

基于分区暗像元和 Spline 插值方法估算 太湖气溶胶光学厚度

陈军^{①②}, 孙记红^{①②}, 付军^{①②}

(① 国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室, 青岛 266071; ② 青岛海洋地质研究所, 青岛 266071)

摘要:传统暗像元大气校正算法认为研究区域上空的气溶胶光学厚度呈均匀分布状态。对于 II 类水体, 尤其是气溶胶类型复杂的内陆湖区, 暗像元算法的均匀性假设将不再适用。针对传统暗像元算法的不合理性, 本研究将太湖湖区划分为 9 个子区域, 每个子区域利用传统暗像元算法估算其气溶胶光学厚度, 然后结合 Spline 插值算法获取整个太湖的气溶胶光学厚度信息, 并以传统暗像元大气校正算法作为参照, 探讨与分析分区暗像元算法的精度状况。通过本文的研究可知: 气溶胶光学厚度是遥感大气校正的关键参数; 在 2003 年 10 月 28 日, 受西北风的影响, 太湖上空的气溶胶光学厚度呈湖南低, 湖北高的分布模式; 分区暗像元大气校正算法获取的气溶胶光学厚度平均值为 0.79, 标准偏差为 0.099, 标准偏差与平均值的比值为 12.58%, 与传统暗像元算法相比, 分区暗像元算法综合考虑了水体上空气溶胶光学厚度空间分布的不均匀性, 进而有利于改善大气校正的精度。

关键词: 大气校正; 气溶胶光学厚度; 暗像元

doi: 10.3969/j.issn.1000-3177.2011.03.006

中图分类号: TP79 文献标识码: A 文章编号: 1000-3177(2011)115-0033-05

Using the Sub-area Dark Pixel and Spline Interpolation Approach to Estimate the Aerosol Optical Thickness on Taihu Lake

CHEN Jun^{①②}, SUN Ji hong^{①②}, FU Jun^{①②}

(① The Key Laboratory of Marine Hydrocarbon Resources and Environmental Geology, Qingdao 266071;

② Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071)

Abstract: The traditional atmospheric correction algorithms consider that aerosol optical thickness is homogeneous distribution above the research regions. For the case II waters, especially in the inland lakes whose aerosol types are very complicated, the approximation of homogeneous distribution becomes improper. Taking into account the unreasonable traditional approach, the study divides the Taihu Lake into 9 sub areas. The aerosol optical thickness was estimated by the traditional dark pixel algorithm. Then, spline interpolation approach was used to calculate the aerosol optical thickness of each pixel on Taihu Lake based on those 9 dark pixels. According to the results of this paper, it was found that the aerosol optical thickness was an important parameter of atmospheric correction algorithm. Influenced by the northwester, the aerosol optical thickness was lower on the south lake and higher on the north lake on 28 October, 2003. The mean aerosol optical thickness, calculated by the sub area dark algorithm, was 0.79, the standard deviation was 0.099, and the ration of standard deviation and the mean aerosol optical thickness was 12.58%. Comparing with the traditional dark pixel algorithm, the sub area dark algorithm has comprehensive consideration of the inhomogeneity distribution of aerosol optical thickness in space, and could be beneficial to the accuracy improvement of atmospheric correction.

Key words: atmospheric correction; aerosol optical thickness; dark pixel

收稿日期: 2010-04-07 修订日期: 2010-05-28

基金项目: 十一五国家科技支撑项目(2008BAC34B03), 国家自然科学基金项目(40606013)与中国海陆地质地球物理系列图项目(GZH200900504)资助。

作者简介: 陈军(1982~), 男, 从事水环境遥感研究。

E mail: chenjun820711@163.com.

1 引言

对于水色遥感而言, 卫星所探测到的遥感信号主要包括两部分: 载有水体水质浓度信息的离水辐亮度和大气程辐射噪声。大气校正的目的是从总信号中提取离水辐亮度信号。打破大气校正瓶颈的关键在于弱信号提取方法的有效突破。在蓝光波段, 传感器所探测到的信号, 80% 以上是来自于大气散射的贡献, 也常称之为大气程辐射; 离水辐亮度信号仅占总信号的 10% 左右, 而绿光波段的比重将更小^[1]。大气校正的另一难点则是, 辐射定标和大气校正的 5% 误差, 可以导致 100% 以上的水质参数浓度的反演误差, 而不同的大气算法之间可能存在 2%~4% 的误差^[2], 因此, 大气校正算法必须是稳定的“业务化算法”, 把大气校正算法视为卫星传感器探测能力的延伸, 要对传感器和大气校正算法进行综合的替代定标, 否则辐射定标和大气校正的绝对误差之和可能超过 5% 的技术极限^[3]。大气散射可以分为 Rayleigh 散射和气溶胶散射。臭氧、氧气等大气固有成分含量的时空分布较稳定, 该类型的散射贡献可以通过多次散射加偏振的精确 Rayleigh 散射的方法予以消除。然而, 气溶胶浓度及类型具有极大的时空多样性与不稳定性, 要准确计算气溶胶散射的贡献较难。因此, 目前对大气校正算法的研究也主要侧重于对气溶胶散射贡献计算方法的探讨。

在过去的一段时间内, 国内外学者对大气校正算法进行了大量而有益的探讨, 并逐步形成了以标准 Gordon 暗像元大气校正算法为核心的一系列稳定的业务化算法^[4-5]。传统暗像元大气校正算法认为^[6]: 研究区域内存在清洁水体, 该水体的红外与近红外波段的光谱反射率近似等于 0; 研究区域上空的气溶胶类型及浓度分布是均匀且同一的, 即研究区域上空的气溶胶光学厚度是相同的。在红外与近红外波段, 水体反射率与水体悬浮泥沙浓度成正比^[7], 因此, 假设 ①在 II 类水体中应用将产生很大误差; 同样, 对于 II 类水体湖区, 尤其是内陆湖体上空, 气溶胶类型及其浓度较复杂; 假设 ②的不足在 II 类水体遥感定量中的应用将导致 7.9% 以上的气溶胶光学厚度估算误差^[8]。对于前者的不足, 已有一些成熟的算法予以修正^[9], 而关于后者在 II 类水体条件下的合理性研究较少。鉴于此, 本研究提出了分区暗像元大气校正算法。该算法将研究区域划分为若干子区域, 在每个区域中利用传统暗像元算法计算区域性暗像元的气溶胶光学厚度, 然后利用

Spline 插值算法, 将各个子区域内的气溶胶光学厚度在整个研究区域内进行插值, 进而获取整个水体区域内的气溶胶光学厚度分布状况, 其旨在提高传统暗像元算法在 II 类中的应用精度。

2 实验数据与研究区域

太湖又名震湖, 地处于长江三角洲, 经纬度坐标范围为 $30^{\circ}55'40'' \sim 31^{\circ}32'58''N$, $119^{\circ}52'32'' \sim 120^{\circ}36'10''E$, 面积为 2427.8km^2 。太湖属于典型的 II 类水体, 年均叶绿素 a 浓度大约为 $22.23\mu\text{g/L}$ 。太湖之所以被选择为研究区域, 在于太湖水体较浑浊, 叶绿素 a 和可溶性有机质浓度较高, 太湖气溶胶类型受多种大陆气溶胶类型控制。

本研究实例计算的遥感影像数据为 2003 年 10 月 28 日太湖地区 Landsat-5 TM 影像。Landsat-5 TM 传感拥有 7 个波段, 这些波段分别为: 蓝、绿、红波段, 近红外、红外、远红外以及短波波段。由于 Landsat/TM 影像具有分辨率高的优势, 被广泛应用于水色遥感领域。根据 Dekker 和 Peters 等人的研究结果^[10]: TM1 的反射辐亮度主要受叶绿素 a 浓度和黄色物质的影响; TM2 主要被用于藻类等浮游植物的探测; TM3 的反射辐亮度是悬浮泥沙浓度, 叶绿素 a 和黄色物质等共同作用的结果。鉴于这种多水质成份光学特性的耦合效应较复杂, TM3 波段的水质遥感机理较难被解释清楚; TM4 的辐亮度与悬浮泥沙浓度具有较强的相关性。

3 研究方法

根据 Gordon 的标准暗像元算法, 假设天空辐照度各向同性, 天空晴朗无云, 水体为朗伯体, 忽略大气的偏振、湍流、折射和多次散射的作用, 卫星传感器在大气层顶处接收到的总信号用辐亮度表示如下^[11]:

$$L_t(\lambda) = L_{rs}(\lambda) + L_{as}(\lambda) + T(\lambda)L_{wc}(\lambda) + t(\lambda)L_w(\lambda) \quad (1)$$

式中, λ 为波长; $L_t(\lambda)$ 为总辐亮度; $L_{rs}(\lambda)$ 为大气分子的 Rayleigh 散射; $L_w(\lambda)$ 为离水辐亮度; $L_{as}(\lambda)$ 为大气成分的气溶胶散射; $L_{wc}(\lambda)$ 为太阳耀斑; $t(\lambda)$ 为大气漫射透过率; $T(\lambda)$ 为太阳直射透过率。在水色遥感中, 设计传感器观测角度时, 已经考虑了太阳耀斑的作用, 并予以规避, 因此, 太阳耀斑对总信号的影响可以忽略不计^[12]。

(1) 式中 Rayleigh 散射和气溶胶散射可以用下式近似给出:

$$L_{xs}(\lambda) = \frac{\omega_x \tau_x F'_0 P_x(\theta_x)}{4\pi} \quad (2)$$

式中, $x = r, a; \theta_x$ 太阳高度角; τ_x 为光学厚度; F'_0 为经过臭氧双带吸收的大气层外太阳辐射照度; $P_x(\theta_x)$ 为散射相函数; ω_x 为单次反照率 ($\omega_r = 1, \omega_a = 0.97$)^[11]。

Rayleigh 散射像函数如下^[6]:

$$P_r(\theta_x) = \frac{3(1 + \cos^2\theta_x)}{4} \quad (3)$$

气溶胶散射像函数如下^[13]:

$$P_a(\theta_x) = \alpha f(\theta_x, g_1) + (1 - \alpha) f(\theta_x, g_2) \quad (4)$$

$$f(\theta_x, g) = \frac{(1 - g)^2}{(1 + g^2 - 2g\cos\theta_x)^{1.5}} \quad (5)$$

根据参考文献[14], (4) 式中的 3 个参数可以采用 $\alpha = 0.983, g_1 = 0.82$ 和 $g_2 = -0.55$ 。

大气总光学厚度可以表示如下:

$$\tau(\lambda) = \tau_r(\lambda) + \tau_o(\lambda) + \tau_a(\lambda) \quad (6)$$

式中, $\tau(\lambda)$ 为大气总光学厚度; $\tau_r(\lambda)$ 为 Rayleigh 散射光学厚度; $\tau_o(\lambda)$ 为臭氧吸收光学厚度; $\tau_a(\lambda)$ 为气溶胶光学厚度。由于大气固有成分和臭氧的分布及其浓度较稳定, 则 $\tau_r(\lambda)$ 和 $\tau_o(\lambda)$ 可以通过如下模型精确地计算得到:

$$\tau_r = 0.008524\lambda^{-4}(1 + 0.0113\lambda^2 + 0.00013\lambda^4) \quad (7)$$

$$\tau_o = 0.03 \cdot \text{Exp}[-277(\lambda - 0.6)^2] \quad (8)$$

当像元为清澈水体时, 则该像元在近红外波段的反射率可近似为 0。另外, 在近红外波段, 像元的离水反射率主要受悬浮泥沙浓度的影响, 对于低泥沙浓度区域, 仍将成立像元反射率近似为 0 的假设^[4-5]。综合上述推导与近似假设, 对于低悬浮泥沙浓度像元, 在近红外波段的气溶胶光学厚度可以如下近似表示:

$$\tau_a = \frac{4\pi L_r(\lambda) - \tau_r F'_0 P_r(\theta_x)}{0.97 F'_0 P_a(\theta_x)} \quad (9)$$

4 实例计算与分析

本研究将太湖划分为 9 个子区域(图 1), 每个子区域采用 Gordon 标准暗像元算法估算其气溶胶光学厚度, 然后将 9 个点的气溶胶光学厚度在影像区域内进行 Spline 空间插值, 插值的结果即为研究区域内的气溶胶光学厚度分布状况。

4.1 基于暗像元方法估算各分区的气溶胶光学厚度

标准暗像元大气校正算法认为: 清洁水体的反

射率在近红外与红外波段近似等于零^[4-5]。鉴于暗像元的这种光谱特征, 本研究的实例计算主要针对 TM4 波段(760nm~900nm)。对于太湖水体, 张民伟的研究结果表明总能找到适用于暗像元大气校正算法的清澈的水体区域^[14]。在 IDL 二次开发平台的支持下, 将湖区划分为 9 个子区域。每个区域搜索辐亮度最小的像元作为该子区域的暗像元, 利用(9)式计算其气溶胶光学厚度。9 个分区如图 1 所示。同时, 图 1 也标注了在 IDL 平台下检索出来的每个分区的暗像元位置。陈军等研究结果表明^[15]: 在 2003 年 10 月 28 日, 太湖悬浮泥沙浓度呈湖中高, 湖边低的格局, 并且图 1 所示的暗像元恰好分布于悬浮泥沙浓度较低的位置, 而由(9)式的假设条件可知, 悬浮泥沙浓度高低状况将决定暗像元算法的精度。因此, 在缺少同步大气参数数据的情况下, 基于分区暗像元算法所提取气溶胶光学厚度信息的方法具有一定的优势。另外, 考虑到水体对近红外波段的强衰减特性, 太湖平均水深大约为 1.89m, 基本上可以忽略底质对近红外波段离水反射率的影响。

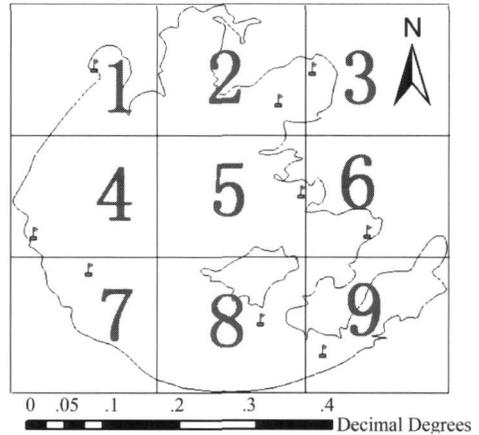


图 1 基于 TM4 提取的 9 个区域的暗像元

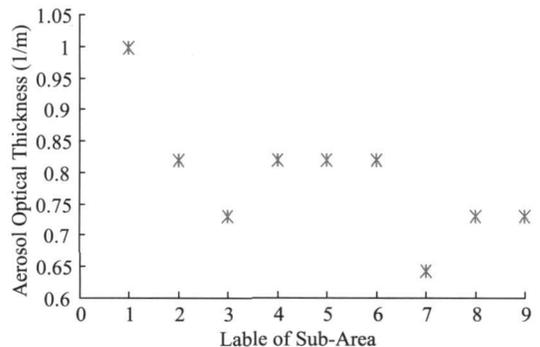


图 2 每个区域的气溶胶光学厚度

图 2 给出了每个暗像元的气溶胶光学厚度。由图 2 可知, 太湖 9 个子区域的气溶胶光学厚度最大

值为 0.998, 最小值为 0.642, 平均值为 0.79, 标准偏差为 0.099, 标准偏差与平均值的比值的百分比为 12.58%。标准偏差与平均值的比值反映了由分区暗像元算法估算而得的太湖上空气溶胶光学厚度具有 12.58% 的不均匀性。事实上, 由基于均匀假设的标准暗像元大气校正算法所获取的太湖区域气溶胶光学厚度为 0.642, 在假设 9 个分区中的暗像元均为清澈水体的前提下, 基于均匀假设的暗像元大气校正算法应用于内陆水体可能导致 12.58% 左右的气溶胶光学厚度估算误差。另外, 逢勇等研究表明, 太湖的绕湖心环流使得湖心和部分湖岸的水体悬浮物浓度较高, 湖心的悬浮物浓度比沿湖区域高^[16]。在近红外波段, 水体反射率随着悬浮物浓度的增加呈线性递增^[17], 这也导致了大部分暗像元分布在沿湖区域。

4.2 基于 Spline 插值方法提取太湖气溶胶光学厚度的空间分布信息

常见的插值函数有最近邻插值法、双线性插值法、反距离插值算法, Krigin 插值算法和 Spline 插值算法。其中, Spline 插值法获取的曲面具有光滑性好的特点。鉴于此, 本研究采用 ArcGIS 9.2 提供的规则 Spline 空间插值功能, 对 9 个子区域的大气气溶胶光学厚度, 在研究区域内进行插值, 进而获取每个像元的气溶胶光学厚度。

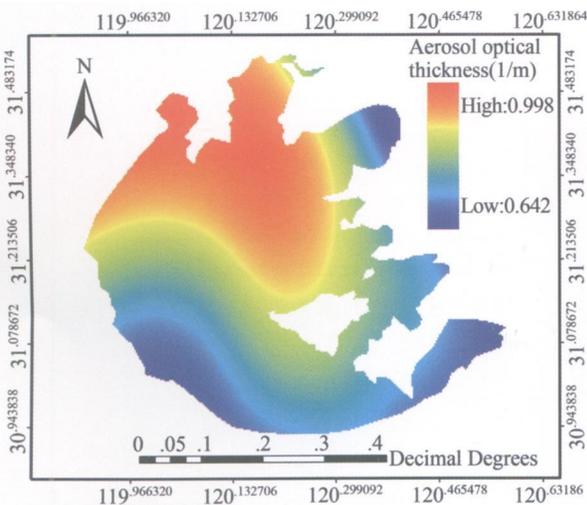


图 3 T M4 波段的气溶胶光学厚度

图 3 给出了基于 Spline 插值算法获取的太湖区域气溶胶光学厚度分布状况。由图 3 可知, 太湖上空气溶胶光学厚度呈湖南低、湖北高的分布格局。太湖北部为无锡和宜兴, 该区域工业发达, 城市化程度较高, 其气溶胶主要受工业型和城市型气溶胶类

型控制。在 2003 年 10 月 28 日, 太湖上空的风向主要以西北风为主, 风速为 0.5m/s。缓慢的西北风将太湖西北部浓厚的大陆气溶胶传送到太湖东南部区域, 以至太湖上空气溶胶光学厚度呈图 3 所示的分布格局。

5 结论与探讨

离水辐亮度信息是被动遥感进行水质参数反演的重要信息。然而, 由于水分子的强吸收特性, 携带水体水质浓度信息的离水辐亮度属于弱信号。一般情况下, 传感器所探测到的信号, 在蓝光波段, 大气程辐射信号占 80% 以上, 离水辐亮度信号仅 10% 左右, 而这个比重在绿光波段将更小。因此, 有效地去除大气程辐射的干扰是水色遥感水质参数定量精度突破 30% 瓶颈的关键。

传统暗像元大气校正算法认为, 研究区域上空的气溶胶种类及浓度分布是均匀的, 即研究区域上空的气溶胶光学厚度是相同的。然而对于 II 类水体, 尤其内陆湖体上空, 气溶胶类型及浓度较复杂, 很难满足传统暗像元算法的均匀性的假设。本研究将太湖划分为 9 个子区域, 每个子区域利用传统暗像元算法计算其气溶胶光学厚度, 然后利用 Spline 插值算法获取整个太湖的气溶胶光学厚度分布状况。通过本文的研究, 可知: ①大气光学厚度是遥感影像进行大气校正的关键参数, 基于不均匀假设的分区暗像元大气校正算法获取的 9 个分区的气溶胶光学厚度的平均值为 0.79, 标准偏差为 0.099, 标准偏差与平均值的比值的百分比为 12.58%, 与传统暗像元算法相比, 分区暗像元算法综合考虑了水体上空气溶胶光学厚度空间分布的不均匀性, 进而有利于改善大气校正的精度。②太湖北部的陆地地区城市化和工业化程度较高, 其气溶胶类型较复杂。在 2003 年 10 月 28 日, 太湖上空的风向主要以西北风为主, 风速为 0.5m/s。缓慢的西北风将太湖西北部浓厚的大陆气溶胶传送到太湖东南部区域, 以至太湖气溶胶光学厚度呈湖南低, 湖北高的分布模式。

综上所述, II 类水体, 尤其是内陆水体上空的气溶胶类型及浓度具有空间分布的不均匀性与不稳定性, 进而影响遥感影像大气校正的精度。基于分区暗像元算法和 Spline 插值方法相结合的大气校正算法有助于对标准暗像元算法精度的改善。

参考文献

- [1] Chomko, R. M., Gordon, H. R. Atmospheric correction of ocean color imagery: Using of the Junge power law aerosol size distribution with variable refractive index to handle aerosol absorption[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(24): 5560–5572.
- [2] Ding, K. Y., Gordon, H. R. Atmospheric correction of ocean color sensors: Effects of the earth's curvature[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(30): 7096–7106.
- [3] 张民伟, 唐军武, 丁静. 水色大气校正算法综述[J]. *海洋技术*, 2008, 27(3): 110–126.
- [4] Hu, C. M., Carder, K. L., Muller-Karger, F. E. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery: Assessment of the use of alternative bands[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(21): 3573–3581.
- [5] Gordon, H. R., Wang, W. Retrieval of water leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: A preliminary algorithm[J]. *Applied Optics*, 1997, 33(3): 443–452.
- [6] Pan, D. L., Mao, Z. H. Atmospheric correction for China's coastal water color remote sensing[J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2001, 20(3): 343–354.
- [7] Dekker, A. G., Vos, R. J., Peters, S. W. M. Analytical algorithms for lake water TSM estimation for retrospective analysis of TM and SPOT sensor data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(1): 15–35.
- [8] Chen, J., Zen, Z. H., Sun, J. H. A new atmospheric correction algorithm based on the inverse distance spatial interpolation approach[J]. *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 2010.
- [9] Ruddick, K. G., Ovidio, F., Rijkeboer, M. Atmospheric correction of SeaWiFS imagery for turbid coastal and inland waters[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(6): 897–912.
- [10] Dekker, A. G., Peters, S. W. M. The use of the thematic mapper for the analysis of eutrophic lakes: A case study in the Netherlands[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1993(14): 799–821.
- [11] Gordon, H. R., Clark, D. K. Clear water radiance for atmospheric correction of coastal zone color scanner imagery[J]. *Applied Optics*, 1981, 20(24): 4175–4180.
- [12] Gordon, H. R., Wang, W. Retrieval of water leaving radiance and aerosol optical thickness over the oceans with SeaWiFS: A preliminary algorithm[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(3): 443–452.
- [13] Gordon, H. R., Castano, D. J. Aerosol analysis with the coastal zone color scanner: A simple method for including multiple scattering effects[J]. *Applied Optics*, 1989, 28(7): 1320–1326.
- [14] 张民伟. 二类水体真三维 Monte Carlo 模拟及其大气校正算法研究[D]. 北京, 中国科学院研究生院. 2009.
- [15] 陈军, 周冠华, 温珍河, 等. 太湖表层悬浮泥沙遥感定量模式研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(1): 137–141.
- [16] 逢勇, 李一平, 罗淑葱. 水动力条件下太湖透明度模拟研究[J]. *中国科学 D 辑*, 2005, 35(增刊 II): 145–156.
- [17] Dekker, A. G., Vos, R. J., & Peters, S. W. M. Analytical algorithms for lake water TSM estimation for retrospective analysis of TM and SPOT sensor data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, 23(1): 15–35.

(上接第 32 页)

参考文献

- [1] 杨永兴. 从魁北克 2000—世纪湿地大事活动看 21 世纪国际湿地科学研究与热点与前沿[J]. *地理科学*, 2002, 22(2): 150–155.
- [2] 赵惠, 牛振国. 面向遥感监测的中国湿地区划初步构想[J]. *湿地科学与管理*, 2009, 5(2): 44–47.
- [3] 周维才, 陈永富. 湿地资源遥感变化监测方法[J]. *世界林业研究*, 2007, 20(2): 45–49.
- [4] 李建平, 张柏, 张冷, 等. 湿地遥感监测研究现状与展望[J]. *地理科学进展*, 2007, 26(1): 33–43.
- [5] 杨永兴. 国际湿地科学研究进展和中国湿地科学研究优先领域与展望[J]. *地球科学进展*, 2002, 17(4): 508–514.
- [6] Jessika Thyro, Alain Pietroniro. Towards operational monitoring of a northern wetland using geomatics based techniques[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2005, 97(2): 174–191.
- [7] Brij G. Wetland types[A]. In: Shyamal K. Majumdar, E. Willard Miller, Fred J. Brenner. *Ecology of Wetlands and Associated Systems*[M]. Pennsylvania Academy of Science, 1998.
- [8] 唐小平, 黄桂林. 中国湿地分类系统的研究[J]. *林业科学研究*, 2003, 16(5): 531–539.
- [9] Jo Hyung Ryu, Joong-Sun Won, Kyung Duck Min. Waterline extraction from Landsat TM data in a tidal flat[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002(83): 442–456.
- [10] R. G. Bryant, M. P. Rainey. Investigation of flood inundation on playas within the zone of chotts, using a time series of AVHRR[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002(82): 360–375.
- [11] 邬建国. *景观生态学——格局、过程、尺度与等级*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.