

基于 SMDPSO 算法的呼伦湖藻华遥感监测

曹萌萌, 青松, 杜雨春子, 袁瑞强, 顺布日

(内蒙古师范大学 地理科学学院, 内蒙古 呼和浩特 010022)

摘要: 水体富营养化所引起的藻华爆发现象是我国面临的重大环境问题之一。以内蒙古呼伦湖为研究区, 采用基于离散粒子群优化的光谱匹配(SMDPSO)算法提取藻华, 以浮游藻类指数(FAI)的分类结果作为验证数据进行精度检验。然后分析2009–2018年藻华的时空变化特征, 并将此算法应用于黄海。结果表明: SMDPSO算法可以有效地识别呼伦湖藻华, 与FAI分类结果之间的 R^2 为0.97, $RMSE$ 为0.22 km²; 呼伦湖藻华爆发于7–8月, 且主要出现在湖泊边缘; SMDPSO算法既可以较好地识别以蓝藻为优势门的呼伦湖藻华, 也可以提取黄海的浒苔(绿藻); SMDPSO算法不仅保留了光谱指数法精度高的特点, 而且它还具有成本低、参数少、无需人工干预的优势。该研究为藻华遥感监测提供了新的工具, 有助于控制湖泊水体富营养化和改善水生态环境。

关键词: 藻华; SMDPSO算法; 浮游藻类指数(FAI); Landsat-8 OLI; 遥感监测; 呼伦湖

中图分类号: X832

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2021)02-0066-07

Remote sensing monitoring of algal blooms in Hulun Lake based on SMDPSO algorithm

CAO Mengmeng, QING Song, DU Yuchunzi, YUAN Ruiqiang, SHUN Buri

(College of Geographical Science, Inner Mongolia Normal University, Hohhot 010022, China)

Abstract: Algal blooms caused by eutrophication is one of the major environmental problems in China. Spectrum matching based on discrete particle swarm optimization (SMDPSO) algorithm was used to identify algal blooms in Hulun Lake, Inner Mongolia, and the classification results of floating algae index (FAI) were used as validation data to evaluate the accuracy of the algorithm. Then, the temporal and spatial characteristics of algal blooms from 2009 to 2018 were analyzed, after which the algorithm was applied to the identification of algal blooms in the Yellow Sea. The results show that SMDPSO algorithm can effectively identify algal blooms in Hulun Lake. The R^2 and $RMSE$ between SMDPSO and FAI are 0.97 and 0.22 km² respectively. The outburst of algal blooms in Hulun Lake last from July to August, and mainly appeared at the edge of the lake. SMDPSO algorithm can not only extract the algal blooms (cyanobacteria is the dominant phylum) from Hulun Lake, but also identify enteromorpha (green algae) in the Yellow Sea. The algorithm shares the characteristics of high precision with spectral index method, and has the advantages of low cost, less parameters involved and no need of manual intervention. This study provides a novel tool for algal bloom remote sensing monitoring, which is helpful for controlling the eutrophication of lake water and improving the water ecological environment.

Key words: algal bloom; spectrum matching based on discrete particle swarm optimization (SMDPSO) algorithm; floating algae index (FAI); Landsat-8 OLI; remote sensing monitoring; Hulun Lake

收稿日期: 2020-06-04; 修回日期: 2020-10-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41961057、61461034); 内蒙古自治区高等学校青年科技英才支持计划项目(NJYT-17-B04); 内蒙古自然科学基金项目(2019MS04013)

作者简介: 曹萌萌(1995-), 女, 内蒙古乌海人, 硕士研究生, 主要研究领域为湖泊水色遥感。

通讯作者: 青松(1982-), 男, 内蒙古呼和浩特人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要研究领域为湖泊水色遥感。

1 研究背景

随着社会发展和人类活动强度的增加,我国乃至全世界的生态环境遭到破坏,其中水体富营养化引发的藻华现象已成为社会最关注的问题之一^[1]。藻华不仅破坏湖泊景观,导致生物量减少,同时也会造成水体自净能力失衡,严重影响湖泊水生态环境。因此,对湖泊藻华进行实时动态监测是预防与治理藻华的关键^[2-4]。

与传统方法相比,遥感技术不仅可以有效地绘制藻华的空间分布,也可以实时监测其生长情况,所以国内外学者采用了多种方法对藻华进行提取分析。其中,光谱指数法被广泛应用于藻华识别研究,例如:NDVI 指数^[5-6]、FAI 指数^[7-9]、AFAI 指数^[10]、EVI 指数^[11]、NDICB 指数^[12]等。同时,也有学者进一步结合多个光谱指数建立了分类决策树,并用来提取复杂水体环境中的藻华^[13-15]。此外,除了常见的监督或非监督分类方法^[16-18],还有少部分研究结合了野外实测光谱数据^[19]、目视解译方法、水质参数反演法^[20]和专家系统^[21]对藻华进行识别。综合对比以上几种分类方法,发现它们各自都具有缺陷。结合光谱指数的决策树分类算法缺乏伸缩性,难以针对大量训练数据集中确定唯一的有效阈值,对缺失值敏感,容易过拟合,从而加大误差。监督分类方法的缺点在于人为主观性强、选择样本的成本较高,而且仅限于识别已定义的类别。非监督分类方法的分类精度无法保证,往往需要后期大量的分析处理。专家系统则在知识获取和量化等方面颇为困难。此外,由于获取野外实测数据与高分辨率影像的成本高、操作难度大,所以难以对藻华进行高效率的识别。

自 1995 年粒子群优化算法被提出后^[22],已成功应用于洪水监测^[23]、水质参数反演^[24]、生物量估算^[25]和土地利用变化^[26]等多个方面。其中,基于离散粒子群优化的光谱匹配(spectrum matching based on discrete particle swarm optimization, SMDPSO)算法是由 Jia 等^[27]提出的一种用于提取地表水的方法,他们运用该算法较精确地提取了全球 8 个地区不同类型的水体。与上文中提到的其他方法相比,SMDPSO 算法具有精度高、成本低、参数少、先验知识少和自动化潜力大的优点。但目前基于 SMDPSO 算法的藻华监测研究鲜有报道,而且在以往的藻华研究中,很少涉及到中国东北部冰封期较长的湖泊。因此,本文拟运用 SMDPSO 算法对

2009–2018 年呼伦湖的藻华进行提取,并与光谱指数 FAI 进行对比验证。然后,总结藻华的时空分布特征,并对 SMDPSO 算法的适用性和优缺点进行评价。本研究的成果可以为分析呼伦湖藻华发生发展规律和进一步治理和保护湖泊生态环境提供参考。

2 数据来源与研究方法

2.1 研究区概况

呼伦湖位于内蒙古呼伦贝尔市,是内蒙古第一大湖泊,其地理位置及水系分布见图 1。湖泊冰封期从 11 月到次年 5 月,时间跨度长达 6–7 个月^[28]。随着气候环境变化和人类活动强度的增大,呼伦湖面积逐渐缩减,水体富营养化加剧。尤其是自 20 世纪 80 年代以来,呼伦湖开始频繁出现藻华爆发的现象,引起了严重的生态环境问题^[4]。呼伦湖藻华的优势门为蓝藻门,其次是绿藻门^[29]。

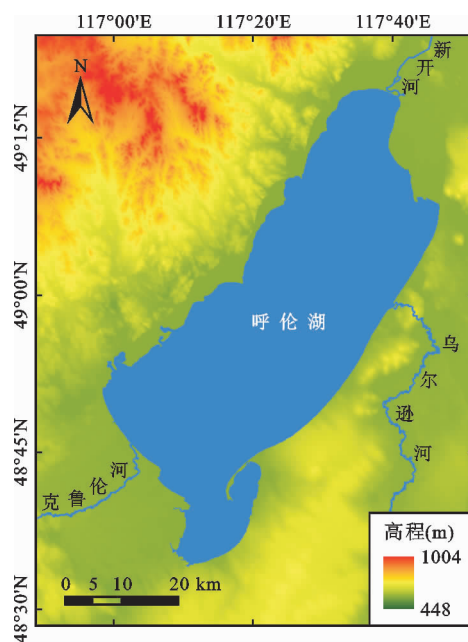


图1 呼伦湖地理位置及水系分布

2.2 遥感数据及预处理

基于时间分辨率、空间分辨率、影像波段数量和卫星发射时间等因素的综合考虑,本文选取 2009 年至 2018 年间非冰封期(5 月 1 日–11 月 1 日)的 Landsat 系列影像对呼伦湖藻华进行遥感识别。为了避免云的干扰,本文共筛选出 53 景无云且质量较好的影像进行研究。影像预处理主要包括辐射定标和大气校正。大气校正通常包括瑞利散射和气溶胶矫正,但由于呼伦湖水体情况复杂,受陆地的影响较大,气溶胶变化较为强烈,因此难以对呼伦湖进行精确的气溶胶矫正。本研究采用 Vanhellemont

等^[30-31]的算法消除瑞利散射对遥感影像的影响。另外,为了消除陆地信息对提取结果的干扰,进一步选用 MNDWI(改进归一化差异水体指数)提取呼伦湖水域。

2.3 SMDPSO 算法

运用基于离散粒子群优化的光谱匹配(SMDPSO)算法提取呼伦湖的藻华,需要两个步骤:(1)对遥感影像进行光谱匹配获得藻华概率图;(2)运用 DPSO(离散粒子优化)算法识别概率图中的藻华^[27]。

本研究选取呼伦湖中藻华的特征波段作为标准光谱进行匹配。标准光谱曲线和目标光谱曲线两者之间的相似程度为藻华的概率,两者差异越小,则像元被识别为藻华的可能性就会越高。计算方式如下:

$$P_B = \cos(\mathbf{B}, \mathbf{O}) \cdot \text{dist}(\mathbf{B}, \mathbf{O}) \quad (1)$$

$$\cos(\mathbf{B}, \mathbf{O}) = \frac{\mathbf{B} \cdot \mathbf{O}}{\|\mathbf{B}\| \cdot \|\mathbf{O}\|} \quad (2)$$

$$\text{dist}(\mathbf{B}, \mathbf{O}) = 1 - \frac{1}{\sqrt{c}} \sqrt{\sum_{i=0}^c (b_i - o_i)^2} \quad (3)$$

式中: P_B 为像元是藻华的概率;变量 $\mathbf{B} = (b_1, b_2, \dots, b_c)$ 和 $\mathbf{O} = (o_1, o_2, \dots, o_c)$ 分别为藻华的标准光谱矢量和任一像素的光谱矢量; c 为波段数量。

为扩大不同波段之间的相对差异,将藻华的概率值进行归一化处理。概率值越大表明该像素为藻华的可能性就越大,而像元是非藻华的概率值可以用公式(4)表示。

$$P_{NB} = 1 - P_B \quad (4)$$

然后将光谱匹配后得到的概率图分割为行 $\times$ 列(即 $rows \times cols$) 的多个图块,将每个图块当做自变量代入自适应函数 T 中,通过多次迭代,DPSO 算法可以求出各图块的最大自适应值 $\max T$,而该值所对应的各像素的位置即为分类结果,最后将各个图块的分类结果合并即可。具体公式如下:

$$\max T = a_1 \cdot \sum_{k=1}^{rows \times cols} P_{B,k} + a_2 \cdot \sum_{k=1}^{rows \times cols} P_{NB,k} - a_3 \cdot \frac{\bar{D}_{\text{nearest}}}{\sqrt{rows^2 + cols^2}} \quad (5)$$

$$\bar{D}_{\text{nearest}} = \begin{cases} 0 & (\text{无藻华}) \\ \sqrt{rows^2 + cols^2} & (\text{藻华像元数为 1}) \\ \text{两个像元间的最短距离} & (\text{其他}) \end{cases} \quad (6)$$

式中: a_1, a_2, a_3 为常量,分别代表藻华、非藻华、相邻部分的权重; $\bar{D}_{\text{nearest}}$ 为在同一个图块中一个藻华像元到另一个藻华像元之间的最短距离。

如果将概率图分为 n 个图块,则解析过程重复 n 次,而此处只考虑 1 个图块。本研究设定 1 个图块的大小为 $D = 4 \times 4$,其适宜解 $\{x_1, x_2, \dots, x_d\}$ 由公式(7)决定。

$$x_d = \begin{cases} 0 & (\text{非藻华}) \\ 1 & (\text{藻华}) \end{cases} \quad (7)$$

$$v_{id}^{k+1} = wv_{id}^k + s_1r_1(P_{id} - x_{id}^k) + s_2r_2(P_{gd} - x_{id}^k) \quad (8)$$

$$v_{id}^{k+1} = \begin{cases} v_{\max} & (v_{id}^{k+1} > v_{\max}) \\ v_{id}^{k+1} & (v_{\min} \leq v_{id}^{k+1} \leq v_{\max}) \\ v_{\min} & (v_{id}^{k+1} < v_{\min}) \end{cases} \quad (9)$$

$$x_{id}^{k+1} = \begin{cases} 1 & (L(v_{id}^k) > R) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases} \quad (10)$$

$$w = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{k} \times k_{\max} \quad (11)$$

$$L(v_{id}^k) = \frac{1}{1 + e^{-v_{id}^k}} \quad (12)$$

式中: i 为粒子序号; d 为空间维数; k 为迭代次数; w 为权重, $w_{\max}$ 和 $w_{\min}$ 为 0.95 和 0.40; $k_{\max}$ 为最大迭代次数; s_1 和 s_2 均为系数,取值为 2.05; r_1, r_2 和 R 为 $[0, 1]$ 间的随机数,对于每个粒子 r_1 和 r_2 都不同,而 R 在每次迭代中只生成一次; v_{id}^{k+1} 和 x_{id}^{k+1} 分别为第 $k+1$ 次迭代时,第 i 个粒子在 d 维的速度与位置; v_{id}^k 为第 k 次迭代时,第 i 个粒子在 d 维的速度; P_{id} 和 P_{gd} 分别为历史最优解与全局最优解; $v_{\max}$ 和 $v_{\min}$ 分别为允许的最大、最小速度,本研究将最大和最小分别设置为 1 和 0。

DPSO 算法运用于单个图块的具体步骤如下:

(1) 随机生成 I 个 D 维粒子,即 1 个 I 行 D 列的矩阵 $\mathbf{X}$ 。矩阵 $\mathbf{X}$ 中的值为 0 或 1。同时,随机生成速度矩阵 $\mathbf{V}$, $\mathbf{V}$ 的取值范围为 0 ~ 1。

(2) 对于 $\mathbf{X}$ 的每一行,图块中的像元被分为两类:藻华和非藻华。根据公式(5) 计算 $\mathbf{X}$ 每行的自适应值 T ,记录每行的历史最优解, $\mathbf{X}$ 中最大自适应值 $T_{\max}$ 所在的那行为全局最优解。

(3) 运用公式(8)、(9)、(11) 更新速度矩阵 $\mathbf{V}$,运用公式(8) ~ (10) 和公式(12) 更新位置矩阵 $\mathbf{X}$ 。

(4) 再次计算 $\mathbf{X}$ 每行的自适应值 T ,并比较本次与上次迭代时 $\mathbf{X}$ 每行的自适应值 T ,选取较大 T 值所在位置更新历史最优解和全局最优解。

(5) 当 $k = k_{\max}$ 时,进行下一步,否则返回第(3)步。

(6) 全局最优解是该图块的最终分类结果。之后依次对其他图块重复上述步骤。

2.4 光谱指数法

浮游藻类指数 FAI (floating algae index) 是由 Hu^[32] 提出的一种监测海洋与近海岸带藻类的方法,该指数对环境条件的适应能力强,可以有效地提取漂浮藻类,已被广泛应用于藻类的业务化监测中。因此,本研究选取 FAI 对呼伦湖藻华进行遥感识别,并将结果作为验证数据来检验 SMDPSO 算法的精度与可靠性。

2.5 精度验证方法

以 FAI 的分类结果为标准,运用格网统计法对 SMDPSO 算法进行精度验证。具体原理为:在呼伦湖内创建若干个大小为 $3\text{ km} \times 3\text{ km}$ 的正方形格网,以格网为单位分别统计 SMDPSO 算法和 FAI 提取的藻华面积,之后构建散点图,并计算两者之间的决定系数 (R^2) 和均方根误差 ($RMSE$)。

3 结果与分析

3.1 标准光谱曲线与概率图

首先,对标准假彩色合成的遥感影像进行交互式色彩拉伸,基于先验知识目视选取藻华与水体的样点各 164 个。然后,计算样点在各个波段的光谱反射率的平均值,得到呼伦湖藻华和水体的标准光谱曲线,如图 2 所示。

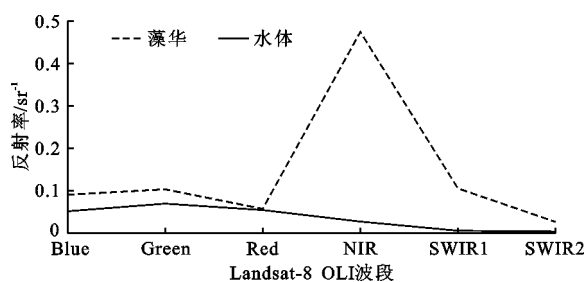


图2 呼伦湖藻华和水体的标准光谱曲线

由图 2 可以看出,藻华的光谱特征与典型植被相似,且在各个波段的反射率均大于水体。虽然藻华和水体在绿光波段都具有 1 个小的反射峰,但水体的反射率在绿光波段之后就随波长增加而逐渐降低,直至短波红外波段便趋于 0,曲线整体呈现出 1 个上下翻转的“对勾”形状。与之不同的是,藻华在红光波段具有明显的吸收谷,随后在红光波段到近红外波段之间形成一个“陡坡”,反射率急剧上升,在近红外波段达到顶峰。

基于上述特征,本研究以藻华标准光谱曲线中的红光波段、近红外波段和短波红外波段进行光谱匹配,并得到藻华概率图如图 3 所示。

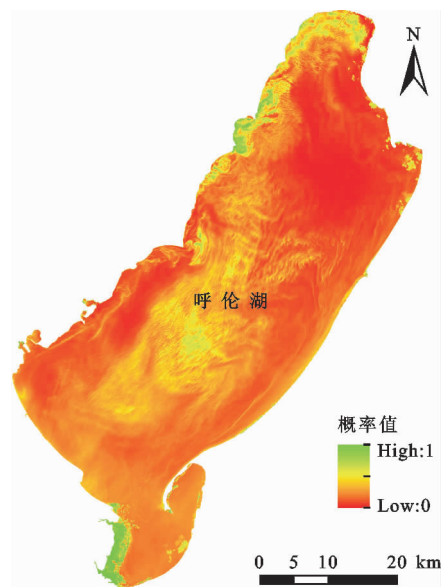


图3 呼伦湖藻华概率图(2017-08-20)

3.2 分类结果及验证

以 MATLAB R2018 软件为平台,运用 SMDPSO 算法提取呼伦湖藻华。其中,输入对象为 Landsat 影像图,输出结果为二值图像。之后,采用 ArcGIS10.2 软件整理出图,最终得到 2009 - 2018 年呼伦湖藻华分类图,如图 4 所示。由于 2012 和 2016 年的大部分影像有云覆盖,且其余影像也未发现有藻华爆发,因此图 4 缺少这两年的分类图。

本文又选取了 2015 年 7 月 28 日和 2017 年 8 月 2 日的遥感影像,对比 SMDPSO 算法和 FAI 的分类结果,并结合格网统计法绘制散点图(见图 5),对结果进行定量评价。

由图 5 可以看出,SMDPSO 算法和 FAI 的藻华提取结果十分相似,无论是面状、块状,还是絮状的藻华都能被准确提取。散点图中绝大多数点也紧密分布于 1:1 线附近,整体拟合度较好。不同分类方法之间的决定系数 R^2 在 2015 年 7 月 28 日和 2017 年 8 月 2 日分别为 0.98 和 0.97,均方根误差 $RMSE$ 均小于 0.22 km^2 ,这表明 SMDPSO 算法可以准确识别呼伦湖藻华。

3.3 呼伦湖藻华时空分布特征

通过计算各影像中藻华的面积,得到了 2009 - 2018 年呼伦湖的藻华面积统计图,如图 6 所示。

由图 6 可知,呼伦湖藻华大多爆发于每年 7 和 8 月,其次是 6 和 9 月,藻华面积较大的日期集中在 7 月下旬至 8 月中旬(2009 年 8 月 12 日: 125 km^2 ; 2011 年 8 月 9 日: 115.5 km^2 ; 2015 年 7 月 28 日: 87.6 km^2)。

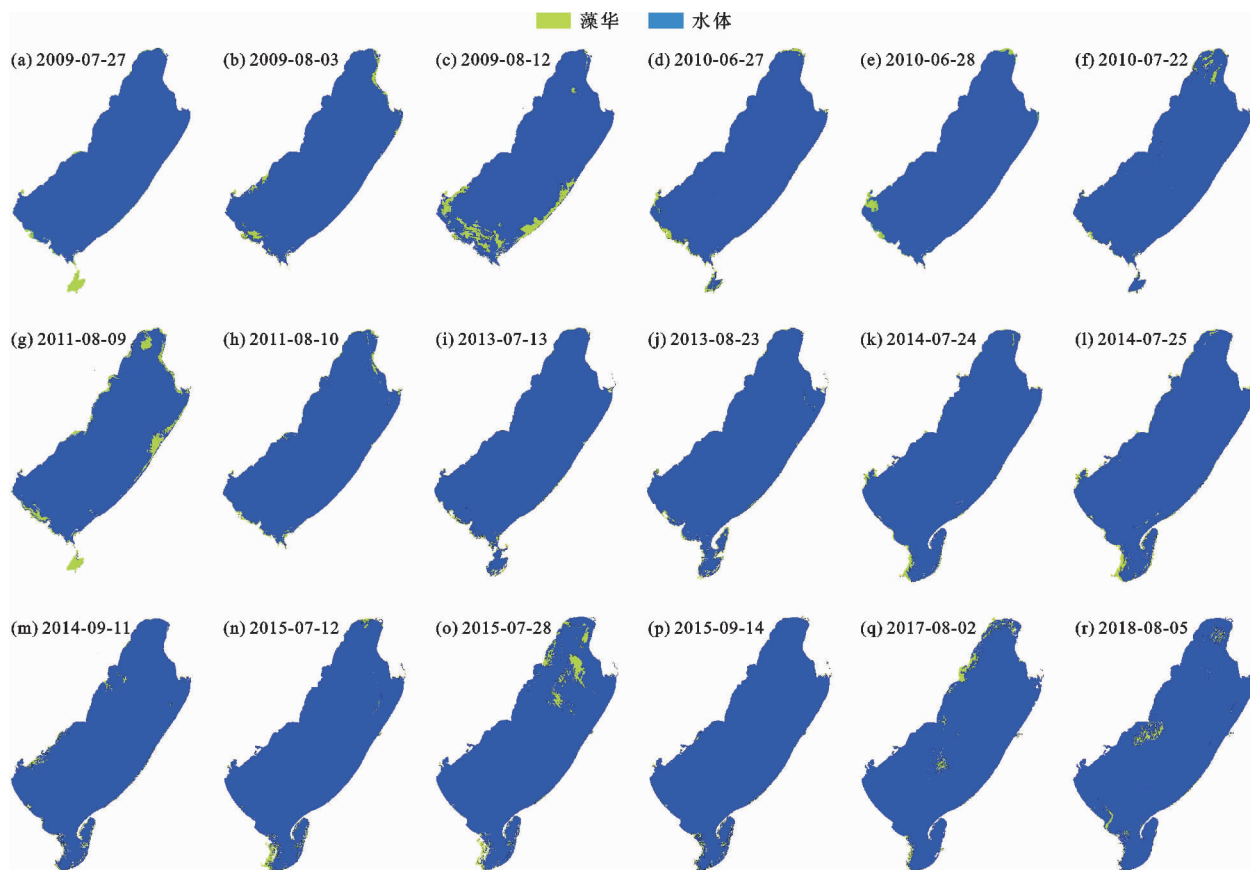


图4 基于 SMDPSO 算法的 2009 – 2018 年呼伦湖藻华分类图

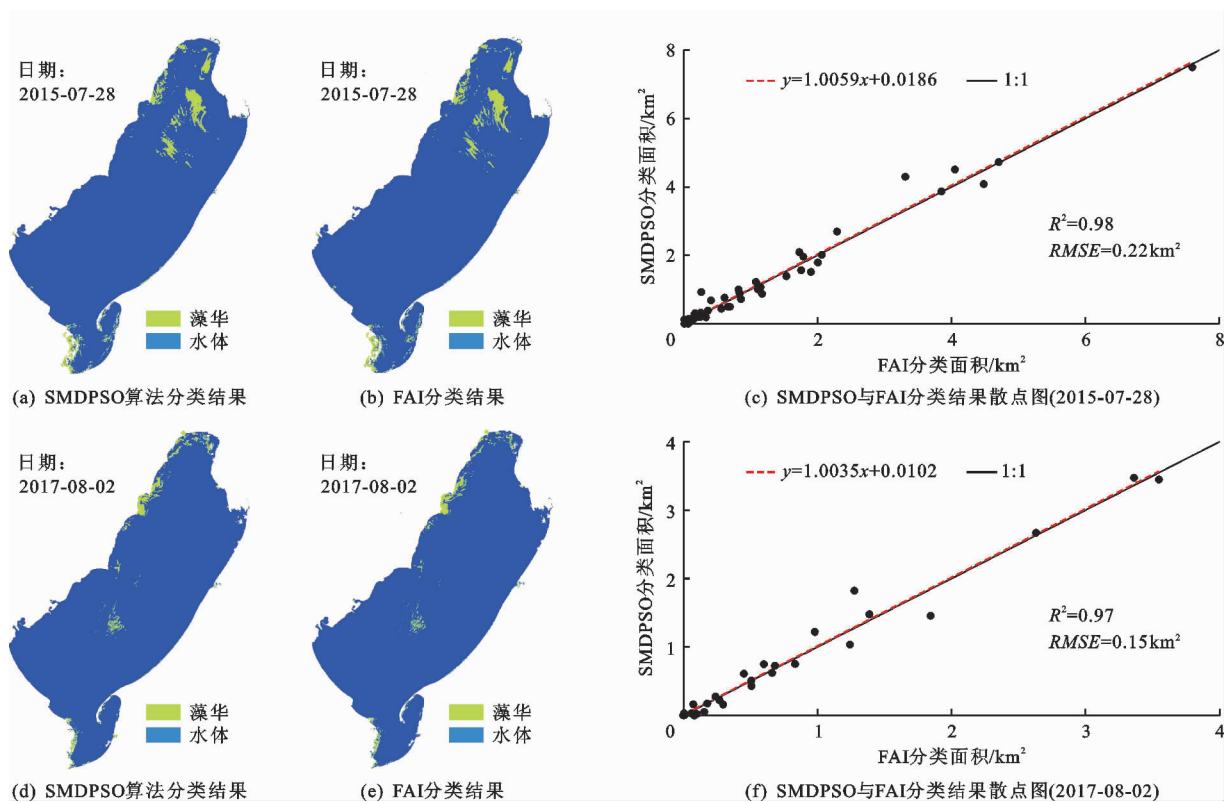


图5 基于 SMDPSO 算法和 FAI 的呼伦湖藻华分类结果及散点图(以 2015-07-28 和 2017-08-02 遥感影像为例)

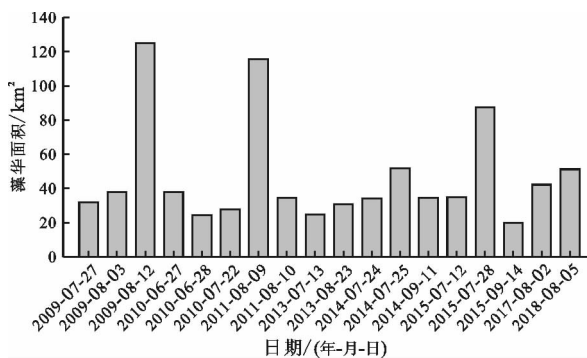


图6 2009-2018年呼伦湖藻华面积统计

为了探究呼伦湖藻华的空间分布特征,本文以像元为单位统计了2009-2018年藻华出现的次数,结果见图7。

由图7可知,藻华主要出现在湖泊南部、西南部和北部的边缘,而湖区中心却很少出现藻华,水体情况较好,这可能是周围土地类型和水流流速所导致的。一方面,湖区东北部为呼伦湖的旅游景点,人类的频繁活动对湖水产生了巨大影响;另一方面,由于湖区西南部距克鲁伦河入湖口较近,而此处长期受到放牧和工厂排放的影响,所以导致河口富营养化加剧,很容易出现藻华。

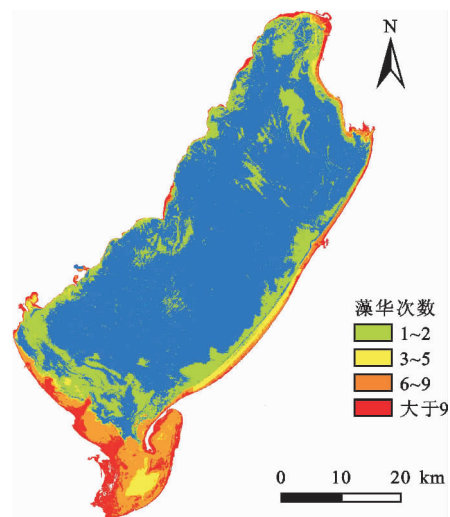


图7 2009-2018年呼伦湖藻华次数空间分布

3.4 算法适用性评价

为了进一步验证 SMDPSO 算法在其他区域的适用性,以2016年7月2日黄海区域的 OLI 影像为数据源对浒苔(属绿藻门,呈绿色)进行识别,并与 FAI 的分类结果进行比较,见图8。其中图8(b)和8(c)分别为 SMDPSO 和 FAI 方法的分类结果,其中绿色表示浒苔,蓝色表示海水。

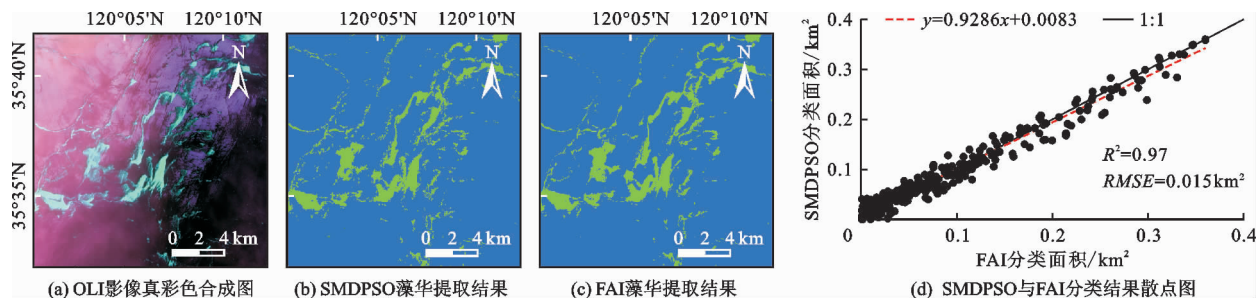


图8 不同方法对黄海的浒苔的提取结果及散点图(2016-07-02)

图8中的对比结果表明,浒苔的空间分布具有高度一致性,SMDPSO 算法能够很好地捕捉和描绘浒苔条纹的细节与形状,即使是很小的斑块也能清晰地识别出来。此外,结合格网统计法绘制的 SMDPSO 和 FAI 分类结果的散点图也表现出非常好的线性关系,拟合线几乎与 1:1 线重合, R^2 达到 0.97, $RMSE$ 为 0.015 km^2 ,这说明 SMDPSO 算法可以有效地识别黄海的浒苔。同时,也为算法的进一步发展和应用提供了方向。

与光谱指数法相比,SMDPSO 算法既保留了其分类精度高的特点,也在其他方面具有独特的优势。首先,SMDPSO 算法的参数少、成本低,且无需人工干预。此算法所涉及的参数仅包括标准光谱和图块

大小,而且一旦确定就无需改变。但是,使用光谱指数法进行遥感分类时,经常需要运用目视解译方法对每一幅影像的阈值进行调整以保证分类精度,这种方式不仅具有很大的主观性,而且也会消耗许多时间和人力。所以,SMDPSO 算法比光谱指数法更加简单方便。其次,由于 SMDPSO 算法是基于目标地物的标准光谱,通过计算像元之间的相似性来识别地物,所以如果标准光谱发生变化,SMDPSO 算法同样可以识别不同种类的藻华或其他类别的地物,这是单一的光谱指数不能实现的。然而,SMDPSO 算法也存在一些缺点,即在运行过程中消耗的时间较长,所以之后的研究重点在于如何在保证精度的前提下提升算法的效率。

4 结 论

本文利用基于离散粒子群优化的光谱匹配 (SMDPSO) 算法对 2009–2018 年呼伦湖的藻华进行识别,并用浮游藻类指数 (FAI) 的分类结果进行检验。主要结论如下:

(1) SMDPSO 算法对呼伦湖藻华的提取效果较好,与 FAI 高度一致。

(2) 呼伦湖藻华的高发期为 7–8 月,且主要爆发于湖泊边缘,在湖中心出现的次数较少。

(3) SMDPSO 算法的分类精度与 FAI 相似,但其成本更低、所需参数较少,且无需人工干预,甚至可以通过改变标准光谱来识别其他地物(如识别黄海的浒苔);

(4) 在之后的研究中,还需要进一步验证 SMDPSO 算法在多种水生植物并存环境下的适用性,并将其推广应用于其他具有高分辨率的多光谱遥感影像中。

参考文献:

- [1] HO J C, MICHALAK A M, PAHLEVAN N. Widespread global increase in intense lake phytoplankton blooms since the 1980s[J]. *Nature*, 2019, 574: 667–670.
- [2] 张 娇,陈莉琼,陈晓玲,等. HJ-1B 和 Landsat 卫星蓝藻水华监测能力评估——以洱海为例[J]. *水资源与水工程学报*, 2016, 27(4): 38–43.
- [3] 周卢茜,裴钱玲琳,唐剑锋,等. 城市湖泊春季绿藻水华特征及其影响因素——以宁波月湖为例[J]. *湖泊科学*, 2019, 31(4): 1023–1034.
- [4] FANG Chong, SONG Kaishan, SHANG Yingxin, et al. Remote sensing of harmful algal blooms variability for Lake Hulun using adjusted FAI (AFAI) algorithm[J]. *Journal of Environmental Informatics*, 2018: 54–68.
- [5] 何兆骏,段洪涛,朱 利,等. 基于环境卫星 CCD 数据的太湖蓝藻水华监测算法研究[J]. *湖泊科学*, 2016, 28(3): 624–634.
- [6] 李旭文,侍 昊,张 悦,等. 基于欧洲航天局“哨兵-2A”卫星的太湖蓝藻遥感监测[J]. *中国环境监测*, 2018, 34(4): 169–176.
- [7] 胡旻琪,张玉超,马荣华,等. 巢湖 2016 年蓝藻水华时空分布及环境驱动力分析[J]. *环境科学*, 2018, 39(11): 4925–4937.
- [8] 张 娇,陈莉琼,陈晓玲. 基于 FAI 方法的洱海蓝藻水华遥感监测[J]. *湖泊科学*, 2016, 28(4): 718–725.
- [9] 张东彦,尹 勋,余 宝,等. 多源卫星遥感数据监测巢湖蓝藻水华爆发研究[J]. *红外与激光工程*, 2019, 48(7): 303–314.
- [10] 李晟铭,刘吉平,宋开山,等. 基于 Landsat 影像巢湖蓝藻水华暴发时空变化特征及其驱动因素分析[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(5): 1205–1213.
- [11] 柳晶辉,万 君. 利用 HJ-1 卫星多光谱数据监测城市湖泊蓝藻研究[J]. *气象科技进展*, 2018, 8(5): 91–95.
- [12] 林 怡,潘 琛,陈映鹰,等. 基于遥感影像光谱分析的蓝藻水华识别方法[J]. *同济大学学报(自然科学版)*, 2011, 39(8): 1247–1252.
- [13] OYAMA Y, MATSUSHITA B, FUKUSHIMA T. Distinguishing surface cyanobacterial blooms and aquatic macrophytes using Landsat/TM and ETM+ shortwave infrared bands[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 157: 35–47.
- [14] OYAMA Y, FUKUSHIMA T, MATSUSHITA B, et al. Monitoring levels of cyanobacterial blooms using the visual cyanobacteria index (VCI) and floating algae index (FAI)[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 38: 335–348.
- [15] QING Song, A Runa, SHUN Buri, et al. Distinguishing and mapping of aquatic vegetations and yellow algae bloom with Landsat satellite data in a complex shallow Lake, China during 1986–2018[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 112: 106073.
- [16] 刘朔孺,杨 敏,张方辉,等. 基于支持向量机分类的嘉陵江草街水库甲藻水华预警[J]. *湖泊科学*, 2015, 27(1): 38–43.
- [17] 李 瑶,张立福,黄长平,等. 基于 MODIS 植被指数时间谱的太湖 2001 年–2013 年蓝藻爆发监测[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36(5): 1406–1411.
- [18] 李世明,王小艺,许继平,等. 基于人工神经网络的河湖蓝藻水华状态评价研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(4): 93–96.
- [19] 韩秀珍,吴朝阳,郑 伟,等. 基于水面实测光谱的太湖蓝藻卫星遥感研究[J]. *应用气象学报*, 2010, 21(6): 724–731.
- [20] VERDÚ A R, MARTÍNEZ R P, ALONSO C D H. Monitoring cyanobacteria in inland waters by remote sensing[J]. *SIL Proceedings*, 2010, 30(9): 1475–1476.
- [21] 王凌斌. 湖库藻类水华智能识别与预测研究[D]. 北京:北京工商大学, 2015.
- [22] KENNEDY J, EBERHART R. Particle swarm optimization[C]//*Proceedings of ICNN'95 – International Conference on Neural Networks*. IEEE, 1995.
- [23] LI Linyi, CHEN Yun, YU Xin, et al. Sub-pixel flood inundation mapping from multispectral remotely sensed images based on discrete particle swarm optimization[J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, 101: 10–21.

(下转第 80 页)

参考文献:

- [1] JEFFERSON M. IPCC fifth assessment synthesis report: "Climate change 2014: Longer report": Critical analysis [J]. *Technological Forecasting & Social Change*, 2015, 92:362–363.
- [2] MEYBECK M. Global analysis of river systems: From earth system controls to Anthropocene syndromes [J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 2003, 358 (1440): 1935–1955.
- [3] 李冰瑶, 陈星, 周志才, 等. 缺水地区水资源可持续利用评价与对策探讨[J]. *水资源与水工程学报*, 2017, 28(6): 104–108.
- [4] 陈亚宁, 杜强, 陈跃斌, 等. 博斯腾湖流域水资源可持续利用研究[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [5] 吕继强, 张晓伟, 沈冰, 等. 和田河年径流序列变化特征及驱动因素分析[J]. *水力发电学报*, 2010, 29(5): 165–169.
- [6] 王杰, 王俊, 孙鑫. 和田河流域水量沿程变化分析研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2013, 24(3): 142–148.
- [7] 高云, 郭维华. 和田河典型站点径流及气象因子变化规律分析[J]. *南水北调与水利科技*, 2018, 16(2): 87–92.
- [8] 杨扬, 王丽娟, 岳平, 等. 利用陆面模式和遥感经验模型估算半干旱区陆面蒸散量[J]. *水土保持研究*, 2020, 27(5): 147–153 + 159.
- [9] 许敏, 江鹏. 基于 MODIS 和 ERA-Interim 的安徽省地表蒸散发及其受植被覆盖度影响研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(2): 253–260.
- [10] ADNAN S, ULLAH K, AHMED R. Variability in meteorological parameters and their impact on evapotranspiration in a humid zone of Pakistan[J]. *Meteorological Applications*, 2019, 27(5): e1859.
- [11] 蒋春宇, 黄领梅, 沈冰, 等. CRAE 模型在新疆和田绿洲的适用性分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2016, 27(2): 51–54.
- [12] 雷雨, 李江. 塔里木河干流上中游河道耗水过程分析[J]. *水利水电技术*, 2019, 50(4): 55–63.
- [13] 新疆和田河流域水资源利用初步规划[R]. 新疆: 新疆水利水电勘测设计研究院, 2011.
- [14] 晁智龙. 1959–2011 年北洛河上游流域径流量及其组分变化趋势和时间分配特征[J]. *水资源与水工程学报*, 2020, 31(1): 23–28.
- [15] 薛嵩嵩, 高凡, 何兵. 径流序列变异诊断的近似熵与样本熵法对比研究——以新疆叶尔羌河为例[J]. *水资源与水工程学报*, 2019, 30(6): 24–29.
- [16] 刘方平, 汪文超, 邓海龙, 等. 鄱阳湖流域典型稻田水量平衡分析[J]. *水资源保护*, 2019, 35(6): 100–103.
- [17] 董弟文, 阿布都热合曼·哈力克, 王大伟, 等. 近 60 年和田河源区径流特征及对气候变化的响应[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2018, 16(6): 536–543.
- [18] 周晓曦, 阿布都热合曼·哈力克. 气候变化对和田河径流的影响研究[J]. *中国农村水利水电*, 2017(3): 21–25.
- [19] 秦胜英, 黄领梅, 沈冰, 等. 新疆和田河径流损失辨析[J]. *水资源与水工程学报*, 2015, 26(4): 85–88.
- [20] 邓铭江, 杨鹏年, 周海鹰, 等. 塔里木河下游水量转化特征及其生态输水策略[J]. *干旱区研究*, 2017, 34(4): 717–726.
- (上接第 72 页)
- [24] CAO Yin, YE Yuntao, ZHAO Hongli, et al. Remote sensing of water quality based on HJ-1A HSI imagery with modified discrete binary particle swarm optimization-partial least squares (MDBPSO-PLS) in inland waters: A case in Weishan Lake [J]. *Ecological Informatics*, 2018, 44: 21–32.
- [25] GAO Yongnian, LI Qin, WANG shuangshuang, et al. Adaptive neural network based on segmented particle swarm optimization for remote-sensing estimations of vegetation biomass [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 211: 248–260.
- [26] LAL A M, ANOUNCIA S M. Modernizing the multi-temporal multispectral remotely sensed image change detection for global maxima through binary particle swarm optimization[J]. *Journal of King Saud University – Computer and Information Sciences*, 2018.
- [27] JIA Kai, JIANG Weiguo, LI Jing, et al. Spectral matching based on discrete particle swarm optimization: A new method for terrestrial water body extraction using multi-temporal Landsat 8 images [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 209: 1–18.
- [28] 郭子扬, 李畅游, 史小红, 等. 呼伦湖冰封期 N、P 时空分布及富营养化特征[J]. *环境化学*, 2019, 38(5): 1180–1189.
- [29] 姜忠峰, 李畅游, 张生, 等. 呼伦湖浮游植物调查与营养状况评价[J]. *农业环境科学学报*, 2011, 30(4): 726–732.
- [30] VANHELLEMONT Q, RUDDICK K. Turbid wakes associated with offshore wind turbines observed with Landsat 8 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, 145: 105–115.
- [31] VANHELLEMONT Q, RUDDICK K. Advantages of high quality SWIR bands for ocean colour processing: Examples from Landsat-8 [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 161: 89–106.
- [32] HU Chuanming. A novel ocean color index to detect floating algae in the global oceans [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2009, 113(10): 2118–2129.