄河下游洪水遥感监测研究[D]. 南京: 河海大学, 2006.
- [9] 梁益同, 刘可群, 周守华, 等. EOS-MODIS 数据监测暴雨洪涝灾害的技术方法[J]. 暴雨灾害, 2008, 27(1): 64-67.
- [10] 黄伟锋, 李茂堂, 崔旭东. 中巴地球资源一号 02B 星在广西水库监测中的应用[J]. 水利水电技术, 2010, 41(7): 79-82.
- [11] 曹云刚, 刘闯. EnviSat ASAR 数据在水情监测中的应用[J]. 地理与地理信息科学, 2006, 22(2): 13-15.
- [12] 许丽娜, 李炯, 牛瑞卿. 基于 ASAR 和 ETM 影像的洪水淹没分析[J]. 测绘信息工程, 2010, 35(4): 12-14.
- [13] 聂娟, 范一大, 邓磊, 等. 山洪灾害雷达遥感灾情评估技术研究与应用[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(3): 105-110.
- [14] McFEETERS S K. The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7): 1425-1432.
- [15] 刘勇洪, 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.
- [16] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数 (MNDWI) 提取水体信息[J]. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595.
- [17] 莫伟华, 孙涵, 钟仕全, 等. MODIS 水体指数模型 (CIWI) 研究及其应用[J]. 遥感信息, 2007(5): 16-21.
- [18] 闫需, 张友静, 张元. 利用增强型水体指数 (EWI) 和 GIS 去噪音技术提取半干旱地区水系信息的研究[J]. 遥感信息, 2007(6): 62-67.
- [19] 夏天, 周清波, 陈仲新, 等. 基于 HJ-1 卫星的冬小麦叶片 SPAD 遥感监测研究[J]. 中国农业资源与区划, 2012, 33(6): 38-44.
- [20] 蒙继华, 吴炳方, 杜鑫, 等. 基于 HJ-1A/1B 数据的冬小麦成熟期遥感预测[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 225-230.
- [21] 李强子, 闫娜娜, 张飞飞, 等. 2010 年春季西南地区干旱遥感监测及其影响评估[J]. 地理学报, 2010, 65(7): 771-780.
- [22] 宫鹏, 张晗, 张海英, 等. 用中国环境减灾卫星 1 号数据评估日本仙台 9.0 级大地震引发海啸淹没区[J]. 遥感学报, 2011, 15(4): 863-868.
- [23] 胡玉萍. 建国 40 年间 (1949~1988 年) 海南岛自然灾害及其抗灾举措研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2007.
- [24] 李慧芳. 多时空条件下 HJ-1 卫星地表反照率反演方法研究[D]. 郑州: 河南理工大学, 2012.
- [25] 孙长奎, 孙林, 麻盛芳, 等. HJ-1 CCD 数据大气校正方法研究[J]. 遥感学报, 2012, 16(4): 826-836.
- [26] McFEETERS S K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7): 1425-1432.
- [27] 承继成, 郭华东, 史文中. 遥感数据的不确定性问题[M]. 北京: 科学出版社, 2004.