

# 黄海绿潮多源卫星遥感业务化监测需求分析与系统设计

丁一<sup>1,2</sup>, 曹丛华<sup>1,2</sup>, 黄娟<sup>1,2</sup>, 钟山<sup>1,2</sup>, 王宁<sup>1,2</sup>, 胡伟<sup>1,2</sup>, 高松<sup>1,2</sup>

(1. 山东省海洋生态环境与防灾减灾重点实验室, 山东 青岛 266061; 2. 国家海洋局北海预报中心, 山东 青岛 266061)

**摘要:** 在分析黄海绿潮卫星遥感监测需求基础上, 设计了绿潮多源卫星遥感业务化监测系统。系统设计包括: 卫星数据源选择, 多源卫星影像绿潮信息提取方法、多源监测结果融合方法和绿潮信息提取总体流程, 系统功能模块设计, 系统研发语言和平台选择, 以及监测报告、数值模拟初始场等产品的设计。为其后的系统研发中的中低分辨率信息提取、多源监测结果信息融合等关键问题提供了解决思路和方法。系统研发后可为黄海绿潮防灾减灾应急决策提供及时、准确、全面的绿潮监测信息。

**关键词:** 绿潮; 多源卫星影像; 业务化监测; 系统设计; 信息融合

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 1000-3096(2015)02-0085-06

doi: 10.11759/hyqx20141011016

2008 年我国黄海浒苔(*Enteromorpha*)大面积暴发, 对沿岸养殖、航运、旅游、海上运动都造成较大影响<sup>[1]</sup>, 引起全社会关注。在国家卫星海洋应用中心、中国科学院遥感研究所、北海分局等单位合作下开展了绿潮监测, 为绿潮减灾决策提供了技术支持, 为奥运会帆船比赛的顺利进行保驾护航。在此次监测中基本解决了应用多源遥感数据开展绿潮提取的问题<sup>[2-3]</sup>。此后国家海洋局北海预报中心开展黄海绿潮的业务化监测工作, 并向沿岸受灾各省市发布监测、预警信息。

业务化监测工作包括影像预处理、信息提取和融合、成果制作等多个环节, 用到遥感图像处理、GIS 制图、Microsoft Office 办公多款软件。一天工作往往需要 5~6 h, 工作量大、效率较低, 很难满足绿潮防灾减灾应急决策需求。因此设计研发绿潮业务化监测系统, 提高绿潮业务化监测服务效率是急需解决问题。

本文拟在分析绿潮监测需求基础上, 设计绿潮业务化监测系统的数据源、监测算法和流程、多源监测结果融合方法和监测成果。系统设计为系统研发中的难点提供思路和方法, 系统研发后可为黄海绿潮防灾减灾应急决策提供高效、准确、全面的绿潮监测信息。

## 1 需求分析

在绿潮的不同发展时期绿潮卫星遥感监测需求有共同点也有不同点, 分析如下。

**共同点:** 整个绿潮发生期内都需提供全面、准确、及时的绿潮监测结果, 并利用卫星遥感监测结果

按照绿潮漂移预测的需要制作绿潮初始场。监测结果可为绿潮灾害预警等级确定以及防灾减灾决策指挥提供科学依据。

**不同点:** (1)发展初期。一般是每年 5 月和 6 月上旬, 此时绿潮分布在苏北浅滩附近海域, 绿潮斑块小、分布范围小, 该时期侧重早发现和跟踪监测。(2)暴发期。此时随着时间推移, 绿潮在海流和风的影响下会往北和东北方向漂移扩散, 绿潮此时覆盖面积和分布范围很大。若绿潮跨过 35°N 并进入沿海受灾地市“警戒区”, 需要单独统计 35°N 以北和各警戒区绿潮信息。如果绿潮面积和将来漂移趋势达到绿潮灾害预警等级, 那么此时对绿潮监测结果提交时间有较高要求, 必须以最快速度开展绿潮监测并将结果发往受灾各省市绿潮防灾减灾应急决策指挥部门。

## 2 系统设计

### 2.1 数据源选择

不同星源影像特点不同, 低空间分辨率影像幅宽大、回访周期短, 高空间分辨率影像, 回访周期长、幅宽小; 光学影像受天气影响, 云雨天不能监测到绿潮信息, SAR 影像具有全天时全天候的监测能力。

收稿日期: 2014-10-11; 修回日期: 2014-11-18

基金项目: 海洋公益性行业科研专项经费项目(201205010); 国家海洋局青年海洋科学基金项目(2012405)

作者简介: 丁一(1979-), 男, 山东日照人, 工程师, 硕士研究生, 主要从事海洋卫星遥感监测和 GIS 应用研究, 电话: 15092221639, E-mail: dingyi@bhj.gov.cn

综合分析绿潮卫星遥感监测需求和上述星源影像特点, 将影像选择方案定为: (1)绿潮初期, 针对苏北浅滩重点海域, 应用较高空间分辨率影像监测; (2)大面积暴发期, 利用幅宽大、空间分辨率较低影像, 在单景不能全覆盖情况下综合利用多源影像全面监测绿潮; (3)在多云雾天气下, 编程订购 SAR 卫星影像; (4)所选取的星源影像都必须卫星过境后 1~4 h 内提交影像资料。按照上述方案, 不同时期选取的光学和 SAR 影像见表 1。需要指出的是国产 HJ-1 CCD

影像具有较高空间分辨率和宽刈幅特点, 适合于各个绿潮监测时期。

## 2.2 监测算法和流程设计

参考前期研究成果<sup>[2-3]</sup>, 结合上文中业务监测需求分析, 将绿潮卫星遥感业务化监测流程设计为: 影像预处理、信息提取、多源监测信息融合和成果制作四个部分(图 1)。流程中涉及的 6 个关键步骤算法及其流程分述如下。

表 1 不同时期绿潮监测数据源

Tab. 1 Green tide monitoring data at different periods

时期	数据源	波段	空间分辨率(m)	幅宽(km)	覆盖周期(d)
初期	HJ-1 CCD	B, G, R, NIR	30	700	2~3
	Radarsat-2	C	3, 6, 12	50, 125, 150	2~3
	COSMO	X	3, 30	40, 100	1/2
	Terra-SAR	X	18	100	11
发展期和暴发期	MODIS	R, NIR	250	2330	1/2
	HJ-1 CCD	B, G, R, NIR	30	700	2~3
	Rardarsat-2	C	50, 100	300, 500	2~3
	COSMO	X	100	200	1/2

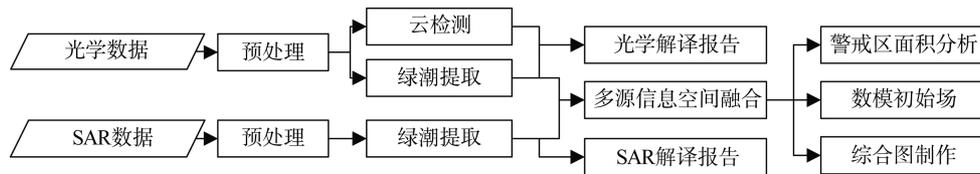


图 1 绿潮信息监测流程

Fig.1 The green tide information monitoring process

### 1) 影像预处理

光学影像和 SAR 影像绿潮提取之前都需要进行预处理, 光学影像预处理包括辐射校正、几何校正和大气校正, 系统采用暗像元法进行大气校正, 其不需要额外参数输入、运行效率高且可保证较高精度<sup>[4-5]</sup>。SAR 影像进行辐射定标预处理, 将影像 DN(Digital Number)值转化为后向散射系数。上述所有预处理仅需输入影像, 不许额外参数输入, 因此系统采用“一键处理”的方式, 无人交互过程, 从而提高业务化监测效率。

### 2) 绿潮提取

光学影像信息提取部分包括云提取、NDVI(Normalized Difference Vegetation Index)计算和绿潮信息提取。HJ-1 CCD 影像分辨率较高, 应用 NDVI 阈值法提取; MODIS 影像空间分辨率较低, 混合像元

存在导致阈值法提取结果误差较大<sup>[6]</sup>, 因此拟参考同步 HJ-1 CCD 提取结果, 建立“NDVI 与绿潮像元丰度”关系的混合像元分解模型, 开展 MODIS 影像绿潮信息提取。SAR 影像应用后向散射阈值法进行绿潮信息提取。

为满足业务化监测对效率和检测信息的准确性的需求, 在光学影像和 SAR 影像绿潮信息提取前, 人工勾画 ROI(Region of Interest), 然后仅对 ROI 内的影像进行绿潮信息提取, 可有效去除云雾、耀斑、噪声等干扰信息, 从而保证信息提取的准确性。HJ-1 CCD 影像不勾画 ROI 和勾画 ROI 时提取结果对比见图 2。未勾画 ROI 时图中右边云误提取为绿潮(图 2b), 勾画时有效去除云的影响(图 2c)。勾画 ROI 时仅对其范围内图像进行绿潮提取, 可以缩短绿潮提取时间。



图2 勾画与不勾画 ROI 绿潮监测结果对比图

Fig. 2 The comparison diagram of the monitoring result between the cases of outlining and not outlining the ROI

a.HJ-1 CCD NDVI 图, 白框为 ROI; b.未勾画 ROI 时绿潮提取结果; c.勾画时 ROI 绿潮提取结果

a. HJ-1 CCD NDVI image, the white line is ROI; b. green tide monitoring result in the case of not outlining ROI; c. green tide monitoring result in the case of outlining ROI

### 3) 多源信息融合

为满足全面获取绿潮信息的业务监测需求, 在绿潮大面积发展和暴发期或者云雾遮挡情况下, 需进行多源信息融合获得尽量全面的绿潮覆盖分布状况。多源信息融合存在两个问题: (1)多源影像空间分辨率不同, 监测能力以及混合像元存在导致监测结果精度也不同<sup>[7]</sup>; (2)不同星源成像时间不同, 监测结果存在时间差。为了解决这两个问题, 拟利用2008~2014年多期不同影像监测结果, 开展统计分析, 获得不同影像与HJ-1 CCD提取结果面积比例系数, 把不同星源监测精度统一到HJ-1 CCD监测精度水平, 以便于多源信息融合和多期动态对比分析。对于时间不统一的问题, 拟利用已经业务化运行的数值漂移溯源模式<sup>[8-10]</sup>, 将不同时间结果统一到一个

基准时刻。通过这两步处理, 获得时间同步、精度统一的多源监测结果。然后应用GIS空间分析功能去除多源结果存在的重叠区, 并制作完整的绿潮融合图(流程见图3)。

应用上述流程制作SAR和可见光融合示例如图4, 图4中a、b图中绿色图斑为上午10:00, 250 m分辨率MODIS提取结果, 图4a中, 蓝色图斑为同日上午6:00, 30 m分辨率COSMO SAR提取结果, 黑框为其范围, 受云的影响在SAR影像范围内MODIS仅能提取少部分绿潮信息。考虑到MODIS结果范围大, 且成像时间对绿潮减灾决策更具有时效性, 因此以上午10:00结果为基准。首先将6:00 SAR提取结果应用绿潮漂移数值模式<sup>[8]</sup>计算到10:00的位置(图4b中棕色图斑)。然后进行叠加分析获取MODIS提取

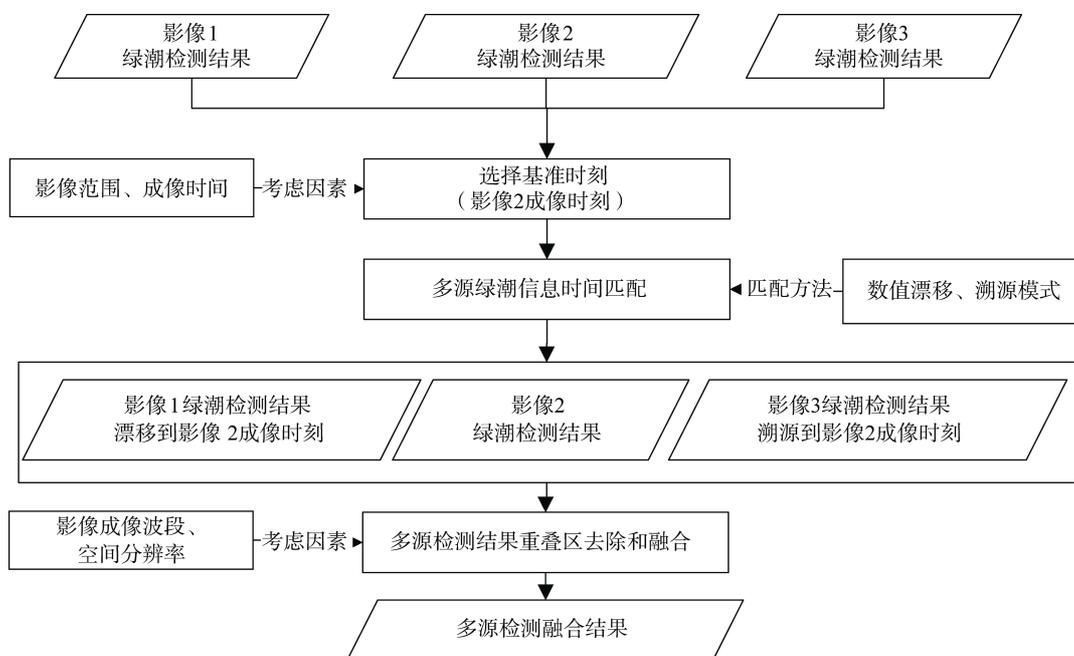


图3 多源监测信息融合流程

Fig. 3 Fusion flowchart of multi-source monitoring information



图 4 多源监测结果融合示例

Fig. 4 Example of multi-source monitoring information fusion process

a. 绿色是 MODIS 提取结果, 蓝色是 SAR 提取结果, 黑框为 SAR 范围; b. 绿色是 MODIS 提取结果, 棕色为 SAR 漂移预测结果; c. MODIS 和 SAR 监测结果融合图

a. green and blue patches represent green tide monitoring results of MODIS and SAR respectively, black frame is the range of SAR image; b. green patches represent MODIS monitoring result(same to in a), brown patches represent the floating forecasting result of SAR monitoring result; c. fusion image of MODIS and SAR monitoring results

结果与 SAR 漂移预测结果的重叠区域, SAR 在重叠区域不受云雾影响, 且分辨率较高, 因此先将 MODIS 的监测结果去除重叠区域, 然后与 SAR 漂移预测结果合并为融合结果(图 4c)。

4) 分布范围自动提取

单景影像结果和多元融合结果都涉及分布范围提取的问题, 以往是利用人工勾绘, 不同人员勾绘结果存在差异, 效率较低。为解决上述问题, 系统设计以距离  $d$  对绿潮结果进行缓冲分析, 然后去除缓冲分析面内“孤岛”, 对于距离小于  $D$  的分布区域进行连接合并, 将处理的区域作为最终的分布区, 并统计该区面积作为分布面积。

5) 特定区域面积统计

为满足受绿潮灾害影响的各地市防灾减灾需要, 系统设计统计  $35^{\circ}N$  以北以及各警戒区面积, 并制作绿潮漂移预测初始场。面积统计应用该日多源监测融合结果和不同警戒区进行叠加分析, 进而统计各同区域内的绿潮覆盖和分布面积。

6) 漂移预测初始场制作

为满足绿潮灾害管理者准确把握灾害趋势, 制定合理应急方案, 需要对绿潮开展漂移预测工作, 系统可利用监测融合结果为绿潮漂移预测提供初始场。应用提取的绿潮像元进行漂移预测, 绿潮像元往往到达几十万个, 运算量大耗时长, 应用高性能计算机也需要几个小时。所以通常应用分布边界角点进行漂移预测, 但预测结果仅能表达绿潮整体漂移趋势。为了同时能逼真模拟绿潮漂移预测, 系统设计增加绿潮像元点初始场。为了降低数值漂移模式运算时间, 对绿潮像元初始场采用“窗口”策略进行抽稀处理, 使抽吸结果能反应绿潮不同区域疏密差异, 又保留稀疏区, 按照漂移预测模式运算时间确定抽吸后保留点数  $N$ , 这样可大幅度降低运行时间, 且能保持模拟结果的逼真。

2.3 系统功能模块设计

按照业务化监测流程, 方便监测人员操作, 系统功能上分为数据管理、信息提取、产品制作、系统设置 4 个模块, 见图 5。

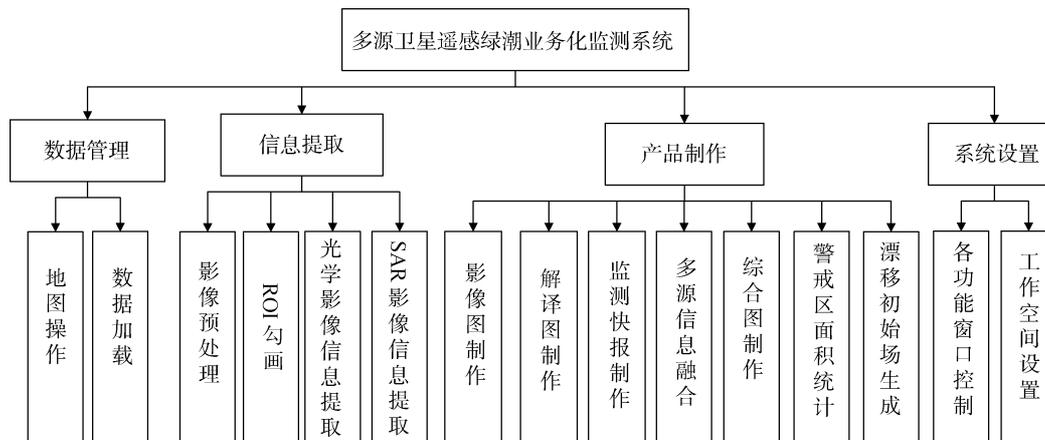


图 5 系统功能模块

Fig. 5 System function modules

数据管理模块包括：地图操作和数据加载，地图操作包括新建、删除、打开、另存，数据加载包括栅格图和矢量图层加载。信息提取模块：包括影像预处理、ROI 勾画、SAR 信息提取、光学影像信息提取。影像预处理中，可见光影像预处理包括辐射定标、大气校正、云提取、假彩色图合成，SAR 影像预处理包括辐射定标。产品制作模块：包括可见光和 SAR 影像图制作、解译图制作和监测报告制作、多源信息融合、综合图制作、警戒区面积统计和漂移初始场制作。系统设置模块：包括工作空间设置和工具栏、状态栏等窗口显示控制。

## 2.4 开发平台

系统功能涉及遥感图像处理、地理空间分析、制图和监测报告制作等内容的融合处理和业务集成。综合考虑各方面因素，系统采用 C#语言结合 IDL 和 ArcEngine 进行开发。IDL 实现遥感数字图像处理功能，ArcEngine 实现地理空间分析和制图，C#调用 MS Office 组件实现监测报告制作。多平台联合开发，可发挥各平台优势，便于功能实现，提高开发效率，同时保证了用户界面的友好。

## 3 系统产品设计

按照绿潮防灾减灾需求，设计监测产品包括：光学影像监测报告、SAR 影像监测报告、多源绿潮监测结果融合图、警戒区面积统计结果、漂移预测初始场。

光学影像监测报告主要内容包括影像介绍、绿潮监测结果介绍、解译人员和核对人员，影像图和解译图，其中影像图包括影像数据源、成像时间、制作单位和制作时间，解译图包括云结果、绿潮监测覆盖面积和分布面积、制作单位和制作时间；SAR 影像监测报告中解译图不包含云检测结果，其余内容相同。多源融合图内容包括绿潮融合结果、融合结果来源、结果时间、综合覆盖和分布面积、制作单位和日期等。警戒区绿潮结果包括警戒区内的绿潮覆盖面积、分布面积、以及绿潮在警戒区的覆盖率。数值模拟初始场按照数值漂移模式要求，制作含有边界角点和内部抽稀后绿潮像元经纬度坐标的文件。

其中，多源融合图、警戒区结果文件和数值模拟初始场监测结果文件提交数值模拟工作人员，结合模拟结果制作统一的绿潮预警报告，发往国家海洋局灾害应急管理部门和受绿潮灾害影响的各省、市绿潮灾害应急决策处置部门。

## 4 结论

本文分析了黄海绿潮不同时期对卫星遥感监测的需求，并在此基础上设计了黄海绿潮业务化监测系统。系统设计主要内容有：(1)结合绿潮不同生长期特点、各星源特点以及防灾减灾决策需求，选择可用于绿潮监测的卫星数据源。(2)根据绿潮灾害防灾减灾决策对卫星监测需求，设计了能及时、准确、全面监测绿潮灾害的卫星遥感业务化监测算法和流程。例如，影像预处理采用“一键操作”方式，减少人机交互，可提高系统运行效率；绿潮信息检测中加入勾画 ROI 步骤，可去除云、雾、噪声对绿潮监测的影响，提高监测精度，同时可减少信息提取时间；指出多源监测信息融合前需要解决各星源监测结果精度不统一和时间不同步这两个问题，提出将各星源监测结果统一到 HJ-1 CCD 影像监测精度以及应用数值漂移、溯源模式将多源监测结果同步到同一基准时刻的解决方案，并设计了多源监测信息融合流程；根据绿潮灾害管理和防灾减灾部门的需求，设计监测产品和内容，如绿潮整体覆盖分布面积、不同区域覆盖分布面积、绿潮漂移预测初始场等等。

系统设计为其后的系统研发提供了关键问题的解决思路和方法。系统研发后可以服务于黄海绿潮业务化卫星遥感监测，能及时、准确提供全面的黄海绿潮覆盖分布信息，统计 35°N 以北以及各警戒区绿潮覆盖分布信息，可为绿潮漂移预测数值模拟系统制作初始场，为绿潮防灾减灾应急决策管理部门提供科学依据。

参考文献：

- [1] 邢婷. 浒苔之困[N]. 中国青年报, 2011-08-01(5).
- [2] 蒋兴伟, 刘建强, 邹斌, 等. 浒苔灾害卫星遥感应急监视监测系统及其应用[J]. 海洋学报, 2009, 1: 52-64.
- [3] 顾行发, 陈兴峰, 尹球, 等. 黄海浒苔灾害遥感立体监测[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 6: 1627-1632.
- [4] Ahern F J, Goodenough D G, Jain S C, et al. Use of clear lakes as standard reflectors for atmospheric measurements[C]. International Committee on Remote Sensing of Environment. Proceedings of the 11th International Symposium on Remote Sensing of Environment. Ann Arbor, MI: Environment Research Institute of Michigan, 1977: 731-775.
- [5] Gordon H R. Removal of atmospheric effects from satellite imagery of the ocean[J]. Applied Optics, 1978,

- 17(13): 1631-1636.
- [6] 钟山, 丁一, 李振, 等. MODIS 浒苔遥感监测误差分析研究[J]. 遥感信息, 2013, 28(1): 38-42.
- [7] Cui Tingwei, Zhang Jie, Sun Lie, et al. Satellite monitoring of massive green macroalgae bloom: imaging ability comparison of multi-source data and drifting velocity estimation[J]. International Journal of Remote Sensing, 2012, 33(17): 5513-5527.
- [8] 黄娟, 吴玲娟, 高松, 等. 黄海绿潮应急漂移数值模拟[J]. 海洋预报, 2011, 1: 25-32.
- [9] 吴玲娟, 曹丛华, 黄娟, 等. 黄海绿潮应急溯源数值模拟初步研究[J]. 海洋科学, 2011, 6: 44-47.
- [10] 白涛, 黄娟, 高松, 等. 黄海绿潮应急预测系统业务化研究与应用[J]. 海洋预报, 2013, 1: 51-58.

## The green tide multi-source satellite remote sensing operational monitoring requirement analysis and system design in the Yellow Sea

DING Yi<sup>1, 2</sup>, CAO Cong-hua<sup>1, 2</sup>, HUANG Juan<sup>1, 2</sup>, ZHONG Shan<sup>1, 2</sup>, WANG Ning<sup>1, 2</sup>, HU Wei<sup>1, 2</sup>, GAO Song<sup>1, 2</sup>

(1. Shandong Provincial Laboratory of Marine Ecology and Environment & Disaster Prevention and Mitigation, Qingdao 266061, China; 2. North China Sea Marine Forecasting Center of State Oceanic Administration, Qingdao 266061, China)

**Received:** Oct., 11, 2014

**Key words:** green tide; multi-source satellite images; operational monitoring; system design; information fusion

**Abstract:** Based on the operational monitoring requirements of the green tide in the Yellow Sea, the multi-source satellite remote sensing operational monitoring system for green tide was designed. System design includes: the selection of the satellite data sources, the green tide information extraction methods of the multi-source satellite images, the fusion method of multi-source monitoring information, and overall process of the green tide information extraction, the function modules, the development language and platform, the products design such as the monitoring report, the initial field of the numerical simulation and so on. The system design provided the key solutions and methods for the following system development. After the operational system was developed, the timely, accurate and comprehensive green tide monitoring information would be provided for the green tide disaster prevention and mitigation and emergency decision-making.

(本文编辑: 刘珊珊)