

文章编号: 1672-8785(2014)09-0023-08

短波红外垂直失水指数对大气效应的敏感性分析

朱 琳^{1*} 秦其明² 王金良² 李文杰³ 赵莹莹³

(1. 国家卫星气象中心, 北京 100081 ;

2. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871 ;

3. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083)

摘 要: 在业务应用中, 用光学遥感方法反演地表土壤水分时常常会因受到大气效应的影响而降低精度。利用中分辨率成像光谱仪 (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer, MODIS) 的卫星观测数据、相应的地表反射率产品以及辐射传输模型模拟方法, 评估了短波红外垂直失水指数 (Shortwave Infrared Perpendicular Water Stress Index, SPSI) 对大气效应的敏感性。结果表明, 大气效应会使近红外和短波红外波段的反射率呈线性增加, 但对由近红外和短波红外波段组成的光谱特征空间中的典型三角形分布以及像元间几何关系影响较小, 能够在一定程度上补偿大气效应对土壤水分反演的影响。因此, 在实际的区域化应用中, 可以不考虑大气效应给 SPSI 指数计算及土壤水分反演带来的不确定性, 从而简化业务流程。

关键词: 短波红外垂直失水指数; 大气效应; 土壤水分; 敏感性分析

中图分类号: TP7 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2014.09.006

Analysis of Sensitivity of Shortwave Infrared Perpendicular Water Stress Index to Atmospheric Effect

ZHU Lin¹, QIN Qi-ming², WANG Jin-liang², LI Wen-jie³, ZHAO Ying-ying³

(1. National Satellite Meteorological Center of China, Beijing 100081, China;

2. Institute of Remote Sensing and GIS, Peking University, Beijing 100871, China;

3. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: In practical applications, the accuracy of optical remote sensing data is often reduced because of the influence of atmospheric effect. The sensitivity of Shortwave Infrared Perpendicular Water Stress Index (SPSI) to atmospheric effect is evaluated by using the data from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS), the corresponding ground reflectivity product and the atmospheric transfer model simulation. The result shows that the atmospheric effect can make the reflectivity in near infrared and shortwave infrared bands increase linearly. However, since it has less influence on the typical triangular distribution and the geometric relationship among the pixels in near infrared and shortwave

收稿日期: 2014-06-18

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划课题 (2012BAH29B03)

作者简介: 朱琳 (1978-), 女, 河南安阳人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为定量遥感监测的理论基础及应用。

E-mail: zhulin@cma.gov.cn

infrared spectral space, the influence of atmospheric effect on soil moisture inversion can be compensated to a certain extent. Therefore, the uncertainty brought by atmospheric effect to SPSI and relative soil moisture can be ignored in practical applications and the operational process can be simplified.

Key words: SPSI; atmospheric effect; soil moisture; sensitive analysis

0 引言

在陆地表层系统的变化过程中,土壤水分是重要的物理参数之一,它对农业生产、气象预报、气候变化乃至全球变化研究都具有重要作用^[1-2]。

由于具有高度的空间概括能力和独特的地物光谱特征,遥感技术日益成为人们获取区域土壤水分数据的重要手段。自 20 世纪 80 年代以来,研究人员基于可见光、近红外^[3-4]、热红外^[5-6]以及微波^[7]遥感资料开展了大量的土壤水分监测指数研究。

近年来,短波红外波段(1.4 ~ 2.5 μm)在土壤水分遥感监测中受到了国内外学者的较大关注。与红光波段相比,短波红外波段对地表水分信息更为敏感,同时受植被散射效应的影响也较小,因此对植被水分信息的反映更为稳定,而植被的水分信息又与土壤含水量紧密相关^[8-9]。很多研究人员将近红外波段作为参考波段,并将短波红外波段作为测定波段,建立了归一化差异水分指数(Normalized Difference Water Index, NDWI)^[10]、植被干旱指数(Vegetation Drought Index, VDI)^[11]、SPSI^[12]以及归一化干旱监测指数(Normalized Perpendicular Drought Index, NPDI)^[13]等方法。以上这些方法均取得了较好的应用效果。

然而,光学遥感方法经常会受到大气状况和云层覆盖的影响。由于存在大气吸收、反射和散射等效应,电磁波在大气中传播时会遭到不同程度的削弱;同时,邻近像元的部分信号会直接或者反射进入传感器视场,使像元信号得到增强^[14]。理论上,在利用短波红外波段并结合其他光学波段对土壤水分进行监测时,大气效应校正是提高定量反演精度的必要步骤。自 20 世纪 70 年代以来,各种关于大气校正的经验模

型或物理模型不断出现。经过近 30 年的发展,大气校正方面的成果尽管有很多,但仍没有一种可以普遍适用的模型^[15]。相对而言,经验模型计算简单,但会受区域性的限制。基于大气辐射传输理论的物理模型充分考虑了大气与电磁波相互作用的机理,其物理意义明确,适用于大范围的大气校正和地表反射率反演。然而这类模型需要输入大量参数,特别是它们对大气气溶胶、大气水分和臭氧含量极为敏感。因此,在业务工作中,大气校正精度在很大程度上依赖于气溶胶和水汽含量等输入参量的精度、地表朗伯特特性的近似方法、地形和卫星-太阳几何关系等多种因素^[16-17]。目前,国内外已公布了多套基于极轨卫星数据的地表反射率产品,如 MODIS 的地表反射率 C5 数据集^[17]、基于法国 SPOT 卫星 VGT 数据的地表反射率产品^[18]以及基于中国新一代极轨卫星(FY-3 号)数据的地表反射率产品^[19]等。这些产品采用不同策略,从不同程度上减小了大气效应对地表反射率的影响。然而残余的大气效应的影响仍然不容忽视,它们会给业务化土壤水分反演和干旱监测带来一定的不确定性。

本文利用 TERRA/MODIS 数据及其相应的地表反射率产品,分析 SPSI 指数对大气效应的敏感性,为 SPSI 指数在土壤水分反演与干旱监测中的业务化应用打下基础。

1 研究区与数据

1.1 研究区介绍

本文以宁夏回族自治区干旱频繁发生的中南部作为研究区域。为了进一步分析大气效应对 SPSI 指数的影响,我们选择位于宁夏回族自治区中南部的固原市(105°58' ~ 106°33'E, 36°38' ~ 35°34'N)作为 SPSI 大气效应敏感性分析区域。固原市是一个典型的干旱、半干旱地区,也是宁夏最重要的旱作农业区之一。该地区的典型气候

特点是日照充足, 气温偏高, 降水偏低; 同时, 降水时间的分配极不均匀, 经常出现春旱。据气象部门统计, 2004 年至 2013 年十年间, 固原市有 7 年发生了中度以上干旱, 其中 2004 年、2005 年、2007 年和 2008 年则达到了重旱等级。因此, 以宁夏及其典型的南部干旱区作为本文的研究区域, 对研究中国北方干旱、半干旱地区的土壤水分时空变化具有一定的指导意义。

1.2 数据来源与预处理

本文以 2004 年和 2008 年两个典型干旱年的 3 月 18 日至 6 月 18 日 (Day of Year (DOY)=78 ~ 170) 作为研究时段。该时段基本覆盖了研究区内春小麦的主要生长期。本文从美国航空航天局 (NASA) 网站上下载了能够覆盖研究区的 MODIS L1 级数据 (分辨率为 500 m), 并将其作为土壤水分遥感观测的数据源。我们主要利用 MODIS 近红外波段 (第二通道: 841 ~ 876 nm) 和短波红外波段 (第六通道: 1638 ~ 1652 nm) 的影像数据进行 SPSI 计算和土壤水分反演。由于有些时段的影像中存在大量云的干扰, 我们无法准确获取地物光谱, 从而影响了数据获取的频率。

为了避免人工灌溉对由模型模拟的土壤水分数据的影响, 本文选用位于宁夏中南部的 7 个土壤水分实地观测点: 韦州 (106°31'E, 37°19'N)、兴仁 (105°15'E, 36°56'N)、固原 (106°16'E, 36°00'N)、海原 (105°34'E, 36°34'N)、西吉 (105°42'E, 35°58'N)、隆德 (106°06'E, 35°37'N) 和泾源 (106°21'E, 35°30'N)。为了进一步分析大气效应对地表反射率和 SPSI 指数的影响, 我们同时下载了 2004 年 DOY=129 天和 2008 年 DOY=155 天覆盖固原市的 MODIS 地表反射率产品, 并利用 MODIS Re-projection Tool (MRT) 软件对数据进行投影和拼接, 以便和对应时间内的 MODIS 1B 产品的投影和覆盖范围保持一致。本文主要是考虑到以上时间正好处于 2004 年 5 月上旬和 2008 年 6 月上旬干旱发生的典型时段, 同时图像受气象云的影响较小, 便于着重评价大气效应 SPSI 指数反演的敏感性。

2 研究方法

2.1 SPSI 指数

研究结果表明^[12], 在植被覆盖区的光学遥感影像中, 由近红外-短波红外数据构造的二维光谱特征空间呈梯形分布。梯形中的不同位置代表植被和水分状况的分异特征。如图 1 所示, 底线 CD 类似于近红外-红光二维光谱空间中的土壤线, 称为近红外-短波红外基线。无植被覆盖的裸露土壤的像元点都落在这条线上。从 C 像元到 D 像元, 沿着 CD 线从湿润 (C 点) 到干旱 (D 点) 逐渐变化。其中, C 点为水体或水分饱和的裸露土壤等的像元位置, D 点为极度干旱的裸露土壤的像元位置。垂直于近红外-短波红外基线的方向与植被覆盖状况有关, 即离近红外-短波红外基线越远, 植被覆盖状况越好, 反之亦然。阿布都瓦斯提·吾拉木^[12] 根据以上规律, 过坐标原点作近红外-短波红外基线的垂线 L, 并将 SPSI 指数定义为梯形空间内任意一点到垂线 L 的距离:

$$SPSI = \frac{1}{\sqrt{M^2 + 1}} (R_{SWIR} + MR_{NIR}) \quad (1)$$

式中, M 为研究区近红外-短波红外基线的斜率, 可以通过空间统计分析得到; R_{NIR} 和 R_{SWIR}

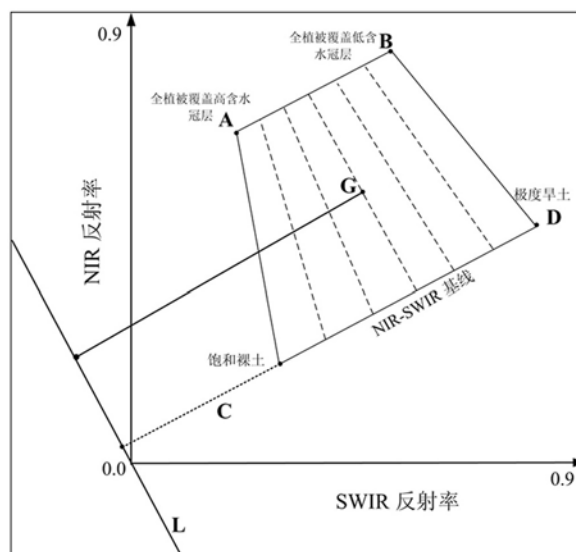


图 1 SPSI 指数的示意图^[12]

分别为像元在近红外和短波红外波段的反射率。实验结果表明, 基于 SPSI 指数的方法简单实用, 易于操作, 无需使用额外的气象参数, 大大简化了土壤水分遥感反演的过程^[12]。

式 (1) 中, M 值的确定是计算 SPSI 指数的关键步骤。理论上, M 值应该只与土壤特性有关, 而不会随季节变化。然而对于中分辨率遥感影像, 像元的反射率包含了植被和裸土的混合信息。随着研究区植被的生长, 混合像元中的植被比例越来越大, 对应的近红外-短波红外二维散点图中的纯裸土像元越来越少。因此, 实际的近红外-短波红外基线的斜率变化较大, 难以得到准确确定。为了使研究时段的 SPSI 指数具备可比性, 本文选取植被生长中期——2004 年 5 月 8 日 (DOY=129 天) 的 M 值作为统一的 M 值来反演整个研究时段的 SPSI 指数。尽管这样做不可避免地会给计算带来一些误差, 但在由 SPSI 向实际土壤水分转化的过程中, 我们会用实测土壤水分数据对 SPSI 进行再分析, 因而能在一定程度上弥补土壤水分 SPSI 反演过程所带来的误差。

通过上述简化, M 统一取 0.725, 则实际的 SPSI 反演公式为

$$\text{SPSI} = 0.8096 * (R_{\text{SWIR}} + 0.725R_{\text{NIR}}) \quad (2)$$

式 (2) 为土壤水分反演提供了一个具体的计算模型。

2.2 基于 SPSI 的土壤水分反演方法

本文利用地表 0~10 cm 土壤水分测量值建立 SPSI 指数与实际土壤水分之间的关系。考虑到在 1 km 分辨率尺度上, 很多植被类型都是混合的, 特别是行播农作物。因此, 为了在最大程度上消除混合像元对模型的影响, 本文采用像元范围内不同作物含水量的平均值代表整个像元的含水量。

图 2 为 0~10 cm 土壤水分实测数据与 MODIS 反演的 SPSI 之间的关系图。可以看出, 两者之间存在很好的相关性。相关系数的绝对值最大为 0.98, 最小为 0.87。同时, 标准偏差 (Standard Deviation, SD) 较低, 在 0.034~0.010 之间变化。

利用实测土壤水分数据与 SPSI 之间的线性相关关系, 可以将 SPSI 转换为地表 0~10 cm 土壤水分数据。

3 基于 MODIS 数据的敏感性实验

为了减小大气效应对传感器接收到的地物反射率的影响, 由 MODIS 第二和第六波段反演的 SPSI 在理论上应采用大气校正后的近红外和短波红外波段的地表反射率进行计算。为了简化计算, 本文直接用包含大气影响的星上反射率代替地表反射率。这一简化势必会给土壤水分估算带来不确定性。下面就大气效应对土壤水分遥感反演的影响进行进一步分析。

以 2004 年 DOY=129 天的研究区 MODIS 地表反射率产品 (MOD09) 为例, 计算基于地表反射率的 SPSI 并反演对应的土壤水分, 然后将其大气校正前的 SPSI 和土壤水分进行对比。我们首先比较了大气校正前后 MODIS 七个波段的反射率变化。大气校正前, 星上反射率受大气分子 (如臭氧、水汽和二氧化碳等) 和气溶胶颗粒的共同影响。大气分子的吸收使反射率受到削弱; 大气瑞利粒子和气溶胶的散射和折射一方面会削弱光线行进方向上的反射率, 另一方面还可能使其他方向上的光线进入传感器, 从而使星上反射率增加。如图 3 所示, MODIS 第一 (620~670 μm)、第二 (841~876 μm)、第五 (1230~1250 μm)、第六 (1628~1652 μm) 和第七 (2105~2135 μm) 波段经过大气校正后, 对应的反射率均有所增加。对于波长较短的蓝光和绿光, 即第三波段 (蓝光: 459~479 μm) 和第四波段 (绿光: 545~565 μm), 反射率在大气校正后明显减小。大气校正使大气分子和气溶胶粒子等对各波段反射率的影响大大降低^[20]。

我们进一步比较了研究区 2004 年 DOY=129 天的 MODIS 近红外和短波红外波段散点图 (见图 4)。可以看出, 大气校正前, 散点图中的像元比较集中。大气校正后, 散点图所对应的实际反射率区域明显变宽, 具体表现为, 短波红外和近红外波段的数据最大值提高, 点与点之间的离散度增加, 层次变得更加丰富。通过对比图 4(a)

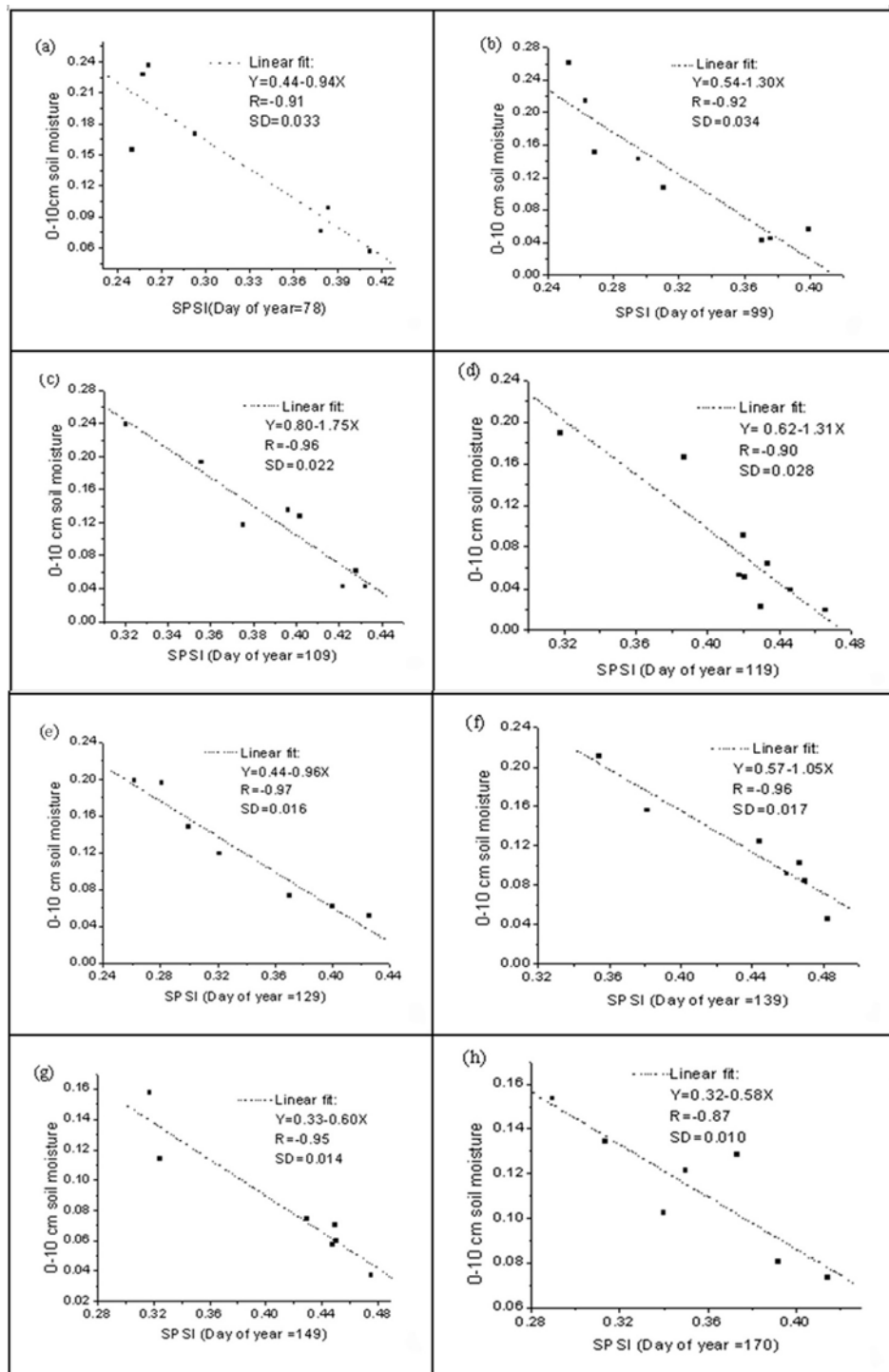


图 2 SP SI 与实地 0 ~ 10 cm 土壤水分之间的关系

和图 4(b) 可以发现, 大气校正后散点图的形状保持不变, 仍呈三角形, 同时近红外-短波红外基线的斜率基本保持不变; 消除大气效应后, 近红外和短波红外波段基本成比例增加。

图 5(a) 所示为由大气效应引起的 SP SI 变化

情况。大气效应的消除会使 SP SI 增加。同时, 大气校正前后的 SP SI 之间存在很好的相关关系 (相关系数 $R=0.94$), 散点图的拟和线与 1:1 线基本平行, 说明对于各个像元来说, 大气效应消除后 SP SI 增加, 而且其增幅基本保持一致。我

们利用实测地表土壤水分数据、大气校正后的 SPSI 以及 2.2 节所述的方法, 计算出了对应的大气校正后的土壤水分。图 5(b) 为大气校正前后的土壤水分散点图。可以看出, 与大气校正后的土壤水分相比, 当土壤水分小于 0.1% 时, 大气校正前的土壤水分偏低; 当土壤水分大于 0.1% 时, 大气校正前的土壤水分估计值偏高。从总体上来说, 大气校正后, 由于近红外和短波红外波段的反射率均会增大, 而且其增幅基本一致, 在

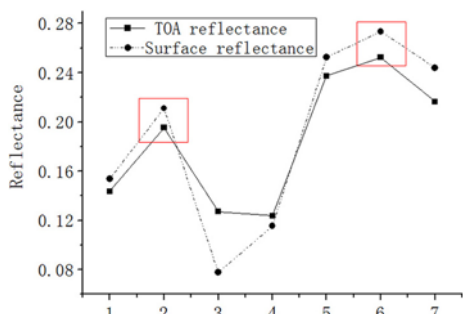


图 3 大气校正对 MODIS 前七个波段的影响

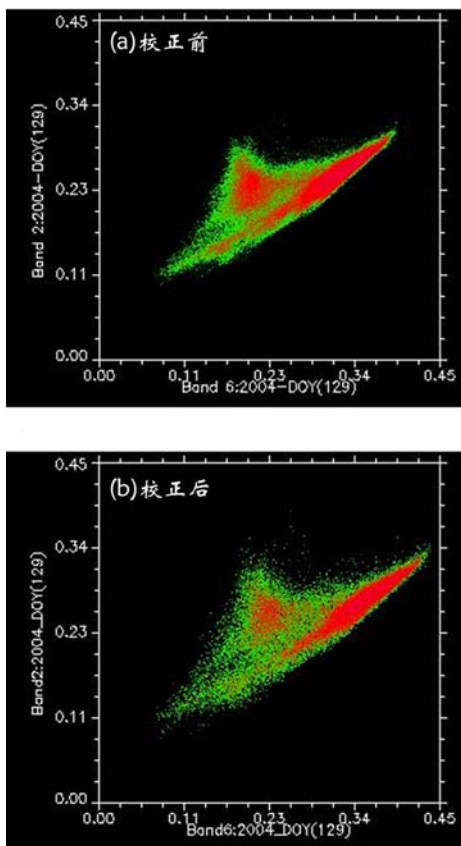


图 4 大气校正对 MODIS 近红外和短波红外散点图的影响: (a) 大气校正前; (b) 大气校正后

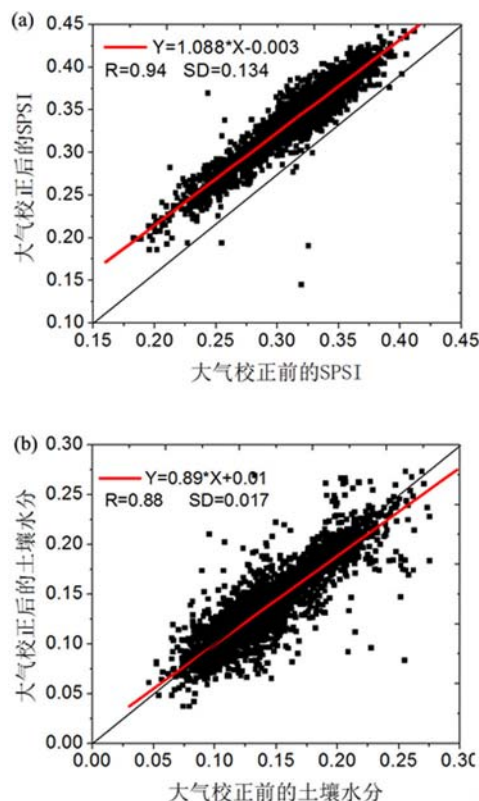


图 5 大气校正对 MODIS 反演的 SPSI 及土壤水分的影响 (固原: 2004 年 DOY=129 天)

一定程度上可以补偿大气效应对地表土壤水分反演的影响。大气校正前后的土壤水分之间存在明显的相关关系 ($R=0.88$, $SD=0.017$)。因此, 大气效应的影响基本上可以忽略不计。

为了进一步证明上述结论的正确性, 我们选择固原市 2008 年 DOY=155 天的大气校正前后的图像, 并利用 2.2 节所述的反演方法, 计算了当天的 SPSI 指数及其对应的土壤水分。如图 6(a) 所示, 大气校正后, 研究区的 SPSI 整体升高, 散点图的拟和线基本上与 1:1 线平行, 同时大气校正前后的 SPSI 之间仍保持较高的相关性 (相关系数达到 0.96)。这一结果与 2004 年 DOY=129 天的一致。从图 6(b) 中可以看出, 大气校正前后的土壤水分之间保持明显的相关关系 ($R=0.953$), 同时大气校正前后 SPSI 反演的土壤水分拟合线的斜率接近 1:1 线, 其截距和标准差较 2004 年 DOY=129 天进一步减小。我们同样可以认为, 大气校正对 SPSI 反演土壤水分误差影响较小。

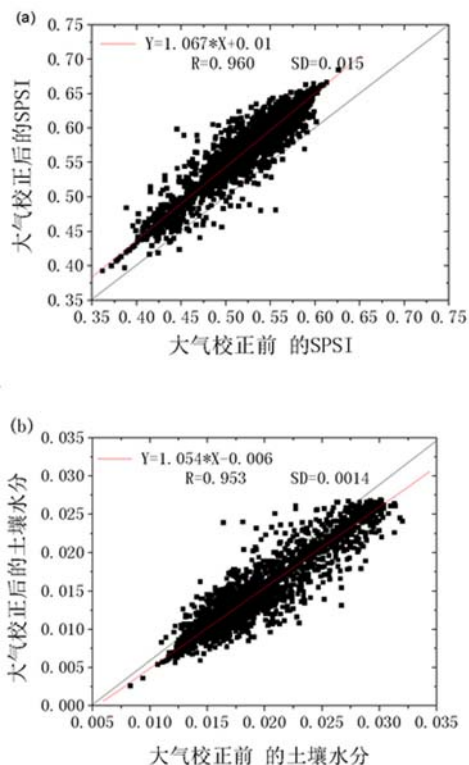


图 6 大气校正对 MODIS 反演的 SPSI 及土壤水分的影响 (固原: 2008 年 DOY=155 天)

4 基于模型模拟的敏感性实验

下面将结合辐射传输模型的模拟结果, 进一步讨论大气中的关键因子对近红外和短波红外反射率的影响。由于处于大气窗口区, MODIS 的近红外和短波红外波段受臭氧以及大气中水汽含量的影响较小。大气校正精度在很大程度上依赖于气溶胶光学厚度的精度^[20]。本文利用 Modtran4 大气辐射传输模型模拟了 MODIS 近红外和短波红外波段的星上辐射亮度与大气气溶胶浓度之间的关系。表 1 列出了 Modtran4 模型输入参数的设定值。其中, 与卫星波段及观测几何有关的参数采用了 MODIS 对应波段的光谱响应函数以及与研究时段一致的观测时间和角度信息。气溶胶含量可以用大气可视距离表示, 其范围为 10 ~ 50 km, 间隔步长为 5 km, 形成气溶胶序列数据 (供 21 组数据)。

从图 7 中可以看出, 当气溶胶含量减小 (视距增大) 时, MODIS 近红外和短波红外通道的辐射亮度都会增加, 同时两者均呈线性增加 (其

表 1 Modtran4 模式的运行参数设定

参数名称	Model Atmosphere	Surface albedo type	Aerosol model used	Surface Meteorological Range	Initial Frequency
参数设定值	Mid-Latitude Winter	Farm	Rural	10-50km	6017
参数名称	Final Frequency	DOY	Azimuth angle	Sun zenith at Target	View zenith angle
参数设定值	6265	129	53.12	20.21	131.49

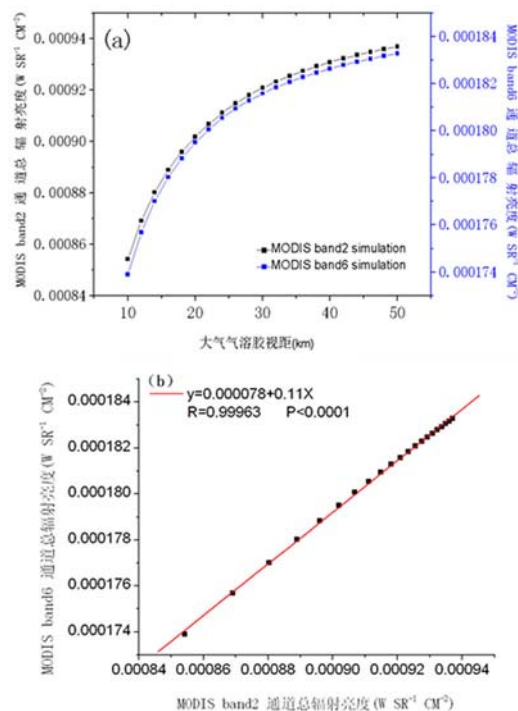


图 7 模拟结果

散点图的线性拟合相关系数达到 0.99963)。以上模拟结果进一步解释了前面利用 MODIS 的地表反射率产品数据生成的近红外和短波红外散点图较大气校正前成比例升高的现象。与其他大气因子相比, 气溶胶对上述两个波段的影响是主要因素。在区域气溶胶含量变化不大的前提下, 大气效应使近红外和短波红外散点图中的各个点都是成比例变化的; 大气效应对三角形总体形状以及像元之间的几何关系影响较小, 因此可以不考虑大气效应对 SPSI 指数计算的不确定性。

5 结论与讨论

光学遥感方法经常会受到大气状况和云层覆盖的影响。在用光学传感器进行区域土壤水分反演时,大气校正是一个重要的数据预处理步骤。然而,基于大气辐射传输模型的大气校正需要输入大量参数,特别是对大气气溶胶光学厚度和大气水分含量极为敏感。相关参数的准确性制约着遥感地表反射率产品的精度,同时可能会给业务化土壤水分监测带来额外误差。

本文通过利用卫星观测数据和辐射传输模型进行模拟,分析了用 MODIS 大气校正前后数据计算得到的 SPSI 指数及其对应的土壤水分反演结果,然后讨论了 SPSI 对大气效应的敏感性并基于大气校正前的数据对 SPSI 进行了计算,最后对业务化土壤水分监测的可行性进行了分析。研究表明,大气效应消除后研究区 SPSI 增加,而且对于各个像元来说,相应通道的增幅之间线性相关,基本不会改变近红外-短波红外散点图的几何关系,从而在一定程度上补偿了大气效应对 SPSI 和土壤水分反演的影响。因此,在业务上利用大气校正前的遥感数据计算区域 SPSI 指数,可以在不降低反演精度的前提下简化业务流程,所以对于进行大范围土壤水分反演来说是可行的。本文的研究成果对于进一步利用 SPSI 指数和我国 FY-3 号气象卫星数据进行干旱监测业务应用也有很好的借鉴意义。

在敏感性分析中,本文以大气中的气体分子和气溶胶粒子作为主要研究对象,而没有考虑气象云以及卫星-太阳观测几何条件等对大气状况和地表反射率反演的影响。此外,由于实地土壤水分观测站点有限,本文的 SPSI 反演土壤水分的拟合曲线具有一定的经验性,因此在被推广到其他地区时还要根据实地情况进行校正。

参考文献

- [1] Zhan Z, Qin Q, Ghulam A, et al. NIR-red Spectral Space Based New Method for Soil Moisture Monitoring [J]. *Sci China*, 2007, **50**(2): 283-289.

- [2] Heathman G C, Starks P J, Ahuja L R, et al. Assimilation of Surface Soil Moisture to Estimate Profile Soil Water Content [J]. *Journal of Hydrology*, 2003, **279**: 1-17.
- [3] 陈维英,肖乾广,盛永伟. 距平植被指数在 1992 年特大干旱监测中的应用 [J]. *环境遥感*, 1994, **9**: 106-112.
- [4] Ghulam A, Qin Q, Zhan Z. Designing of the Perpendicular Drought Index [J]. *Environ Geol*, 2007, **52**(6): 1045-1052.
- [5] Mcvicar T R, Jupp D L B. The Current and Potential Operational Uses of Remote Sensing to Aid Decisions on Drought Exceptional Circumstances in Australia: A Review [J]. *Agriculture System*, 1998, **57**(3): 399-468.
- [6] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A Simple Interpretation of the Surface Temperature/Vegetation Index Space for Assessment of Surface Moisture Status [J]. *Remote Sens Environ*, 2002, **79**: 213-224.
- [7] Njoku E G, Li L. Retrieval of Land Surface Parameters Using Passive Microwave Measurements at 6-18 GHz [J]. *IEEE Trans Geosci Remote Sensing*, 1999, **37**: 79-93.
- [8] Gond V, Pury D G, Veroustraete F, et al. Seasonal Variations in Leaf Area Index, Leaf Chlorophyll, and Water Content; Scaling-up to Estimate FAPAR and Carbon Balance in a Multilayer, Multi-species Temperate Forest [J]. *Tree Physiology*, 1999, **19**(10): 673-679.
- [9] Aldakheel Y Y, Danson F M. Spectral Reflectance of Dehydrating Leaves: Measurements and Modelling [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, **18**: 3683-3690.
- [10] Gao B. NDWI - A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, **58**: 257-266.
- [11] Maki M, Ishihara M, Tamura M. Estimation of Leaf Water Status to Monitor the Risk of Forest Fires by Using Remotely Sensed Data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2004, **90**: 441-450.
- [12] 阿布都瓦斯提·吾拉木. 基于 n 维光谱特征空间的农田干旱遥感监测 [D]. 北京: 北京大学, 2006.
- [13] 冯海霞, 秦其明, 李滨勇, 等. 基于 SWIR-Red 光谱特征空间的农田干旱监测新方法 [J]. *光谱与光谱学分析*, 2011, **31**(11): 3069-3073.
- [14] 徐希孺. *遥感物理* [M]. 北京: 北京大学出版社, 2005.

(下转第 47 页)