

· 监测技术 ·

# 基于无人机高光谱遥感在太湖蓝藻水华监测中的一次应用

丁铭<sup>1</sup>, 李旭文<sup>1\*</sup>, 姜晟<sup>1</sup>, 王甜甜<sup>1</sup>, 张悦<sup>1</sup>, 纪轩禹<sup>1</sup>, 刘耀瑶<sup>2</sup>, 姜威<sup>2</sup>

(1. 江苏省环境监测中心, 江苏 南京 210019; 2. 南京智谱科技有限公司, 江苏 南京 210048)

**摘要:**采用机载高光谱视频相机,在4个季节对太湖蓝藻进行7次、18个架次的有效拍摄。对拍摄到的高光谱影像进行辐射定标、几何拼接等预处理后,提取不同浓度蓝藻和水草等其他物体的高光谱数据,发现不同浓度的蓝藻光谱在680 nm后表现出较大差异。采用主成分分析(PCA)对高光谱数据降维后,结合 $k$ -近邻( $k$ NN)分类算法,可实现对蓝藻的精准定位。定性识别结果经光谱预处理后,采用连续投影算法(SPA)进行特征波段提取,发现蓝藻光谱的季节差异主要表现在450 nm~570 nm和760 nm~910 nm波段。

**关键词:** 蓝藻水华;高光谱遥感;无人机;太湖

中图分类号:X87

文献标志码:B

文章编号:1006-2009(2022)01-0049-03

## An Application of UAV-based Hyperspectral Remote Sensing in Monitoring Cyanobacterial Bloom in Taihu Lake

DING Ming<sup>1</sup>, LI Xu-wen<sup>1\*</sup>, JIANG Sheng<sup>1</sup>, WANG Tian-tian<sup>1</sup>, ZHANG Yue<sup>1</sup>,

JI Xuan-yu<sup>1</sup>, LIU Yao-yao<sup>2</sup>, JIANG Wei<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Province Environmental Monitoring Centre, Nanjing, Jiangsu 210019, China;

2. Nanjing ZHIPU Technology Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu 210048, China)

**Abstract:** An airborne hyperspectral video camera was used to take effective photos of cyanobacteria in Taihu Lake for 7 times and 18 sorties in four seasons. After preprocessing the hyperspectral images by radiometric calibration and geometric splicing, and extracting the hyperspectral data of cyanobacteria, aquatic plants and other objects of different concentrations, it was discovered that the spectra of cyanobacteria with different concentrations showed great differences after 680 nm. After dimensionality reduction of hyperspectral data by principal component analysis(PCA), combined with  $k$ -nearest neighbor( $k$ NN) classification algorithm, accurate positioning of cyanobacteria could be realized. After spectral preprocessing the qualitative identification results, and extracting the characteristic bands by successive projections algorithm(SPA), it was found that the seasonal differences of cyanobacteria spectra were mainly at 450 nm~570 nm and 760 nm~910 nm.

**Key words:** Cyanobacterial bloom; Hyperspectral remote sensing; Unmanned aerial vehicle; Taihu Lake

蓝藻是一种广泛分布的可形成危害的藻类,在其长期的进化过程中,发展出了一系列对地球化学和气候变化的生理、形态及生态的适应机制<sup>[1]</sup>。蓝藻广泛地存在于淡水生态系统中,并且能产生一系列严重的水环境问题,因而受到全球高度的重视。藻类色素是藻类进行光合作用时吸收、转化和传递光能的基本物质基础,藻华水体叶绿素 a 浓度在440 nm、680 nm 处吸收系数呈正相关关系<sup>[2-4]</sup>;蓝藻叶绿素 a 浓度与690 nm~740 nm 区间的荧光峰位

置红移呈正相关关系。基于光谱特征的波段或波段组合算法,可以对蓝藻水华进行光谱分析<sup>[5-7]</sup>。

收稿日期:2020-12-22;修订日期:2021-11-10

基金项目:国家水体污染控制与治理科技重大专项基金资助项目(2017ZX07302-003);2019年度江苏省环保科研课题基金资助项目(2019010);农村环境监测质量抽查基金资助项目(CNEMC-EC0217-04)

作者简介:丁铭(1981—),男,江苏南京人,高级工程师,硕士,从事环境监测工作。

\*通信作者:李旭文 E-mail: lxy@jshb.gov.cn

根据太湖野外观测多年经验,太湖蓝藻在不同季节、不同生长周期其颜色具有一定差异。由于水体污染多呈带状分布,靠人为巡检效率低,且会受人为主观影响;采用卫星遥感的方式,分辨率低,无法将蓝藻与其他水生植物准确区分,同时由于卫星过境频次有限,受当时天气状况影响较大,无法进一步及时反映蓝藻情况<sup>[8-10]</sup>。因此,利用无人机搭载多光谱、高光谱,获取不受云层干扰的影像,将是今后蓝藻快速追踪、分析的手段。今通过光谱反射曲线对多次采集不同浓度蓝藻的高光谱曲线进行差异分析,以期为无人机高光谱技术在太湖蓝藻监测中的应用提供借鉴与参考。

## 1 研究方法

### 1.1 研究区域概述

太湖是我国5大淡水湖之一,面积为2400 km<sup>2</sup>,南北长68.5 km,东西平均宽度34.0 km,平均深度为1.9 m,最大深度为2.6 m,承担着周边城市供水和改善下游地区水质的重要作用。由于太湖湖泊富营养化,易受到蓝藻影响,其中竺山湖位于梅梁湾西面,是太湖西北角半封闭型湖湾,面积为57.2 km<sup>2</sup>,周边涉及无锡市马山区、宜兴市和常州市武进区,沿湖居民生产生活丰富,存在一定的生活污染排放,尤其在夏季受热带海洋气团的影响,盛行东南风,太湖西北角竺山湖受蓝藻影响较为严重。冬、春、夏、秋四季在竺山湖入口蓝藻水华长期聚集的重点地区采集光谱视频,结合高光谱曲线对蓝藻水华差异进行分析研究<sup>[11-13]</sup>。

### 1.2 光谱影像设备

光谱采集设备是LightGene系列高光谱视频相机搭载在大疆如影三轴云台上,通过大疆经纬多旋翼无人机飞行采集,该相机是框幅式/画幅式光谱视频成像系统,通过几何畸变校正、谱线位置畸变标定和校准,光谱视频成像空间分辨率达到百万像素量级。相机光谱范围为450 nm~950 nm,光谱分辨率为4 nm~550 nm,全幅像素为200万像素,帧频为20 cubes/s。无人机采用模块化设计,M600 Pro搭载Lightbridge 2高清数字图传、智能飞行电池组和电池管理系统,载重高达6.0 kg,为光谱数据采集提供可靠的高性能飞行平台。

### 1.3 光谱数据采集

光谱数据有效采集为7次,18架次,覆盖了冬、春、夏、秋四季。拍摄过程的飞行速度均为

5 m/s,飞行高度120 m,单次拍摄视场范围大致为26.5 m×21.5 m。冬季拍摄时间为2019年12月5日,拍摄地点为江苏省无锡市滨湖区雷渚亭附近。秋、夏、春季拍摄时间分别为2020年9月中旬、2020年8月中旬、2020年4月和5月底,拍摄地点为无锡市滨湖区七里风光堤附近和宜兴市太湖积善桥福善寺附近。

### 1.4 数据处理软件

采用Coral软件及Matlab2020a软件平台。Coral主要用于高光谱视频数据的采集,对高光谱数据的DN值和Reflectance值进行重构,并可提取重构后的高光谱数据的单点曲线,以及对各个波段的灰度图进行解译。Matlab2020a软件主要用于对光谱数据进行预处理、蓝藻与水草的判别算法。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同浓度蓝藻的光谱曲线差异

对影像进行辐射定标、几何拼接、图像匀色预处理工作,形成相关正射影像产品。为排除光照等影响,每次拍摄均会采取标准反射板对采集的光谱影像进行校正。为分析单一气象条件下不同浓度的蓝藻水华光谱曲线差异,选取单次拍摄的高光谱影像(E119°59'21",N31°23'27"和E119°59'20",N31°23'25"),对其中不同蓝藻浓度的水体高光谱数据进行提取。选取1张高光谱图像,包含高浓度蓝藻水域、低浓度蓝藻水域和无蓝藻水域,各区域分别选取2个点提取其光谱数据进行分析。

图1为从高光谱影像中提取出来拍摄物质的遥感反射率(DN值)。由图1可见,3种蓝藻浓度的水体光谱曲线整体变化趋势相近。初始阶段, DN值随波段的提高而增加,在650 nm~680 nm区间,3种蓝藻浓度的水体光谱曲线均出现波谷,随后高浓度蓝藻由680 nm开始迅速上升,在760 nm处再次达到峰值后开始下降;低浓度蓝藻由680 nm开始上升后,其上升幅度远低于高浓度蓝藻,并在740 nm处达到峰值后开始下降;无蓝藻水体由680 nm波段处开始上升后,上升的幅度在3组数据中最低,并在720 nm处达到峰值后开始下降。3组数据光谱最高DN值分别接近0.078、0.052和0.044。表明,随着水体中蓝藻浓度的增加,水体光谱曲线在680 nm后的变化斜率及持续波段也在逐渐增加。

### 2.2 蓝藻与其他水生植被高光谱定性判别

基于5次无人机高光谱研究,对湖面蓝藻与水

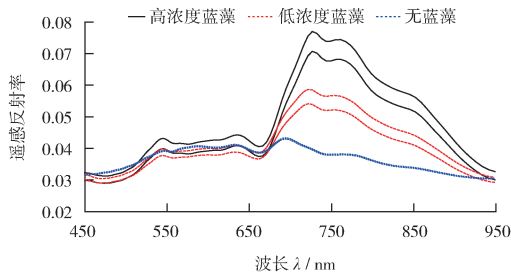


图 1 不同蓝藻浓度下的光谱曲线  
Fig. 1 Spectral curves of cyanobacteria at different concentrations

草的光谱曲线进行提取与分析。结果表明,蓝藻与水草的光谱曲线特征趋势相近,且光谱曲线相似度高,通过简单的几个光谱通道无法实现蓝藻与水草的准确性分析。故对蓝藻、水草及其他物体(路、建筑物等)进行高光谱曲线的提取并做主成分分析(PCA),第 1 主成分(PC1)和第 2 主成分(PC2)见图 2。将全光谱数据进行 PCA 降维后,结合 *k*NN 的分类算法对蓝藻进行定性分析,发现非水生植物与蓝藻区分明显,故选取其中 1 张水生植物与蓝藻的影像展示。图 3(a)的 RGB 图像蓝藻和水生植物接近,难以区分;图 3(b)为定性后二值图,白色为蓝藻、黑色为水生植物。表明高光谱图像经 PCA 结合 *k*NN 可准确地区分蓝藻和绿植,准确定位。

2.3 不同季节下蓝藻的光谱差异

为排除光照、温度及湿度等因素的影响,通过标准反射板对采集的高光谱影像进行校正,并用多种预处理方法消除光谱数据中的无关信息和噪声<sup>[10-11]</sup>。经对比,SNV 结合 5 点 MAF 预处理方法可降低 5 次蓝藻光谱曲线拍摄差异,提高其信噪比。4 个月中,12 月谱图左移较明显,移动到

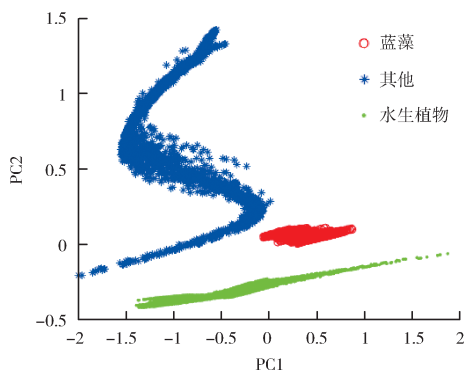


图 2 PCA 分布  
Fig. 2 PCA distribution

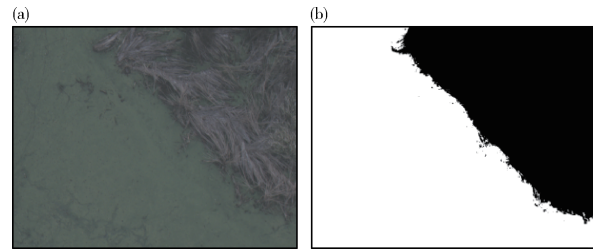


图 3 蓝藻定性识别  
Fig. 3 Qualitative identification of cyanobacteria

510 nm 左右,依次后移分别为 8 月、9 月、5 月。

综合偏移的现象,初步判断绿色波段的峰值冬季出现在左侧,夏秋季处于中心波段处,春季出现在右侧。这可能是由于冬季是蓝藻消亡的季节,蓝藻光谱特征峰向蓝色波段偏移,而春季处于生长期,蓝藻光谱特征峰向红色波段偏移。在 650 nm 附近的波谷位置基本一致,只是存在反射率大小的差异。采用 SPA 算法从不同时期的蓝藻全谱段中选出的与 5 次拍摄差异相关的 8 个波长点(450 nm、519 nm、553 nm、567 nm、685 nm、761 nm、824 nm 及 910 nm),主要位于 450 nm ~ 570 nm 和 760 nm ~ 910 nm 波段,说明蓝藻水华在该波段对于季节的响应较为明显。全谱段共 125 个波段,选取得到的 8 个波长点可较好反映蓝藻季节之间差异,且仅占全光谱的 6.4%,这将使光谱相机结构简化、成本降低,使其在蓝藻监测推广中具有一定意义。

3 结语

对单次高光谱采集数据的分析可以准确识别不同浓度蓝藻。基于这一现象,可对蓝藻暴发进行预测,推出预防方案。高光谱遥感数据进行 PCA 降维后结合 *k*NN 分类算法对蓝藻进行定性分析,得到蓝藻与水草及其他物质的区别,准确定位蓝藻出现区域,实现精准定位。

通过对 5 次拍摄光谱信号之间的差异进行放大,可以看出不同时期蓝藻在可见-近红外波段的光谱曲线存在明显的差异,冬季与其他季节拍摄的光谱曲线差异最大。对比不同的光谱曲线,获取不同时期蓝藻的全波段光谱曲线差异,可针对不同季节、不同生长期的蓝藻做进一步研究。现阶段由于受湖面天气影响,无人机载高光谱遥感的工作效率较低,后续可对无人机载平台进行改进,使其可以适应更多环境应用场景,通过对蓝藻高光谱影像

(下转第 71 页)