



中国科学: 技术科学 2016年 第46卷 第1期: 79~81 《中国科学》杂志社SCIENCE CHINA
PRESSSCIENTIA SINICA Technologica tech.scichina.com论 文

近红外比值法在对流层航空遥感数据大 气水汽

估算中的改进

??????????*王靓, 赵利民, 赵艳华, 谢勇, 董建婷, 刘景旺, 余涛,
顾行发??

? 中国科学院遥感与数字地球研究所, 北京 100101;

? 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100101;

? 国家航天局航天遥感论证中心, 北京 100101;

? 北京空间机电研究所, 北京 100094;

? 北华航天工业学院, 廊坊 065000 *E-mail: zhaolm@radi.ac.cn

收稿日期: 2015-03-22; 接受日期: 2015-06-16; 网络出版日期: 2015-11-16

民用航天“十二五”预研项目(编号: D030101)资助

摘要 利用近红外波段大气窗口通道和水汽吸收通道辐亮度比值反演大气柱水汽含量,是卫星遥感大气水汽估算的通用方法之一. 但对于对流层内的航空遥感水汽估算,直接套用卫星遥感水汽估算近红外比值法会引入飞行平台到大气顶层水汽的影响. 根据航空遥感成像特征,利用Modtran和热力学初始分析资料(thermodynamic initial guess retrieval, TIGR)大气廓线库数据,分别构建入射路径上,航飞高度到地表的水汽透过率与太阳到地表水汽透过率的对数之比 G 与航飞高度内大气水汽与整层大气水汽之比 R ,以及入射路径上的航飞高度到地表的水汽透过率,与出射路径上地表到入瞳处水汽透过率的对数之比 H 与太阳入射角,的函数关系,结合下垫面特征,建立对流层航空遥感水汽估算模型. 以1614组TIGR廓线为输入模拟航飞,

入瞳处辐亮度,利用本文模型估算对流层内大气水汽,并与廓线数据直接计算值对比,结果表明,当航飞高度

在1.0~7.0 km时,模型估算值的总体精度为0.22 g/cm,且精度优于0.5 g/cm的样本占总样本数95.30%.

利用2014年5月28日郑州上街航空遥感试验获取的影像进行水汽分布估算,并与同步大气探空数据计算到的

水汽进行对比,结果表明,各样区估算值与探空值的RMS误差为0.16 g/cm(12.8%),且对下垫面覆盖条件的先验了解能够提高模型估算精度.

本文模型消除航空遥感飞行高度以上大气的影响,增大了模型的精准度与适应性,为热红外航空遥感数据实时大气校正提供了可靠的输入.

关键词 大气水汽, 对流层, 航空遥感, 近红外比值法, 红外多角度航空相机

引用格式:王靓, 赵利民, 赵艳华, 等. 近红外比值法在对流层航空遥感数据大气水汽估算中的改进. 中国科学: 技术科学, 2016, 46: 79-90 Wang L, Zhao L M, Zhao Y H, et al. Improvement of near infrared ratio method in troposphere water vapor estimation with airborne remote sensing data (in Chinese). Sci Sin Tech, 2016, 46: 79-90, doi: 10.1360/N092015-00020

? 2015《中国科学》杂志社www.scichina.com

王靓等: 近红外比值法在对流层航空遥感数据大气水汽估算中的改进

1 引言如果直接套用卫星遥感水汽估算中的RT法,会额外

引入航飞高度之上水汽吸收造成的影响,从而高估水汽是大气的重要组成部分之一,是导致天气

地表到航飞高度之间的水汽,降低大气订正精度.变化的主要要素.在中/长波红外波段,水汽对电磁

RT法的核心参数为近红外波段大气窗口通道和波具有明显的吸收作用,成为红外遥感大气校正需

,通过建立该比值水汽吸收通道入瞳辐亮度之比 T_w 要剔除的主要因素.利用遥感反演可以获得大气柱

与水汽的函数关系可以估算水汽空间分布.但是在水汽含量的空间连续分布,其主要方法包括差分吸

对流层内, T 与水汽的关系是随着航飞高度变化的. w 收法(differential absorption technique, DAT)^{[1,2][3]}选用1614条热力学初始分析资料(thermodynamic,分裂窗法(split-window technique, SWT),

^[4,5]initialguess retrieval, TIGR)大气廓线数据,包微波法(microwave techniques, MT)以及近红外

^[6,7]比值法(ratio technique, RT)等.其中由于RT括陆地与海洋区域,其中编号1~872为热带法对载荷仪器噪声、大气及地表的变化具有较低的敏(tropical)廓线,编号873~1260为温带(mid-lat1)

^[8]感性,是一种较为稳定的卫星遥感水汽估算方法,廓线,以及编号1261~1614为温带冬季与亚寒带夏受到广泛应用.季(mid-lat2)廓线.利用Modtran4.0模拟MAIC在

热红外航空遥感大气校正的核心在于与飞行同不同航高成像时, T_w 随地面到航高水汽的变化规律, w

步大气水汽信息的获取.通过在热红外遥感上加如图2所示.当航高在5 km以上时,航空器之上的载-大气窗口通道(如860 nm附近)和水汽吸收通道大气水汽较为稀薄,对太阳-地表-传感器路径上的(如940 nm附近),可实现红外遥感数据的实时大气水汽透过率贡献较小.对于不同廓线数据,入瞳辐校正.我国研制的红外多角度航空相机(multi-亮度之比与水汽呈现良好的负相关关系,在散点图angular infrared camera, MAIC)安装了4个谱段,中的分布相对平缓稳定;当航高在5 km以下时,入

分别为B1 (0.845~0.885 μm), B2(0.915~0.965 μm), B3(10.3~11.3 μm)和B4(11.5~12.5 μm),同廓线数据散点图的变化相对剧烈.因此,在利用其中B1, B2波段能够用于估算地表到航飞高度的高RT法从对流层(尤其是5 km以内的低空)航空遥感数分辨率水汽空间分布信息,

是提高MAIC应用潜力的据中估算水汽时, 必须针对太阳-地表-航空器的大重要手段. MAIC各通道光谱响应如图1所示.气辐射传输路径特征进行算法修正, 以消除飞行高度

大气水汽主要集中在对流层以内. 对于成像在

变化对水汽估算精度的影响. 对流层以上(10 km或更高)的航空遥感, 由于水汽含

本文根据MAIC工程参数, 针对传统比值法在航量在高层大气中极为稀少, 利用RT法估算水汽的过

空遥感水汽估算中的局限性, 结合大气辐射传输模[9]程与卫星遥感相似. 但是为获取较高分辨率航空

拟软件Modtran4.0和TIGR大气廓线数据的垂直分层影像, 热红外航空遥感飞行高度一般位于2~5 km的

资料进行模拟, 建立考虑航空相机飞行高度及太阳对流层之内, 航飞高度之上的大气水汽不可忽略.

入射角的近红外两通道比值法的对流层航空遥感水80

中国科学: 技术科学 2016年 第46卷 第1期

汽估算改进模型, 并利用模拟数据和实际航空遥感数据, 对模型的精度进行验证分析.

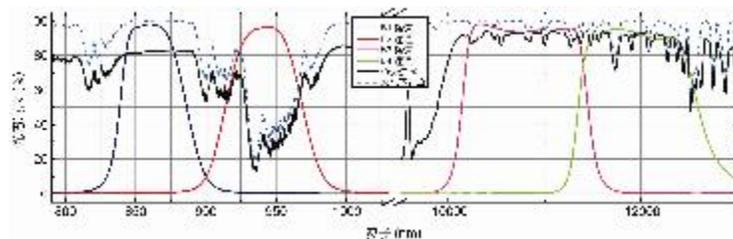
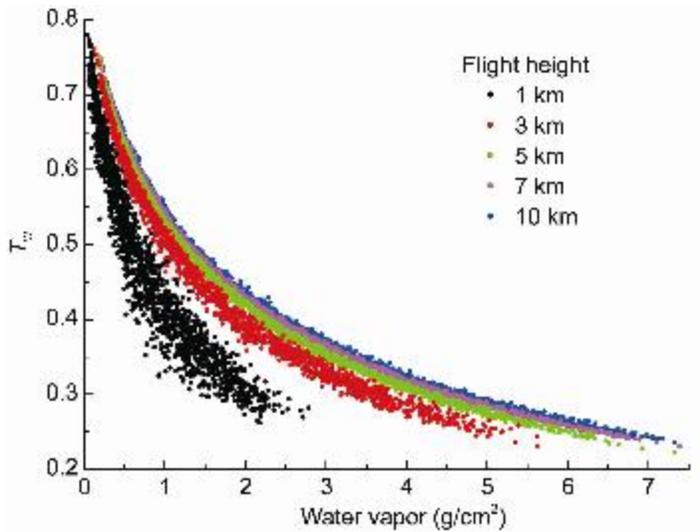


图1 MAIC各通道光谱响应



(λ)的作用与气溶胶光学厚度很小, 散射辐射 L_p

[10](1)式右端第一项直接反射项相比, 可忽略不计,

因此(1)式可表示为

$$L(\lambda) = \tau(\lambda) \rho(\lambda) = (2)_{\text{sensor sun}}$$

令

$$T = \tau(940) / \tau(860) = (3)_{w_path \text{ surface sun}}$$

式中 $T = L(940) / L(860)$, 为传感器入瞳处 $w_{\text{sensor sensor}}$

吸收通道(940 nm附近)和窗口通道(860 nm附近)等

效辐亮度之比; $\tau = \tau(940) / \tau(860)$, 为 $w_{\text{path path path}}$ 图2 MAIC B2,

B1通道入瞳辐亮度之比 T 与地面到航 w

传输路径上的对应通道等效水汽透过率之比, 其中高大气水汽关系散点图

, (860)作为大气窗口通道透过率, 其值相对稳定 w_{path}

2 近红外水汽反演原理且接近于1(图1), 因此, 实际上能表征水汽吸 w_{path}

收通道的路径透过率; $T = \rho(940) / \rho(860)$ 为传 w_{surface} 在1 μm 附近的近红外波段, 传感器在某一波

传输路径上的对应通道等效地表反射率之比;长,所接收到的入瞳辐射可简化为

$$T = L(940)/L(860)$$

为对应通道在大气顶层的等sunsunsunLLL()()()(),λλτλρλλ = +(1)s
ensorsunp

[7,8,10]效太阳辐照度之比. 研究发现, 860和940 nm式中L(λ)为传感器入瞳辐亮度;
L(λ)为大sensorsun

附近的地物反射率基本相等或成线性变化, T相surface气顶

对稳定; T根据大气层外太阳辐亮度计算获得. 因sun层的太阳入射辐亮度; τ(λ)为太阳-
地面-传感器

此水汽的透过率,就可以通过计算 T得到, 进w_path w路径透过率,
包含了传输路径上的大气吸收信息;

而由,估算大气水汽含量.w_pathρ(λ)为地表双向反射率; L(λ)为路径上分子与ρ

气溶胶的散射辐射项. 晴空条件下, 近红外波段大

81

王靓等: 近红外比值法在对流层航空遥感数据大气水汽估算中的改进

ln()τmh_{wss} 3 航空遥感近红外水汽反演算法_{ssss} = , , (5)ln()mhτ_{wzszszs} 3.1 算法设计

上式可简化为G函数, 与水汽垂直分布W以及太阳v₁,

入射路径上太阳到地表的水汽透过率; w_{ss}入射角有关,s₁,

入射路径上太阳到MAIC航空遥感成像高度Zτ_{w_{sz}}ln()τ_{wss} = GW(,),θ(6)_{vs}的水汽透过

率; τ, 入射路径上MAIC所在高度Z_{w_{zs}}ln()τ_{wzs}

GW(,)_{θ_{vs}}到地表的水汽透过率; τ, 出射路径上地表到w_{sm}ττ = .(7)_{wsswzs}

MAIC的水汽透过率; W, 整层大气柱水汽含量; 同理, 与对数比值受到太阳入射角,

τ₁, w_{zs}w_{sm}

W,

地表到航高Z区间的大气柱水汽含量z传感器观测角,以及地面到飞行高度水汽含量W_{oz}

对940 nm通道电磁波传输路径(太阳-地表- 的影响, 定义为H函数, 如下式:

ln(τ MAIC)上的水汽透过率,进行分段考虑(以下所 $w_{path} w_{zs}(\theta, \theta_s) = HW\theta\theta_s(8)$ $\ln(\tau) \tau_{ws}$ m 涉及透过率均为水汽透过率),

可表示为入射路径上 $HW(\theta_s)\theta\theta_s\tau = \dots(9)$ $w_{zs} w_{sm}$ 与反射路径上,的乘积, 如下式: $w_{ss} w_{sm}$

$\tau\tau = \dots(4)$ 由(3), (4), (7)和(9)式可得 $w_{ws} m_{ss} path$

$GH_{+1} TTT = \tau_{\dots}(10)$ $w_{ws} m_{surfacesun}$ 在入射路径中,根据辐射传输公式, 水汽透过率

[11~13]研究表明, 大气水汽透过率,和大气可降 w 可表示为, $= \exp(m h)$,

其中 m 为相对大气质量, w

水量关系可用如下形式表示:与传输路径及太阳入射角度有关, h 为水汽光学厚度,

$\tau = \exp(-b W(11))$ (w_{z0} 与大气水汽的垂直分布有关. τ 与, 取对数 $w_{ss} w_{zs}$

可得到式中 b 与仪器通道的中心波长和半波宽度以及波段 θ

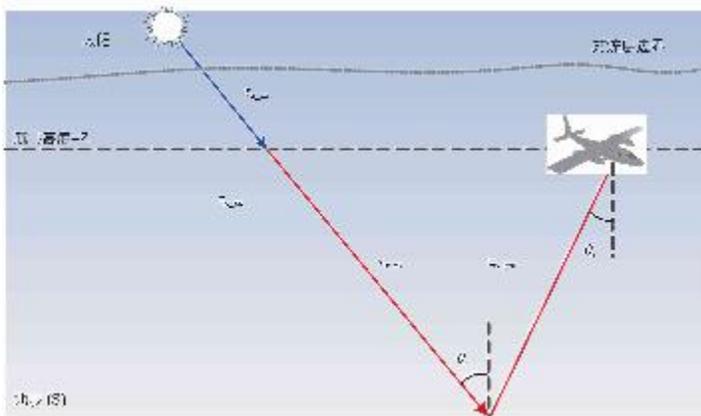
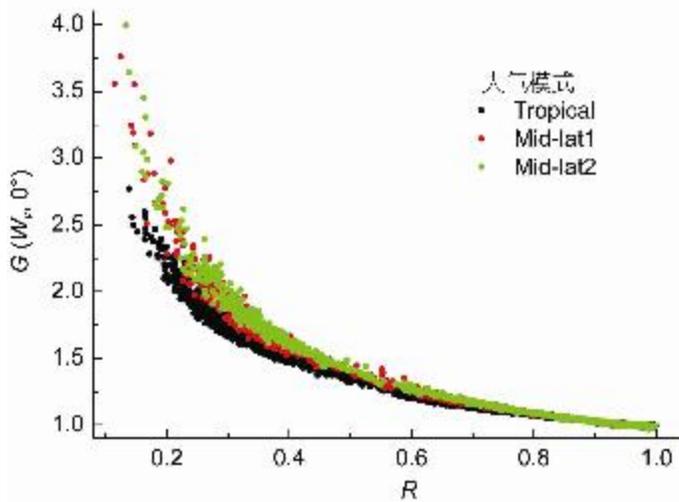


图3 (网络版彩图)航空遥感水汽估算模型参数几何关系82

中国科学: 技术科学 2016年 第46卷 第1期 响应函数有关. 合并(10)和(11)式可得



,, TTTbGHW=?+,,,,exp(1).(12)wzsurfacesun0,,

3.1.1 G函数设计

定义参数 R , 其含义为地表到航高 Z 的水汽 W_z

与整层大气水汽 W 之比

$$R = \frac{W_z}{W} \quad (13)$$

计算1614条TIGR廓线下 R 值. 利用

Modtran4.0模拟太阳入射角为 0° 时, 不同观测高

图4 基于TIGR数据绘制的 $G(W, 0^\circ)$ 与 R 关系散点图. 度(1, 3, 5, 7 km)下MAIC B1, B2通道的, 与 w_{ss}

, 并由(7)式计算得到 $G(W, 0)$. 分析 G 与 R, w_{zsv} TIGR廓线数据输入Modtran4.0, 模拟1, 3, 5, 7 的关系, 绘制散点图,

发现二者表现为明显的幂指km航高条件下的 W 值以及MAIC B1, B2通道的 z

b 数形式 ($G = aR^b$), 如图4所示., 与,, 并由(8)式计算得到 H . 模拟不同太 $w_{zsw_{sm}}$

G 不仅受到 R 的影响, 还与太阳入射角, 有关. s 阳入射角, 条件下, H 与 W 的关系, 结果如图 sz

以TIGR廓线为样本数据,当航高 Z 为3 km时,图5(a)所示.

由图发现,对 H 的影响非常显著: H 随 s

太阳入射角与 60° 太阳入射角下 G 值的差异集中在 s 的增大而增大,

$H(\theta=10^\circ)$ 与 $H(\theta=60^\circ)$ 的平差 $\pm[0.02, 0.02]$,

该误差对水汽估算影响的敏感性均差值可达到0.4415.

可见对 H 的估算必须考虑太阳入射角的变化.

水汽含量 W 的变化对 H 的影响相

对较小:尤其当 s 小于 50° 时, H 几乎不受到水汽 s .3.1.2 H 函数设计

变化的影响.因此在实际计算 H 时可考虑忽略参数 H 函数为地面 S 到航高 Z 之间,入射路径与出

W 的影响,特别针对低太阳入射角条件.计算图5射路径上940 nm水汽透过率对数之比,如(8)式所

图5(a)中不同 s 时 H 的平均值,分析 H 与 s 的关系,图5示.航空遥感主要以垂直下视成像居多,本文仅考

结果如图5(b)所示.发现二者表现为明显的二次方函数关系(即 $\theta=0^\circ$)的情况.

二次形式,即 $H=c_1\theta+c_2\theta+c_3$.不同航高,不同廓线可计算出不同的 W ,将

分大气模式考虑,在太阳入射角为 $40^\circ, 50^\circ$ 时,

忽略水汽含量的影响对估算 H 所带来的误差主要集

中在 $\pm[0.008, 0.008]$ 以内,在太阳入射角为 60° 时

误差范围会增大到 $\pm[0.012, 0.012]$.该误差对最

终 W 估算造成的影响分析见4.2节.

3.2 对流层航空遥感大气水汽估算模型

根据上述分析,(12)式可写成

$T_b G R H W = ? + \exp[()()1], \alpha \theta^4$ 航空遥感水汽估算误差敏感性分析(14) $\left. \vphantom{\exp} \right\} w s z 0$

4.1 R值估算误差敏感性分析其中,

$\alpha = \ln(), T T, (15)_{\text{surfacesun}}$ 本文模型中,

R的估算误差直接影响到W的估 $z b_1 G R R(), = (16)_{[14]}$ 算精度.

定义W估算误差W如下: $z_2 H b b b(). = + + \theta \theta \theta (17)_{s s s 2 3 4} \delta \delta W W R R W R = + ? ()(), (18)$ 利用Modtran4.0模拟不同条件下MAIC B2与B1

,R为参数R可能出现的误差, $W(R + \delta R)$ 与 $W(R)$ 的入瞳辐亮度比值T,
回归计算得到下垫面为植被w

为利用(14)式分别在 $R + \delta R$ 和R下计算得到的水汽(veg),
土壤(soil)条件下不同大气模式对应的,,

含量. 计算过程中选择如下典型条件: 1) 大气模式 $b \sim b$, 各参数取值如表1所示. 其中,
由于 $T_{04\text{surface}}$

为Mid-lat1; 2) 地表覆盖类型为植被.大部分观测与

条件下, 入瞳辐亮度之比T集中在[0.2, 0.8], 本w地物覆盖类型有关,
本文考虑了9类地物, 包括4类

文设定 $T = 0.452$ (为所有观测条件下的平均值), 并w植被(针叶林, 落叶林, 草地,
混合植被)和5类土

选取太阳入射角,分别为20°和50°的情况进行分析s壤(黏土, 粉砂土壤, 粉质黏土,
沙质土壤, 混沙土

(图6). 壤). 其他Modtran模拟输入条件包括: 太阳入射角

由图6可看出, 本文算法中,R对,W的影响度为10°~60°; 垂直下视观测, 观测高度为1,
3, 5,

7 km. 较为显著: 典型条件下, 如果R的计算误差

, $R = 0.05$, 则将

表1 回归计算得到的,, $b \sim b_{0.4}$

zbbbbR₀₁₂₃₄地表类型大气模式,

以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。
如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/255111240213011201>