

利用 MODIS 影像提取太湖蓝藻水华的尺度差异性分析^{*}

尚琳琳^{1,2}, 马荣华^{1**}, 段洪涛¹, 姜广甲¹, 周琳^{1,2}

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

(2: 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 有效地提取蓝藻水华信息对分析蓝藻动态分布有重要意义, 然而低空间分辨率数据提取的蓝藻水华会产生尺度误差。本文以太湖为研究区, 利用 2005 年 10 月 17 日和 2010 年 12 月 3 日两景 MODIS (250 和 500 m) 数据, 采用浮游藻类指数 (FAI) 法提取太湖蓝藻水华面积; 通过将 FAI_{250} 均值化为 FAI_{mean} (500 m), 然后与 FAI_{500} 比较, 从像元角度定量评价 FAI 的尺度误差, 分析引起提取误差的原因。结果表明, FAI_{500} 平均值偏大, 造成提取出来的蓝藻水华面积增大; 而太湖蓝藻水华监测结果的尺度差异是水体的空间异质性导致的, 即存在水体和水华混合组成的像元导致提取面积有误差。

关键词: 蓝藻水华; FAI; 太湖; 遥感; MODIS; 尺度

Scale analysis of cyanobacteria bloom in Lake Taihu from MODIS observations

SHANG Linlin^{1,2}, MA Ronghua¹, DUAN Hongtao¹, JIANG Guangjia¹ & ZHOU Lin^{1,2}

(1: *Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P. R. China*)

(2: *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P. R. China*)

Abstract: In order to study the spatio-temporal patterns of cyanobacteria blooms, it is important to detect and monitor them effectively by satellite observations. However, such detection and monitoring by low resolution data induces a scaling bias. Based on MODIS (250 m and 500 m) data at Oct. 17, 2005 and Dec. 3, 2010, the area of cyanobacteria bloom in Lake Taihu was derived by a approach named Floating Algae Index (FAI). The low resolution FAI was then achieved in two ways: FAI_{500} , was directly calculated from MODIS (500 m); and the FAI_{mean} was the mean of FAI_{250} which was directly calculated from MODIS (250 m). Results reveal a serious overestimation of FAI_{500} and the area of cyanobacteria bloom due to the scale error all over Lake Taihu. The causes for scaling error are discussed and it is found that the spatial heterogeneous is the key factor which may lead to the error in the detection and monitoring on cyanobacteria bloom.

Keywords: Cyanobacteria bloom; FAI; Lake Taihu; remote sensing; MODIS; scale

以蓝藻水华暴发为表征的水体富营养化问题是当前湖泊面临的主要环境问题之一^[1]。太湖是我国的第二大淡水湖, 是典型的富营养化水体, 早在 1950s 末就出现过蓝藻水华^[2], 1990s 以后, 由于经济快速发展和人类活动的加剧, 污染物排放显著增加, 导致太湖水环境形势日益恶化, 蓝藻水华频繁暴发。2007 年无锡“5.29 事件”, 太湖蓝藻水华大面积暴发, 造成近百万人饮水困难, 引起人们对太湖水环境问题的极大关注^[3]。卫星遥感是大型湖泊水体水质监测最有效的措施之一, 早在 1998 年, 就有学者利用 Landsat TM 卫星影像成功监测到了太湖蓝藻水华的暴发^[4], 目前, MODIS 是蓝藻卫星遥感监测最适合的数据源^[5], 太湖蓝藻水华的遥感监测主要依赖于 MODIS 卫星数据, 基本实现了业务化运行。

由于蓝藻水华的监测多采用不同的卫星影像数据源, 除了 TM、MODIS 外, NOAA/AVHRR、CBERS、IRS-P6 等已经用于蓝藻水华的监测; 而对于不同的遥感卫星数据, 由于分辨率的不同, 即使是同一时刻的数

* 中国科学院知识创新工程重要方向性项目 (KZCX2-YW-QN311、KZCX2-EW-QN308)、国家自然科学基金项目 (40871168, 40801137) 和国家水体污染控制与治理科技重大专项项目 (2009ZX07528-005-02) 联合资助。2010-12-20 收稿; 2011-05-15 收修改稿。尚琳琳, 女, 1986 年生, 硕士研究生; E-mail: shangll03@163.com.

** 通讯作者; E-mail: mrhua2002@niglas.ac.cn.

据,提取出来的蓝藻水华分布面积也有一定差异^[3].不同空间分辨率的卫星遥感影像,像元具有不同的尺度结构和模型表达,在利用这些图像数据提取蓝藻水华信息时,存在一定的尺度差别,因此存在不同卫星遥感图像像元尺度的匹配与转换问题^[6].目前有关遥感反演模型尺度效应的理论与方法主要是针对陆地遥感与热红外遥感提出的^[7-8].在 LAI 反演的尺度效应研究上,取得了较大进展,建立了不同尺度之间 LAI 的转换公式^[9],研究表明多尺度 LAI 反演误差的主要原因是地表景观结构的空异质性,并通过泰勒公式实现了误差纠正^[10];遥感估算模型空间尺度转换方面,实现了由高分辨率遥感数据获得的净初级生产力向低分辨率遥感数据获得的净初级生产力的空间尺度转换^[11].水色参数反演方面,已经构建了悬浮泥沙浓度反演的尺度效应校正模型^[12],但在蓝藻水华的信息提取方面,却鲜有报道.

另外,蓝藻水华的提取方法也可能影响蓝藻水华遥感监测的精度.例如目前比较常用的 NDVI、波段比值等方法很难将高浑浊水体区分开来,或者存在低蓝藻水华分布区域提取困难现象,造成蓝藻水华分布范围扩大或缩小^[13].同时,由于很容易受到大气的影响,蓝藻水华提取阈值很难统一,即在不同的大气条件下,比值模型的阈值存在一定的差别,从而直接影响蓝藻水华的提取精度.为了更为准确地提取水华,胡传民等提出了浮游藻类指数模型(Floating Algae Index, *FAI*),并已成功地应用到青岛附近海域浒苔^[14]和太湖蓝藻水华的遥感监测^[15],该方法可以有效地避免由于阈值设置不同而造成的蓝藻水华面积提取误差.

本文以太湖为研究区,利用 MODIS 卫星 250 m 和 500 m 的影像数据,利用 *FAI* 方法,尝试在像元尺度水平上,探讨不同空间分辨率卫星遥感影像在蓝藻水华面积提取上的空间尺度差异,分析尺度误差产生原因,为进一步研究蓝藻水华空间尺度转换模型的构建做准备.

1 数据与方法

1.1 卫星遥感数据及处理

选取 2005 年 10 月 17 日和 2010 年 12 月 3 日的 EOS MODIS 卫星 250 m 和 500 m 影像数据,直接选用 NASA 地表反射率产品(250 m: MOD02QKM 和 500 m: MOD02HKM),其中 MOD02QKM 有 2 个波段,光谱范围分别为 0.62–0.67 μm 和 0.841–0.876 μm , MOD02HKM 有 7 个波段,光谱范围分别为 0.62–0.67、0.841–0.876、0.459–0.479、0.545–0.565、1.23–1.25、1.628–1.652、2.105–2.155 μm . 两幅影像上太湖梅梁湾和西南岸区域均聚集着大量的蓝藻水华,即使在 500 m 分辨率影像上,也有完全覆盖着蓝藻水华的像元存在.2005 年的 MODIS 影像显示太湖上空有层薄云覆盖,而 2010 年的大气状况良好,不受云的影响.

东太湖和太湖东部沿岸区水体清澈,水质较好,属于光学浅水区^[16],这些区域到目前为止还没有发生蓝藻水华的记录,因此本文选取除该区以外的其他湖区(均为混浊水体)为研究区域. MODIS L1B 影像数据自带地理坐标,通过 ENVI 4.7 对其进行重投影,以几何精纠正后的 TM 数据为参考,对 MODIS 数据进行几何纠正,误差小于 0.5 个像元;在 ERDAS 中利用太湖矢量边界,通过掩膜技术提取太湖水域,除去太湖周边及其岛屿植被的影响.然后利用最近邻法,将 MODIS 500 m 影像数据重采样为 250 m 分辨率,以便满足蓝藻水华信息提取的需要. EOS 卫星携带的 MODIS 传感器同时获取 250 m 和 500 m 分辨率的影像数据,因此这两种分辨率的影像获取时的大气条件完全一致,故不考虑大气的影响.

1.2 蓝藻水华信息提取方法

本研究使用胡传民 2009 年提出的 *FAI* 法来提取太湖蓝藻水华信息(图 1).该方法采用红光–近红外–短波红外波段的有效组合,可以部分消除大气的影响,进而可以固定阈值,一方面可以提高蓝藻水华的信息提取精度,另一方面可以提高不同时间获取的信息的可比性.对 2005 年这幅有云的 MODIS 影像,同时采用单波段法进行蓝藻水华空间分布的提取,作两种提取方法的简单对比.

$$FAI = R_{\text{re, NIR}} - R_{\text{re, NIR}}' \quad (1)$$

式中, $R_{\text{re, NIR}}$ 与 $R_{\text{re, NIR}}'$ 分别使用下式进行计算:

$$R_{\text{re, NIR}} = \pi L_t^* / (F_0 \cdot \cos \theta_0) - R_t \quad (2)$$

$$R_{\text{re, NIR}}' = R_{\text{re, RED}} + (R_{\text{re, SWIR}} - R_{\text{re, RED}}) \times (\lambda_{\text{NIR}} - \lambda_{\text{RED}}) / (\lambda_{\text{SWIR}} - \lambda_{\text{RED}}) \quad (3)$$

式中, L_t^* 为传感器经过辐射定标的辐射率, F_0 为大气层外垂直入射的太阳辐照度, θ_0 为太阳天顶角, R_t 为使

用 6S 模型估计的瑞利散射的反射率;本研究中,红光、近红外、短波红外波段分别为 MODIS 数据的第 1、2、5 波段. MOD02QKM 和 MOD02HKM 是同一个 MODIS L1B 的两种不同分辨率的产品,成像条件一致,所以 6S 模型估计的瑞利散射的反射率相同,即公式(2)中 R_r 取值相同.

MODIS 波段设置中,红波段中心波长为 645 nm,近红外波段为 858 nm,短波红外波段为 1250 nm,则公式(3)可简化为:

$$R_{\text{re,NIR}}' = R_{\text{re,RED}} + (R_{\text{re,SWIR}} - R_{\text{re,RED}}) \times \frac{214}{595} \quad (4)$$

针对 MODIS 影像,FAI 表达式为:

$$FAI = R_{\text{re,NIR}} - R_{\text{re,NIR}}' = R_{\text{re,NIR}} - \frac{381}{595} \times R_{\text{re,RED}} - \frac{214}{595} \times R_{\text{re,SWIR}} \quad (5)$$

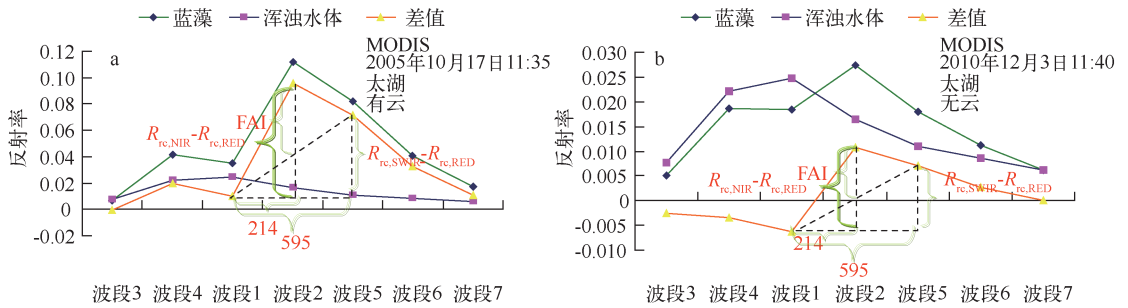


图 1 FAI 算法示意图

Fig. 1 Diagram of FAI

1.3 空间尺度分析方法

采用两种方法实现 $FAI(250\text{ m})$ 到 $FAI(500\text{ m})$ 的尺度上推:(1) 将由 MODIS 数据(250 m)计算所得的 FAI_{250} 直接均值化得到 $FAI_{\text{mean}}(500\text{ m})$,用以模拟低分辨率 FAI 信息(本文中暂定为低分辨率 FAI 真实值);(2) 将原 MODIS 数据(250 m)重采样为低分辨率的图像数据(500 m),经计算得到 FAI_{500} (本文中暂定为低分辨率 FAI 反演值).

定义 $err = FAI_{500} - FAI_{\text{mean}}$ 为升尺度后遥感影像计算 FAI 的误差因子.

$$err = FAI_{500} - FAI_{\text{mean}} = FAI_{500} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n FAI_{250i} \quad (6)$$

把式(4)代入式(6)可得到:

$$\begin{aligned} err &= \left(R_{\text{re,NIR500}} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{\text{re,NIR250}} \right) - \frac{381}{595} \times \left(R_{\text{re,RED500}} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{\text{re,RED250}} \right) - \frac{214}{595} \times \left(R_{\text{re,SWIR500}} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{\text{re,SWIR250}} \right) \\ &= (R_{\text{re,NIR500}} - mR_{\text{re,NIR250}}) - \frac{381}{595} \times (R_{\text{re,RED500}} - mR_{\text{re,RED250}}) - \frac{214}{595} \times (R_{\text{re,SWIR500}} - mR_{\text{re,SWIR250}}) \end{aligned} \quad (7)$$

式中, $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n FAI_{250i}$ 为与大尺度图像像元对应的 n 个小尺度图像像元 FAI 的均值, $mR_{\text{re,NIR250}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{\text{re,NIR250i}}$, $mR_{\text{re,RED250}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{\text{re,RED250i}}$, $mR_{\text{re,SWIR250}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{\text{re,SWIR250i}}$. 对于 250 m 分辨率 MODIS 影像来说,短波红外波段是由 500 m 分辨率的短波红外波段重采样(最近邻法)而来,所以上式中第三项为 0. 因此,

$$err = (R_{rc,NIR500} - mR_{rc,NIR250}) - \frac{381}{595} \times (R_{rc,RED500} - mR_{rc,RED250}) \tag{8}$$

2 结果

2.1 FAI 结果

低分辨率影像遥感反演结果 FAI_{500} 与 FAI_{mean} 存在一定程度的误差. 由表 1 分析可知, 经过重采样后再经模型计算得到的 FAI_{500} 值存在一定程度的高估现象. 而对于 500 m 分辨率 MODIS 影像来说, 红波段和近红外波段是由 MOD02QKM 的两个波段重采样得到. 从式 (8) 得知, FAI_{500} 与 FAI_{mean} 之间的误差主要是 MODIS 的 1、2 波段的重采样方法引起的.

表 1 误差纠正前后 FAI 值统计信息
Tab. 1 Statistics about FAI before and after error correction

FAI 值	最小值		最大值		平均值	
	2005 - 10 - 17	2010 - 12 - 03	2005 - 10 - 17	2010 - 12 - 03	2005 - 10 - 17	2010 - 12 - 03
FAI_{250}	-0.060475	-0.039596	0.126084	0.197706	0.001641	0.000301
FAI_{mean}	-0.038375	-0.025843	0.111922	0.170600	0.001641	0.000301
FAI_{500}	-0.007232	-0.015444	0.089226	0.149038	0.001965	0.000406

2.2 蓝藻水华面积

FAI 算法示意图 (图 1) 上显示了两个不同日期太湖水域的地物光谱特征曲线, 由于太湖水体范围确定, 本文的研究区内只有蓝藻和浑浊水体两种地物. MODIS 按照其波段分布特征从可见光到近红外进行了重新排序. 其中, 蓝藻选自蓝藻水华带上典型像元, 浑浊水体选自太湖浑浊水体像元. 在波段 2 (近红外波段), 蓝藻与水体有较大差异, 出现植被的“陡坡效应”, 之后形成近红外高台. 在蓝藻与浑浊水体反射率差值曲线上, 波段 2 对应的值减去波段 1 (红波段) 和波段 3 (短波红外波段) 这一连线在波段 2 上对应的值, 结果即为 FAI. 在 ERDAS 9.1 中, 设定阈值, 2005 年 10 月 17 日的影像为 $FAI > 0.03$, 2010 年 12 月 3 日的影像为 $FAI > 0.01$, 提取蓝藻水华面积. 即在 FAI_{250} 、 FAI_{500} 和 FAI_{mean} 图像上像元值大于阈值的像元判定为蓝藻像元. 从蓝藻的面积和空间分布可以看出 (图 2), 在 250 和 500 m 两种不同尺度的图像上提取结果存在差异, 500 m 图像上提取出的蓝藻水华部分细节缺失, 不够细致; 对于相同空间分辨率的 FAI_{500} 和 FAI_{mean} 来说, 这两种不同尺度上推方法得到的图像上蓝藻水华提取结果差异较大.

波段 2 是区分 MODIS 影像上蓝藻水华与混浊、清洁水体最好的波段^[17]. 根据波段光谱特征建立阈值, 在 2005 年 250 m MODIS 反射率影像上用单波段 (波段 2) 法提取出蓝藻水华的空间分布信息 (图 3), 面积约为 354.3 km².

2.3 空间尺度差异

本文试图分析研究区各个像元不同尺度之间的差异, 故对研究区逐个像元进行分析. 其中 FAI_{250} 的 4 个像元分别与 FAI_{500} 和 FAI_{mean} 的 1 个像元空间上保持一致, 通过对比分析 FAI_{250} 的 4 个像元提取太湖水体蓝藻面积与 FAI_{500} 和 FAI_{mean} 进行比较, 可以反映不同尺度蓝藻面积提取精度差异, 因此, 本文在空间上分析 FAI_{500} 中被判定为蓝藻而在 FAI_{mean} 中被认为非蓝藻的像元 (图 4), 以确定 FAI_{500} 和 FAI_{mean} 之间的误差; 同时, 确定 FAI_{250} 相对应的 4 个像元中, 在 250 m 空间分辨率的尺度上, 不同比例的蓝藻像元对蓝藻水华面积提取结果的影响. 图 4 可以直观地显示 FAI_{500} 和 FAI_{mean} 在同一阈值下提取蓝藻水华结果的差异.

3 分析与讨论

3.1 两景影像对比分析

对比分析两景不同时间不同大气条件下 MODIS 影像提取的太湖蓝藻水华结果, 在有薄云的情况下

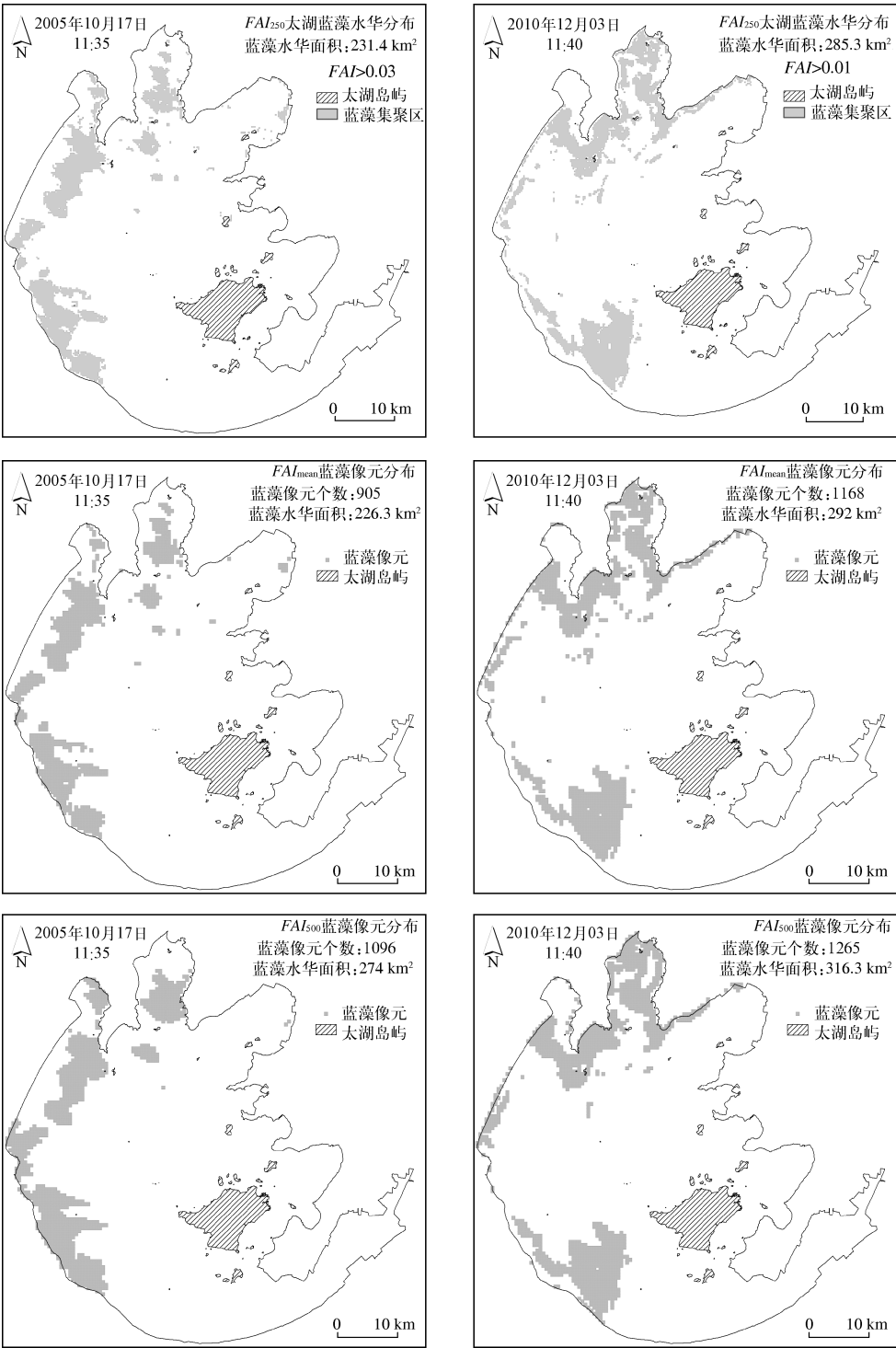


图2 太湖蓝藻水华监测结果

Fig.2 Results of cyanobacteria bloom detection and monitoring in Lake Taihu by three ways

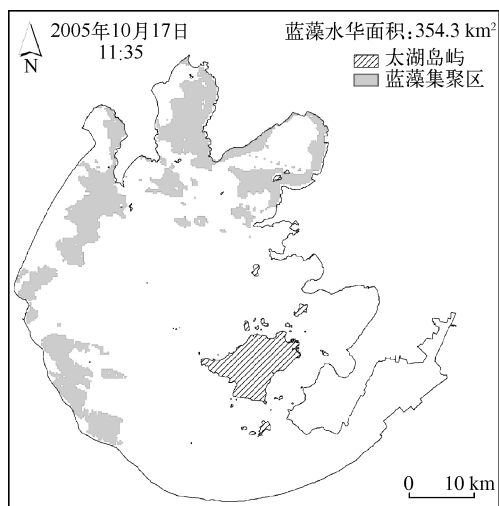


图3 单波段法在 MODIS(250 m)上的太湖蓝藻水华监测结果图

Fig. 3 Results of cyanobacteria bloom detection and monitoring in Lake Taihu by band2 in MODIS(250 m)

(2005 年), 单波段方法结果(图 3)显示, 梅梁湾和贡山湾上空的薄云被误认为是蓝藻水华, 造成了较大的误差. 因为云在近红外波段高反射, 蓝藻水华光谱易与薄云混淆, 单波段方法容易扩大蓝藻水华分布面积, 而 FAI 方法则可以通过红光、近红外和短波红外的算法组合较好地去除大气的影 响, 有效地穿透薄云, 较为真实地反映蓝藻水华的分布. 因为 FAI 方法使用了 6S 大气校正去除了瑞利散射的影响, 提取蓝藻水华的阈值较稳定, 波动范围较小. 本文的研究中, FAI 的阈值在 2005 年为 0.03, 在 2010 年是 0.01. 因此, 本文虽然用两景不同大气条件下的影像分别提取太湖蓝藻水华, 但是结果仍然具有可比性. 分别对 2005 年和 2010 年太湖蓝藻水华提取结果进行空间尺度分析后, 发现两者的变化规律是相似的. 在 500 m 空间分辨率尺度上, 两个不同时间的 FAI_{500} 平均值均大于 FAI_{mean} 均值, FAI_{500} 蓝藻提取面积也均大于 FAI_{mean} 蓝藻水华提取面积, 且相差幅度相近.

3.2 提取结果整体分析

根据太湖蓝藻水华遥感提取结果, 从空间上分析, FAI_{250} 和 FAI_{mean} 很相似, 而 FAI_{500} 和 FAI_{250} 、 FAI_{mean} 差别较大. 从蓝藻提取面积角度分析, FAI_{mean} 提取出的蓝藻面积与 FAI_{250} 接近(相差不到 10 km^2); 而 FAI_{500} 提取出的蓝藻面积与 FAI_{250} 相差很多(约 40 km^2). 因此, 将 FAI_{mean} 看作真实值, 而 FAI_{500} 存在一定的尺度误差. 与高空间分辨率(250 m)提取太湖蓝藻水华结果相比, 低空间分辨率遥感影像混合像元效应严重, 导致梅梁湾附近蓝藻提取结果误差较大(图 2). 同时, 由于低空间分辨率遥感影像混合像元效应严重, 对蓝藻水华面积提取影响较大. 水体的空间异质性在很大程度上造成了蓝藻水华面积提取误差, 蓝藻信息出现误判, 不能真实反映蓝藻水华的面积和空间分布情况.

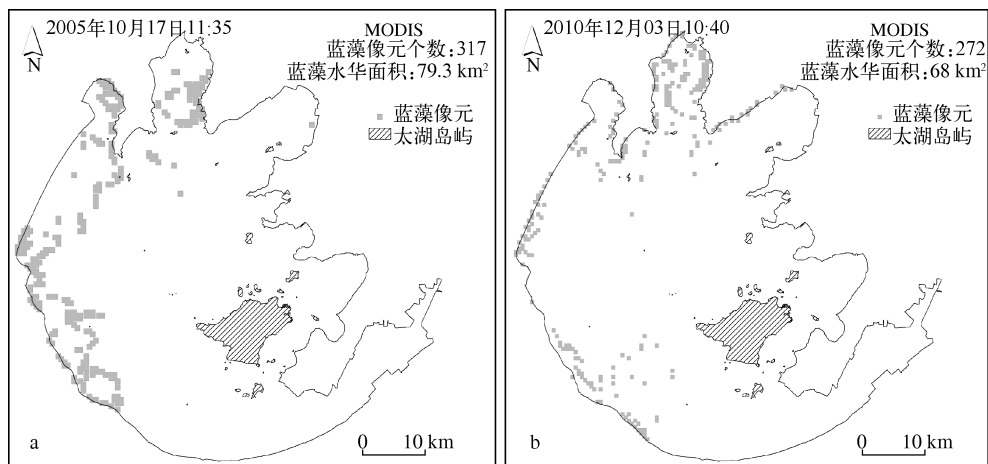


图4 在 FAI_{500} 中被判定为蓝藻而在 FAI_{mean} 中认为非蓝藻的像元

Fig. 4 Pixels which are regarded as cyanobacteria pixels in FAI_{500} and not in FAI_{mean}

3.3 像元尺度上的结果分析

从像元角度对不同分辨率的 FAI 监测结果进行分析, 结果发现, 造成 FAI 监测结果尺度误差的主要原因在于混合像元, 即水体中存在的空间异质性现象. FAI_{mean} 中的水体在 FAI_{500} 中被判定为蓝藻的像元多数分布

在太湖水体蓝藻水华区域的边缘部分(图 4),2005 年的影像里有 317 个,2010 年的影像里有 272 个,约占总体像元数的 4.5%。在 FAI_{500} 中这些像元的值偏高,导致该混合像元误判为蓝藻像元,是 FAI_{500} 提取蓝藻面积偏大的主要原因。

FAI_{mean} 在判定蓝藻像元时基本与高分辨率的 FAI_{250} 保持一致,而 FAI_{500} 存在很多误判的像元(表 2),在 2005 年的影像中,当 4 个 FAI_{250} 像元值都不大于 0.03 时,仍有 196 个与之对应的 FAI_{500} 像元判定为蓝藻像元;在 2010 年的影像中,则有 175 个这样的异常像元,这些异常像元约占总像元的 2.5%(表 2)。以 2005 年的图像为例,当 FAI_{250} 均为蓝藻像元时(100%), FAI_{500} 与 FAI_{mean} 相关关系最好(图 5d);建立全部蓝藻像元的 FAI_{500} 与 FAI_{mean} 相关关系,效果不明显(图 5a),当剔除异常像元时(图 5c),提取结果有明显改善(图 5b), R^2 达 0.7 以上。

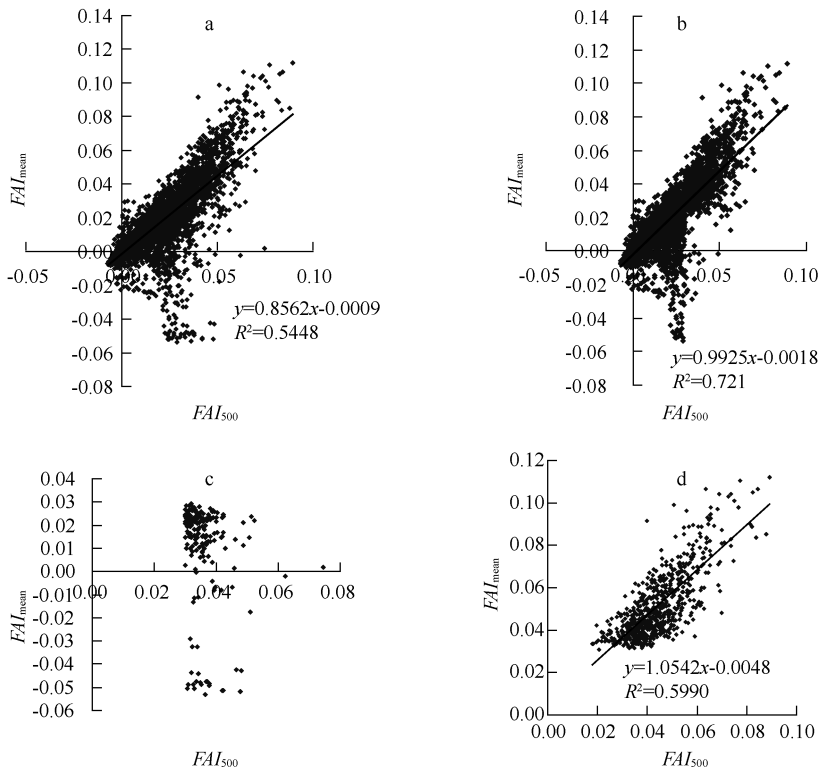


图 5 2005 年 MODIS 影像中 FAI_{500} 与 FAI_{mean} 的相关关系(a:全部像元;b:去除 196 个异常点后的 6894 个像元;c:196 个 0% 异常像元;d:679 个 100% 像元)

Fig. 5 The relationship between FAI_{500} and FAI_{mean} in 2005(a : all pixels; b: remains without 196 pixels; c: 196 pixels of 0% ; d: 679 pixels of 100%)

表 2 不同影像 500 m 分辨率像元统计信息

Tab. 2 Statistics information of pixels with 500 m resolution in different images

4 个像元中 $FAI_{250} > 0.03$ 的比例	2005 年			2010 年		
	500 m 分辨率 像元个数	$FAI_{mean} > 0.03$ 的像元个数	$FAI_{500} > 0.03$ 的像元个数	500 m 分辨率 像元个数	$FAI_{mean} > 0.03$ 的像元个数	$FAI_{500} > 0.03$ 的像元个数
100%	679	679	627	802	802	743
75%	144	136	99	194	192	135
50%	182	88	101	255	146	135
25%	210	2	73	242	28	77
0%	5875	0	196	5597	0	175

4 结论

本研究分别采用 2005 年 10 月 17 日和 2010 年 12 月 3 日的 MOD02QKM、MOD02HKM 两个不同尺度的遥感图像,发现低分辨率遥感影像在监测太湖蓝藻水华分布时存在一定的高估现象. 2005 年的影像中,基于 FAI_{250} 均值化得到的 FAI_{mean} 的均值约为 0.001641,而影像尺度为 500 m 的 FAI_{500} 的均值为 0.001965,由此带来的面积差为 47.7 km². 同样,在 2010 年的影像中, FAI_{500} 的均值比 FAI_{mean} 的大了 0.0001,面积则增大了 24.3 km². 因为存在高估现象,在阈值相同的情况下, FAI_{500} 的太湖蓝藻水华监测结果中,蓝藻区域被放大. 而且分析表明,造成面积增大的像元均分布在蓝藻水华区域的边缘,即水华与水体混合的区域. 由于太湖水体中蓝藻空间结构分布不均一,出现了纯净水体和蓝藻水华组合的混合像元,给蓝藻水华提取带来很大的不确定性和误差. 另外,250 和 500 m 空间分辨率影像的 FAI 值之间并不是简单的平均关系. 下一步研究工作将进一步考虑如何进行不同尺度之间的转换,研究建立 FAI 方法监测太湖蓝藻水华分布的误差纠正.

5 参考文献

- [1] 秦伯强. 长江中下游浅水湖泊富营养化发生机制与控制途径初探. 湖泊科学, 2002, 14(3): 193-202.
- [2] 窦鸿身, 姜加虎. 中国五大淡水湖. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003: 117-124.
- [3] Duan HT, Ma R, Xu X *et al.* Two-decade reconstruction of algal blooms in China's Lake Taihu. *Environmental Science and Technology*, 2009, 43(10): 3522-3528.
- [4] 黄家柱, 赵 锐. 卫星遥感监测太湖水域蓝藻暴发. 遥感信息, 1999, 4: 43-44.
- [5] 马荣华, 孔维娟, 段洪涛等. 基于 MODIS 影像估测太湖蓝藻暴发期藻蓝素含量. 中国环境科学, 2009, 29(3): 254-260.
- [6] 马荣华, 段洪涛, 唐军武等. 湖泊水环境遥感. 北京: 科学出版社, 2010: 5.
- [7] 李小文, 王锦地, Strahler AH. 非同温黑体表面上 Planck 定律的尺度效应. 中国科学(E 辑), 1999, 29(5): 422-426.
- [8] Li X, Strahler AH. Geometric-optical modeling of a conifer forest canopy. *Geoscience and Remote Sensing*, 1985, 23(5): 705-721.
- [9] 徐希孺, 范闻捷, 陶 欣. 遥感反演连续植被叶面积指数的空间尺度效应. 中国科学(D 辑: 地球科学), 2009, 39(1): 79-87.
- [10] 朱小华, 冯晓明, 赵英时等. 作物 LAI 的遥感尺度效应与误差分析. 遥感学报, 2010, 14(3): 579-592.
- [11] 王莉雯, 卫亚星, 牛 铮. 净初级生产力遥感估算模型空间尺度转换. 遥感学报, 2010, 14(6): 1082-1089.
- [12] 陈 军, 丰佳佳, 温珍河等. 悬浮泥沙浓度反演不均一像元尺度误差. 遥感信息, 2008, 5: 8-11.
- [13] 徐京萍, 张 柏, 李 方等. 基于 MODIS 数据的太湖藻华水体识别模式. 湖泊科学, 2008, 20(2): 191-195.
- [14] Hu CM. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 5: 1-12.
- [15] Hu CM, Lee ZP, Ma RH *et al.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) observations of cyanobacteria blooms in Taihu Lake, China. *Journal of Geophysical Research*, 2010, 115: 1-20.
- [16] Ma RH, Tang JW, Dai JF. Bio-optical model with optimal parameter suitable for Taihu Lake in water colour remote sensing. *International Journal of Remote Sensing*, 2006, 27(19): 4305-4328.
- [17] 段洪涛, 张寿选, 张渊智. 太湖蓝藻水华遥感监测方法. 湖泊科学, 2008, 20(2): 145-152.