

科学出版社
出版
中国地理学会环境遥感分会
中国科学院遥感与数字地球研究所
主办

JOURNAL OF REMOTE SENSING

遥感学报

2015年

Vol.19

第19卷

No.1

第1期

ISSN 1007-4619 CN11-3841 / TP CODEN YXAUAB



百种中国杰出学术期刊

遥感学报

Yaogan Xuebao

第 19 卷 第 1 期 2015 年 1 月

目 次

大气遥感专栏

- 大气 CO₂ 浓度卫星遥感进展 陈良富, 张莹, 邹铭敏, 徐谦, 李令军, 李小英, 陶金花 (1)
- 北京地区颗粒物质量消光吸湿增长模型研究
..... 陶金花, 王子峰, 徐谦, 李令军, 范萌, 陶明辉, 苏林, 陈良富 (12)
- 动态气溶胶模型的 PARASOL 多角度偏振卫星气溶胶光学厚度反演算法
..... 陈澄, 李正强, 侯伟真, 李东辉, 张玉环 (25)
- 大气 CO₂ 浓度时空变化卫星遥感监测的应用潜力分析 布然, 雷莉萍, 郭丽洁, 刘达, 曾招城 (34)
- 短波红外 CO₂ 反演过程约束研究及初步反演结果
..... 邹铭敏, 陈良富, 陶金花, 张莹, 范萌, 苏林 (46)
- 高空飞行器尾焰亚毫米波临边探测模拟与分析
..... 李小英, 陈良富, 国爱燕, 苏林, 贾松林, 陶金花, 张莹 (54)

综述

- 森林地上生物量遥感反演方法综述 刘茜, 杨乐, 柳钦火, 李静 (62)
- 关键陆表参数遥感产品真实性检验方法研究进展
..... 吴小丹, 闻建光, 肖青, 李新, 刘强, 唐勇, 窦宝成, 彭菁菁, 游冬琴, 李小文 (75)

技术方法

- 临边遥感大气辐射传输的宽光谱快速计算模型 郭晶, 杨春平, 曾丹丹, 叶玉堂, 饶长辉 (100)
- 元胞自动机最短路径算法优化 任志国, 郭健, 李爱光, 王卉, 阚映红 (108)
- 根据分形理论与五指标评价体系构建 NDVI 连续空间尺度转换模型
..... 栾海军, 田庆久, 余涛, 顾行发, 黄彦, 胡新礼, 杨闫君 (116)
- 结合多尺度几何分析和 KICA 的遥感图像变化检测 吴一全, 曹照清, 陶飞翔 (126)
- 尺度效应的叶面积指数产品真实性检验方法
..... 廖嫣然, 盖颖颖, 姚延娟, 范闻捷, 徐希孺, 闫彬彦 (143)

遥感应用

- 利用 AMSR-E 数据反演华北平原冬小麦单散射反照率 柴琳娜, 吴凤敏, 张立新, 施建成 (162)
- 基于亮温和 SVM 模型的干球温度推算方法 林奕桐, 叶骏菲, 汪嘉杨, 王永前 (172)

JOURNAL OF REMOTE SENSING

(Vol. 19 No. 1 January, 2015)

CONTENTS

Atmospheric Remote Sensing

- Overview of atmospheric CO₂ remote sensing from space
..... CHEN Liangfu, ZHANG Ying, ZOU Mingmin, XU Qian, LI Lingjun, LI Xiaoying, TAO Jinhua (11)
- Particulate matter mass extinction hygroscopic growth model in Beijing
TAO Jinhua, WANG Zifeng, XU Qian, LI Lingjun, FAN Meng, TAO Minghui, SU Lin, CHEN Liangfu (24)
- Dynamic model in retrieving aerosol optical depth from polarimetric measurements of PARASOL
..... CHEN Cheng, LI Zhengqiang, HOU Weizhen, LI Donghui, ZHANG Yuhuan (32)
- Temporal and spatial potential applications of satellite remote sensing of atmospheric CO₂ concentration
monitoring BU Ran, LEI Liping, GUO Lijie, LIU Da, ZENG Zhaocheng (45)
- CO₂ retrieval and preliminary retrieval results from space-based observations in shortwave infrared band
..... ZOU Mingmin, CHEN Liangfu, TAO Jinhua, ZHANG Ying, FAN Meng, SU Lin (53)
- Sub-millimeter wave limb sounding simulation of the plume flow of a high-flying vehicle
..... LI Xiaoying, CHEN Liangfu, GUO Aiyun, SU Lin, JIA Songlin, TAO Jinhua, ZHANG Ying (61)

Review

- Review of forest above ground biomass inversion methods based on remote sensing technology
..... LIU Qian, YANG Le, LIU Qinhua, LI Jing (74)
- Advances in validation methods for remote sensing products of land surface parameters
..... WU Xiaodan, WEN Jianguang, XIAO Qing, LI Xin, LIU Qiang,
..... TANG Yong, DOU Baocheng, PENG Jingjing, YOU Dongqin, LI Xiaowen (92)

Technology and Methodology

- Wide spectrum and rapid calculation model for atmospheric radiative transfer in limb remote sensing
..... GUO Jing, YANG Chunping, ZENG Dandan, YE Yutang, RAO Changhui (93)
- Optimal path algorithm enhancement based on cellular automaton
..... REN Zhiguo, GUO Jian, LI Aiguang, WANG Hui, KAN Yinghong (115)
- Establishing continuous spatial scaling model of NDVI on fractal theory and five-index estimation system
..... LUAN Haijun, TIAN Qingjiu, YU Tao, GU Xingfa, HUANG Yan, HU Xinli, YANG Yanjun (125)
- Change detection of remote sensing images by multi-scale geometric analysis and KICA
..... WU Yiquan, CAO Zhaoqing, TAO Feixiang (132)
- Validation methods of LAI products on the basis of scaling effect
..... LIAO Yanran, GAI Yingying, YAO Yanjuan, FAN Wenjie, XU Xiru, YAN Binyan (134)

Remote Sensing Applications

- Estimating single scattering albedo of winter wheat over the North China Plain using AMSR-E data
..... CHAI Linna, WU Fengmin, ZHANG Lixin, SHI Jiancheng (153)
- Calculation method for dry-bulb temperature on the basis of brightness temperature and SVM model
..... LIN Yitong, YE Junfei, WANG Jiayang, WANG Yongqian (177)

短波红外 CO₂ 反演过程约束研究及初步反演结果

邹铭敏¹, 陈良富¹, 陶金花¹, 张莹¹, 范萌^{1,2}, 苏林¹

1. 中国科学院遥感与数字地球研究所 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要:短波红外通道卫星 CO₂ 遥感是近年国际研究热点。首先,开展了卫星观测对气溶胶及大气温度的敏感性研究;其次,针对基于最优化理论的非线性迭代反演方法反演过程中的不收敛问题,提出了修正的阻尼牛顿方法(MDNM),并利用模拟数据评估了MDNM方法的有效性;最后,利用GOSAT卫星数据反演CO₂的垂直混合比浓度,并与地基TCCON站点数进行比对。研究表明:短波近红外CO₂卫星遥感受气溶胶散射及温度影响明显;通过地基比对初步验证了MDNM具有良好的精度,两者的相关性 R^2 达到了0.729。

关键词:CO₂, 修正的阻尼牛顿方法(MDNM), 反演, GOSAT

中图分类号:X87

文献标志码:A

引用格式:邹铭敏,陈良富,陶金花,张莹,范萌,苏林. 2015. 短波红外 CO₂ 反演过程约束研究及初步反演结果. 遥感学报, 19(1): 46–53

Zou M M, Chen L F, Tao J H, Zhang Y, Fan M and Su L. 2015. CO₂ retrieval and preliminary retrieval results from space-based observations in shortwave infrared band. *Journal of Remote Sensing*, 19(1): 46–53 [DOI: 10.11834/jrs.20153319]

1 引言

2007年,IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)发布的第四次评估报告指出(IPCC, 2007),自20世纪中期以来观测到全球平均温度的上升,很可能是由于人类活动导致温室气体过量排放而引起的。二氧化碳(CO₂)是一种非常重要的温室气体,在过去的几十年内大气CO₂浓度持续增长。研究表明大气中CO₂浓度及其空间分布监测是全球气候变化评估中的主要不确定性因素之一。由于CO₂主要的源和汇分布于近地面大气,所以大气低层CO₂浓度及其分布成为全球变化关注的热点。

传统的CO₂浓度地基观测网(Washenfelter等, 2006; Tans, 2009; NACP, 2002; CARBOEUROPE-IP, 2004),如NOAA ESRL(Earth Systems Research Laboratory)的Cooperative Air Sampling Network,全球

碳柱总量观测网络TCCON等,其观测数据精确度高,但由于各监测网络站点分布稀疏以及观测数据量少,不能满足区域尺度应用研究需求。基于卫星平台的观测方式可以提供区域尺度的连续观测数据,早期的卫星探测主要包括搭载于NASA Aqua卫星和ESA METOP卫星上的AIRS、IASI传感器,此类传感器通过接收大气CO₂的热辐射信号来反演CO₂浓度信息(Engelen等, 2004; Engelen和McNally, 2005; Aumann等, 2005; Strow等, 2006; Maddy等, 2008; Crevoisier等, 2009)。然而热红外遥感对近地面CO₂浓度变化不敏感,有用观测信号主要源自大气中高层CO₂的热辐射。相比之下,利用短波近红外通道探测CO₂,卫星接收经地表反射的太阳辐射中包含了整层大气CO₂的吸收信号,其对近地层CO₂浓度变化敏感,因此发展短波近红外CO₂卫星遥感技术成为当前研究热点(Bovensmann等, 1999; Crisp等, 2004; Yokota和Aoki, 2004)。然而,短波近

收稿日期:2013-11-26;修订日期:2014-03-27;优先数字出版日期:2014-04-04

基金项目:国家自然科学基金重点项目(编号:41130528)

第一作者简介:邹铭敏(1986—),男,助理研究员,从事痕量气体卫星遥感反演研究, E-mail: zoum@irsa.ac.cn

通信作者简介:陈良富(1965—),男,研究员,主要从事全球变化的大气遥感辐射传输与大气成分定量遥感等研究, E-mail: lfchen@irsa.ac.cn

红外通道卫星遥感 CO₂, 受大气相关状态参数影响较多, 特别是大气气溶胶的散射效应, 对卫星观测及反演精度影响巨大 (Houweling 等, 2005); 大气温度会影响气体吸收线的强度, 因此 CO₂ 反演中所用温度产品误差也会对 CO₂ 浓度的反演精度带来影响。

2 CO₂ 物理反演方法

大气辐射传输模型属于第一类非线性 Fredholm 方程, 基于辐射传输模型的物理反演问题是不适定的, 这使得通常的数值求解方法失效。大气廓线的物理反演方法, 理论上可以统一到最优化理论的框架之下, 通过构建目标函数和选择寻优策略的思路, 以迭代的形式逐步逼近真解 (蒋德明和董超华, 2010)。Rodgers (2000) 提出基于前向模型计算辐射值和卫星实测值的差值, 及先验廓线值和反演廓线值之间的差值来定义代价函数, 利用先验条件和牛顿迭代方式逐步逼近真解的最大似然估计。

近红外卫星高光谱 CO₂ 反演方法采用最优化估计方法 (Rodgers, 2000)。反演中, 卫星观测值可表示为:

$$Y = F(x, b) + \varepsilon \quad (1)$$

式中, F 表示前向模型; Y 表示卫星观测值; X 表示待反演大气状态参数, b 表示反演中固定不变的前向模型输入参数; ε 包含了仪器噪声及前向模型误差。

定义代价函数 $J(X)$ 如式 (2)。采用牛顿迭代方法, 可以得到式 (3) 所示迭代模型:

$$J(X) = (Y - F(X))^T \cdot S_e^{-1} \cdot (Y - F(X)) + (X_a - X)^T \cdot S_a^{-1} \cdot (X_a - X) \quad (2)$$

$$X_{i+1} = X_i + [S_a^{-1} + K_i^T \cdot S_e^{-1} \cdot K_i]^{-1} \cdot \{K_i^T \cdot S_e^{-1} [Y - F(X)] - S_a^{-1} [X_i - X_a]\} \quad (3)$$

令

$$H_e = S_a^{-1} + K_i^T \cdot S_e^{-1} \cdot K_i \quad (4)$$

式中, S_a 表示先验协方差矩阵, S_e 观测误差协方差矩阵, X_a 表示初始猜值, i 表示第 i 次迭代, K_i 是权重函数, 表示为式 (5); H_e 为一 Hessian 矩阵。

$$K_i = \frac{\partial Y}{\partial X_i} \quad (5)$$

2.1 改进的阻尼牛顿方法 MDNM

式 (3) 是一般的物理反演迭代形式。该迭代方

式在实际计算中, 往往会出现由于 Hessian 矩阵 H_e 奇异性而无法确定后续的迭代点, 导致反演无法收敛; 此外, 迭代的步长有时很小, 而当迭代点远离真实值时, 同样会影响反演迭代的收敛。针对第一种问题, 借用 LM 方法思想 (Marquardt, 1963), 在迭代公式中增加一个约束因子 γ 来修正 Hessian 矩阵; 对于第二种问题, 通过在迭代公式中增加步长因子 α 来解决。这样, 得到新的反演迭代形式, 本文称之为改进的阻尼牛顿方法 MDNM, 如式 (6) 所示。

$$X_{i+1} = X_i + \alpha [K_i^T \cdot S_e^{-1} \cdot K_i + S_a^{-1} + \gamma \cdot I]^{-1} \cdot \{K_i^T \cdot S_e^{-1} [Y - F(X)] - S_a^{-1} [X_i - X_a]\} \quad (6)$$

2.2 MDNM 反演方法评估

本节利用逐线积分辐射传输模型 LBLRTM (Clough 等, 1992) 模拟卫星观测的表现反射率, 针对 3.1 节中提出的 MDNM 反演方法进行评估分析。模拟中, 整层大气从地表到大气顶划分 24 层; CO₂ 的廓线形状如图 1 所示; 其他痕量气体及温度压力廓线均设定为美国标准大气 US1976 模式中的标准值, 利用 LBLRTM 模拟得到一条卫星观测数据。反演中先验协方差矩阵 S_a 选定为对角矩阵, 且对角线元素值设定较大, 以保证反演结果来自观测数据; 观测误差协方差矩阵 S_e 给定一个固定值; 约束因子 γ 依据 Hessian 矩阵 G 的特征值来取定; 步长因子 α 通过一维搜索方法得到, 迭代中根据代价函数的变化更新 α 值。

反演结果如图 1 所示。由于近红外 1.6 μm 通道卫星观测值对近地层 CO₂ 吸收敏感, 观测值的权重函数峰值位于大起底层, 因此前十层 (从地表到海拔 12 km 高度处) 大气 CO₂ 反演结果与真实值符合很好, 最大误差不超过 0.7 ppmv (<0.2%); 而从 15 层 (海拔 30 km) 往上, 反演结果完全来自先验知识, 初始猜值的准确度决定了后 10 层大气 CO₂ 反演浓度的精度水平。

为了检验 MDNM 反演算法的稳定性, 按 100 信噪比水平向模拟观测数据中加入随机噪声, 产生 100 个含有随机噪声的观测样本, 再利用上述方法进行反演, 结果如图 2 所示。从多样本的反演结果可以看到, 反演迭代过程能很好收敛, 在受噪声影响的条件下, 近地表各层反演误差的标准差不超过 4 ppm 以内, 这表明本文提出的有约 MDNM 反演方法具有较好反演精度及稳定性。

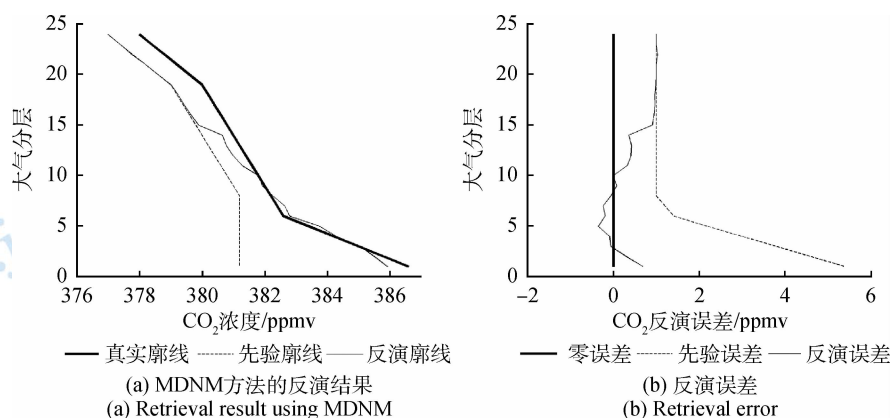
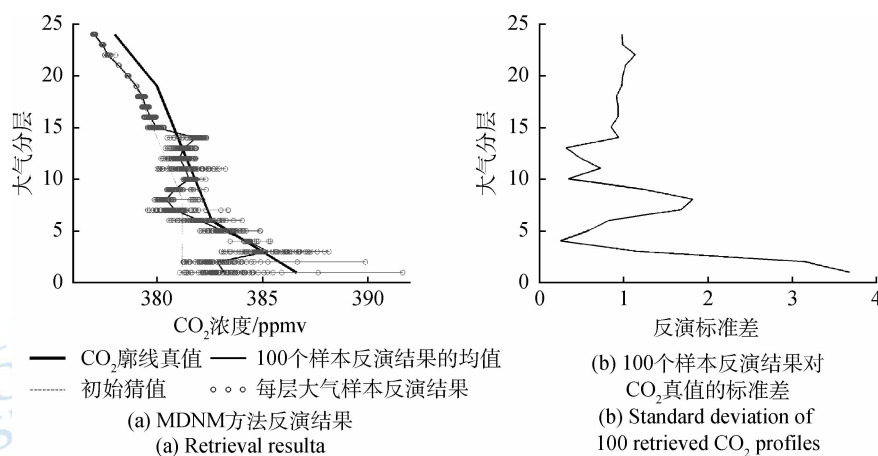
图1 CO₂ 廓线反演结果Fig. 1 Retrieved CO₂ profile图2 100个样本的CO₂反演结果

Fig. 2 Retrieved results from 100 samples

3 CO₂ 卫星观测敏感性分析

3.1 气溶胶散射对CO₂遥感的影响

短波近红外痕量气体浓度遥感受气溶胶散射影响严重,散射往往会导致目标气体浓度的错误估计。Houweling 等人(2005)指出,SCIAMACHY 传感器的 CO₂ 浓度产品在撒哈拉沙漠地区高达 10% (约 37 ppm) 的非正常变化幅度,主要是观测受到沙尘型气溶胶的影响。本节将从正演模拟不同类型气溶胶对 CO₂ 遥感的影响。

3.1.1 气溶胶对观测的影响

选择包含有多次散射处理模块的正向模型 SCIATRAN (Rozanov 等, 2005), 分别模拟秋季/冬季、春季/夏季两种模式下,不同类型气溶胶模式、能见度、空气湿度时,气溶胶多次散射对大气垂直透过率的影响。每种气溶胶类型具体如下:秋季/冬季,乡村型气溶胶,边界层/对流层能见度 23 km,

相对湿度 70%;秋季/冬季,城市型气溶胶,边界层/对流层能见度 23 km,相对湿度 70%;春季/夏季,乡村型气溶胶,边界层/对流层能见度 23 km,相对湿度 70%;春季/夏季,城市型气溶胶,边界层/对流层能见度 23 km,相对湿度 70%。不同气溶胶类型对整层大气透过率的影响类似,图 3 给出了秋季/冬季模式下城市型气溶胶的模拟结果。模拟中,大气 CO₂ 浓度设定为 385 ppm,其他大气状态参数则参照美国标准大气 1976。由图 3 可看出,气溶胶散射效应对短波红外辐射大气透过率的影响非常大,模拟的 4 种气溶胶散射,对透过率的影响达到 5%—6%。

3.1.2 气溶胶对反演精度的影响

由 3.1.1 节的模拟结果可以看到,气溶胶散射导致了模拟观测谱段内 CO₂ 吸收特征明显变化,此时在反演过程中,如果不能有效地估算并去除,散射导致 CO₂ 吸收峰的变化将被误认为是由 CO₂ 浓度变化引起,从而将严重影响 CO₂ 反演精度。接下

来,以模拟的秋冬季节乡村型气溶胶模拟数据为例,分别选择添加气溶胶散射效应前后的模拟观测值,利用非线性最优估计方法(Rodgers,2000),进行反演实验。反演结果图4、图5所示。

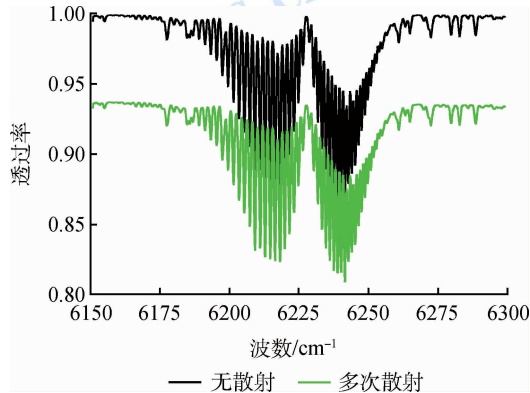


图3 秋季/冬季气溶胶模式下大气透过率(绿线是气溶胶影响时的透过率,黑线是无气溶胶时透过率)

Fig.3 Transmittance under Fall/winter season aerosol model
(Green and black lines represent transmittances with and without aerosol scattering)

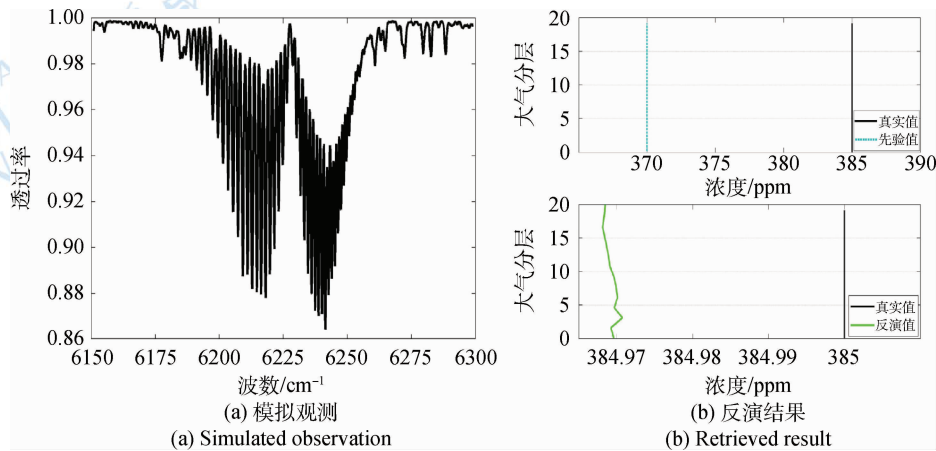


图4 无散射影响反演结果

Fig.4 Retrieval without aerosol scattering

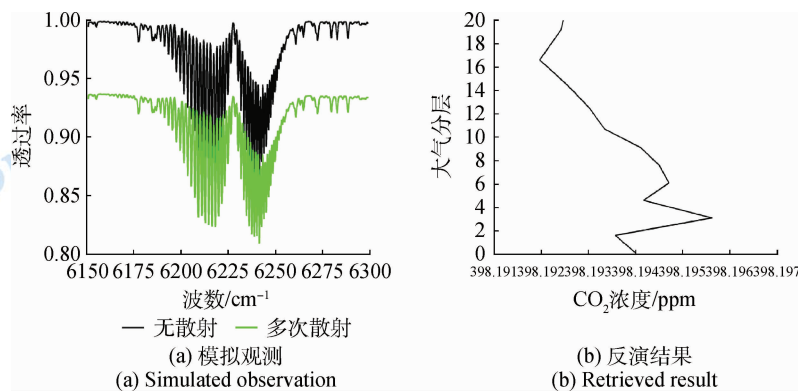


图5 气溶胶散射影响下反演结果

Fig.5 Retrieval using observation with aerosol scattering

对于增加了散射的模拟数据,首先利用多项式拟合的方式进行处理,去除模拟数据中的慢变信号,然后再进行迭代反演。从图4可以看到,没有散射影响时,反演的精度非常高,误差小于0.05 ppm;而对于有散射效应存在时(图5),在经过多项式拟合后反演误差依然高达约13.2 ppm(3.4%),此精度水平远远达不到应用需求。所以简单的多项式拟合方法不能完全有效地去除气溶胶散射效应对CO₂反演的影响。

3.2 温度对CO₂遥感的影响

短波红外传感器接收的地面反射太阳辐射,观测辐射亮度中包含了CO₂的吸收信号。温度、压力是影响分子吸收强度的重要因素,尤其是温度因子。温度对CO₂吸收的影响,主要体现在以下几个方面。首先是对CO₂吸收谱线强度的影响,这主要体现在分子光谱的振动和转动配分函数对温度的依赖,在一定的温度范围内,CO₂的振动及转动配分函数随温度的升高而单调增强。其次是谱线的增

宽效应也受到温度的影响,谱线增宽的半宽度是温度的函数。最后是描述谱线增宽的线型函数,根据导致谱线增宽原因的不同,谱线线型包括 Lorentz、Doppler 及 Voigt 3 种线型函数。3 种线型的峰值随温度变化略有不同,Lorentz、Voigt 线型的峰值随温度的升高而相应增大,Doppler 线型峰值则随温度升高而减小(邹铭敏等,2012),如图 6 所示。

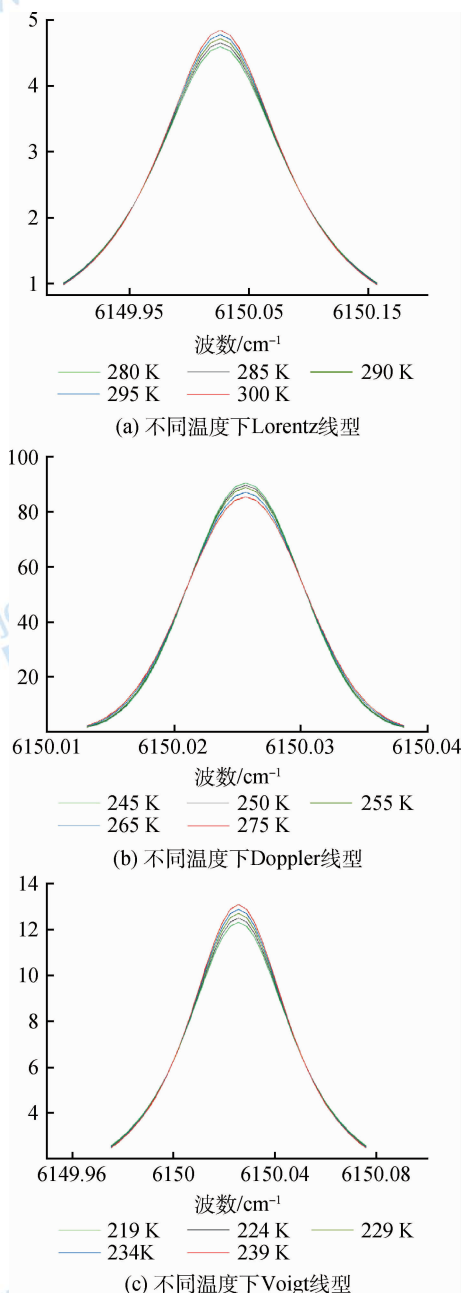


图 6 3 种线型函数

Fig. 6 Three functions of line shape

邹铭敏等人(2012)利用模拟数据,分析讨论了温度对水平均匀大气和垂直整层大气观测的影响,结果表明:在水平均匀大气中,气温 1 K 误差造成的

CO_2 吸收差异与 1 ppm CO_2 浓度变化引起的差异相当;将温度廓线产品 1 K 的不确定性代入反演当中,有时能导致近 1.5 ppm 的反演误差。从研究结果来看,温度是影响 CO_2 观测反演精度能否达到 1 ppm 的一个重要因素。因此,在 390 ppm 的大气 CO_2 含量背景下, CO_2 的观测精度要达到 0.3%—0.5% (1—2 ppm),是一个巨大的挑战。

4 卫星初步反演结果及验证

4.1 GOSAT 简介

日本的 GOSAT 卫星是目前唯一在轨运行观测的短波近红外高光谱 CO_2 遥感卫星,GOSAT 上进行温室气体遥感探测载荷 TANSO (Thermal and Near-infrared Sensor for Carbon Observation) 主要包含两部分:一是具有高光谱分辨率、光谱范围的傅里叶变换光谱仪 (TANSO-FTS);另一个是云/气溶胶成像仪 TANSO-CAI (Cloud and Aerosol Imager)。TANSO-FTS 采用傅里叶变换干涉仪对大气吸收进行光谱测量。TANSO-FTS 的光谱范围包括了 0.76 μm 的可见光波段 (band 1), 1.6 μm (band 2) 和 2.0 μm (band 3) 的短波红外波段和 15 μm (band 4) 的热红外波段。氧 A 波段用来提供大气压力信息,近红外的两个波段被用来估计 CO_2 的柱浓度,而热红外的 15 μm 波段用来获取 700 hPa 压力层以上的 CO_2 浓度廓线。

4.2 反演结果及验证

本节利用 GOSAT TANSO-FTS L1B 数据进行反演测试,选择晴空卫星条件下,无气溶胶散射影响的观测像元数据,取得了初步反演结果。用于验证的地基观测数据来自于全球碳柱总量观测网 TCCON (Total Carbon Column Observing Network) (Wunch 等,2011)。TCCON 是利用高光谱分辨率傅里叶变换光谱仪地基观测大气 CO_2 等痕量气体的一个全球观测站网,当前 TCCON 观测网在亚洲只有日本茨城县筑波市 Tsukuba 站和九州岛佐贺县佐贺市 Saga 站两个点正常进行观测,而中国没有 TCCON 网络的观测站点。由于 GOSAT 卫星交轨方向上相邻扫描点的点距较大(5 点扫描模式,点距大约为 150 km),在 Tsukuba 站附近的有效观测数据相对较少;另外 Saga 站点的观测数据目前从 TCCON 数据网站上还不提供下载。因此本文在反演过程中,选择 TCCON 位于北亚美利加洲的 Park

Falls 站点周围区域的卫星观测数据用于反演,并将卫星反演结果与 Park Falls 站点观测数据进行比对。

星地观测结果比对的时间选择为 2010-01—2010-03 的有效观测天;比对过程中,地基数据的挑选主要依据 GOSAT 卫星过境时间,取过境时间点前后 1 个小时内的 FTS 观测结果,并计算时间段内的平均值;对于卫星的反演数据,选择以 Park Falls 观测点的位置为中心、半径为 2.5° 的区域内的反演结果,并计算对应的均值。同时本文也将 GOSAT Level2 级 CO₂ 产品数据(Yoshida 等,2011)与 FTS 观测数据进行了比对。

图 7、图 8 给出了 Park Falls 站点观测 XCO₂ 与卫星反演结果的比对散点图,可以看到:相比 GOSAT L2 级产品数据,MDNM 方法反演的 XCO₂ 反演结果与 Park Falls 站点的观测值相关性更好, R^2 达

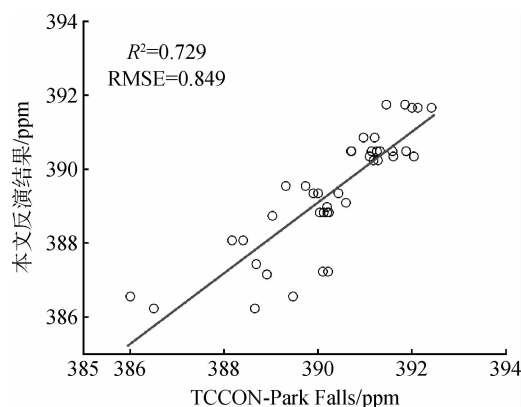


图 7 2010-01—2010-03 MDNM 反演的 XCO₂ 与 Park Falls 站点观测结果比对散点图

Fig. 7 Comparison between the retrieved XCO₂ using MDNM and Park Falls measurements from TCCON during 2010-01 to 2010-03

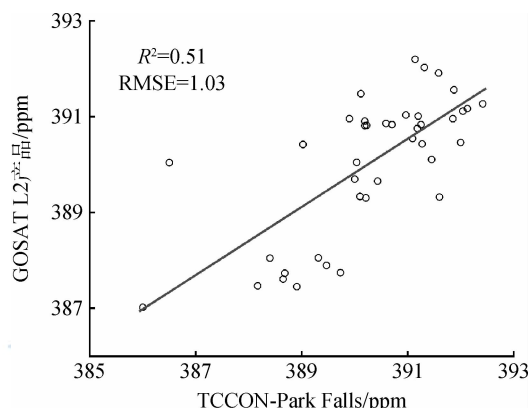


图 8 2010-01—2010-03 GOSAT L2 级 XCO₂ 产品与 Park Falls 站点观测结果比对散点图

Fig. 8 Comparison between GOSAT Level2 CO₂ product and Park Falls measurements from TCCON during 2010-01 to 2010-03

到了 0.729。图 9 给出了 2010-01—2010-03 有效观测天内,XCO₂ 的 Park Falls 站点观测值、本文反演结果以及 GOSAT L2 产品的变化趋势;图 10 分别给出了本文反演的 XCO₂ 以及 GOSAT 发布的 L2 级产品数据相对于 Park Falls 站点观测数据的误差分布,可以看到两者的标准偏差均在 1.3 ppm 以内;MDNM 方法反演结果的标准偏差为 1.23 ppm,GOSAT L2 产品的相对较好,标准偏差为 1.12 ppm。

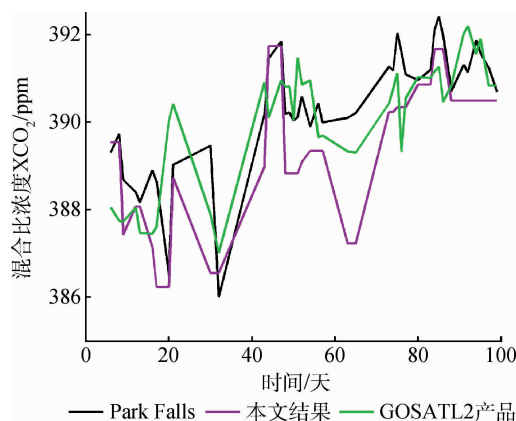


图 9 2010-01—2010-03 Park Falls 站点区域 3 种 XCO₂ 浓度数据变化情况

Fig. 9 Daily trend of XCO₂ from three data source around Park Falls region from 2010-02 to 2010-03

5 结 论

本文研究了 CO₂ 的物理反演方法,针对 CO₂ 迭代反演过程不稳定而导致的无法收敛问题,提出了改进的反演算法 MDNM;开展了短波近红外卫星 CO₂ 遥感的敏感性分析;利用 GOSAT 卫星观测数据进行了反演实验,并将反演结果与 TCCON 地基站点数据进行了比对。

论文首先阐述分析了基于最优化理论的 CO₂ 物理反演方法,提出了一种新的改进的阻尼牛顿方法(MDNM)。文中利用模拟数据反演结果,验证了 MDNM 方法具有良好的收敛性,且在噪声干扰情况下的反演误差均值不超过 4 ppm,表明该方法具有良好的反演精度。

其次,本文模拟了多种气溶胶类型对卫星观测值的影响,并定量分析了无法有效地去除散射效应时,CO₂ 的反演误差高达约 13.2 ppm(约 3.4%)。此外开展了反演的温度敏感性研究,结果表明:在水平均匀大气中,气温 1 K 误差造成的 CO₂ 吸收差异与 1 ppm CO₂ 浓度变化引起的差异相当;将温度

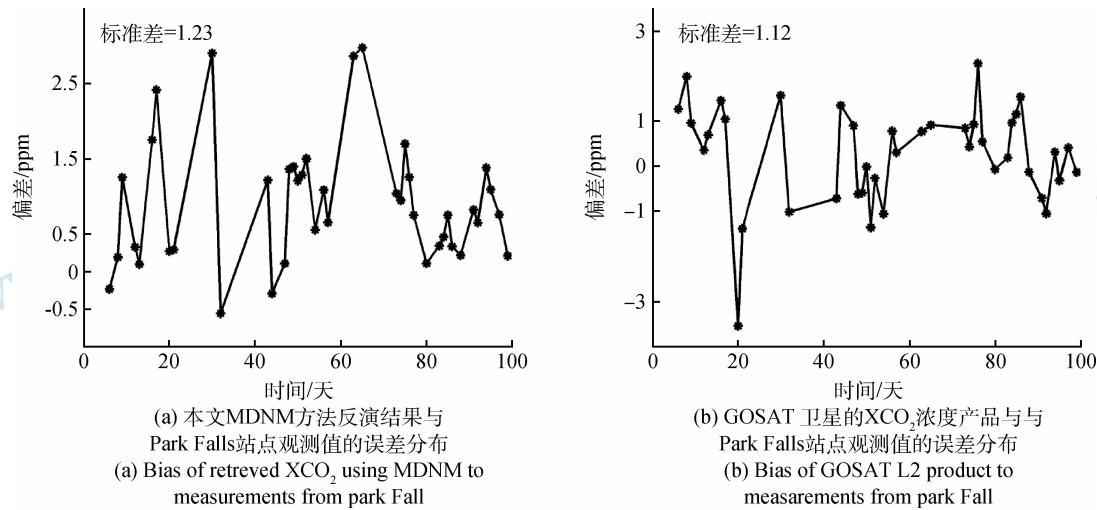


图 10 2010-01—2010-03 卫星反演结果的误差分布图

Fig. 10 Error analysis of retrieval from 2010-01 to 2010-03

廓线产品 1 K 的不确定性代入反演当中,有时能导致近 1.5 ppm 的反演误差。

最后,利用晴空且无气溶胶散射条件下 GOSAT 卫星观测数据进行了反演实验,并分别将本文反演结果和对应的 GOSAT 卫星 L2 级产品数据与 TC-CON 站点数据进行了比对。本文反演结果与 Park Falls 站点数据的相关性 R^2 达到了 0.729,标准偏差为 1.23 ppm;GOSAT L2 产品与地基观测的相关性 R^2 为 0.51,标准偏差为 1.12 ppm。比对结果初步验证了 MDNM 算法具有较好的精度水平。

参考文献 (References)

- Aumann H H, Gregorich D and Gaiser S. 2005. AIRS hyper-spectral measurements for climate research: Carbon dioxide and nitrous oxide effects. *Geophysical Research Letters*, 32(5): L05806 [DOI: 10.1029/2004GL021784]
- Bovensmann H, Burrows J P, Buchwitz M, Frerick J, Noël S, Rozanov V V, Chance K V and Goede A P H. 1999. SCIAMACHY: mission objectives and measurement modes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 56(2): 127 – 150 [DOI: 10.1175/1520-0469(1999)056<0127:SMOAMM>2.0.CO;2]
- CARBOEUROPE-IP. 2004. Assessment of the European Terrestrial Carbon Balance, Tech. Rep., EU Sixth Framework Programme, priority 1. 1. 6. 3 Global Change and Ecosystems.
- Clough S A, Iacono M J and Moncet J-L. 1992. Line-by-line calculations of atmospheric fluxes and cooling rates: application to water vapor. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 97 (D14): 15761 – 15785 [DOI: 10.1029/92JD01419]
- Crevoisier C, Chédin A, Matsueda H, Machida T, Armante R and Scott N A. 2009. First year of upper tropospheric integrated content of CO₂ from IASI hyperspectral infrared observations. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 9: 8187 – 8222 [DOI: 10.5194/acpd-9-8187-2009]
- Crisp D, Allas R M, Breon F M, Brown L R, Rurrows J P, Ciaia P, Connor B J, Doney S C, Fung I Y, Jacob D J, Miller C E, O'Brien D, Pawson S, Randerson J T, Rayner P, Salawitch R J, Sander S P, Sen B, Stephens G L, Tans P P, Toon G C, Wennberg P O, Wofsy S C, Yung Y L, Kuang Z, Chudasama B, Sprague G, Weiss B, Pollock R, Kenyon D and Schroll S. 2004. The Orbiting Carbon Observatory (OCO) mission. *Advances in Space Research*, 34(4): 700 – 709 [DOI: 10.1016/j.asr.2003.08.062]
- Engelen R J, Andersson E, Chevallier F, Hollingsworth A, Matricard M, McNally A P, Thépaut J N and Watts P D. 2004. Estimating atmospheric CO₂ from advanced infrared satellite radiances within an operational 4D-Var data assimilation system: methodology and first results. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 109(D19): D19309 [DOI: 10.1029/2004JD004777]
- Engelen R J and McNally A P. 2005. Estimating atmospheric CO₂ from advanced infrared satellite radiances within an operational four-dimensional variational (4D-Var) data assimilation system: results and validation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 110(D18): D18305 [DOI: 10.1029/2005JD005982]
- Houweling S, Hartmann W, Aben I, Schrijver H, Skidmore J, Roelofs G J and Breon F M. 2005. Evidence of systematic errors in SCIAMACHY-observed CO₂ due to aerosols. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 5: 3003 – 3313 [DOI: 10.5194/acp-5-3003-2005]
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 996pp
- Jiang D M and Dong C H. 2010. A review of optimal algorithm for physical retrieval of atmospheric profiles. *Advances in Earth Science*, 25 (2): 133 – 139 (蒋德明, 董超华. 2010. 大气廓线物理反演的最优化方法进展. *地球科学进展*, 25(2): 133 – 139)
- Maddy E S, Barnet C D, Goldberg M, Sweeney C and Liu X. 2008.

- CO₂ retrievals from the Atmospheric Infrared Sounder: methodology and validation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984—2012), 113(D11): D11301 [DOI: 10.1029/2007JD009402]
- Marquardt D W. 1963. An algorithm for least-squares estimation of non-linear parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 11(2): 431–441 [DOI: 10.1137/0111030]
- NACP. 2002. The North American Carbon Plan, A report of the NACP committee of the U. S. carbon cycle steering Group, Tech. rep. S. C. Wofsy and R. C. Harriss, co-chairs.
- Rodgers C D. 2000. *Inverse Methods for Atmospheric Sounding: Theory and Practice*. London: World Scientific Publishing
- Rozanov A, Rozanov V, Buchwitz M, Kokhanovsky A and Burrows J P. 2005. SCIATRAN 2. 0-a new radiative transfer model for geophysical applications in the 175–2400 nm spectral region. *Advances in Space Research*, 36(5): 1015–1019
- Strow L L, Hannon S E, De-Souza M S, Motteler H E and Tobin D C. 2006. Validation of the Atmospheric Infrared Sounder radiative transfer algorithm. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984—2012), 111(D9): D09S6 [DOI: 10.1029/2005JD006146]
- Tans P P. 2009. The atmospheric buildup rate for carbon is based on measurements of CO₂ at Mauna Loa obtained by the NOAA Earth System Research Laboratory. Available at ftp://ftp.cmdl.noaa.gov/ccg/co2/trends/co2_gr_mlo.txt, www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/.
- Washenfelder R A, Toon G C, Blavier J F, Yang Z, Allen N T, Wennberg P O, Vay S A, Matross D M and Daube B C. 2006. Carbon dioxide column abundances at the Wisconsin Tall Tower site. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984—2012), 111: D22305 [DOI: 10.1029/2006JD007154]
- Wunch D, Toon G C, Blavier J-F L, Washenfelder R A, Notholt J, Connor B J, Griffith D W T, Sherlock V and Wennberg P O. 2011. The total carbon column observing network. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 369(1943): 2087–2112 [DOI: 10.1098/rsta.2010.0240]
- Yokota T and Aoki T. 2004. Test measurements by a BBM of the nadir-looking SWIR FTS aboard GOSAT to monitor CO₂ column density from space. *Proceedings of The SPIE*, 5652: 182 [DOI: 10.1117/12.578497]
- Yoshida Y, Ota Y, Eguchi N, Kikuchi N, Nobuta K, Tran H, Morino I and Yokota T. 2011. Retrieval algorithm for CO₂ and CH₄ column abundances from short-wavelength infrared spectral observations by the Greenhouse gases observing satellite. *Atmospheric Measurement Techniques*, 4(4): 717–734 [DOI: 10.5194/amt-4-717-2011]
- Zou M M, Chen L F, Tao J H, Su L, Han D, He B H, Zhang Y and Yu C. 2012. Temperature sensitivity analysis of carbon dioxide measurement in SWIR band. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 31(5): 455–462 (邹铭敏, 陈良富, 陶金花, 苏林, 韩冬, 贺宝华, 张莹, 余超. 2012. 短波红外通道 CO₂ 观测的温度敏感性分析. *红外与毫米波学报*, 31(5): 455–460) [DOI: 10.3724/SP.J.1010.2012.00455]

CO₂ retrieval and preliminary retrieval results from space-based observations in shortwave infrared band

ZOU Mingmin¹, CHEN Liangfu¹, TAO Jinhua¹, ZHANG Ying¹, FAN Meng^{1,2}, SU Lin¹

1. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: CO₂ is a primary greenhouse gas in the atmosphere and many scientific missions from all over the world are focused on space-based remote sensing of CO₂ using shortwave infrared technique. We present an improved method to retrieve CO₂ column abundance from space-based observations in a shortwave infrared band. We analyze the sensitivities of CO₂ observations to aerosol scattering and atmospheric temperature profiling using the forward model. We also evaluate the reduced accuracy of CO₂ retrieval caused by aerosol scattering and 1K random error of temperature profiles. We propose a Modified Damped Newton Method (MDNM) for CO₂ retrieval and present the retrieval samples to evaluate the performance of the proposed algorithm. Sensitivity studies show that the influence of aerosol scattering and temperature on CO₂ remote sensing and scattering can cause a misestimate of up to 13.2 ppm of CO₂ concentration. We retrieve the CO₂ column abundance from GOSAT L1B data using MDNM method, and the results are compared with ground-based measurements from Total Carbon Column Observing Network (TCCON). The correlation coefficient R-square between the retrieved results and TCCON measurements is 0.729. Sensitivity studies show that aerosol scattering can cause a significant error in CO₂ retrieval. A comparison between satellite retrievals and ground-based measurements shows good agreement. The proposed MDNM method is preliminarily proven to accurate.

Key words: CO₂, MDNM, Retrieve, GOSAT



封面说明

About the Cover

盐城东台中巴地球资源卫星04星影像

CBERS-04 satellite image of Dongtai, Yancheng

中巴地球资源系列卫星 (CBERS) 由中国航天科技集团公司和巴西空间研究院联合研制, 是中巴两国在航天科技领域合作的重要体现, 被誉为“南南合作的典范”, 主要应用于国土、林业、水利、农情、环境保护等领域的监测、规划和管理。CBERS-04 卫星配备有分辨率为 5 m 的全色、10 m 的多光谱相机 (PAN), 20 m 的多光谱相机 (MUX), 40 m/80 m 的红外相机 (IRS) 以及分辨率为 67 m 的宽视场相机 (WFI), 满足了获取持续稳定的中分辨率普查数据的迫切需求。封面图片由中国资源卫星应用中心提供, 为 2014 年 12 月 8 日获取的盐城东台 5 m 全色与 10 m 多光谱融合影像, 图中可清晰辨识出池塘、河流、道路以及不同作物类型的农田。

The China-Brazil Earth Resources Satellite program (CBERS) is a technological cooperation program between China and Brazil which develops and operates earth observation satellites. CBERS-04 satellite will mainly be used in land use monitoring, forestry resource survey, water conservancy planning, crop yield estimation, environmental protection and many other fields. The CBERS-04 satellite carries four instruments: panchromatic imager (PAN) with 5 m spatial resolution for the panchromatic band and 10 m spatial resolution in the other bands; multispectral camera (MUX) with 20m spatial resolution; the infrared medium resolution scanner (IRS) with 40 m and 80 m spatial resolution, and a wide-field imaging camera (WFI) with 67 m spatial resolution. The cover image is the fusion of panchromatic and multispectral images captured by CBERS-04 satellite, which shows Dongtai, Yancheng on December 8, 2014. In the image, ponds, rivers, roads and fields with different crops can be clearly identified.

遥感学报

JOURNAL OF REMOTE SENSING

YAOGAN XUEBAO (双月刊 1997年创刊)

第19卷 第1期 2015年1月25日

(Bimonthly, Started in 1997)

Vol.19 No.1 January 25, 2015

主 管 中国科学院	Superintended by	Chinese Academy of Sciences
主 办 中国科学院遥感与数字地球研究所 中国地理学会环境遥感分会	Sponsored by	Institute of Remote Sensing and Digital Earth, CAS The Associate on Environment Remote Sensing of China
主 编 顾行发	Editor-in-Chief	GU Xing-fa
编 辑 《遥感学报》编委会 北京市朝阳区大屯路中国科学院遥感与数字地球研究所 邮编: 100101 电话: 86-10-64806643 http://www.jors.cn E-mail: jrs@radi.ac.cn	Edited by	Editorial Board of Journal of Remote Sensing Add: P.O.Box 9718, Beijing 100101, China Tel: 86-10-64806643 http://www.jors.cn E-mail: jrs@radi.ac.cn
出 版 科 学 出 版 社	Published by	Science Press
印刷装订 北京科信印刷有限公司	Printed by	Beijing Kexin Printing Co. Ltd.
总 发 行 科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 国内邮发代号: 82-324 邮政编码: 100717 电话: 86-10-64017032 E-mail: sales_journal@mail.sciencep.com	Distributed by	Science Press Add: 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: 86-10-64017032 E-mail: sales_journal@mail.sciencep.com
国外发行 中国国际图书贸易总公司 北京 399 信箱 邮政编码: 100044 国外发行代号: BM 1002	Overseas distributed by	China International Book Trading Corporation Add: P.O.Box 399, Beijing 100044, China

中国标准连续出版物号: ISSN 1007-4619

CN 11-3841/TP

CODEN YXAUAB

定价: 70.00元



官网



微站

ISSN 1007-4619



9 771007 461156

01>