

文章编号: 1001-5485(2011)05-0067-04

基于混合像元分解的武汉市湖泊面积变化监测

张 晗, 夏丹宁, 张昊成, 王晓昶

(武汉大学 遥感信息工程学院, 武汉 430072)

摘要: 以中等分辨率 Landsat TM /ETM+ 为数据源的常用水体提取方法有阈值法、谱间关系法、归一化水体指数法和分类法, 然而这些方法都未考虑混合像元的影响。遥感影像上不可避免的存在着混合像元, 这使得基于像元的遥感信息提取精度难以满足较高精度应用需求。首先利用混合像元线性光谱分解方法从 2006 年武汉地区 Landsat TM 影像上计算得到了东湖水面面积, 并传统基于像元的方法处理得到结果进行对比, 发现前者精度更高。随后, 又利用混合像元线性光谱分解法从多时相 Landsat TM /ETM+ 影像上提取了 1995-2006 年武汉市主要湖泊水域面积变化信息, 并对监测结果进行分析。结果表明武汉市主城区湖泊面积在 11 年间普遍呈现出不断减少的趋势, 湖泊萎缩强度指数 LLI 呈现出时空分布不均的特点。

关键词: 混合像元; 线性分解; 湖泊面积; 变化监测

中图分类号: P237 文献标识码: A

1 概述

武汉市地处长江与汉水交汇处, 城区湖泊星罗棋布, 素有“百湖之城”的美誉。湖泊在武汉城市发展中发挥了重要的作用, 然而随着近年来城市建设力度的不断加大以及人口的快速增长, 湖泊被填占现象时有发生。特别是主城区, 湖泊数量锐减, 水域面积急剧萎缩, 水质恶化, 沿湖风景遭到破坏, 水资源优势正在弱化等, 这一系列问题导致了城市调蓄、供水及旅游等功能的减弱, 给武汉城市发展造成了较严重的负面影响。

湖泊的遥感监测离不开对水体信息的准确提取。目前从遥感影像上提取水体的方法主要有两类: ①基于高分辨率影像数据的水体信息直接提取; ②基于中低分辨率影像数据结合相关算法提取。高空间分辨率影像传感器由于时间分辨率低、监测费用高等因素, 难以进行大范围的湖泊监测。而中低分辨率影像在时间分辨率、覆盖范围、费用等方面有很大优势。

利用中低分辨率影像提取水体信息, 前人做过不少研究, 常用方法有单波段法、多波段法和分类提取法。单波段法利用水体和背景地物在 MR 上的反差, 通过适当的阈值提取水体。但单波段阈值法会误提在 MIR 上同样具有低反射率的阴影。为消

除阴影噪声, 有学者提出了多波段法, 即综合利用水体在不同波段上的反射特性加以提取, 常用方法有谱间关系法和归一化水体指数法。谱间关系法由周成虎^[1]等人提出, 他们通过分析水体与其他地物在不同波段上的波谱曲线, 发现水体具有独特的谱间关系特征, 即 $Green + Red > NR + MIR$ 。为了进一步削弱背景因素的影响, McFeeters^[2]提出了归一化水体指数 NDWI 概念, 即通过 Green 和 NR 波段之间的比值运算来增强水体与背景地物之间的反差来提取水域。徐涵秋^[3]研究认为 NDWI 提取结果往往混有城镇建筑物用地信息, 使得提取的水体范围夸大, 并采用 MIR 替代 NR 提出了改进修正归一化水体指数 MNDWI, 有效遏制了建筑物背景同时减少了阴影噪音, 有利于城区水体专题信息的提取。常用分类提取法有监督分类法和面向对象分类法等。但这些方法都未考虑混合像元的影响。

遥感影像上不可避免地存在着混合像元, 它严重影响了影像的解译精度, 使传统的遥感信息提取精度难以满足较高精度应用需求。混合像元在中低分辨率影像上尤其严重, 不仅使得水体边界难以精确确定, 且容易漏提水面较窄的区域(如湖汉等)。为了提高遥感应应用精度, 必须解决混合像元分解问题。本文基于多时相 Landsat TM /ETM+ 数据, 利用混合像元分解方法, 对 1995 至 2006 年武汉市主城区湖泊面积进行了监测, 为城市快速发展过程中湖

收稿日期: 2010-06-28

项目基金: 2009 国家大学生科研和创新性实验项目 (091048644)

作者简介: 张 晗 (1989-), 男, 湖北武汉人, 本科, 主要从事遥感信息专业的研究, (电子信箱) han_zh @ qq . com.

泊资源的保护及合理利用提供参考。

2 混合像元光谱线性分解

混合像元分解即算出像元内各个端元所占的面积比例。常用的混合像元分解模型有:线性模型、概率模型、几何光学模型、随机几何模型和模糊分析模型^[4]。其中线性光谱混合模型因其简单和易于处理的特点得到了广泛应用^[5]。

2.1 线性光谱混合模型

在线性混合模型中,每一光谱波段中单一像元的反射率表示为它的端元组分特征反射率与它们各自丰度的线性组合。端元是组成混合像元的多种单一光谱的土地覆盖类型,丰度是端元在混合像元中所占的权重系数。线性混合模型如下:

$$R_{i\lambda} = \sum_{k=1}^n f_{ki} C_{k\lambda} + \varepsilon_{i\lambda} ; \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^n f_{ki} = 1 。 \quad (2)$$

式中: $R_{i\lambda}$ 为第 λ 波段第 i 像元的波谱反射率; f_{ki} 为对应像元的第 k 个端元组分所占权重; $C_{k\lambda}$ 为第 k 个基本组分在第 λ 波段的光谱反射率; $\varepsilon_{i\lambda}$ 为残余误差值; n 为端元数目。该模型受到 2 个约束条件: ① f_{ki} 取值在 0~1 之间变化; ② 波段数 m 要大于 n , 以便利用最小二乘法求解。

模型的计算结果为各端元的丰度图和以均方根误差 RMS 表示的残余误差图像。当 RMS 较大时,说明线性光谱混合模型适用错误,或选取了错误的端元组分,或漏选了某些重要的端元组分^[6]。

2.2 端元提取及线性分解

端元的确定是混合像元分解方法的关键和难点。端元的类型、数量都会直接影响到最终结果。端元可从波谱库中提取,也可从影像自身中提取。考虑到波谱库中的光谱和影像数据中不是在完全相同的条件下获得的,故从影像本身提取端元更可靠。

首先对影像进行最小噪声分离分析 (Minimum Noise Fraction MNF), 分离信号和噪声, 根据信噪比来定制数据的维度。然后对 MNF 变换后的有效分量生成的散点图进行分析, 可较好地确定端元。PPI (Pixel Purity Index) 是一种在多光谱和高光谱影像中寻找波谱最纯净像元的一种方法^[7]。经过多次 PPI 迭代计算的结果为一幅像元纯度图像, 图像上每个像元的值越高表示该处光谱越纯净, 对应地物类型越单一。通过 PPI 处理只能得到纯净像元在影像中的位置, 还需将相对纯净的像元点投影到 MNF

变换主成分空间以确定纯净像元所对应的地物类型。端元位于特征空间数据云团凸出的转角, 混合像元分解的关键就是识别并聚类这些像元。提取好端元后便可对图像进行线性光谱分解, 得到相应地物的丰度图。

2.3 实验与分析

东湖是我国最大的城中湖, 位于武汉市东部内环和中环之间, 属冲积淤积湖。根据武汉市勘测设计院 2006 年的测量成果, 东湖水面面积为 33.2 km²。本文选用 2006 年武汉地区 Landsat TM 影像作为数据源, 对东湖水面面积进行监测。

首先利用 ENVI 4.5 对 TM 1 至 5 和 7 波段进行 MNF 分析, 共生成 6 个主成分, 各主成分所包含的光谱信息量为 41.10%, 28.67%, 13.18%, 8.93%, 4.98%, 3.14%。考虑到 TM 数据并非高光谱数据, 本文没有舍弃特征值小的 MNF 成分对数据进行降维, 保留了全部 6 个成分。接着利用 MNF 变换后的成分进行 PPI 处理, 选择 PPI 值大于 100 的像元作为 ROI 并将 ROI 区域中 MNF 变换结果投影到 n 维可视化仪中提取端元。结合 TM 432 假彩色合成影像可以较容易判断出各类端元所代表的地物类型。实验提取的主要地物端元有水体、植被、土壤和建筑物等。最后利用提取好的端元进行线性光谱分离处理, 得到各个端元所对应地物类型的丰度图。在丰度图上像素值即为该地物在每个像元中的丰度值, 乘以像元的面积即得到该地物在像元中的面积值。本次试验得到的东湖水面面积为 31.07 km²。

随后, 本文又用单波段法、谱间关系法、MNDWI 法处理同一影像, 剔除误提区域后获得了东湖水面面积, 并对计算结果进行了精度评定, 如表 1 所示。结果表明混合像元分解法提取水体面积精度更高, 且能消除阴影噪声的影响。而传统的基于像素的方法在提取水体时难以精确确定水陆边界, 且容易漏提一些狭窄的湖汊。

表 1 不同方法监测东湖面积的结果及精度

Table 1 Results and their accuracy of East Lake area monitoring by different methods

监测方法	监测结果面积 / km ²	精度 / %
阈值法	29.76	89.64
谱间关系	30.29	91.23
MNDWI	30.37	91.47
混合像元分解	31.07	93.58

3 湖泊萎缩变化监测

3.1 湖泊萎缩强度指数

本文引入湖泊萎缩强度指数, $ILLI$ (Index of Lake

Loss Intensity)^[8] 来定量描述不同时期湖泊萎缩程度的相对强弱。ILLI 定义如下: 若某一时期内湖泊面积萎缩总量为 $S_{总}$, 该时期又可分为 N 个不同阶段, 每个阶段湖泊面积萎缩量为 $S_i (i = 1, 2, \dots, N)$, 则每一阶段的 $ILLI_i = S_i / S_{总}$ 。 $-1 < ILLI_i < 1$, 且 $|\sum_{i=0}^N ILLI_i| = 1$ 。若某一阶段的 $ILLI_i$ 为 0 表示湖水面积没有变化; $ILLI_i$ 为正, 表示湖水萎缩; $ILLI_i$ 为负, 表示湖泊水域扩大。

3.2 数据处理与结果

首先将 1995 年、2000 年、2002 年及 2006 年 4 个不同时期的 Landsat TM /ETM+ 影像配准, 保证所有数据具有统一的空间参考系。然后采用混合像元线性光谱分解法处理, 得到了武汉三镇主城区 17 个湖泊 4 个时期的面积。图 2 为湖泊萎缩变化监测的技术流程图。

湖泊水面面积与湖泊水位密切相关。通常湖泊水由江河或地下水补给, 因此湖泊面积与江河水位相关。历史水文资料表明, 与本文采用的影像数据同时期的武汉关水位基本处于多年平均水位左右, 从而保证数据有较好的可比性。分别计算汉口、武昌及汉阳地区各个湖泊 1995-2000 年、2000-2002 年、2002-2006 年 3 个阶段的 ILLI 数值, 结果如表 2 至表 4 所示。

表 2 汉口地区不同时期湖泊 ILLI 数值

Table 2 ILLI during different periods in Hankou

名称	ILLI 值			1995-2006 年 总萎缩 面积 /hm ²
	1995-2000 年	2000-2002 年	2002-2006 年	
北湖	0.182	0.818	0.000	1.79
塔子湖	0.429	0.068	0.503	14.38
菱角湖	0.527	0.473	0.000	4.47
西湖	-1.000	0.000	0.000	-1.62
合计	0.380	0.240	0.380	19.02

4 湖泊萎缩时空分析

随着城市快速发展, 武汉市版图不断扩展, 昔日的郊区湖如今已经变成城中湖。但来自武汉市水务局最新的调查数据显示表明城区湖泊数量不增反

表 3 武昌地区不同时期湖泊 ILLI 数值

Table 3 ILLI during different periods in Wuchang

名称	ILLI 值			1995-2006 年 总萎缩 面积 /hm ²
	1995-2000 年	2000-2002 年	2002-2006 年	
东湖	0.566	0.133	0.301	84.72
南湖	0.200	0.400	0.400	537.87
四美塘	1.000	0.000	0.000	5.69
晒湖	0.316	0.536	0.148	16.98
水果湖	1.000	0.000	0.000	2.92
沙湖	0.600	0.218	0.182	412.95
紫阳湖	0.000	0.000	0.000	0.00
野芷湖	0.013	0.08	0.907	18.19
合计	0.387	0.303	0.310	1079.32

表 4 汉阳地区不同时期湖泊 ILLI 数值

Table 4 ILLI during different periods in Hanyang

名称	ILLI 值			1995-2006 年 总萎缩 面积 /hm ²
	1995-2000 年	2000-2002 年	2002-2006 年	
月湖	0.402	0.004	0.594	20.39
北太子湖	0.215	0.118	0.667	40.69
南太子湖	0.073	0.013	0.914	349.27
墨水湖	0.182	0.321	0.497	123.38
三角湖	0.200	0.076	0.724	38.26
合计	0.127	0.091	0.782	571.99

减, 武汉中心城区现存湖泊只有 38 个, 远少于建国初期登记在册的 127 个。

表 2 至表 4 表明, 武汉市主城区湖泊面积在 1995 年至 2006 年 11 年间总体上呈现出不断减少的趋势, 湖泊萎缩强度指数 ILLI 呈现出时空分布不均的特点。从时间上看, 同一湖泊在不同时期的萎缩强度有差异。如汉口的北湖、菱角湖, 武昌的四美塘、晒湖、沙湖等湖泊在 2002 年以前萎缩速度较快, 而汉阳地区的几个湖泊被填占现象主要发生在 2002 年至 2006 年, 其这一阶段的 ILLI 数值高达 0.782。从空间上看, 湖泊填占现象有着近地域性的特点, 即经济水平越高的地方湖泊填占越严重, 中心城区的湖泊明显比郊区湖泊萎缩更为严重, 面积小的湖泊比面积较大的湖泊填占更为严重, 汉口、武昌及汉阳三镇湖泊总体萎缩情况也不尽相同。图 2 为从不同时期 Landsat TM /ETM+ 影像上提取的武昌城区湖泊边界线矢量图。

武汉市湖泊的萎缩和消失, 并非是气候变化等自然原因导致的, 而是其背后城市建设水平、道路交通规划、政府调控与湖泊改造等因素的复杂交织^[8]。不同湖泊在不同时期的萎缩速度则主要与同时期当地城市建设水平和非法填占活动紧密相关。

以沙湖为例。沙湖曾是仅次于东湖的第 2 大城中湖, 近年来则因大面积被填占、污染严重和淤塞, 成为受关注度最高的湖泊之一。上世纪初, 由于建设粤汉铁路, 沙湖被人为地划分为内沙湖和外沙

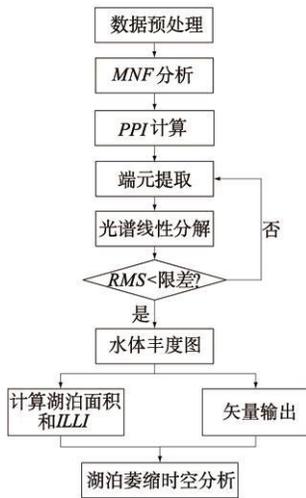


图 1 技术流程图

Fig 1 Flow chart of monitoring techniques

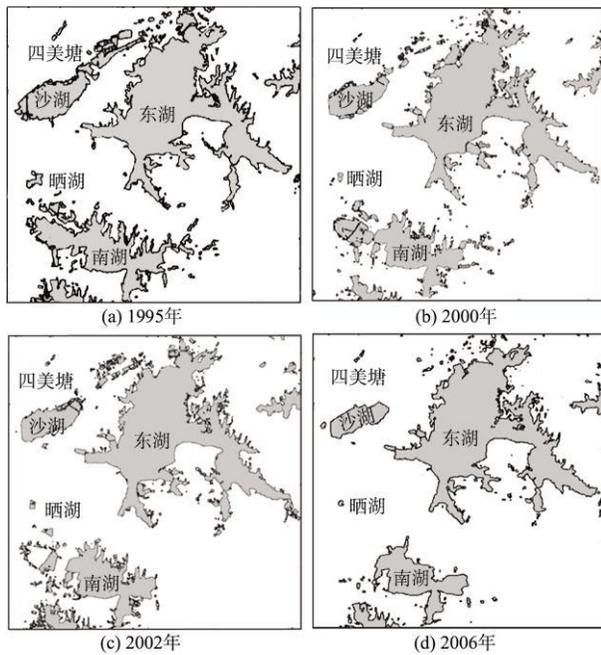


图 2 不同时期的武昌城区湖泊

Fig 2 Lakes in different years in Wuchang

湖。上世纪 90 年代,为了修建长江二桥,拓宽中北路、徐东路,导致部分沙湖快速萎缩,到 2000 年,沙湖水面积消失近半,这一阶段的 *ILLI* 值为 0.6。2000 年后,随着友谊大道的修建和内环线的逐步畅通,形成了环线经济带并引发了湖边房地产开发热潮^[9],再加上一些违法填湖活动导致整个内沙湖几乎消失。2005 年,武汉市启动了内沙湖清淤整治工作,恢复了内沙湖及附近湿地的小生态系统,并建成内沙湖公园,沙湖萎缩现象得到遏止。

然而也有少数湖泊由于得到了较好治理和规划,转变成了风景优美的湖泊公园,从而免遭蚕食,如西湖和紫阳湖,2000 年后的四美塘、水果湖以及 2002 年后的北湖、菱角湖。上世纪末,市政将整治西湖列入了山水园林城重点项目之一,经过挖泥清淤,西湖水面扩大到约 5.8 km^2 ,并于周边一起被改造成为城市绿化广场,这也使得西湖成为城区内唯一面积呈现出增加趋势的湖泊。

5 结 语

本文以多时相 Landsat TM/ETM+ 遥感影像为数据源,首先利用混合像元线性光谱分解方法提取并计算得到了 2006 年东湖湖水面积。计算结果比传统以像素为单位的提取算法精度更高,为准确、高效的湖泊面积变化监测提供了新思路。随后,本文利用混合像元分解的方法对 1995 年至 2006 年武汉市主城区湖泊面积变化进行了监测,结果表明,武汉市主城区

湖泊面积在 11 年间普遍呈现出不断减少的趋势,湖泊萎缩强度指数 *ILLI* 呈现出时空分布不均的特点,不同湖泊在不同时期的萎缩速度则主要与同时期当地城市建设水平和非法填占活动紧密相关。

为了阻止湖泊进一步被填占,我们可以借鉴西湖和紫阳湖的经验,对湖泊早规划、早治理。对于面积较小的湖泊可以将其建设成为风景优美的城市湖泊公园;对于面积较大的湖泊,应对其岸线整修、固化,沿湖岸修建环湖道路,清理拆除湖边违法建筑。

致谢:感谢长江科学院陈华康教授、武汉大学遥感信息工程学院胡庆武副教授及对本文给予指导和帮助的老师。

参考文献:

- [1] 周成虎, 骆剑承. 遥感影像地学理解与分析 [M]. 北京: 科学出版社, 2003
- [2] MCFEETERS S K. The Use of Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features [J]. *International Journal of Remote Sensing* 1996, 17(7): 1425–1432
- [3] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数 (MNDWI) 提取水体信息的研究 [J]. *遥感学报*, 2005, 9(5): 214–219. (XU Hanqiu. A Study on Information Extraction of Water Body with the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) [J]. *Journal of Remote Sensing* 2005, 9(5): 214–219. (in Chinese))
- [4] CHARLES ICHOKU, ARNON KARNIELI. A Review of Mixture Modeling Techniques for Subpixel Land Cover Estimation [J]. *Remote Sensing Reviews* 1996, 13: 161–186
- [5] HU Y H, LEE H B, SCARPACE F L. Optimal Linear Spectral Unmixing [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 1999, 37: 639–644
- [6] 卢远, 林年丰. 半干旱地区土地退化遥感动态监测方法 [J]. *干旱区资源与环境*, 2004, 18(1): 94–98. (LU Yuan, LIN Nianfeng. A Method of Remote Sensing Dynamic Monitoring of Land Degradation in Semiarid Region [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment* 2004, 18(1): 94–98. (in Chinese))
- [7] TOMPKINS S, MUSTARD J F, PIETERS C M. Optimization of Endmembers for Spectral Mixture Analysis [J]. *Remote Sensing of Environment* 1997, 59: 472–489
- [8] 曾忠平, 卢新海. 城市湖泊时空演变的遥感分析——以武汉市为例 [J]. *湖泊科学*, 2008, 20(5): 648–654. (ZENG Zhongping, LU Xin Hai. Spatiotemporal Evolution of Urban Lakes in Wuhan City Based on Remote Sensing Images [J]. *Journal of Lake Sciences* 2008, 20(5): 648–654. (in Chinese))
- [9] 张泉. 武汉湖泊调查报告 [N]. *楚天都市报*, 2010-6-23(A06).

(编辑: 王 慰)

(下转第 74 页)

- 业出版社, 2007: 2-38 (WU Yun-hui Efficient Development of Excel VBA Application [M]. Beijing Electronic Industry Press, 2007: 2-38 (in Chinese))
- [2] DLT5148-2001 水工建筑物水泥灌浆施工技术规范 [S]. (DLT5148-2001 The Standard Specification for Construction of Hydraulic Structure Cement Grouting [S]. (in Chinese))
- [3] 孙 钊. 大坝基岩灌浆 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004: 201-220 (SUN Zhao Grouting of Dam Bedrock [M]. Beijing China Water Power Press, 2004: 201-220 (in Chinese))
- [4] 夏 强. Excel VBA 应用开发与实例精讲 [M]. 北京: 科学出版社, 2006: 1-18 (XIA Qiang Application Development and Example Intensive Teaching of Excel VBA [M]. Beijing Electronic Industry Press, 2006: 1-18 (in Chinese))
- [5] 熊厚金. 国际岩土锚固与灌浆新进展 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996: 33-39. (XIONG Houjin New Progress in International Ground Anchorage and Grouting [M]. Beijing China Building & Industry Press, 1996: 33-39 (in Chinese))
- [6] 罗仁辉. 钻孔信息标注的 VBA 程序化处理 [J]. 人民长江, 2009, 40(24): 60-65. (LUO Renhui VBA Programmed Treatment of Drilling Information Marking [J]. Yangtze River, 2009, 40(24): 60-65 (in Chinese))

(编辑: 赵卫兵)

Programming of Organizing Grouting Result Tables Using VBA Language Based on Excel Software

LIU Huixia XIANGHong-li

(Quzhou Water Resource and Hydropower Design and Research Co. Ltd., Quzhou 324002, China)

Abstract Heavy workload and low efficiency are problems in organizing the grouting result tables of water conservancy grouting projects. In this paper, taking visualization window as the operation interface, a program for automatically organizing the grouting result tables using VBA language, the secondary development tool of Excel, is presented. Having inputted original borehole data and the grouting data in the Excel worksheets, users then select tables to be organized in the visualization window, and then click on "generate table" button to achieve automatic organization. The program has been applied to an engineering project and proved to be capable of automatic, accurate and efficient organization. This paper lays foundation for applying Excel VBA language to organizing data of grouting projects and serve as a reference for organizing data of other engineering projects.

Key words grouting result table; excel VBA language

(上接第 70 页)

Dynamic Monitoring of Lake Areas in Wuhan Based on Mixed Pixels Decomposition

ZHANG Han, XIA Dan-ning, ZHANG Hao-cheng, WANG Xiao-yi

(School of Remote Sensing and Information Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract Conventional methods including threshold method, spectral structure method, normalized difference water index and classification method are used to delineate and extract water body from TM/ETM+ data collected by Landsat with medium spatial resolution. However, none of them take the impact of mixed pixel into account. Mixed pixels, unavoidable on remote sensing image, generally result in low precision of pixel-based information extraction, which makes it hard to meet the requirements of highly accurate applications. In this article, the water area of the East Lake is calculated based on linear spectral unmixing method from Landsat TM image obtained in 2006. The result proves to be more accurate compared with those by pixel-based methods. Furthermore, linear spectral unmixing method for mixed pixel is exerted on varied Landsat TM/ETM+ images to monitor the shrink of lake area in Wuhan from 1995 to 2006. The monitoring results demonstrate that lake areas in Wuhan decreased continuously during this period, and the Index of Lake Loss Intensity (ILLI) was unevenly distributed across time and space.

Key words mixed pixel; linear spectral unmixing; lake areas; monitoring of changes