

文章编号:1001-9014(2010)06-0440-06

悬浮泥沙浓度分布方差与尺度修正——八邻域算法

陈军^{1,2}, 王伟财³, 王保军^{1,2}, 温珍河^{1,2}

(1. 国土资源部海洋油气资源与环境地质重点实验室, 山东 青岛 266071;

2. 青岛海洋地质研究所, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院青藏高原研究所, 北京 100085)

摘要:在归纳总结悬浮泥沙反演模型尺度效应研究现状的基础上,提出了基于八邻域窗口估算像元泥沙浓度分布方差算法,并利用该算法的计算结果,推导与计算了线性模型、对数模型和指数模型的尺度修正方法.结合太湖 Landsat/TM 影像数据和同步实测泥沙浓度数据及光谱数据的分析表明:悬浮泥沙浓度定量模型的尺度效应误差与模型密切相关.对于像太湖这样的复杂 II 类水体,尺度效应可以导致反射率的相对误差达到 16%.

关键词:反演模型;尺度效应;八邻域算法;悬浮泥沙

中图分类号:P715.6 **文献标识码:**A

DISTRIBUTION VARIANCE OF SUSPENDED SEDIMENT CONCENTRATION AND SCALING EFFECT CORRECTION: EIGHT NEIGHBORHOOD ALGORITHM

CHEN Jun^{1,2}, WANG Wei-Cai³, WANG Bao-Jun^{1,2}, WEN Zhen-He^{1,2}

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

2. Qingdao Institute of Marine Geology, Qingdao 266071, China;

3. Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China)

Abstract: The eight neighborhood algorithm (ENA) was developed for estimating the variance of suspended sediment concentration (SSC) distribution in a pixel based on the current knowledge about the SSC retrieval models' scaling effect. Taking advantage of the results of ENA, further study developed the scaling correcting methods for linear quantitative models, exponential quantitative models and logarithmic quantitative models. Applied these methods to the results of the Landsat/TM imagery and the field spectral experiments in Tai Lake, it was found that the scale effect errors are strongly correlated with the SSC predicting models. The scale effect could result in 16% relative errors for reflectance measurement in complicated Case II water bodies such as Tai Lake.

Key words: retrieval model; scaling effect; eight neighborhood algorithm; suspended sediment

引言

随着沿湖与沿海社会的发展,水资源短缺与经济需求增长的矛盾日益激烈,进而加大了大面积水质监测与水环境保护的压力^[1]. 水色遥感作为大尺度监测水体泥沙分布状况的便捷手段,为缓解上述压力提供了新思路^[2]. 通常,悬浮泥沙浓度量化的基本工作路线为:从野外遥感参数和水体泥沙浓度测量入手,结合理论、经验或半经验分析方法,建立遥感参数与水体泥沙浓度之间的数学关系,最后将

这种数学关系应用于由特定卫星传感器获得的影像数据^[3,4].

尺度可以分为时间和空间尺度.在遥感领域,尺度问题可以理解为空间尺度^[5].众所周知,地面试验观测与卫星对地观测所对应的空间尺度存在很大的差异.地面试验观测尺度上建立的反演模型,在卫星对地观测尺度上应用将产生模型尺度不匹配问题,需要进行尺度修正.陈军等^[6]在总结了关于泥沙浓度与遥感参数之间关系的现有研究基础上,推导出了小尺度上观测模型与像元尺度上的反演模型

收稿日期:2009-10-14,修回日期:2010-05-28

Received date: 2009-10-14, revised date: 2010-05-28

基金项目:国家自然科学基金项目(40606013),国家自然科学基金资助项目(40901168);山东省自然科学基金项目(Y2006E04)与中国海陆地地质地球物理系列图项目(GZH200900504)联合资助

作者简介:陈军(1982-),男,浙江温州人,硕士,实习研究员,从事水环境遥感研究,chenjun820711@163.com.

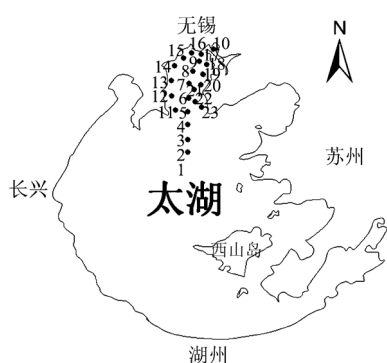


图1 太湖实验站点分布

Fig. 1 Distribution of in situ measurements in Taihu Lake

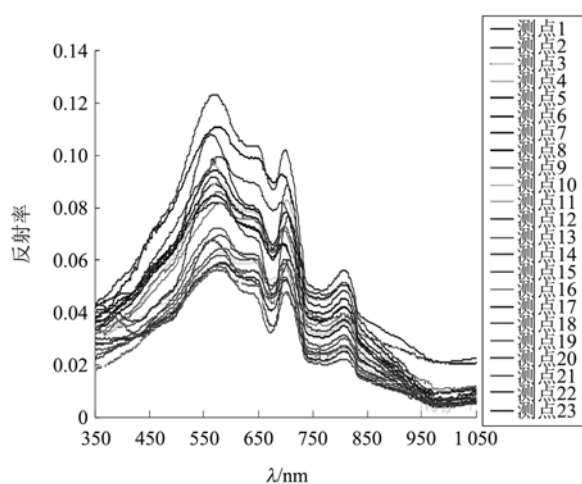


图2 实测光谱曲线

Fig. 2 In situ measurements of spectral curves

之间的理论转换关系. 由于泥沙浓度分布的动态变化性及像元所涉及区域过大, 导致常规实验手段难以获得测区像元内泥沙浓度分布方差, 而像元内泥沙浓度分布方差是定量模型进行尺度修正的关键参数, 这使得悬浮泥沙定量模型尺度效应的研究仅局限于理论探讨阶段. 针对这种研究现状, 提出了基于八邻域窗口估算像元泥沙浓度分布方差, 并在此基础上, 推导与计算了线性模型、对数模型和指数模型的尺度修正式, 旨在探索悬浮泥沙浓度定量模型尺度效应估算方法.

1 研究区域与数据

根据 NASA 水体光学测量规范^[7], 在 2003 年 10 月 27 日, 利用 ASD 手持地物光谱仪 FieldSpec Pro 对太湖水质样本进行光谱测量. 样本分布状况见图 1, 样本的光谱曲线见图 2. 在光谱测量的同时, 利用尼克森采水器取表层到水下 30cm 处的水体样

本, 当天带回实验室并提取悬浮泥沙浓度等水质组分浓度.

2 研究方法

2.1 不均匀像元定量模式尺度效应

有研究表明^[8]含沙水体的遥感反射率光谱有两个峰值, 一个位于黄光波段的主峰, 另一个位于近红外波段的次级峰. 许多学者实测了两个峰值所在波段遥感反射率 R 同泥沙浓度 S 的关系, 得出如下 3 点结论: ① R 随着 S 的增大而增大, 即 $\frac{dR}{dS} > 0$; ②

$\frac{dR}{dS} \neq \text{const}$ (const 为常数) 且随着 S 的增大而减小,

即 $\frac{d^2R}{dS^2} < 0$; ③ $S = 0$ 时, $R = \text{const}$, $\text{const} > 0$; $\lim_{S \rightarrow +\infty} R = 1$

$-\delta$, 其中 δ 为常数, 且 $0 < \sigma < 1$. 陈军等^[6]利用上述波段遥感反射率与悬浮泥沙浓度关系曲线的微分性质推导出了悬浮泥沙浓度定量模型的尺度修正模型

$$R_r = R_a + \frac{1}{2} R_a'' D(S) \quad (1)$$

式中, $D(S)$ 为不均匀像元悬浮泥沙浓度分布方差; R_r 为像元实际反射率; R_a 为当悬浮泥沙浓度等于像元平均浓度时, 由定量模型计算而得到的反射率; R'' 为 R_a 对应的定量模型的二阶导数; $R_a'' D(S)$ 即为由像元泥沙浓度分布的不均匀性和定量模型的非线性共同作用引起的定量模型尺度效应误差^[7]

悬浮泥沙浓度定量模型可分为分析模型、半分析模型和经验模型三类. 且每一类又可细分为许多小类^[8]. 在众多的反演模型中, 以线性模型、对数模型和指数模型为代表的经验模型应用最广. 鉴于研究应具备典型性与代表性的考虑, 主要围绕上述三种经验模型展开模型尺度效应的探索. 根据式(1)可得上述定量模型的尺度误差, 见表 1.

表 1 悬浮泥沙定量模型的尺度误差

Table 1 Scale effect error of retrieval models for suspended sediment concentration

模型名称	数学表达式	模型尺度误差	参数说明
线性模型	$R = a + bS$	0	a, b 为模型系数
指数模型	$R = a \text{Exp}(bS)$	$\frac{1}{2} ab^2 \text{Exp}(bS) \cdot D(S)$	a, b 为模型系数
对数模型	$R = a \ln(S) + b$	$-\frac{a}{2S^2} \cdot D(S)$	a, b 为模型系数

2.2 基于八邻域估算泥沙像元内分布方差

连续介质的运动必须维持质点的连续性, 即质点不能发生空隙. 因此, 根据质量守恒原理, 对于影

像中的一个像元,其净流入的流体质量必等于像元内因流体密度变化而增加的质量^[9].仅考虑二维情况,流体连续方程的差分近似表述如下

$$\frac{\rho_{x,y}^{t+\Delta t} - \rho_{x,y}^t}{\Delta t} + \frac{\rho_{x+\Delta x,y}^t u_{x+\Delta x,y}^t - \rho_{x-\Delta x,y}^t u_{x-\Delta x,y}^t}{2\Delta x} + \frac{\rho_{x,y+\Delta y}^t u_{x,y+\Delta y}^t - \rho_{x,y-\Delta y}^t u_{x,y-\Delta y}^t}{2\Delta y} = 0 \quad (2)$$

式中, ρ 表示 t 时刻的流体密度; u 表示 t 时刻的流体流速; $\Delta t, \Delta x, \Delta y$ 为差分方程的时间与空间步长.由式(2)可知,对于一个 3×3 的格网,格网中心点的流体流速完全由包围该点的8个相邻格网点流速决定.而水体中悬浮物浓度与流速密切相关^[10],因此,在某种意义上,格网中心点处的悬浮物浓度由与其相邻的8个格网点的浓度决定.另外,若用稍小的格网尺寸从原 3×3 的格网中提取一个 3×3 的子格网,式(2)对于该子格网仍然成立.这就是说,子格网中心点的流体流速和悬浮物浓度仍然可近似地由与其相邻的8个子格网点的流速和浓度决定.由此可知,流体中的悬浮物浓度空间分布具有一定的自相似特点,并且,像元内的泥沙浓度分布的异质状况与相邻的8个像元的泥沙浓度状况密切相关,这就是八邻域估算像元内泥沙浓度分布方差的理论依据.所涉及的八邻域算法的运算规则如下:

- ① 逐像元提取以某像元为中心的一个 3×3 窗口.
- ② 判断该像元是否为边界像元,若为边界像元则不足构成 3×3 窗口的边界用0加以扩展,以达到足以构成 3×3 窗口为止.
- ③ 判断 3×3 窗口的中心像元是否为背景像元,若是,则该像元的方差赋值为0;否则剔除 3×3 窗口中所有的像元浓度值为0的格网,计算剩余非0值格网点的方差,并以此方差作为格网中心像元悬浮物浓度分布的方差(假定悬浮泥沙浓度值为0的像元为非水体目标).

3 数据分析

3.1 太湖悬浮泥沙浓度分布方差

太湖是典型的II类水体.国内许多学者对太湖悬浮泥沙遥感定量模型开展了一系列的研究,并提出了许多经验算法^[10,11].通过对比分析这些研究成果发现,陈军等提出的基于分段映射悬浮物反演算法具有较好的反演效果(不仅模型计算值与实测值在整体变化趋势上相一致,而且每个节点处的实测值与计算值相一致,此外,模型还具有良好的可扩展性)^[10].另

外,影响模型尺度效应的一个重要参数为悬浮泥沙浓度分布方差,而由文中提出的基于八邻域估算像元泥沙浓度分布方差的基础数据为悬浮泥沙浓度的分布状况.综合考虑了上述的数据需求与研究现状,研究采用了陈军等提出的分段映射悬浮物反演算法(见图3),并结合2003年10月27日的Landsat影像数据与地面同步光谱数据及其对应的实测悬浮泥沙浓度数据,在IDL平台的支持下,通过八邻域方差估算算法计算得到Landsat卫星过境时的太湖悬浮泥沙浓度(见图4(a))及其分布方差状况(见图4(b)).

由图4可知,太湖泥沙浓度大约为 $0 \sim 118 \text{ mg/L}$,对应的方差范围为 $0 \sim 679$.其中,湖心泥沙浓度较高且均匀,对应的方差在16以下;湖体边缘区域,虽然泥沙浓度较湖心低,但分布的均匀性较差,从而导致浓度分布方差在该区域较大,尤其在湖西沿岸,存在很大的一块区域其方差在256以上.

3.2 几种常用经验模型的尺度误差

鉴于线性模型的尺度误差为0,这里重点讨论指数模型与对数模型的尺度修正模型见表1.对实测光谱反射率(TM2)与悬浮泥沙浓度之间的关系利用最小二乘法进行回归分析,可以获得悬浮泥沙定

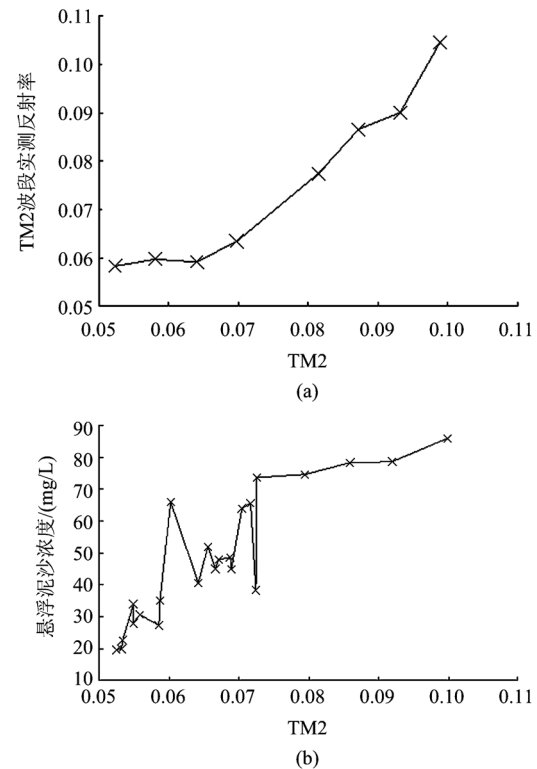


图3 基于分段映射模型 (a)TM2 气校正模型 (b)悬浮泥沙定量模型

Fig.3 Subsection mapping algorithms (a) TM2 atmospheric correction (b) suspended sediment concentration retrieving

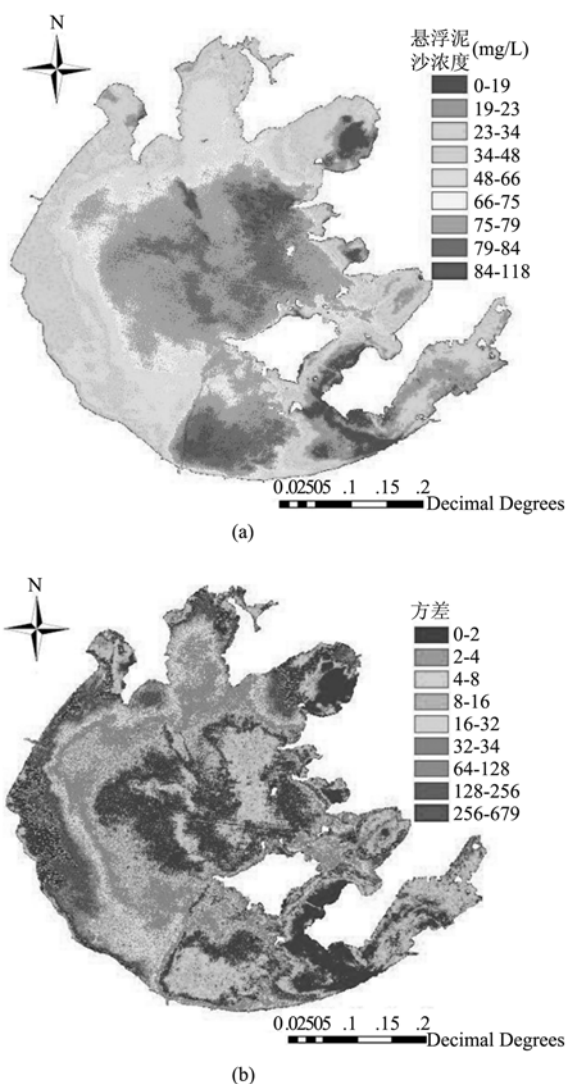


图4 太湖悬浮泥沙浓度及其分布方差 (a) 基于分段映射悬浮泥沙浓度分布状况 (b) 基于八邻域窗口算法估算的悬浮泥沙浓度分布方差

Fig. 4 Distribution of suspended sediment concentration and its variance in Taihu Lake (a) subsection algorithm retrieval results for suspended sediment concentration (b) variance of suspended sediment concentration distribution calculated by eight neighbouring pixels

量反演的指数模型与对数模型及其尺度误差,结果如图5和表2所示。

以图4所示的悬浮泥沙浓度及其方差数据为基础,利用表2所示的两种尺度误差修正模型,可分别计算的指数模型与对数模型尺度效应误差分布状况,用反射率的相对误差表示如图6所示。由图6可知:大部分区域由尺度效应引起的尺度误差较小(这里指反射率相对误差,以下同),在 $\pm 1.5\%$ 以内,主要分布在浓度分布方差较小的区域,如湖心;局部区域的尺度效应误差较大,达到 $\pm 5\%$ 以上,如

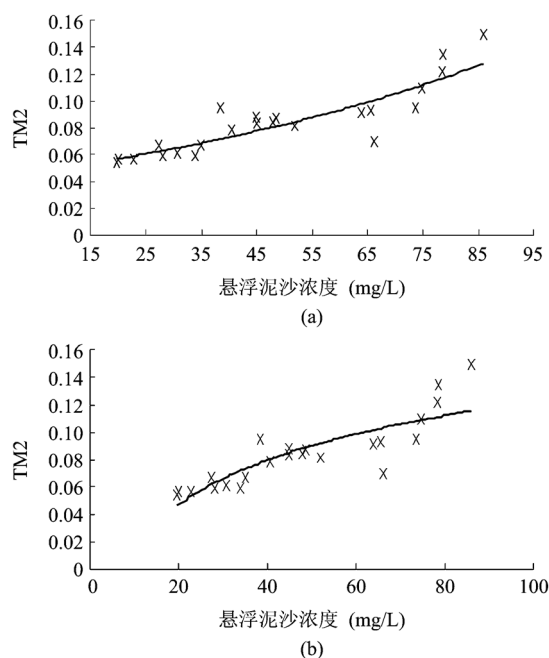


图5 悬浮泥沙浓度经验反演模型 (a) 指数反演模型 (b) 对数反演模型

Fig. 5 Experimental models for suspended sediment concentration retrieving (a) exponential retrieval model (b) logarithmic retrieval model

湖体边缘区域。比较图6(a)与图6(b)得出:对于研究中的数据,对数模型的尺度误差比指数模型的尺度误差整体上大;在局部区域对数模型的尺度效应误差达 $\pm 16\%$,比指数模型大3倍。这表明当泥沙分布方差一定时,模型的尺度效应误差的大小由模型自身特征决定,不同的模型其尺度效应现象存在很大的区别。这就要求定量模型不仅能较好地描述实测光学参数与悬浮泥沙浓度之间的关系,而且能有效地抑制尺度效应误差。尤其对于悬浮泥沙浓度空间分布复杂的II类水体,泥沙浓度及其分布方差都较大,进而引起反演模型较大的尺度效应误差。显然,这是不利于悬浮泥沙遥感定量精度的提高与改善。

4 结论

地表实验模型与遥感应应用模型尺度不匹配是引起悬浮泥沙浓度遥感定量模型尺度误差的根本原因。前者的观测尺度较小,属于亚米级别,在观测区域内悬浮泥沙浓度可以近似为均匀;而后者观测尺度较大,其尺度可为几米到几千米,在这种尺度范围内,像元内泥沙浓度分布均匀的假设将不再合理,需要对模型进行尺度修正。针对上述问题,初步尝试了利用八邻域估算浓度方差算法提取指数模型与对数模型的尺度误差,并得到如下结论:

表 2 对数模型与指数模型的尺度误差

Table 2 Scale effect errors for exponential model and logarithmic model

模型名称	数学表达式	模型尺度误差	
		绝对误差	相对误差%
指数模型	$R = 0.0449 \text{Exp}(0.0122S)$	$2.242 \cdot 10^{-6} e^{0.0122S} \cdot D(S)$	$0.0075D(S)$
对数模型	$R = 0.0466 \ln(S) - 0.0923$	$-\frac{0.0233}{S^2} \cdot D(S)$	$-\frac{50D(S)}{S^2 (\ln(S) - 1.981)}$

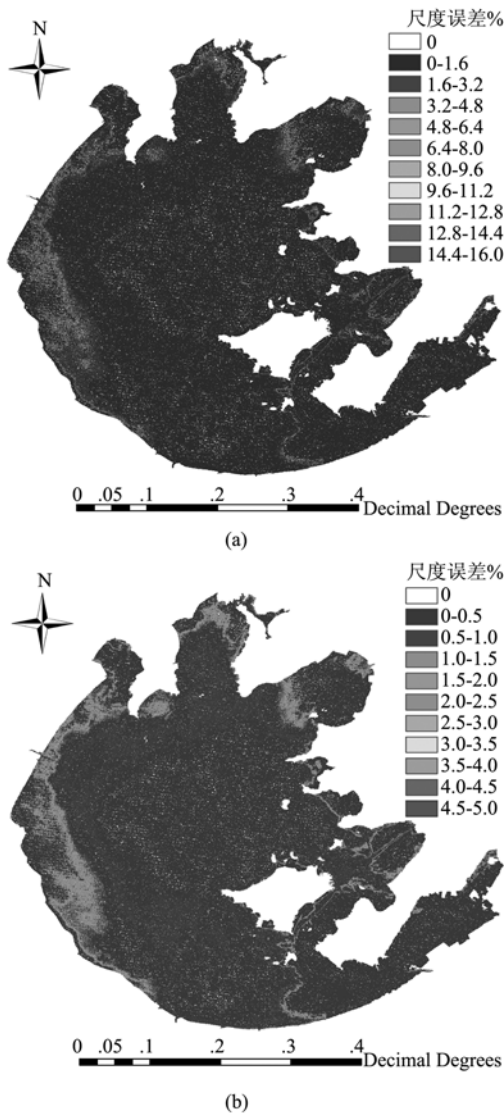


图 6 经验模型的尺度误差 (a) 对数反演模型的尺度误差 (b) 指数反演模型的尺度误差

Fig. 6 Scale effect errors of experimental models (a) for logarithmic Model and (b) for exponential mode

① 对于一个 3×3 的格网窗口, 流体的连续性决定了格网中心点的泥沙浓度分布状况与其相邻的 8 个格网点的浓度密切相关. 基于八邻域方差估算算法的计算结果可知: 太湖水体泥沙浓度的分布方差表现为湖心低, 沿湖区域高的分布格局, 最高可达 679.

② 悬浮泥沙浓度定量模型的尺度效应误差与模型密切相关. 利用研究的数据计算可知: 太湖空间位

置的不同对应泥沙浓度和方差不同, 进而导致尺度误差的大小不同; 由于线性模型的二阶导数为 0, 线性模型不存在尺度误差; 从整体上而言, 对数模型的尺度误差比指数模型的尺度误差大, 局部区域可达 3 倍.

③ 对于像太湖这样的复杂 II 类水体, 泥沙浓度空间分布差异较大, 尺度效应可以导致反射率的相对误差达到 $\pm 16\%$. 显然, 这是不利于悬浮泥沙浓度估算能力朝着更高精度水平的发展.

综上所述, 在定量模型选择的过程中, 不仅要考虑模型描述遥感参数与悬浮泥沙浓度之间的关系的能力, 而且还要兼顾模型尺度不适用所带来的尺度误差的影响, 力求保证反演模型的模型误差与尺度误差之和为所有模型中最小者.

REFERENCES

- [1] Gin KYH, Koh ST, Lin II. Spectral irradiance profiles of suspended marine clay for estimation of suspended sediment concentration in tropical waters[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, **24**(16): 3235—3245.
- [2] Deng M, Li Y. Use of SeaWiFS imagery to detect three-dimensional distribution of suspended sediment[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2003, **24**(3): 519—534.
- [3] Dekker AG., Vos RJ, Peters SWM. Analytical algorithms for lake water TSM estimation for retrospective analyses of TM and SPOT sensor data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2002, **23**(1): 15—35.
- [4] Doxaran D, Froidefond JM, Castaing P. Remote-sensing reflectance of turbid sediment-dominated waters: Reduction of sediment type variations and changing illumination conditions effects by use of reflectance ratios[J]. *Applied Optics*, 2003, **42**(15): 2623—2634.
- [5] LI Xiao-Wen, WANG Jin-Di, Strahler AH. The applied scale effecting of Plank's law on nonhomogeneity of blackbody[J]. *China Science E Series* (李小文, 王锦地, Strahler AH. 非同温黑体表面上普朗克定律的尺度效应, *中国科学(E 辑)*) 1999, **44**(15): 422—426.
- [6] CHEN Jun, FENGg Jia-Jia, WEN Zhen-He, et al. Nonhomogeneity: the scale error of Pixel in remote sensing assimilation of suspending sediment concentration[J]. *Remote Sensing Information* (陈军, 丰佳佳, 温珍河, 等. 悬浮泥沙浓度反演不均匀像元尺度误差. *遥感信息*), 2008, **5**: 93—96.
- [7] Mueller J L, Austin R W. *Ocean optics protocols for SeaWiFS validation; NASA technical memorandum 104566* [M]. Greenbelt, MD, NASA Goddard Space Flight Center. 1992, 5.

(下转 460 页)

钒薄膜的相变温度为 63.74℃,相变持续的温度宽度为 7.34℃,常规升温热处理的氧化钒薄膜的相变温度为 60.31℃,相变持续的温度宽度为 6.27℃.

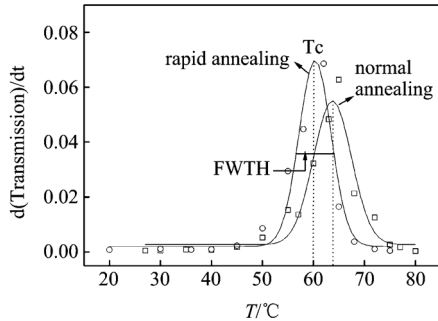


图6 二氧化钒薄膜的相变特性分析曲线 $d(\text{Transmission})/dt$
Fig.6 $d(\text{Transmission})/dt$ curves of VO₂ thin films

经快速升温热处理后得到的晶粒尺寸较小的 VO₂ 薄膜相变温度明显高于常规升温热处理后的晶粒尺寸较大的 VO₂ 薄膜的相变温度,这与 Lopez^[8] 发现的结果相一致.分析认为,VO₂ 薄膜的相变温度主要与薄膜内的应力有关,孤立 VO₂ 晶粒在相变过程中所受的应力较小,所以相变温度接近单晶 VO₂ 的相变温度.而快速升温热处理有助于降低薄膜内的应力,因此相变温度也相对较高.

3 结论

分别采用常规和快速两种升温方式对离子束溅射氧化钒薄膜进行了热处理,成功地获得了具有相变特性的 VO₂ 薄膜,快速升温热处理后得到的 VO₂ 薄膜晶粒尺寸较小,分布均匀;而常规升温热处理后

的 VO₂ 薄膜中晶粒尺寸相对较大,分布范围较宽;VO₂ 薄膜的透射率变化幅度均超过 60%;快速升温热处理获得 VO₂ 薄膜的光学相变持续的温度宽度增大,相变温度为 63.74℃,高于常规升温热处理的相变温度 60.31℃.

REFERENCES

- [1] Morin F J. Oxides which show a metal-to-insulator transition at the neel temperature[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1959, **3**(1): 34—36.
- [2] Lysenko S, Rua A J, Vikhnin V, et al. Light-induced ultrafast phase transitions in VO₂ thin film[J]. *Applied Surface Science*, 2006, **252**(15): 5512—5515.
- [3] LIANG Ji-Ran, HU Ming, WANG Xiao-Dong, et al. Fabrication and infrared optical properties of nano vanadium dioxide thin films[J]. *Acta Phys. Chin. Sin.* (梁继然,胡明,王晓东,等.纳米二氧化钒薄膜的制备及红外光学性能. *物理化学学报*), 2009, **25**(8): 1523—1529.
- [4] Qazilbash M M, Brehm M, Chae B G, et al. Mott transition in VO₂ revealed by infrared spectroscopy and nano-imaging[J]. *Science*, 2007, **318**(5857): 1750—1753.
- [5] HE Chen-Juan, LI De-Hua, LU Zhen-Zhong, et al. Research on optical properties of phase transition VO₂ films[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis* (何琛娟,李德华,卢振中,等.相变前后 VO₂ 薄膜光学性质的研究. *光谱学与光谱分析*), 2003, **23**(3): 417—420.
- [6] Wang H C, Yi X J, Li Y. Fabrication of VO₂ films with low transition temperature for optical switching applications[J]. *Optics Communications*, 2005, **256**(4-6): 305—309.
- [7] Brassard D, Fourmaux S, Jean-Jacques M, et al. Grain size effect on the semiconductor-metal phase transition characteristics of magnetron-sputtered VO₂ thin films[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, **87**(5): 051910.
- [8] Lopez R, Haynes T E, Boatner L A, et al. Size effects in the structural phase transition of VO₂ nanoparticles[J]. *Physical Review B*, 2002, **65**(22): 224113.

(上接 444 页)

- [1][8] ZHAO Ying-Shi. *Analysis and its method of applied remote sensing* [M]. Beijing: Science Press (赵英时. *遥感应用分析原理与方法*. 北京:科学出版社) 2006.
- [9] LI Yu-Zhu, HE Wu-Zhou. *Engineering Fluid Mechanics* [M]. Beijing: Springer (李玉柱,贺五洲. *工程流体力学*. 北京:清华大学出版社) 2006.
- [10] CHEN Jun, ZHOU Guan-Hua, FU Jun, et al. The application of the subsection mapping retrieval model on water qualities quantitative analysis[J]. *Spectroscopy and Spec-*

tral Analysis (陈军,周冠华,付军,等.基于分段映射模型的水质参数遥感反演研究. *光谱学与光谱分析*), 2010, 待刊.

- [11] MA Rong-Hua, DAI Jin-Fang. Quantitative estimation of chlorophyll-a and total suspended matter concentration with Landsat ETM based on field spectral features of lake Taihu [J]. *Journal of Lake Sciences* (马荣华,戴锦芳.结合 Landsat ETM 与实测光谱估测太湖叶绿素及悬浮物含量. *湖泊科学*), 2005, **17**(2): 97—103.