引文格式：孙衍建. 混合像元分解结合SVM的水生植物遥感信息提取[J]. 地理空间信息, 2023, 21(3): 72-76. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623. 2023.03.015

混合像元分解结合SVM的水生植物遥感信息提取

孙衍建[1]
（1. 山东省鲁南地质工程勘察院（山东省地勘局第二地质大队），山东 济宁 272100）

摘　要：水生植物是湖泊生态系统的重要组成部分，具有稳定和调节湖泊生态系统、提高水体透明度、维持渔业生产等生态和社会经济功能。基于实测光谱数据，分析了乌梁素海水生植物光谱特征，作为建立标准光谱库的参考。基于Landsat TM/ETM+/OLI数据，提出了一种结合混合像元分解（FCLSU）和SVM的新方法，对1986—2018年的乌梁素海水生植物进行了遥感分类，分析其时空分布特征。结果表明，新方法可有效提高分类精度，挺水植物、沉水植物和黄苔藻华的分类精度均较高，相关性分别为0.973 1、0.930 9和0.904，RMSE均为0.02 km^2。乌梁素海水生植物时空分布结果显示，1986—2018年挺水植物生长面积呈缓慢增长趋势；沉水植物覆盖面积具有阶段性变化特征，即1986—2013年呈减少趋势，2013年以后呈快速增长趋势。研究期间黄苔藻华覆盖面积无明显变化趋势，但个别年份会爆发性增长。

关键词：水生植物；遥感分类；时空分布；乌梁素海
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2023）03-0072-05

Aquatic Plant Remote Sensing Information Extraction Based on Hybrid Pixel Decomposition and SVM

SUN Yanjian[1]
(1. Lunan Geological and Engineering Survey Institute of Shandong Province (Second Geological Brigade of Shandong Provincial Geological Survey Bureau), Jining 272100, China)

Abstract: Aquatic plants are an important part of lake ecosystem, which has ecological and socio-economic functions such as stabilizing and regulating lake ecosystem, improving water transparency and maintaining fishery production. Based on the measured spectral data, we analyzed the spectral characteristics of aguatic plants in Ulansuhai, as a reference for the establishment of standard spectral library. Based on Landsat TM/ETM+/OLI data, we proposed a new method combining FCLSU and SVM, and analyzed the spatio-temporal distribution characteristics of aguatic plants from 1986 to 2018 by remote sensing. The results showed that the new method could effectively improve the classification accuracy, the classification accuracy of emergent plants, submerged plants and yellow moss algal blooms are higher, the correlations were 0.973 1, 0.930 9 and 0.904, respectively, and the RMSE were 0.02 km^2. The spatio-temporal distribution of aguatic plants showed that the growth area of emergent plants increased slowly from 1986 to 2018. The coverage area of submerged plants showed a gradual change, that is, it showed a decreasing trend from 1986 to 2013, and a rapid increase trend after 2013. During the study period, there was no obvious change trend in the coverage area of yellow moss algal blooms, but it increased explosively in some years.

Key words: aquatic plant, remote sensing classification, spatio-temporal distribution, Ulansuhai

湖泊作为地球水圈的组成部分，具有调节区域气候、维持流域生态平衡、记录区域环境变化和保护生物多样性等特殊功能[1-2]。水生植物的分布直接影响湖泊的稳态，因此准确快速地监测湖泊水生植物类群、了解其时空分布特征，对浅水湖泊的管理和治理具有重要意义。内蒙古巴彦淖尔市乌梁素海是黄河流域最大的淡水湖，也是河套灌区农田退水、工业废水和生活污水的唯一承泄渠道，对维护周边地区生态平衡、调节区域气候、流域蓄水防洪具有重要作用[3]。乌梁素海湖区挺水植物、沉水植物等大型水生植物广泛分布。由于长期受农田退水、工业废水等影响，湖区已被严重污染，水体营养盐、有机物等质量浓度过高，导致乌梁素海成为典型的重度富营养化草型湖泊[4-5]。近年来，湖区明水区每年都会出现附于水面的黄色团块状浮游藻类——黄苔，使湖泊生态环境变得更加复杂且脆弱[6]。

传统的水生植物监测方法以人工船舶调查为主，该方式精度较高，但需投入大量人力物力，监测范围

收稿日期：2021-04-24；修回日期：2021-08-04。
项目来源：国家自然科学基金资助项目（41801385）。
作者简介：孙衍建（1982—），工程硕士，高级工程师，主要研究方向为测绘、航测遥感，E-mail：1278752637@qq.com。

小、且时空连续性差。卫星遥感技术具有宏观、高效、低成本、可进行长时间序列的动态监测等优势，已成为水生植物监测的重要技术手段。相较于陆生植被，水生植物由于生长在复杂度较高的水体中，其光谱特性具有复杂性。挺水植物位于水面之上，受水环境影响较小，具有典型的植物光谱特征；而沉水植物由于完全沉入水中，反射光谱易受水环境参数影响，其光谱特征与挺水植被有显著差异。不同水生植物类群的光谱特征及其对水环境的光谱响应各有差异，这也是水生植物遥感监测的理论基础。近年来，国内外学者基于多种遥感卫星数据在各大型浅水湖泊先后开展了一系列水生植物遥感分类和制图研究，常见的水生植物监测与识别方法可分为4类：①目视解译方法[7]，精度较高但耗时较长，不适用于长时间序列的水生植物分类和动态监测；②监督分类和非监督分类[8-11]，前者在很大程度上依赖于先验知识，而后者受光学复合图像分类精度差的阻碍；③光谱指数法结合决策树分类方法[12-14]，通过数学比率将两个或多个波段组合在一起被证明是有效的，但该方法在不同时相的遥感影像分割阈值将出现较大波动；④混合像元分解法[15]，有效定义独立的终端成员，量化的每个定义端元都有亚像素分数估计。在上述方法中，混合像元分解法的性能较好，能检测较低目标信号，尤其是在环境复杂区域可取得很好的效果。另外，该方法的分数图像比光谱指数更易解释，因为它们具有实际的物理意义。目前对于水生植物的分类监测，尤其是沉水植被和浮游藻类的提取，许多学者已进行了大量研究并提出了多种算法；但大多数算法不适用于乌梁素海水生植物的提取，无法为乌梁素海生态保护和生态修复提供可靠的基础数据。本文基于水生植物的光谱特征，拟构建标准的光谱库，利用混合像元分解结合SVM的方法对乌梁素海水生植物进行长时间序列监测，并分析其时空分布特征规律。

1　研究数据和方法

1.1　研究区概况

乌梁素海位于内蒙古乌拉特前旗境内，南北长约35~40 km，东西宽约5~10 km，面积约为293 km^2，是同纬度最大的自然湿地，也是我国八大淡水湖之一。研究区属干旱半干旱气候，多年平均气温为6.89℃，年均降水量为188.30 mm。乌梁素海是当地农田退水、山洪、工业废水和生活污水唯一的承泄渠道，具有蓄水防洪、农业灌溉和调节区域气候等多种功能[16]。由于长期受农田退水、工业废水等影响，湖水被严重污染，湖区内挺水植物、沉水植物等大型水生植物疯长，导致其成为重度富营养化草型湖泊[17]。其中，挺水植物优势种为芦苇，沉水植物的绝对优势种为龙须眼子菜和穗花狐尾藻，其生长季和衰退期开始得均比芦苇晚，但生长速度特别快。近年来，湖区明水区每年都会出现附于水面的黄色团块状浮游藻类——黄苔。

1.2　数据来源与预处理

本文于2017—2018年对乌梁素海水生植物进行了野外实地调查，共获取410组水生植物观测数据，包括遥感反射率、水生植物景观照片等。采样时间分别为2017-08-14、2018-07-16、2018-08-01、2018-08-17、2018-09-02和2018-09-18。本文以Landsat5、Landsat7和Landsat8卫星遥感影像为数据源，通过筛选，最终采用无云覆盖或云量少、数据质量较好的影像，具体数据如表1所示。首先对影像进行辐射定标和FLAAH大气校正，以消除大气传输过程的影响；再以2017-08-13的GF-2 PMS高分辨率遥感影像为验证数据，利用二次多项式模型将GF-2 PMS影像与其对应的准同步Landsat8 OLI数据进行几何配准，配准总的均方根误差（RMSE）小于0.5个像元；最后进行影像拼接与镶嵌。

1.3　光谱特征分析与光谱库建立

不同地区由于地形地貌和物候变化的影响，地物的波谱反射率可能有所差异，为了尽量减少地物波谱差异对混合像元分解精度的影响，本文特意收集了乌梁素海内典型地物的光谱数据。ENVI支持波谱库的创建，因此将ASD地物光谱仪采集的光谱数据导入ENVI软件，建立研究区的典型地物光谱库，用于识别选取端元的波谱曲线。乌梁素海内典型的水生植物主要包括挺水植物（芦苇、香蒲）、沉水植物和黄苔（图1）。

1.4　端元选取

本文以地物光谱仪从野外实测光谱获取的端元为“参考端元”，再从待分类影像上选取“图像端元”，然后利用“参考端元”和“图像端元”相结合的方式选取

表1　本文采用的Landsat影像信息表

年份	月份	传感器	空间分辨率/m	数量	对研究区的覆盖度/%
1986—2008	6—11	Landsat5 TM	30	40	100
2002—2014	6—10	Landsat7 ETM	30	20	100
2013—2018	6—8	Landsat8 OLI	30	5	100

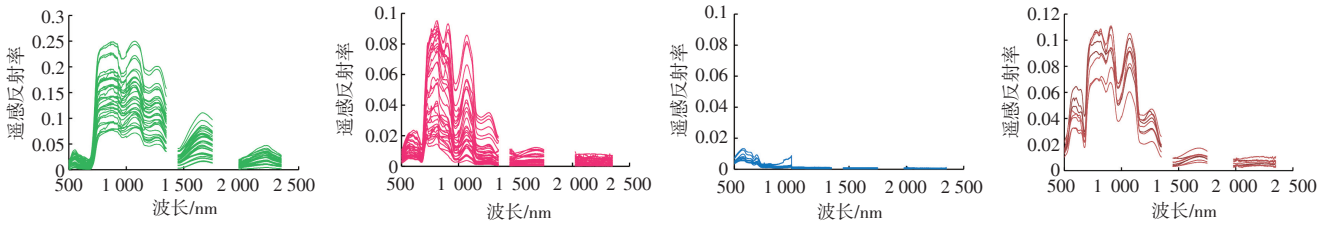
端元，并根据需要对选取的端元进行调整和修改，最终确定端元。端元反射率值直接取自2017年Landsat8 OLI图像，利用GF-2 PMS图像来定位最均匀的端元目标。

1.5 混合像元分解结合SVM的分类方法

线性光谱混合模型是混合像元分解的常用方法，本文利用完全约束的最小二乘混合像元分解算法提取研究区的水生植物丰度，避免了无约束最小二乘混合像元分解算法提取端元信息时出现负值的情况，且提高了水生植被丰度信息提取的精度；利用RMSE对混合像元分解结果的提取精度进行评价。应用传统的监督分类方法只能做到定性划分，由于分类样本选取的不确定性，很难做到准确分类，分类精度不高。本文采用混合像元分解与SVM相结合的方法，定量划分研究区的水生植物。首先对研究区遥感影像进行混合像元分解，然后结合各丰度图影像在丰度较高的区域选择训练样本，最后将训练样本作为SVM分类器的输入参数进行研究区水生植物的分类和提取。

1.6 精度评价

基于实测数据，本文对GF-2 PMS影像进行目视解译[18]，得到GF-2 PMS影像的提取结果，并利用格网统计方法验证Landsat8 OLI地表水提取的精度。首先利用ArcGIS软件在各典型子区域内建立450个网格，网格大小为600 m×600 m；再针对Landsat8 OLI地表水提取结果和GF-2 PMS处理结果，分别统计各网格内的水生植物面积；最后通过计算二者的相关系数和RMSE等统计量，对分类结果进行精度评价。



a 挺水植物 b 沉水植物 c 黄苔藻华 d 开阔水体

图1 水生植物实测反射率图

2 研究结果与分析

2.1 标准光谱库

本文利用最小噪声分离变换结合像元纯度指数从待分类影像上选取端元，根据地物光谱仪从野外实测光谱获取的端元对选取的端元进行调整和修改，最终确定端元。研究区标准光谱库的光谱曲线如图2所示。

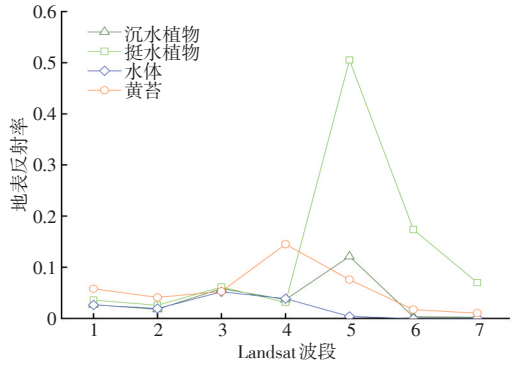


图2 研究区标准光谱库的光谱曲线

2.2 混合像元分解丰度图

混合像元分解后获得的研究区典型水生植物丰度图如图3所示，可以看出，丰度越大的区域水生植物的纯度越高，挺水植物、沉水植物和水体分解精度较高，接近真实的水生植物分布状况；湖区内RMSE值普遍较小，说明混合像元分解模型精度较高。在各水生植物纯度较高的区域进行训练样本选取，并将所选的样本作为SVM分类器的输入参数。

2.3 Landsat与GF-2 PMS的分类结果

由研究区水生植物分类结果定量精度评价可知，提取结果与GF-2 PMS影像目视解译结果整体上较一

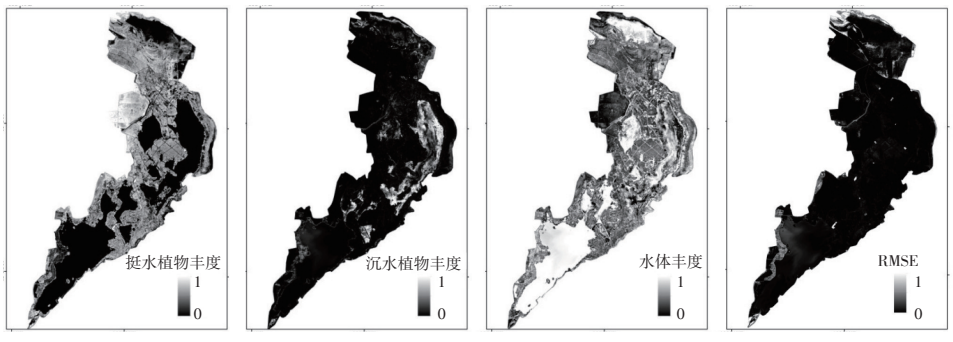
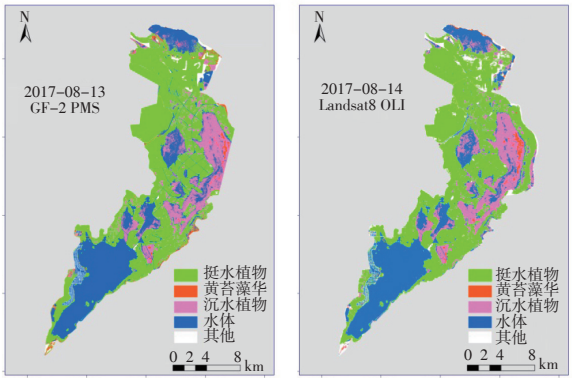


图3 Landsat影像各典型水生植物的混合像元分解丰度图

致，挺水植物、沉水植物、黄苔藻华的 R^2 分别为0.973 1、0.930 9和0.904，如图4、5所示。

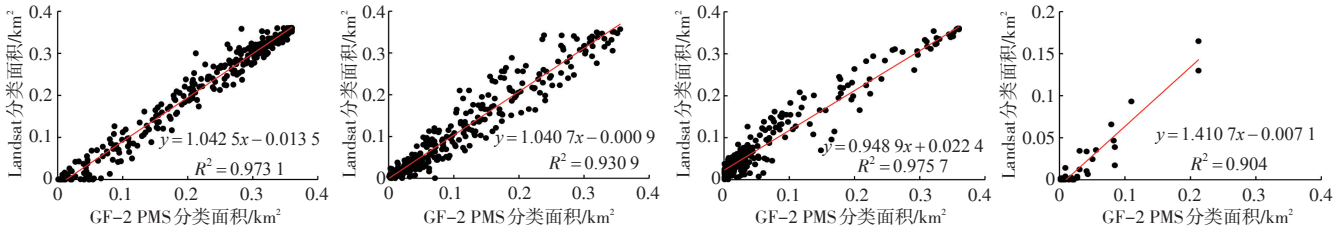


a GF-2 PMS目视判读结果　　b Landsat8 OLI分类结果

图4　Landsat8 OLI分类结果和GF-2 PMS目视判读结果

2.4　水生植物的变化特征分析

本文利用混合像元分解和SVM相结合的方法获取了1986—2018年乌梁素海水生植物的空间分布图（图6）。由于数据质量（云量等）和数据量的限制，挑选每年生长季（7—8月）的一景影像反映1986—2018年乌梁素海水生植物年际时空变化的分布特征，其中1990年无数据。1986—2018年水生植物监测时间与面积统计结果如表2所示，可以看出，1986—2018年乌梁素海挺水植物生长面积整体呈缓慢增长趋势，年均增长面积约为0.85 km²，其中1987-08-28的面积最小（约为143.47 km²），2010-08-27的面积达到峰值（约为196.28 km²），2014年以后挺水植物生长面积呈小幅减少趋势。由图6可知，1986—2018年整个湖区内遍布挺水植物，1986年和1987年乌梁素海总排干沟周围为裸地，1988年开始对该区域的湖滨地进行围湖造田，使挺水植物生长面积小幅增加；1986—1994年乌梁素海北部裸地较多，1994年之后该区域有明显的水体和挺水植物，2014年之后东大滩和西大滩之间的挺水植物出现明显的“斑块区域”，使得挺水植物生长面积呈小幅减少趋势；乌梁素海沉水植物覆盖面积具有阶段性变化特征，1986—2013年沉水植物覆盖面积呈波动性减小趋势，年均减少量约为1.7 km²，2013—2018年沉水植物覆盖面积呈迅速增长趋势，年增长幅度为9.02 km²，其中2013年沉水植物覆盖面积最小（约为31.22 km²），其次为2012年（约为37.26 km²），1988年沉水植物覆盖面积达到峰值（约为102.06 km²），其次为1991年（约为99.43 km²）；1986—2010年乌梁素海沉水植物主要分布在东大滩和湖泊南部，其中2006年、2007年、2009年和2010年西大滩出现较大面积的沉水植物，2011—2018年湖泊南部的沉水植物显著减少，2012年和2013年东大滩沉水植物也明显减少，导致2012年和2013年的沉水植物覆盖面积出现最低值，2014年以后东大滩沉水植物



a 挺水植物　　b 沉水植物　　c 水体　　d 黄苔

图5　OLI影像分类结果与GF-2 PMS目视判读结果对比

表2　1986—2018年水生植物监测时间与面积对比

监测时间	挺水植物面积/km²	沉水植物面积/km²	黄苔藻华面积/km²	监测时间	挺水植物面积/km²	沉水植物面积/km²	黄苔藻华面积/km²
1986-08-09	155.59	94.52	0.88	2003-08-08	184.29	62.60	10.40
1987-08-28	143.47	73.14	2.30	2004-07-01	169.65	79.22	3.96
1988-08-14	163.22	102.06	0.88	2005-08-05	183.25	60.00	7.34
1989-07-08	162.92	61.39	1.16	2006-08-24	177.30	91.94	2.61
1991-08-23	171.03	99.43	5.50	2007-08-03	184.92	55.37	1.36
1992-09-26	172.90	82.23	0.34	2008-07-12	189.44	65.66	6.29
1993-09-29	174.28	92.79	0.08	2009-07-23	191.78	63.86	5.67
1994-01-02	163.18	86.54	0.69	2010-08-27	196.28	58.57	6.30
1995-08-02	168.22	69.93	0.34	2011-07-13	184.63	40.11	1.97
1996-07-03	166.00	93.96	0.28	2012-08-08	188.80	37.26	0.00
1997-08-23	173.70	66.04	0.74	2013-08-03	190.83	31.22	0.12
1998-09-27	176.16	83.16	0.72	2014-07-29	195.24	42.03	1.83
1999-07-28	176.78	75.78	13.05	2015-08-25	191.59	40.18	1.59
2000-07-30	179.43	67.42	3.57	2016-08-27	180.70	55.39	0.91
2001-08-02	176.42	82.36	0.00	2017-08-14	164.89	63.64	3.14
2002-08-13	170.05	76.26	4.37	2018-06-30	160.03	74.93	0.00

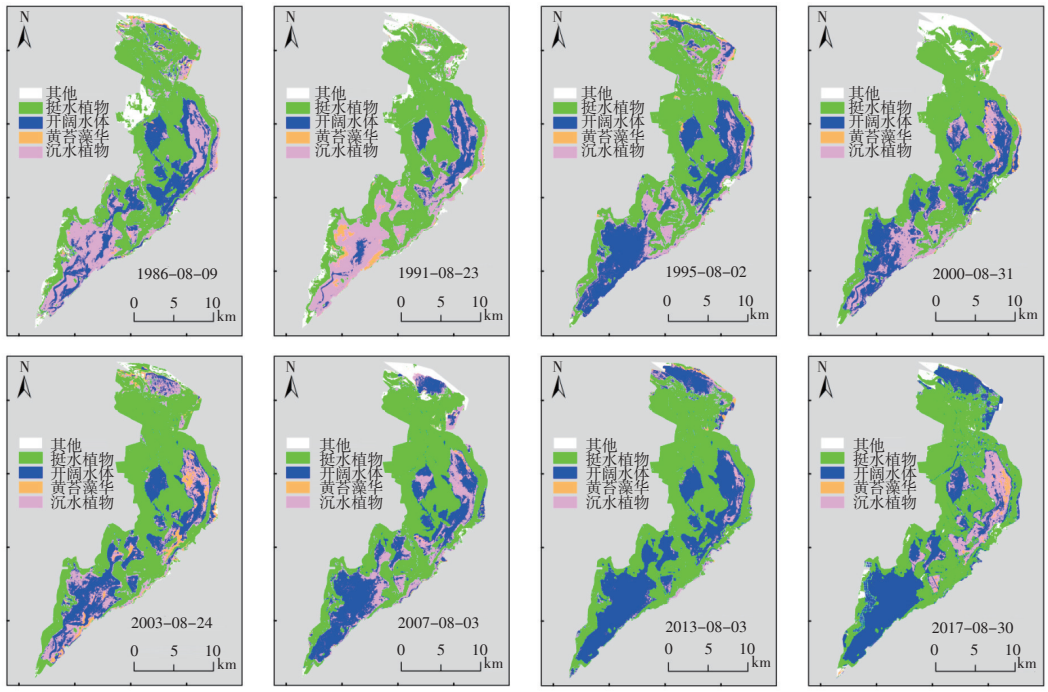


图6 1986—2017年乌梁素海水生植物时空分布图

迅速生长，2017-08-14尤为明显；1986—2018年乌梁素海黄苔藻华的覆盖面积没有显著变化趋势，而具有一定的爆发性，如1999年、2003年、2005年、2008年和2010年均有黄苔藻华爆发的现象，其中1999年黄苔藻华覆盖面积最大，为13.05 km^2，黄苔藻华爆发地点主要为东大滩和码头附近，1999年湖泊南部也出现了大面积的黄苔藻华。

水环境通常是由水体和水生植物等组成的混合环境，且沉水植物完全沉入水中，反射光谱易受水环境参数的影响，其光谱特征变得复杂化。因此，利用Landsat等中空间分辨率传感器提取水生植被信息是一个亚像素的混合问题，在定量遥感中是必须要解决的关键问题。虽然已存在很多亚像素图像分析技术，但最常用的仍是线性光谱混合分析。传统分类方法具有一定的局限性，本文尝试利用混合像元分解与SVM相结合的方法，将二者的优势结合起来进行研究区水生植物的遥感信息提取。

通过对乌梁素海水生植物光谱特征的分析，本文提出了一种新的水生植物遥感分类方法，进而研究了1986—2018年乌梁素海水生植物的时空分布特征。然而，由于数据质量和数据获取等限制，仍存在一些不足，具体如下：在水生植物年内时空分布特征研究方面，由于数据时间分辨率限制，未能对水生植物进行更短时间尺度的监测，拟在下一步研究中，结合HJ-1A/B CCD数据对乌梁素海水生植物进行更短时间尺度的监测；未研究水生植物对环境因素的响应，在后续研究中，将会进一步分析气候因素和环境因素对水生植物生长的影响。

3 结 语

本文结合实测反射率数据与2017-08-14的Landsat8 OLI数据，分析了乌梁素海挺水植物、沉水植物和黄苔藻华的光谱特征。

基于2017-08-14的Landsat8 OLI数据，本文利用混合像元分解结合SVM的方法对乌梁素海水生植物进行遥感分类，并利用2017-08-13的GF-2 PMS数据验证了分类结果。结果表明，乌梁素海水生植物遥感分类精度较高，挺水植物、沉水植物和黄苔藻华分类结果相关性分别为0.973 1、0.930 9和0.904，RMSE均为0.02 km^2。将该方法应用于不同时期的遥感影像，得到1986—2018年乌梁素海水生植物的时空分布结果。

由乌梁素海水生植物时空分布结果可知，1986—2018年挺水植物生长面积呈缓慢增长趋势；1986—2018年沉水植物覆盖面积具有阶段性变化特征，1986—2013年呈减少趋势，2013年以后呈快速增长趋势；1986—2018年黄苔藻华覆盖面积无明显变化趋势，而具有爆发性。

参考文献

[1] ZHANG Y, Jeppesen E, LIU X, et al. Global Loss of Aquatic Vegetation in Lakes[J]. Earth-science Reviews, 2017,173:259-265

（下转第89页）