

应用多光谱遥感信息反演干旱区浅水湖泊水深

于瑞宏¹, 许有鹏², 刘廷玺³, 李畅游³

(1. 内蒙古大学生命科学学院, 内蒙古 呼和浩特 010021; 2 南京大学地理与海洋科学学院, 江苏 南京 210093;

3. 内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要: 选取位于中国北方干旱区的湖泊乌梁素海为研究区, 基于 2002–2004 年的 Landsat TM 数据以及同期实测水深数据, 根据水深遥感原理, 通过 1 次, 2 次, 3 次实测水深数据与遥感影像反射率及其组合之间的相关关系, 选取五变量, 三变量, 二变量及一变量的非对数及对数模型进行湖泊水深估值, 继而通过误差分析及模型对比, 最终确定出 3 次实测数据五变量非对数模型作为乌梁素海的最优估值模型。该模型利用多光谱组合确定水深的估值模式, 克服了单光谱信息难以综合反映沉水植物、芦苇、水色及底质空间变化的困难, 符合干旱区浅水湖泊的特性, 结果可为干旱区其它浅水湖泊水深反演提供新的思路和参考。

关键词: 水深; 多光谱组合; 遥感; 浅水湖泊; 干旱区; 乌梁素海

中图分类号: P343.3 文献标识码: A 文章编号: 1004-6791(2009)01-0114-07

遥感测深是一种间接的水深测量方法, 主要通过建立水深和水体辐射(反射)之间的相关关系, 对水深进行反演。遥感最早被应用于海岸带水深测图与估算, Mgengel 和 Spitzer 利用 TM 影像对荷兰近海岸水域进行了多时相水深测图, 取得了令人满意的效果^[1]; 丁贤荣等将 RS 与 GIS 相结合对长江口水下地形空间信息进行了提取^[2]; Nellis 则基于 TM 数据分析湖泊相同年份不同时期湖泊水深的变化^[3]。此外, 应用多光谱及高光谱遥感技术, 确定水体透明度及叶绿素的变化^[4,5], 继而进行水深反演的研究也不断发展^[6], 而且随着遥感非监督分类建模技术的完善, 多光谱影像的分等级马尔可夫分割法也开始用于水深图的重建研究中^[7]。综上所述, 目前水深遥感研究主要集中于湿润区或沿海地带, 而对于干旱区浅水湖泊的研究尚少, 且在水深反演模型建立过程中, 尽管建模技术日臻完善, 但大多数研究都是基于单次实测数据, 而应用多次实测数据进行水深估值和验证的研究尚不多见。

本文选择位于北方干旱区的浅水湖泊乌梁素海为研究区, 基于 Landsat TM/ETM 遥感影像数据及实测水深数据, 利用多光谱组合确定水深估值模式, 通过模型对比及误差分析, 最终确定干旱区浅水湖泊的最优水深反演模型。该模型克服了单光谱信息难以全面反映底质空间变化的不足, 符合干旱区浅水湖泊的特性, 可为干旱区湖泊水深模型的建立提供新的思路和参考。

1 研究区概况

乌梁素海为黄河改道而形成的河迹湖, 是黄河流域最大的淡水湖泊^[8], 也是地球上同一纬度最大的自然湿地, 位于内蒙古自治区临河市乌拉特前旗境内, 介于北纬 40°36′~41°03′, 东经 108°43′~108°57′ 之间。据乌拉特前旗气象站 1956–2004 年资料统计, 多年平均降水量为 219.5 mm; 多年平均水面蒸发能力为 1396.3 mm(E601 蒸发器实测值); 多年平均气温为 6.6℃。现有水域面积 361.3 km²(据 2004 年卫片统计), 湖泊水位控制高程 1018.5 m, 水

收稿日期: 2007-12-11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40571025); 教育部博士点基金资助项目(20060284019)

作者简介: 于瑞宏(1978–), 女, 内蒙古包头人, 博士, 主要从事遥感在水文及水环境领域的应用等研究。

深 0.5~3.0 m, 其中水深在 0.8~1.0 m 的水域占 80%, 蓄水量 2.5 亿~3 亿 m^3 。此外, 基于乌梁素海富营养化加剧的现状, 本文从 2002-2004 年的各月中, 遴选出富营养化较为严重的 8 月作为研究时段^[9], 采用 Landsat TM/ETM 影像数据及同期实测水深数据为数据源来建立乌梁素海水深反演模型。研究区遥感影像经过大气校正、几何校正、图像增强等预处理, 突出显示湖泊水域信息, 为湖泊水深反演奠定了基础。

2 干旱区浅水湖泊水深反演模型

2.1 水深遥感的基本原理

进入水体内的光受到水体及底质的吸收和散射, 随着水深的加大, 光的能量受到水分子、溶解物及水中粒状物(有机和无机)吸收以及悬浮颗粒的散射而逐渐衰减, 这种衰减作用可表达为

$$T_r = e^{-\alpha z} \quad (1)$$

式中 T_r 为入射辐射量在水深 z 处的分量; α 为光的衰减系数。

Jupp 考虑了底质反射的影响而对该式作了更广义的变换处理, 其表达式为

$$L_E = (e^{-2kz})L_b + (1 - e^{-2kz})L_w \quad (2)$$

式中 L_E 为水体的辐射量; L_b 为底质上没有上覆水层时的辐射量; L_w 为深水辐射量; k 为水体的有效衰减系数。

因为反射量正比于辐射量, 所以上述 Jupp 提出的水体辐射量可以正规化处理为反射率值, 即

$$R_E = (e^{-2kz})R_b + (1 - e^{-2kz})R_w \quad (3)$$

式中 R_E 为水体的反射率; R_b 为底质上没有上覆水层时的反射率; R_w 为深水反射率。

式(3)反映出水深的反射率 R_E 与光在水中衰减程度(水深)成线性关系, 其模式可概化为

$$R_E = K_1 e^{-K_2 z} \quad \text{或者} \quad z = a_0 + a_1 \ln(R_E) \quad (4)$$

式中 K_1, K_2 为式(3)经过概化后的转换系数。

浅湖的遥感响应包含了水深、底质成分、水质和大气条件等多因素的贡献。当水体足够清澈, 底质比较均一, 大气条件较好时, 可根据式(4)推算出水深值。然而, 干旱区湖泊水深很浅, 水中多长有沉水植物及芦苇, 水色及底质空间分布也不均匀, 因此很难用单波段反射率理论模式来刻画, 应考虑多光谱反射率的组合来模拟确定水深遥感估值模式。大量研究结果表明, 虽然水体的衰减系数和底部反射率的绝对值随水体类型和底质种类不同有很大差异, 但两个波段的底部反射率比值却不随底部物质的种类而变化, 两个波段衰减系数的差值对不同类型的水体也基本保持稳定。也就是说, 通过卫片两个波段反射率的比值可以消除底质物质与水体类型的影响, 这样就可以利用两个波段的比值统计模式求取水深, 即

$$\frac{n_i}{n_j} = K_1 e^{-K_2 z} \quad \text{或者} \quad z = a_0 + a_1 \ln\left(\frac{n_i}{n_j}\right) \quad (5)$$

式中 n_i, n_j 分别为第 i, j 波段的反射率。

由于干旱区浅水湖泊最大水深一般不超过 3 m, 水体类型与底质空间变异性较大, 任何单一波段水深估值式(4)或者两波段组合估值式(5)的估值精度都较低。因此采用多波段及其相互组合的多元对数线性模式, 即

$$z = a_0 + \sum_i a_i \ln(n_i) + \sum_{i,j < 7} b_{ij} \ln\left(\frac{n_i}{n_j}\right) \quad (6)$$

或者直接近似为线性关系

$$z = a_0 + \sum_i q_i n_i + \sum_{i,j < 7} b_{ij} \left(\frac{n_i}{n_j}\right) \quad (7)$$

式中 b_{ij} 为与 (n_i/n_j) 相对应的系数。

2.2 乌梁素海水深反演模型

本文利用乌梁素海 2002 年 8 月 26 日、2003 年 8 月 24 日及 2004 年 8 月 27 日 3 次实测水深数据与当日卫星图

像前 5 个波段反射率数据 TM_1 、 TM_2 、 TM_3 、 TM_4 、 TM_5 及其相互间的运算数据 TM_2/TM_1 、 TM_3/TM_1 、 TM_4/TM_1 、 TM_5/TM_1 、 TM_3/TM_2 、 TM_4/TM_2 、 TM_5/TM_2 、 TM_4/TM_3 、 TM_5/TM_3 、 TM_5/TM_4 进行单变量相关分析, 根据各次数据与各变量之间的相关系数, 综合考虑 3 次数据与各个变量的相关性, 最后遴选出 TM_2 、 TM_5 、 TM_3/TM_1 、 TM_3/TM_2 、 TM_5/TM_4 五变量作为水深反演模型建立的自变量, 水深 z 为因变量进行回归分析。由于传统的水深反演模型中通常将变量的对数作为自变量, 因此本文也将各变量的对数作为自变量, 以便于对比分析。

此外, 考虑到回归方程中 5 个变量作为自变量, 在应用推广中会增加工作量及工作的难度, 因此试图将自变量个数缩减为 3 个、2 个和 1 个, 从而使模型更利于外延及推广。因此, 本文在回归过程中, 自变量分别选取对数和非对数两种形式, 且变量数分别为五变量 (TM_2 、 TM_5 、 TM_3/TM_1 、 TM_3/TM_2 、 TM_5/TM_4), 三变量 (TM_3/TM_1 、 TM_3/TM_2 、 TM_5/TM_4), 两变量 (TM_3/TM_2 、 TM_5/TM_4) 及一变量 (TM_3/TM_2) 4 种形式; 而因变量分别选取单次数据 (2002-08-26, 2003-08-24, 2004-08-27), 双次数据 (2002-08-26+2003-08-24; 2002-08-26+2004-08-27; 2003-08-24+2004-08-27) 及 3 次数据 (2002-08-26+2003-08-24+2004-08-27), 在各种组合的基础上, 模拟乌梁素海的水深, 继而对各种组合的结果进行检验分析, 最终得出乌梁素海水深的最佳遥感估值模式。

根据浅湖水深遥感理论及上述变量的确定与分析, 可以得出不同变量数的遥感回归估值模型。

$$(1) \text{ 五变量 非对数模型: } z = a + bTM_2 + cTM_3 + d \frac{TM_3}{TM_1} + e \frac{TM_3}{TM_2} + f \frac{TM_5}{TM_4} \quad (8)$$

$$\text{对数模型: } z = a + b \ln TM_1 + c \ln TM_2 + d \ln TM_3 + e \ln TM_4 + f \ln TM_5 \quad (9)$$

$$(2) \text{ 三变量 非对数模型: } z = a + b \frac{TM_3}{TM_1} + c \frac{TM_3}{TM_2} + d \frac{TM_5}{TM_4} \quad (10)$$

$$\text{对数模型: } z = a + b \ln \frac{TM_3}{TM_1} + c \ln \frac{TM_3}{TM_2} + d \ln \frac{TM_5}{TM_4} \quad (11)$$

$$(3) \text{ 二变量 非对数模型: } z = a + b \frac{TM_3}{TM_2} + c \frac{TM_5}{TM_4} \quad (12)$$

$$\text{对数模型: } z = a + b \ln \frac{TM_3}{TM_2} + c \ln \frac{TM_5}{TM_4} \quad (13)$$

$$(4) \text{ 一变量 非对数模型: } z = a + b \frac{TM_3}{TM_2} \quad (14)$$

$$\text{对数模型: } z = a + b \ln \frac{TM_3}{TM_2} \quad (15)$$

3 误差分析及最优估值模型的确定

3.1 基于单次实测水深数据的误差分析

以五变量模型为例进行说明, 基于式(8)、式(9), 通过单次水深数据与五变量进行非对数及对数回归, 分别得出各次回归的相关系数, 结果列于表 1。

从表 1 中的相关系数可以看出, 应用单次数据回归过程中, 2004 年 8 月 27 日对数回归的结果较好, 但为了更准确地说明二种模型的优劣, 有必要对以上二模型进行了误差分析。表 2 给出了单次五变量模型回归模拟、检验及误差分析的结果。其中, 回归模拟值为根据历次实测水深数据进行回归求得的计算值, 2002 年 8 月 26 日的回归模拟值为根据该次回归方程的计算值, 以此类推; 回归模拟误差为历次实测水深与回归模拟值之差; 检验值为根据某次回归方程推断其他次的水深值, 如利用 2002 年 8 月 26 日

表 1 单次数据五变量模型的相关系数

Table 1 Correlation coefficients of five-variable model using single-time data

模型分类	2002-08-26	2003-08-24	2004-08-27
非对数模型	0.719	0.700	0.789
对数模型	0.680	0.661	0.821

的回归方程可以推断 2003 年 8 月 24 日、2004 年 8 月 27 日的水深值; 检验平均值为两次检验值的平均值; 检验误差为实测水深与检验值之差。

表 2 单次五变量非对数模型回归模拟、检验及误差分析

Table 2 Error analysis of five variable non-logarithm model using single time data

项 目	非对数			对 数			
	平均值/m	方 差	离差系数	平均值/m	方 差	离差系数	
实测水深	1.518	0.132	0.240	1.518	0.132	0.240	
回归模拟值	1.527	0.059	0.156	1.522	0.057	0.160	
回归模拟误差	-0.009	0.068		-0.005	0.074		
检验值	利用 2002-08-26 回归方程	1.552	0.037	0.120	1.564	0.035	0.123
	利用 2003-08-24 回归方程	1.565	0.029	0.105	1.618	0.027	0.105
	利用 2004-08-27 回归方程	1.459	0.144	0.242	1.478	0.125	0.256
	检验平均值	1.522	0.044	0.136	1.550	0.043	0.135
检验误差	利用 2002-08-26 回归方程	-0.066	0.115		-0.078	0.119	
	利用 2003-08-24 回归方程	-0.052	0.164		-0.105	0.104	
	利用 2004-08-27 回归方程	0.089	0.126		0.070	0.156	

根据表 2 的分析结果, 单次(2002-08-26; 2003-08-24; 2004-08-27) 五变量非对数模型用于检验的均方误小于对数模型的均方误, 因此, 在仅有单次数据的情况下, 选取五变量非对数回归模型对各年 8 月份水深进行检验优于五变量对数回归模型, 且模型是可行及稳定的。按照单次五变量回归的方法, 依次对三变量、二变量及一变量进行回归, 回归结果显示, 在此 3 种情况下, 对数回归的结果要优于非对数回归的结果, 因此, 仅列出对数回归的结果。最终将单次回归的误差分析结果汇总于表 3。

表 3 单次回归误差分析综合结果

Table 3 Results of error analysis using single-time data

用于回归的 变量个数	相关系数		均方误差	
	实测值与回归模拟值	实测值与检验值	实测值与回归模拟值	实测值与检验值
五变量非对数	0.695	0.456	0.068	0.139
五变量对数	0.666	0.454	0.068	0.139
三变量对数	0.592	0.455	0.085	0.143
二变量对数	0.424	0.157	0.107	0.149
一变量对数	0.400	0.152	0.110	0.147

由表 3 可以看出, 利用一变量及二变量进行水深回归的过程中, 实测值无论与回归模拟值还是检验值的相关性都较小, 且均方误差较大; 但是当变量增长为 3 个以后, 相关系数大大提高, 且均方误差变小, 进一步将变量数增加为 5 个后, 模型估值结果要优于 3 个变量的结果。综上所述, 在仅有单次实测数据的情况下, 五变量非对数回归模型为乌梁素海水深预测的最优模型。

3.2 基于双次及三次实测水深数据的误差分析

与单次数据的分析方法相同, 自变量分别选取五变量、三变量、二变量及一变量, 应用双次(2002-08-26+2003-08-24; 2002-08-26+2004-08-27; 2003-08-24+2004-08-27) 及 3 次(2002-08-26+2003-08-24+2004-08-27) 实测数据进行回归模拟, 检验及误差分析, 双次及 3 次数据的误差分析结果分别汇总于表 4 及表 5。对于三变量, 二变量及一变量回归而言, 对数模型均优于非对数模型, 表 4 和表 5 中仅列出对数模型的分析结果。

表 4 双次实测数据回归误差分析综合结果

Table 4 Results of error analysis using twice data

用于回归的 变量个数	相关系数		均方误差	
	实测值与回归模拟值	实测值与检验值	实测值与回归模拟值	实测值与检验值
五变量非对数	0.632	0.543	0.079	0.093
五变量对数	0.611	0.488	0.079	0.093
三变量对数	0.566	0.489	0.091	0.099
二变量对数	0.369	0.079	0.114	0.140
一变量对数	0.375	0.005	0.116	0.140

由表 4 可以看出, 在利用 2 次数据一变量及二变量进行水深回归的过程中, 实测值与回归模拟值的相关性较小, 与检验水深的相关系数更小; 但是当变量增长为 3 个以后, 相关系数大大提高, 均方误也显著变小, 进而将变量数增加为 5 个后, 模型估值精度要优于 3 个变量的结果。此外, 五变量非对数模型要优于对数模型。综上所述, 在仅有 2 次实测数据的情况下, 五变量(非对数)回归模型为水深预测的最佳模型。

表 5 的结果显示, 3 次回归结果中, 五变量非对数模型要优于五变量对数模型的结果, 且随着变量数目的增多, 相关系数逐渐增大。根据 1 次回归及 2 次回归检验结果的变化规律, 可以推断出 3 次回归模型用于检验时要好于 2 次回归模型, 但圆滑效应也更显著。

3.3 最优水深遥感估值模型的确定

综合表 3~ 表 5 的分析结果, 可以得出以下结论:

(1) 无论对于 1 次、2 次或 3 次实测数据, 就乌梁素海而言, 五变量非对数回归模型优于对数回归模型, 然而三变量、二变量及一变量回归时, 则是对数模型较优。且采用五变量进行回归时, 不论是对数还是非对数, 其回归结果都优于三变量、二变量及一变量。

(2) 模型主要用于水深的外推, 双次五变量非对数回归模型的检验结果优于单次五变量结果, 因此方程中各年同一月份中水深数据的加入, 尽管降低了实测值与回归模拟值的相关系数, 但是用于其它年份时则会提高外推检验的精度。

(3) 采用 3 次数据进行回归时, 五变量非对数回归模型也优于对数模型, 且采用五变量进行回归时, 回归结果也优于三变量、二变量及一变量。由于采用 3 次数据进行回归时无法进行检验, 但是根据 1 次及 2 次实测

表 5 3 次实测数据回归误差分析综合结果
Table 5 Results of error analysis using three times data

用于回归的 变量个数	实测值与回归模拟值	
	相关系数	均方误差
五变量非对数	0.624	0.080
五变量对数	0.593	0.083
三变量对数	0.585	0.086
二变量对数	0.292	0.119
一变量对数	0.284	0.120

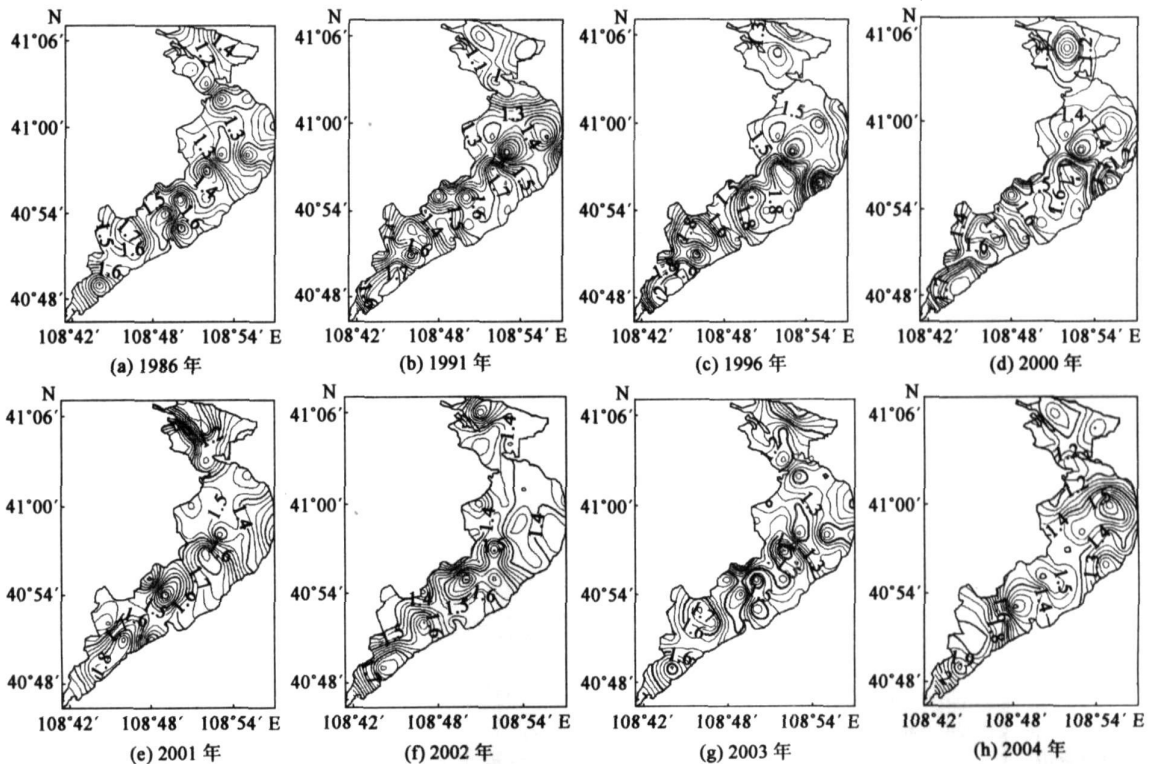


图 1 乌梁素海 8 个典型年等水深线

Fig. 1. Depth isoline for the Wuliangsuhai Lake in the eight typical years

数据检验结果的比较分析可以看出, 2 次及 1 次数据检验的结果稳定, 点距集中, 且采用 2 次实测数据进行检验又优于 1 次, 因此理论上讲将 3 次实测数据用于模型将好于 1 次和 2 次数据的结果。

因此, 本文选取 3 次实测数据五变量非对数线性回归模型对乌梁素海其它年份 8 月份水深值进行估值, 水深反演模型表达式为

$$z = 6.027 - 7.617TM2 - 0.390TM3 - 1.224 \frac{TM3}{TM1} + 0.003 \frac{TM3}{TM2} + 0.191 \frac{TM5}{TM4} \quad (16)$$

$R = 0.624$ 均方误差 $D = 0.08$

3.4 典型年水深的遥感估值

通过计算 1986–2001 年间 5 个典型年份 (1986、1991、1996、2000、2001 年)^[10] 8 月的 $TM2$ 、 $TM5$ 、 $TM3/TM1$ 、 $TM3/TM2$ 、 $TM5/TM4$ 各波段及其组合运算数据, 将其代入式 (16) 中, 即可得到各年水深的计算值, 结合前述 2002–2004 年的水深计算结果, 使用 SURFER 绘制了 1986–2004 年间 8 个年份的等水深线 (图 1)。

由图 1 结合历史资料, 乌梁素海水深的空间分布呈现出从南到北递减的趋势, 而水底形态呈现出从南至北递增的趋势, 估值水深分布与实际水深有相当的一致性, 这也表明, 文中得出的浅水湖泊水深反演模型可以用于各年同一月份水深的估值, 其可为乌梁素海水深演变提供参考。

4 结 论

本文建立的乌梁素海水深反演模型, 自变量分别选取对数和非对数两种形式, 且变量数分别为五变量 ($TM2$ 、 $TM5$ 、 $TM3/TM1$ 、 $TM3/TM2$ 、 $TM5/TM4$), 三变量 ($TM3/TM1$ 、 $TM3/TM2$ 、 $TM5/TM4$), 两变量 ($TM3/TM2$ 、 $TM5/TM4$) 及一变量 ($TM3/TM2$) 4 种形式; 因变量分别选取单次数据 (2002-08-26, 2003-08-24, 2004-08-27), 双次数据 (2002-08-26+ 2003-08-24; 2002-08-26+ 2004-08-27; 2003-08-24+ 2004-08-27) 及 3 次数据 (2002-08-26+ 2003-08-24+ 2004-08-27)。在对自变量和因变量各种组合结果进行检验及误差分析的基础上, 最终得出乌梁素海水深的最优遥感估值模式, 并将其应用于 1986–2001 年间 5 个年份水深的估值中。

模型对比分析结果表明, 当自变量为一变量和两变量时, 均方误差较大, 且相关系数较小; 当自变量增加为 3 个, 相关系数明显增大, 均方误差则迅速缩小; 进而将变量数增加为 5 个后, 模型估值精度又要优于三变量的结果。此外, 当自变量选用五变量时, 无论采用 1 次, 2 次或 3 次实测数据, 非对数模型皆优于对数模型, 且各年同一时期水深实测数据的加入, 使得模型精度显著提高。本文最终选取 3 次实测数据五变量非对数模型作为乌梁素海水深的最优估值模型, 该模型基于浅水湖泊的水深遥感原理, 可将其推广到干旱区其它浅水湖泊。推广应用中根据待研究湖泊的实际水深数据及所获取遥感影像的具体情况, 确定自变量的个数及因变量中实测水深次数, 即可按照本文中提供的回归, 检验及误差分析方法, 建立最适合当地的湖泊水深估值模型。

参考文献:

- [1] MGENGEL V, SPIITZER R J. Application of remote sensing data to mapping of shallow sea-floor near by Netherlands[J]. International Journal of Remote Sensing, 1991, 7: 473–479.
- [2] 丁贤荣, 张鹰, 黄志良. 长江口北支水下地形遥感测量研究[J]. 中国港湾建设, 1997, 4: 6–10. (DING Xian-rong, ZHANG Ying, HUANG Zhi-liang. Survey in support of remote sensing underwater topography entrance of the Yangtze River[J]. China Harbour Engineering, 1997, 4: 6–10. (in Chinese))
- [3] NELLIS D, HARRINGTON J A, WU J P. Remote sensing of temporal and spatial variations in pool size, suspended sediment, turbidity, and Secchi depth in Tuttle Creek Reservoir[J]. Geomorphology, 1998, 21: 281–293.
- [4] 宋开山, 张柏, 王宗明, 等. 半干旱区内陆湖泊透明度高光谱估测模型研究——以松嫩平原查干湖为例[J]. 水科学进展, 2007, 18(6): 790–796. (SONG Kai-shan, ZHANG Bo, WANG Zong-ming, et al. Hyperspectral model for transparency of Chagan lake in semi-arid environment of Songnen plain[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(6): 790–796. (in Chinese))

- [5] 闻建光, 肖青, 杨一鹏, 等. 基于高光谱数据提取水体叶绿素 a 浓度的混合光谱模型[J]. 水科学进展, 2007, 18(2): 270–276. (WEN Jian-guang, XIAO Qing, YANG Yi-peng, et al. Spectral mixing model and its stability of chlorophyll-a concentration extraction based on hyperspectral data[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(2): 270–276. (in Chinese))
- [6] 黄家柱, 尤玉明. 长江南通河段卫星遥感水深探测试验[J]. 水科学进展, 2002, 13(2): 235–238. (HUANG Ji-zhu, YOU Yu-ming. Experiment of water depth surveying in the Nantong section of the Yangtze River[J]. Advances in Water Science, 2002, 13(2): 235–238. (in Chinese))
- [7] PROVOST J N, COLLET C, ROSTANG P, et al. Hierarchical Markovian segmentation of multispectral images for the reconstruction of water depth maps[J]. Computer Vision and Image Understanding, 2004, 93: 155–174.
- [8] 王洪道, 窦鸿身, 颜京松, 等. 中国湖泊资源[M]. 北京: 科学出版社, 1989: 142–168. (WANG Hong-dao, DOU Hong-shen, YAN Jing-song, et al. China Lake Resource[M]. Beijing: Science Press, 1989: 142–168. (in Chinese))
- [9] 李畅游, 高瑞忠, 刘廷玺, 等. 乌梁素海水质富营养化评价及其年季动态变化特征[J]. 水资源与水工程学报, 2005, 16(2): 11–15. (LI Chan-you, GAO Rui-zhong, LIU Ting-xi, et al. Study on the eutrophication synthetical evaluation and the season-year change in Wuliangsu lake[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2005, 16(2): 11–15. (in Chinese))
- [10] 于瑞宏, 李畅游, 刘廷玺, 等. 乌梁素海湿地环境的演变[J]. 地理学报, 2004, 59(6): 948–955. (YU Rui-hong, LI Chan-you, LIU Ting-xi, et al. Change of Wetland Environment in Wuliangsu lake[J]. Acta Geographica Sinica, 2004, 59(6): 948–955. (in Chinese))

Reversing water depth in shallow lake of arid area using multi-spectral remote sensing information*

YU Rui-hong¹, XU You-peng², LIU Ting-xi³, LI Chang-you³

(1. College of Life Sciences, Inner Mongolia University, Huhhot 010021, China;

2. School of Geographic and Oceanographic Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China;

3. Faculty of Hydraulic and Civil Architecture Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot 010018, China)

Abstract: In the paper, Wuliangsu lake, located in the arid area of North China, is taken as a case, in consideration of the characteristics of the shallow depth in the arid area. Through the relative analysis of one, two and three times' real-measured depth data and the reflectance of satellite images, the water depth is estimated based on the logarithm or non-logarithm model of five-, three-, two- and one-variable using the Landsat TM/ETM data and the real-measured depth data from 2002 to 2004 according to the principle of water depth remote sensing. By model comparison and error analysis, the non-logarithm model of five-variable with three-time measured data is selected as the optimal depth model. The model uses the multi-spectral composition method to estimate water depth, solving the problem that the single spectral can not reflect the spatial changes of submerged weeds, reeds, water color and bottom matter. The model accords with the characteristics of shallow lake in the arid area and can provide the new approach and reference for the other lakes of the arid area.

Key words: water depth; multi-spectral composition method; remote sensing; shallow lake; arid area; wuliangsu lake

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 40571025).