DOI: 10.5846/stxb201508251766

史锐,张红,岳荣,张霄羽,王美萍,石伟.基于小波理论的干旱区内陆湖泊叶绿素 a 的 TM 影像遥感反演.生态学报,2017,37(3): - . Shi R, Zhang H, Yue R, Zhang X Y, Wang M P, Shi W.A wavelet theory based remote sensing inversion of chlorophyll a concentrations for inland lakes in arid areas using TM image data.Acta Ecologica Sinica,2017,37(3): - .

基于小波理论的干旱区内陆湖泊叶绿素 a 的 TM 影像 遥感反演

史 锐1,张红2,*,岳 荣1,张霄羽2,王美萍1,石伟3

1 巴彦淖尔市环境科学研究所,巴彦淖尔 015000
2 山西大学环境与资源学院,太原 030006
3 山西大学黄土高原研究所,太原 030006

摘要:叶绿素 a(Chl-a)是衡量湖泊富营养化的重要指标,利用遥感技术动态监测面积较大的湖区水体中 Chl-a浓度对了解湖区 水质具有重要意义。本文以内蒙古乌梁素海为例,提出利用 TM 影像中的水体实测光谱进行小波去噪和光谱信号重构,并结合 水质采样实测数据进行神经网络拟合,建立光谱反射率比值与 Chl-a浓度的反演模型的方法。结果显示:小波理论和神经网络 相结合的模型可以适用于估算乌梁素海 Chl-a浓度,去噪后 Chl-a浓度与光谱信号的相关系数(-0.575)较去噪前(-0.417)明显 增强,去噪后的采样点光谱信号与 Chl-a浓度,去噪后 Chl-a浓度与光谱信号的相关系数(-0.575)较去噪前(-0.417)明显 增强,去噪后的采样点光谱信号与 Chl-a浓度之间表现出比原始信号更强的负相关性,证明了去噪后的观测值可进一步减弱随 机误差的干扰和去除噪声,使观测数据更加逼近 Chl-a浓度的真实情况,图像去噪重构结果显示重构后的光谱范围较之前有所 缩窄,部分信号点得到了增强,但基本剖面结构并没有产生较大变化,反演模型的平均相对误差为 0.142,与其他研究相比差别 不大。反演得出的乌梁素海 Chl-a浓度分布反映了污染源的分布,同时说明了乌梁素海 Chl-a浓度在时空分布上呈现一定的差 异,表现为丰水期呈现浅水区 Chl-a浓度值高于湖心区,来水区高于其他湖区的分布趋势,枯水期乌梁素海中部呈现由西向东 Chl-a浓度逐步降低的分布规律,西部呈均一化分布。反演模型基本可以满足实际预测的需要。但模型在具体应用中在影像数 据采集、数据量及算法方面还有很大的改进空间,该方法的提出为干旱区大型内陆水体富营养化的实时定量遥感监测提供了新 的解决方案。

关键词:小波分析;神经网络模型;遥感反演;叶绿素 a;湖泊水质;陆地卫星影像;富营养化

A wavelet theory based remote sensing inversion of chlorophyll a concentrations for inland lakes in arid areas using TM image data

SHI Rui¹, ZHANG Hong^{2,*}, YUE Rong¹, ZHANG Xiaoyu², WANG Meiping¹, SHI Wei³

1 Institute of Environmental Science of Bayannur, Bayannur 015000, China

2 College of Environmental Science and Resources, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

3 Institute of Loess Plateau, Shanxi University, Taiyuan 030006, China

Abstract: Chlorophyll a (Chl-a) concentration is an important indicator for measuring eutrophication and lake water quality. Therefore, a fast and sensitive remote sensing method for Chl-a concentrations is urgently needed, as this will enable real-time spatio-temporal monitoring of Chl-a distribution in large inland lakes, which will enhance water quality management and protection. Using Wuliangsuhai Lake (Inner Mongolia) as an example, this study established an effective remote sensing inversion method for Chl-a concentrations, based on Landsat Thematic Mapper (TM) image data. Chl-a

收稿日期:2015-08-25; 网络出版日期:2016-00-00

基金项目:国家水污染防治专项-乌梁素海综合整治项目

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhanghong@ sxu.edu.cn

concentration data from January 2010 to November 2014 was collected by the Environmental Monitoring Station of Bayannur city. TM images were acquired by the Information Center of the Chinese Academy of Sciences. After pre-treatment, the Wuliangsuhai TM images were de-noised and reconstructed based on a wavelet analysis. A neural network method was subsequently used to construct a model that relates the TM spectral reflectance ratios and Chl-a concentrations. The results indicated that the proposed method of combining wavelet analysis with a neural network model is suitable for inversely remote sensing Chl-a concentrations. The correlation coefficient between the wavelet de-noised spectral signal and the Chl-a concentration (-0.575) was higher than when the original spectral signal was used (-0.417). Furthermore, the negative correlation between the de-noised spectral signal and water sample Chl-a concentrations was stronger than the original one. This demonstrated that the de-noised monitoring values could further reduce the interference of random errors and noise. Furthermore, the remotely sensed Chl-a values could approach the sampled Chl-a concentrations. In addition, the denoised reconstruction of the TM images had a narrower reconstructed spectral than before, and part of the signals were enhanced. Nonetheless, the basic cross-sectional structure of the images did not change notably. The mean relative error (MRE) of the proposed method was 0.142, and differed little from other models. In addition, the distribution of Chl-a concentration based on the TM inversion method was consistent with the distribution of the Wuliangsuhai Lake pollution sources. The spatio-temporal distribution of Chl-a concentrations showed some variability. In the wet season, the Chl-a concentrations in shallow water areas were higher than those in the central area, whereas the Chl-a concentrations in the inlet area were higher than those in other areas. In the dry season, the Chl-a concentration decreased gradually from west to east in the middle of the lake, and showed a homogeneous pattern in the west of the lake. Overall, the precision of the TM remote sensing inversion method achieved a satisfactory prediction accuracy. However, given the lack of sufficient Chl-a monitoring sites and monitoring data, some factors that influenced the spectral reflectance ratio of TM image could not be removed or controlled for. Some improvements on TM image data acquisition, such as algorithm optimization and model verification, should therefore be a priority for the future. Alternatively, high-resolution remote sensing image data could be used to acquire the spectral reflectance ratio of lake water, instead of TM images. In conclusion, this study could be used to improve lake water quality monitoring technologies, as well as contribute to real-time water quality monitoring. The proposed method for Wuliangsuhai Lake could be applied in other areas as well, and for other water pollutants.

Key Words: wavelet analysis; artificial neural network; remote inversion; Chl-a concentration; lake water quality; landsat thematic mapper; eutrophication

Chl-a浓度是衡量水质状况评价的一个重要指标,常用于估测浮游植物的生物量和初级生产力,直观反映水体的富营养化程度。传统的人工调查方法可精确测定水体局部 Chl-a浓度,但成本高、耗时长,难以应对大范围突发性的水体污染。而基于遥感的水质监测具有大范围、快速、动态及低成本等优势,因此,遥感技术在大面积湖泊水质监测方面具有巨大潜力,是常规水质监测的重要补充。国内外学者在利用遥感技术研究湖泊水质方面做了大量的工作。Gitelson等^[1-2]利用藻类水体在 700nm 附近反射峰位置的移动规律和光谱曲线的微分技术进行建模估算 Chl-a浓度。段洪涛^[3]等利用 TM 数据和野外实测高光谱数据对吉林省查干湖等 3 个湖泊进行了 Chl-a浓度的反演,其研究结论表明利用 TM 数据可以有效的反演 Chl-a浓度和评估湖泊的富营养化状态。徐祎凡^[4]等利用环境一号卫星多光谱数据对三湖一库富营养化状态进行了评价。王琦^[5]等通过 Pearson 相关系数筛选 HJ-1 卫星多光谱波段数据并利用相关系数高的波段组合与 Chl-a浓度建立线性反演模型,提高了特定条件下 Chl-a浓度的反演精度。郭宇龙^[6]等利用高光谱影像重构数据,与 Chl-a浓度数据建立 三波段模型,发现反演结果要优于原始数据。

但是,上述基于遥感方法的湖泊水质参数动态监测研究基本上是基于波段反射率值或其变换形式与水质 参数进行线性或者简单的非线性回归模拟,精度有限^[7],算法本身的模拟有限性导致模型不能很好地拟合光 学信号与水质参数之间复杂的函数关系,同时,水质学方面的遥感机理研究仍不成熟^[8],因此,建立通用的、 精确的数学模型存在困难。而人工神经网络(Artificial Neural Networks,ANN)的非线性映射能力则在此类问 题处理中表现出优势,它不需要对系统进行透彻的了解,却能准确得到输入与输出的映射关系,从而大大简化 设计的难度。然而,传统的神经网络模型在建立光谱与水质参数的关系时,往往直接采用遥感影像的光谱时 间序列来建模,光谱时间序列由于存在弱平稳性、随机性、多时间尺度等特征而影响了建模的精度^[9]。小波 分析是非平稳信号分析的有力工具,将小波分析与神经网络算法结合,可以逼近任意函数,灵活性很大,在优 化、信号处理与模式识别、智能控制、故障诊断等许多领域都有着广泛的应用^[10-12]。

本文通过多年来內蒙古乌梁素海 Chl-a 浓度监测数据与历史 TM 影像数据,尝试通过小波模去噪重构与 小波变换神经网络方法对二者进行拟合,探讨该方法的可行性,在此基础上利用该方法对乌梁素海中 Chl-a 浓度进行估算,并结合乌梁素海周边污染源分布评价模型反演出的乌梁素海 Chl-a 分布特征是否合理。

1 研究区域概况

乌梁素海位于中国内蒙古西部干旱荒漠地区,是内蒙古第二大淡水湖。湖区南北长35—40 km,东西宽 5—10km,总面积296 km²,湖泊水位海拔1018.5m时,平均水深1.09m,库容3.3亿m³。乌梁素海是河套灌区 地表径流和地下水的排泄区,是灌区退水进入黄河的通道,同时也是野生候鸟的重要栖息地,其中有国家一级 保护鸟类5种,二级保护鸟类25种,总鸟类品种有195种^[13]。另外,渔业的年产量为200t左右,芦苇的年产 量为11×10⁴t。目前乌梁素海湿地面临的生态环境问题非常严重,由于河套灌区内的农田退水和生活污染物 的排放导致乌梁素海的水质正在不断恶化。据监测部门数据,有7项水质指标超过Ⅳ类水质标准,湖内藻类 大量繁殖,湖泊富营养化严重,再加上近年来,湖内大量种植芦苇,使得湖泊淤积日趋严重。



图 1 乌梁素海地理位置 Fig.1 The location of Wuliangsuhai Lake

2 数据与研究方法

2.1 Chl-a 历史数据获取

巴彦淖尔市环境保护监测站从 2010 年 1 月至 2014 年 11 月,分季度采用 GPS 定位在乌梁素海进口区、湖 心区及出口区布设样点(图 2),共采样 29 天,采集样本 87 个。Chl-a 的测定采用取 300ml 水样用微孔玻璃纤 维滤膜(0.45µm)抽滤,滤膜低温干燥后,用 90%丙酮低温萃取,离心后取上清液采用 SURVEYOR 型叶绿素测 试仪测定含量,实验方法和计算按规范进行。 遥感影像数据来源于中国科学院信息中心地理数据空间云(http://www.gscloud.cn/)。由于 Chl-a 采样时间段为 2010—2014 年每年度的 1、3、5、7、9、11 月份,而 landsat8 于 2013 年 2 月发射,提供的 landsat8 数据时间为 2013 年 5 月以后,因此,本研究在 2010 年 1 月—2013 年 5 月选用 landsat7 TM 影像数据,2013 年 5 月以后,因此,本研究在 2010 年 1 月—2013 年 5 月选用 landsat7 TM 影像数据,2013 年 5 月以后选用 Landsat8 TM 影像数据,保证成像日期与野外实测时间准同步。影像数据选用当月的云量低于 20%的数据。

2.3 研究方法

水质的光学遥感监测容易受到诸如大气条件等外界因素的影响,所以影像数据的预处理非常重要^[14]。 本研究首先对遥感数据进行几何校正、大气校正,并采用面向对象提取研究区域水边界。而后根据宋瑜^[15]等 关于"700 nm 附近波段与 625 nm 附近波段所构建的 Chl-a 浓度模型 *R*²最高"的研究结论,选择 landsat7 影像 数据中 Band3(波长:630—690nm)、landsat8 影像数据中 Band4(波长:640—670nm)^[16];但一般来说,现实中 的信号均含有噪声,需要在对 TM 影像数据做进一步分析之前将有效的信号提取出来。传统的方法是采用滤 波器进行去噪处理,但是该方法不能很好的区分信号的高频和由噪声所引起的高频干扰^[17]。而小波变换具 有良好的时频局部化性质,因此,本研究对选定水边界内的 TM 影像数据进行小波模极大值重构去噪,再对采 样点的原始光谱信号、重构光谱信号与采样点 Chl-a 浓度进行非参数相关性检验,判定去噪重构后的光谱信 号是否提高了与 Chl-a 浓度的相关程度,如提高相关性则提取重构信号的单位固有光学量(SIOPs),并将其进 行归一化处理后,归一化后的 SIOPs 数据与采样点 Chl-a 浓度进行小波神经网络训练,符合精度要求后建模 反演。具体研究技术路线图如图 3 所示。



图 2 布点采样图



图 3 遥感影像反演 chl-a 的技术路线图

Fig.2 Sampling location for monitoring Chl-a concentration

Fig.3 Technical flow chart of remote sensing inversion of chl-a concentration

2.3.1 小波模极大值去噪重构

由于信号和噪声的小波变换系数在不同尺度上具有不同的传播特性,而TM 遥感数据基本属于缓变信号,随着尺度的增大,噪声所对应的模极大值逐渐增大,因此,连续做若干次小波分解之后,综合各个尺度上模极大值的位置和幅值信息,可以判断哪些模极大值是由噪声引起,哪些模极大值是由信号产生的^[18-23]。剔除由噪声所引起的模极大值,再由剩余的模极大值重构信号,即可实现去除噪声信息的目的^[24]。其具体原理如下:

对含噪信号进行二进小波变换,一般尺度取为J = 4,然后寻找每一尺度上所有小波变换系数的模极大值 点,对最大尺度 2J 上的模极大值进行阈值处理,若极大值点对应的幅值绝对值小于阈值 T,则去掉该极值点; 否则予以保留。选取阈值 T 为: $T = \frac{\log_2^{(1+2\sqrt{N})}}{J+N}A$,其中 $A = Max[W_2^d]f(n_i)$],即最大模极大值点的幅值,N 为预 设的噪声功率,J 为所取的最大尺度,Z 为常数,经验表明,一般取为 2 较好。

设 t0 是尺度 2J 上的模极大值点,t1、t2 是 t0 前后相邻的 2 个模极大值点,t1′是 t1 传播到下一尺度 2 j (1 ≤ j ≤ J - 1) 上的相应模极大值点,则 t0 对应的传播点将在区间[t1′,t2]之间搜索。具体如下:

1)若存在模极大值点 $t0' \in [t1', t2] \pm t0' = t0$,且满足 $W_2'f(t0')$ 和 $W_2'f(t0)$ 符号相同,则 $t0' \pm t0$ 的 传播点;

2)若不存在这样的点,则在区间[t1',t2]内,寻找与 $W_2^{J}f(t0')$ 最接近的那个模极大值点作为t0',即满足: $||W_2^{J}f(t0')| - |W_2^{J}f(t0)|| \le ||W_2^{J}f(tk)| - |W_2^{J}f(t0)||(\forall tk \in [t1',t2]);$

3) 若在区间[t1',t2]内找到 t0 的传播点 t0'满足 $|W_2'f(t0)| \ge \sqrt{2} |W_2'f(t0)|$ 或没有找到对应的传播点, 根据 Mallat 理论,若在一个尺度下的某一区域内无极大值时,则在其它尺度这个区域不存在能被所用小波基 检测出来的奇异性^[25],因此,可将 t0 和 t0'作为噪声的模极大值点而剔除;

4) 重复以上过程,直至所需的尺度。

2.3.2 小波神经网络

小波神经网络是采用小波或者尺度函数来代替前向神经网络中的 Sigmoid 函数作为激活函数,生成一个 与径向基函数神经网络结构上相似的神经网络,从网络结构形式上来看又可分两类,一类为小波变换与常规 神经网络的结合,另一类为小波分解与前向神经网络的结合。第一类小波神经网络的特点是"结合",它可以 很好的表达因变量与变量之间紧密联系又互相独立的非线性关系。第二类小波神经网络的特点是"分解", 在探寻主成分因子时有较多的应用,由于 Chl-a 与光谱信号有明显的相关特性,因此,本研究选取第一类小波 神经网络进行研究。

3 结果与分析

3.1 小波模极大值重构去噪分析

SIOPs 信号小波模极大值重构去噪效果见图 4,从图中可以看出,经小波处理后,去噪信号相比原始信号 剔除了明显变化的尖峰点,原来有些波动的曲线变得更为光滑。图 4 中原始信号编号为 24 的低值点采样日 期为 2012 年 1 月 7 日,根据采样记录,当日温度为 5℃,为当地冬季罕见高温,本已冻结的湖面开始融化,在湖 体表层产生了小部分水蒸气,吸收了较多的光学量,因此导致出现了明显的低值,这样的光学信号变化不能简 单理解为噪声,但由于实验设计,不做过多探讨。同时,为了检验小波去噪重构性能,本研究对样本的原始信 号和去噪后信号与 Chl-a 浓度进行了 Spearman 检验,结果见表 1,由表可知,样本的原始光谱信号与 Chl-a 浓 度有显著负相关,相关系数为-0.417,出现这种情况是由于 Chl-a 对 700nm 波段附近入射光有吸收作用,因 此,Chl-a 浓度越高,吸收的光的能量就越多,卫星接收到的反射光就越少,相比原始信号,去噪后的光谱信号 与 Ch-a 浓度之间表现出更强的负相关性(-0.575),说明经去噪后的观测值可进一步减弱随机误差的干扰和 去除噪声,使观测数据更加逼近 Chl-a 浓度的真实情况,对建模有较大的帮助。



图 4 采样点光谱信号去噪前后对比图

Fig.4 The comparison between original signal, denoised signal and concentration of Chl-a

	表1	采样点原始光谱信号,去噪信号与 Chl-a ネ	农度 Spearman 检验
--	----	-------------------------	----------------

	Table 1 S	pearman test betw	een original signal, denoise	ed signal and	concentration of Chl-a	
因子 Item	检验方法	N	原始信号 Original signal		去噪信号 Denoised signal	
	Test method		相关系数 Correlation coefficient	Sig.	相关系数 Correlation coefficient	Sig.
Chl-a	spearman	81	-0.417 **	0.002	-0.575 **	0.002

** 表示在置信度(单侧)为0.01时,相关性是显著的

基于去噪后的光谱信号增强了表达水体中 Chl-a 浓度信息的结论,本研究对获取的遥感影像进行重构。 首先,在 MATLAB 平台下提取出 TM 影像中的光谱值,考虑到提高图像重构速度、计算机内存及实际反演要 求,在影像上选取 718×406 个像素。以 2014 年 7 月份 TM 图像为例,去噪重构具体步骤如下:在 matlab2012a 以上版本环境下,采用交替投影法进行小波模重构,首先通过 wfilters 函数计算小波分解系数和模极大序列, 再通过 swa 函数得到待重建的信号,并进行迭代初始化,然后对待重建信号通过 Py_Pgama 函数进行 Py 投影 和 Pgama 投影,最后通过 iswt 函数进行 Pv 投影与重建计算,其图像分解重构过程如图 5 所示。从图中可以 看出,重构图像能够较好地分辨出乌梁素海的各种分区,并得到了原始图像的大体轮廓,重构图像增强的边缘 与体现的细节特征与实地调查的情况基本相吻合。为了考证去噪重构后的图像是否改变了原有光谱的基本 结构,本研究在 ENVI 环境中随机提取了原始图像与重构图像的光谱剖面信息(图 6),从图中可以看出,重构 后的光谱范围较之前有所缩窄,部分信号点得到了增强,但基本剖面结构并没有产生较大变化,可见小波模极 大值去噪重构处理确实在一定程度上改善了重构图像的成像质量。





3.2 神经网络拟合及精度分析

将小波重构后的光谱信号与原始信号分别做为神经网络输入,湖泊 Chl-a 的实测值做为神经网络输出,

7



图 6 2014.7 TM 影像重构前后波谱剖面图 Fig.6 The comparison of spectrum between original image and constructed image

随机选取 70%的样本进行神经网络训练,30%的样本进行检验。去噪前后的小波神经网络的反演值与监测值 相关分析见图 7 所示,从图中可以看出,去噪后小波神经网络训练的效果有了明显提升,特别是在验证环节, *R*²由 0.226 提升至了 0.779,而总体训练 *R*²也由 0.558 提升至 0.762。去噪后的训练过程监测值与反演值的 *R*² 为 0.754,检验过程为 0.779,同时从表 2 可以看出,去噪后反演值与监测值的各项统计量均较为接近,反演值 平均相对误差为 0.142。刘朝向等^[26]利用 SVM 模型对妫水河中 Chl-a 浓度进行了两期反演研究,其反演值与 监测值的一元线性回归 *R*²分别为 0.76 与 0.80,平均相对误差分别为 0.12 与 0.13,与本文的拟合精度差别不 大,由于本研究训练神经网络模型的数据量小,在一定程度上影响到估算精度,但这也说明本文提出的方法在 反演 Chl-a 浓度的精度方面是可行的,并且随着样本量的增大,模型的精度会进一步提高,应用前景广阔。 **3.3** 基于小波理论的 Chl-a 反演结果空间分布分析

由于乌梁素海平水期有大量的芦苇种植,混淆了其他水生植物的光谱反映^[27],影响影像数据中水体光谱 反射信息,因此,本研究不对其进行反演,同时枯水期与丰水期也有少部分湖区有较高的芦苇覆盖度(> 50%),这些湖区在反演中也需要剔除掉。本研究采用如下方法进行剔除:首先通过实地调查,确定丰水期与







The analysis of wavelet neural network fitting result between original signal and denoised signal Fig.7

枯水期芦苇覆盖度较高的湖区,通过 GPS 划定范围,采用 ENVI 的 RIO 工具对遥感图件中这部分区域进行标 识,然后通过目视解译划定整个湖区中芦苇覆盖度较高的区域,再进行裁剪,裁剪后的图像在 matlab 中可读 取"0"值,需在 matlab 中对所有的"0"进行赋空值操作。

表 2 反演值与检测值描述性分析							
T	Table 2	The analysis of desc	ribe statistic betw	een inversion val	ue and monito	ring value	
项目 Item		全距 Range	极小值 Minimum	极大值 Maximum	均值 Mean	标准误差 Standard error	平均相对误差 Average relative error
反演值 Inversion value		40.521	1.934	42.457	9.545	1.365	0.142
监测值 Monitoring value		42.910	1.290	44.200	9.544	1.494	0.064

2014年乌梁素海丰水期与枯水期 Chl-a 浓度分布见图 8 所示,从图中可以看出,乌梁素海 Chl-a 浓度在时 空分布上呈现一定的差异,但大体上来说,呈现丰水期浅水区(主要为靠近湖岸湖区)Chl-a浓度值高于湖心 区(主要为深水区),来水区(湖区中部西侧)高于其他湖区的空间分布趋势。在实地调研中发现,在乌梁素海 丰水期(主要为6—9月份)正值当地农业生产活动高峰期,河套灌区大量富含N、P元素的农田退水从乌梁素 海中部的进口区进入湖区^[28-30],在进口区及附近湖区造成 N、P 元素的大量富集^[31]。有研究表明水体中 Chla浓度的变化是水体营养条件如温度、光照、营养盐等因素综合作用的结果^[32],而当地6—9月份光照条件好, 温度较高,适宜藻类生长,这些综合因素造成来水区 Chl-a 浓度升高;其次,乌梁素海两岸 10km 内,尤其北侧 有大量分散居民点与散养殖户,散排的生活污水与养殖废水通过地表径流进入乌梁素海湖体内,提高了两岸 附近及北侧湖区营养盐含量,造成了北侧及两岸湖区 Chl-a 浓度升高;再次,乌梁素海东南侧基本无居民点分 布,因此,东南侧湖区 Chl-a 浓度较西北侧相对较低。枯水期(12月-翌年4月)也基本呈现与丰水期大致相 同的空间分布规律,但细节上不尽相同,从枯水期 Chl-a 分布图可以看出,枯水期 Chl-a 开始向湖心区"蔓延",

在乌梁素海中部形成由西向东浓度逐步降低的分布规律,同时,在湖体西部呈现均一化的分布趋势,综合来 看,反演结论与其他关于乌梁素海富营养化的研究结论基本保持一致^[33]。



图 8 乌梁素海丰水期、枯水期 Chl-a 浓度分布图 Fig.8 The distribution of Chl-a concentration of wet season and dry season in Wuliangsuhai Lake

高阳俊^[34]等针对长江及淮河中下游、黄河及海河下游和大运河沿岸的142个湖泊的水质和水生态数据, 采用 Chl-a 浓度六段分级的方法,得到各指标富营养化控制的分级标准值,本研究利用这种方法评价了乌梁 素海丰水期与枯水期富营养化程度,结果见表3。从表中可以看出,枯水期中富营养化与轻度富营养化的面 积占比分别达到了41.93%与38.30%,丰水期面积占比分别为13.24%与22.66%,枯水期中富营养化与轻度富 营养化的面积占比相比丰水期提高了近30与16个百分点,由此可见,乌梁素海在一年内富营养化水平在随 水期发展提高,同时也证明了一年内乌梁素海的水质在恶化。

Table 3Eval	uation of eutrophication base	ed on Chl-a concentration	n in WUliangsuhai Lake	
营养分级 Nutrition grade	标准分级 Standards grade	Chl-a 浓度/(mg/m ³) Chl-a concentration	枯水期面积占比/% The proportion of dry season	丰水期面积占比/% The proportion of wet season
贫营养 Low nutrient	Ι	<1.6		
中营养 Middle nutrition	Ш	1.6—10	19.77	64.10
轻富营养 Light eutrophic	Ш	10—26	38.30	22.66
中富营养 Middle eutrophic	IV	26—64	41.93	13.24
重富营养 Severe eutrophic	V	64—160		
极端富营养 Extreme eutrophic	VI	>160		

表 3	基干	Chl-a	分级的湖区富营养化评价
AX J	至」	Cm-a	刀级的吻匹由百外化厅川

4 讨论

本研究利用 TM 影像数据,提出通过小波去噪和神经网络方法反演 Chl-a 浓度的方法。首先, TM 影像中

SIOPs 的变化要受到湖体中 Chl-a 和其他水质与环境因子的共同影响,其他因子对 SIOPs 信号中产生的影响 即为噪声,这些噪声分布于所有的小波系数上,虽然可以通过去噪与重构能大致恢复原始信号的趋势,但却无 法彻底去除与频带相互重叠的噪声,重构后的信号仍然携带的这部分噪声将降低神经网络模拟的精度,但受 限于本研究样本量不足,样点数量较少,没有监测其他环境因子,所以很难以从统计上判断信号中极大值或极 小值携带的这部分噪声的比例,也无法有针对性的去除信号中非 Chl-a 因子引起的 SIOPs 信号的变化,因此, 在采样数据较全,样本量较大的情况下,针对其他环境因子与 SIOPs 进行关联分析,分析其对 SIOPs 产生的影 响,而后有针对性的进行比对去噪,对于提高本文研究方法的精度将是有效的;其次,由于光传输环境与卫星 传感器姿势等条件的差异,卫星接收到的反射光信息在空间的传输中的损耗计算较为复杂,而应用神经网络 对 Chl-a 进行反演可以有效的避开这个难点,但神经网络的特点是从海量数据中寻找规律,应用这个方法也 意味着繁重的采样分析工作。同时,本文数据量虽较小,但模型的精度基本可以满足反演要求,反演出的 Chla浓度分布也和掌握的污染源分布情况基本契合,因此,有理由相信随着数据量的增大,该方法的精度势必有 明显提升。再次,从选用的数据上来看,本研究选取了 TM 影像作为反演数据,但 TM 影像为卫星拍摄,光的 传输距离较长,要受到大气状况的影响,SIOPs 解释反映 Chl-a 的程度要减弱,因此,从数据准确性来讲,利用 近感光学元件收集 SIOPs 相对来说要比利用卫星影像要好,同时采用近感方法还可以避免因水体植被存在而 影响光学信号,随着无人机技术的快速发展,利用无人机携带近感光学元件获取大湖泊光学信息,而后应用本 文提出的方法也是提高模型精度的方法。

5 结论

本研究利用 TM 影像数据,提出通过小波去噪和神经网络方法反演 Chl-a 的方法,并验证了该方法的适用性,进一步对乌梁素海 Chl-a 浓度的分布原因进行了讨论,具体结论如下:

(1)小波去噪后的采样点光谱信号与 Ch-a 浓度之间表现出比原始信号更强的负相关性,原始光学信号中,非 Chl-a 引起的光学噪声去除率在一定程度上决定模型反演的精度。

(2)本文的拟合精度与国内相关研究的精度差别不大,表明小波分析和神经网络相结合的方法在可以适用于乌梁素海 Chl-a 浓度反演,但该法在反演 Chl-a 浓度的精度方面还有很大的提升空间;

(3)本文应用提出的方法对乌梁素海进行了丰水期和枯水期 Chl-a 的反演,结果表明乌梁素海 Chl-a 浓度 在时空分布上呈现一定的差异,丰水期呈现浅水区 Chl-a 浓度值高于湖心区,来水区高于其他湖区的分布趋势;枯水期乌梁素海中部呈现由西向东 Chl-a 浓度逐步降低的分布规律,西部呈均一化分布。

致谢:感谢巴彦淖尔市环境保护局、巴彦淖尔市环境保护监测站在提供叶绿素 a 监测数据方面给予的支持。

参考文献(References):

- [1] Gitelson A A, Schalles J F, Hladik C M. Remote chlorophyll-a retrieval in turbid, productive estuaries: Chesapeake Bay case study. Remote Sensing of Environment, 2007, 109(4): 464-472.
- [2] Kallio K, Kutser T, Hannonen T, Koponen S, Pulliainen J, Vepsäläinen J, Pyhälahti T. Retrieval of water quality from airborne imaging spectrometry of various lake types in different seasons. Science of the Total Environment, 2001, 268(1/3): 59-77.
- [3] 段洪涛,张柏,宋开山,王宗明,张树清.查干湖叶绿素 a 浓度高光谱定量模型研究.环境科学,2006,27(3):503-507.
- [4] 徐祎凡,李云梅,王桥,吕恒,刘忠华,徐昕,檀静,郭宇龙,吴传庆.基于环境一号卫星多光谱影像数据的三湖一库富营养化状态评价. 环境科学学报,2011,31(1):81-93.
- [5] 王琦, 孟伟, 马云峰, 史玉强, 胡筱敏. 基于 HJ-1 卫星的大伙房水库叶绿素 a 浓度反演模型研究. 安全与环境学报, 2013, 13(4): 137-141.
- [6] 郭宇龙,李云梅,吕恒,王珊珊,王永波.基于主成分降维的总悬浮物浓度遥感估算模型适用性分析.湖泊科学,2013,25(6):892-899.
- [7] 张兵,申茜,李俊生,张浩,吴迪.太湖水体3种典型水质参数的高光谱遥感反演.湖泊科学,2009,21(2):182-192.
- [8] He W Q, Chen S, Liu X H, Chen J N. Water quality monitoring in a slightly-polluted inland water body through remote sensing-Case study of the

Guanting Reservoir in Beijing, China. Frontiers of Environmental Science & Engineering in China, 2008, 2(2): 163-171.

- [9] 何红曼,米海存,霍艾迪, Chen X H. 西安市曲江南湖富营养化遥感监测与评价. 中国水土保持, 2013, (9): 65-68.
- [10] 姚霞, 王雪, 黄宇, 汤守鹏, 田永超, 曹卫星, 朱艳. 应用近红外光谱法估测小麦叶片糖氮比. 应用生态学报, 2015, 26(8): 2371-2378.
- [11] 吴燕锋, 赵海珍, 巴特尔·巴克, 李维, 魏小琴, Rasulov H. 塔吉克斯坦瓦赫什河流域干湿演变特征. 干旱区研究, 2015, 32(4): 644-650.
- [12] Aloui C, Jammazi R. Dependence and risk assessment for oil prices and exchange rate portfolios: A wavelet based approach. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2015, 436; 62-86.
- [13] 谭枭, 王希, 王秀茹, 刘兰妹, 王红雷. 基于 GIS 的乌梁素海东岸上游地区水土流失动态变化研究. 水土保持通报, 2014, 34(1): 193-198.
- [14] Lee J H W, Huang Y, Dickman M, Jayawardena A W. Neural network modelling of coastal algal blooms. Ecological Modelling, 2003, 159(2/3): 179-201.
- [15] 宋瑜, 宋晓东, 江洪, 郭照冰, 郭青海. 基于定量遥感反演的内陆水体藻类监测. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(4): 1075-1079.
- [16] 李苗, 臧淑英, 吴长山. 基于 TM 影像的克钦湖叶绿素 a 浓度反演. 农业环境科学学报, 2012, 31(12): 2473-2479.
- [17] 梁亮,杨敏华,臧卓. 基于小波去噪与 SVR 的小麦冠层含氮率高光谱测定. 农业工程学报, 2010, 26(12): 248-253.
- [18] Yochum M, Binczak S. A wavelet based method for electrical stimulation artifacts removal in electromyogram. Biomedical Signal Processing and Control, 2015, 22: 1-10.
- [19] M A Hassan M A, Bushroa A R, Mahmoodian R. Identification of critical load for scratch adhesion strength of nitride-based thin films using wavelet analysis and a proposed analytical model. Surface and Coatings Technology, 2015, 277: 216-221.
- [20] Carvalho A T, Lima A C S, Cunha C F F C, Petraglia M. Identification of partial discharges immersed in noise in large hydro-generators based on improved wavelet selection methods. Measurement, 2015, 75: 122-133.
- [21] Tanaka S, Sannomaru S, Imachi M, Hagihara S, Okazawa S, Okada H. Analysis of dynamic stress concentration problems employing spline-based wavelet Galerkin method. Engineering Analysis with Boundary Elements, 2015, 58: 129-139.
- [22] Gupta A K, Saha Ray S. Numerical treatment for the solution of fractional fifth-order Sawada Kotera equation using second kind Chebyshev wavelet method. Applied Mathematical Modelling, 2015, 39(17): 5121-5130.
- [23] 桑燕芳, 王中根, 刘昌明. 小波分析方法在水文学研究中的应用现状及展望. 地理科学进展, 2013, 32(9): 1413-1422.
- [24] 陶珂,朱建军.小波去噪质量评价方法的对比研究.大地测量与地球动力学,2012,32(2):128-133.
- [25] Hill P R, Achim A M, Bull D R, Al-Mualla M E. Dual-tree complex wavelet coefficient magnitude modelling using the bivariate Cauchy -Rayleigh distribution for image denoising. Signal Processing, 2014, 105: 464-472.
- [26] 刘朝相, 宫兆宁, 赵文吉, 崔天翔, 林川, 张翼然. 基于 SVM 模型的妫水河叶绿素 a 浓度的遥感反演. 遥感技术与应用, 2014, 29(3): 419-427.
- [27] Zhao Y H, Deng X Z, Lu Q, Huang W. Regional rural development, nitrogen input and output in farming-grazing system and its environmental impacts—a case study of the wuliangsuhai catchment. Proceedia Environmental Sciences, 2010, 2: 542-556.
- [28] Guo X J, He L S, Li Q, Yuan D H, Deng Y. Investigating the spatial variability of dissolved organic matter quantity and composition in Lake Wuliangsuhai. Ecological Engineering, 2014, 62: 93-101.
- [29] 郝芳华,孙雯,曾阿妍,李鹏,张嘉勋,岳勇. HYDRUS-1D 模型对河套灌区不同灌施情景下氮素迁移的模拟.环境科学学报,2008,28 (5):853-858.
- [30] 张璇,郝芳华,王晓,王云慧,欧阳威.河套灌区不同耕作方式下土壤磷素的流失评价.农业工程学报,2011,27(6):59-65.
- [31] 肖博文, 成文连, 姚荣, 刘华民, 刘玉虹. 内蒙古乌梁素海 N、P 的变化趋势研究. 水资源与水工程学报, 2015, 26(1): 43-46, 51-51.
- [32] 秦伯强,高光,朱广伟,张运林,宋玉芝,汤祥明,许海,邓建明.湖泊富营养化及其生态系统响应.科学通报,2013,58(10):855-864.
- [33] 马龙,吴敬禄. 近 50 年来内蒙古河套平原气候及湖泊环境演变. 干旱区研究, 2010, 27(6): 871-877.
- [34] 高阳俊,曹勇,赵振,孙从军.基于叶绿素 a 分级的东部湖区富营养化标准研究.环境科学与技术,2011,34(12H):218-220.