

植被指数研究进展: 从 AVHRR-NDVI 到 MODIS-EVI

王正兴¹, 刘 闯¹, HUETE Alfredo²

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所全球变化信息研究中心, 北京 100101; 2. Department Soil, Water and Environmental Science, University of Arizona, Tucson, Arizona 85721 USA)

摘要:目前应用广泛的植被指数 AVHRR-NDVI 仍有一些缺陷,主要表现在:(1)在植被高覆盖区容易饱和,这除了红光通道就容易饱和外,主要是基于 NIR/Red 比值的 NDVI 算式本身存在容易饱和的缺陷;(2)没有考虑树冠背景对植被指数的影响;(3)NDVI 的比值算式和最大值合成算法(MVC)确实消除了某些内部和外部噪音,但最终的合成产品仍然有较多噪音;(4)MVC 不能确保选择最小视角内的最佳像元。所有这些 AVHRR-NDVI 的局限性,在基于“中分辨率成像光谱仪(MODIS)”的“增强型植被指数(EVI)”产品中,都有不同程度改善。MODIS-EVI 改善表现在:(1)大气校正包括大气分子、气溶胶、薄云、水汽和臭氧,而 AVHRR-NDVI 仅对瑞利散射和臭氧吸收做了校正;这样 MODIS-EVI 可以不采用基于比值的方法,因为比值算式是以植被指数饱和为代价来减少大气影响;(2)根据蓝光和红光对气溶胶散射存在差异的原理,采用“抗大气植被指数(ARVI)对残留气溶胶做进一步的处理;(3)采用“土壤调节植被指数(SAVI)”减弱了树冠背景土壤变化对植被指数的影响;(4)综合 ARVI 和 SAVI 的理论基础,形成“增强型植被指数(EVI)”,它可以同时减少来自大气和土壤噪音的影响;(5)采用“限定视角内最大值合成法(CV-MVC)”,选择最小视角内的最佳像元,此外,目前正在试验的“双向反射分布函数(BRDF)合成法”,首先把不同视角换算为星下点像元反射值,然后采用 CV-MVC 合成,目的是进一步提高 EVI 对植被季节性变化的敏感性。总之,MODIS-EVI 使植被指数与不同覆盖程度植被的线性关系得到明显改善,尤其在高覆盖区表现良好。

关键词:AVHRR-NDVI; 中分辨率成像光谱仪;MODIS; 增强型植被指数;EVI

From AVHRR-NDVI to MODIS-EVI: Advances in vegetation index research

WANG Zheng-Xing¹, LIU Chuang¹, HUETE Alfredo² (1. Global Change Information and Research Center, Institute of Geographic Science and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Department Soil, Water and Environmental Science, University of Arizona, Tucson, Arizona 85721 USA). *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 979~987.

Abstract: Global AVHRR-NDVI data sets have been widely applied to many fields from land cover change to the extraction of various biophysical vegetation parameters. Yet there still remain some limitations in

基金项目: 中国科学院知识创新工程资助项目(CX10G-E01-07-01)

收稿日期: 2002-08-03; 修订日期: 2003-03-20

作者简介: 王正兴(1963~), 男, 山西省新绛县人, 副研究员, 主要从事资源环境遥感应用研究。E-mail: wangzx@igsrr.ac.cn

Foundation item: the Knowledge Innovation Project of Chinese Academy of Sciences(Contract No. CX10G-E01-07-01)

Received date: 2002-08-03; **Accepted date:** 2003-03-20

Biography: 王正兴, Associate professor, main research field: the application of remote sensing for natural resources and environment.

the NDVI product; (1) NDVI saturates in well-vegetated areas, partly a result of saturation in the Red channel and partly due to the ratio-based NDVI equation; (2) The effect of canopy background on NDVI has not been considered; (3) The ratioing properties of the NDVI along with the Maximum Value Composite (MVC) procedure does remove some sources of internal and external noise, but there still remain significant noise in the final NDVI products; (4) The MVC cannot guarantee the selection of the clearest pixels and smallest view angles. All of these limitations are improved to some extent in the Enhanced Vegetation Index (EVI) product from the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). The MODIS-EVI has several advantages over the AVHRR-NDVI; (1) The MODIS atmosphere correction scheme includes the effect of atmospheric gases, aerosol, thin cirrus clouds, water vapor, and ozone, whereas there are only corrections for Rayleigh scattering and ozone absorption in the AVHRR-NDVI product. This reduces the need for ratio-based vegetation indices, such as the NDVI, that remove some atmospheric noise at the cost of saturation; (2) The influence of residual aerosol is removed by the Atmosphere Resistant Vegetation Index (ARVI), which is based on the difference of Red and Blue aerosol scattering; (3) The influence of the canopy background is reduced by the Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI); (4) The concepts behind the ARVI and SAVI are coupled together to form the Enhanced Vegetation Index (EVI), which removes both atmosphere and background noise simultaneously and; (5) A Constrained-View Maximum Value Composite (CV-MVC) algorithm is applied to select the clearest pixels with smallest view angles and a BRDF compositing scheme is being tested to further improve the seasonal depiction of vegetation dynamics. The MODIS-EVI has improved its linearity with vegetation, particularly in well-vegetated regions.

Key words: AVHRR-NDVI; MODIS; enhanced vegetation index; EVI

文章编号:1000-0933(2003)05-0979-09 中图分类号:Q945.1;TP 751.1, TP79 文献标识码:A

AVHRR-NDVI 仍是目前使用最广泛的植被指数。在全球尺度上,IGBP 在 1997 年完成空间分辨率为 1km、时间分辨率为 10d 的植被指数。该数据与以前陆续公布的数据一起,构成较完整的数据序列;时间范围为 1992~1996 年,空间分辨率分别为 1km、2km、4km、8km、16km,数据包括 10 个波段,除植被指数 NDVI 本身外,还有原来的 5 个波段、太阳高度角、传感器高度角、相对方位角、所选用像元日期^[1,2]。AVHRR-NDVI 应用领域包括:土地覆盖变化^[3],植被与环境因子变化^[4~9],叶面积指数(LAI)和有效光合辐射分量(aFAR)^[10,11],净第一性植被生产力(NPP)^[12~16],农业产量预报等^[17,18]。虽然 NDVI 应用研究富有成效,但 NDVI 本身还有不足,如:NDVI 的饱和问题;对大气影响的纠正不彻底;对低植被覆盖区土壤背景的影响没有处理;“最大值合成法”不能保证选择最佳像元等。增强型植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)是对 AVHRR-NDVI 的继承和改进,它依托“中分辨率成像光谱仪(MODIS)”^[19,20]的丰富信息,以及过去十年对植被指数的研究,在植被指数和合成算法方面都作了改进。本文从植被指数原理出发,分析了 AVHRR-NDVI 的缺陷以及 MODIS-EVI 所做的改进。

1 植被指数的原理

1.1 理想状况下植被指数原理

理想状况下,传感器晴朗、植被指数不受大气、土壤背景变化影响,“太阳-地物-传感器”相对位置固定。这时

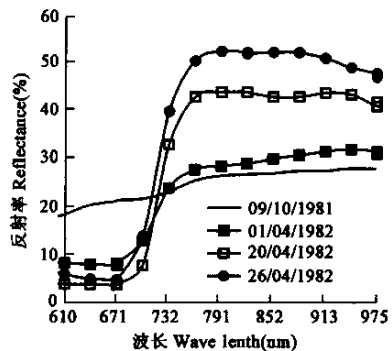


图 1 山东禹城冬小麦光谱特征

Fig. 1 Reflectance of winter wheat in Yu-Cheng county, Shandong Province, China.

传感器收到的信号来自地物,没有信号丢失和噪音介入。植物叶片组织对蓝光(470nm)和红光(650nm)有强烈的吸收,对绿光尤其是近红外有强烈反射。这样可见光只有绿光被反射,植物呈现绿色。叶片中心海绵组织细胞和叶片背面细胞对近红外辐射(700~1000 nm, NIR)有强烈反射。图1为山东禹城冬小麦主要物候期光谱特征。1981年10月9日为播后裸土。1982年4月1日为返青期,覆盖度75%。4月20~26日为拔节期,覆盖度100%^[21]。从红光到红外,裸地反射率基数较高但增幅很小。植被覆盖越高,红光反射越小,近红外反射越大。由于对红光的吸收很快饱和,只有NIR反射的增加才能反映植被增加。任何强化Red和NIR差别的数学变换都可以作为植被指数描述植被状况,如“差值植被指数(NIR-Red)”、“比值植被指数(NIR/Red)”,“归一化植被指数 $[(NIR/Red-1)/(NIR/Red)+1]$ ”。遥感传感器的波段设置就依此为基础。表1是几种常见传感器有关植被指数的波段,其中MODIS共36个波段,参与植被指数计算的除NIR和Red外还有Blue(Ch3),它将用于解决经过初步大气校正后,残留气溶胶引起的植被指数衰减问题。

表1 几个常见传感器与植被指数有关波段的光谱、时间、空间分辨率

Table 1 Spectral characteristics of some channels used for vegetation index

传感器 Sensor	与植被指数有关光谱范围 Spectral (μm)				时间分辨率 Temporal	空间分辨率 Spatial
	Ch1	Ch2	Ch3	Ch4		
Landsat-TM	0.45~0.52	0.52~0.60	0.63~0.69	0.76~0.90	16d	30m
NOAA-AVHRR	0.58~0.68	0.725~1.10	3.55~3.93	10.3~11.3	1d	1000m
Terra-MODIS	0.62~0.67	0.841~0.876	0.459~0.479	0.545~0.565	1d	Ch 1~2: 250m Ch 3~4: 500m

1.2 现实情况下植被指数原理

遥感植被指数的真正优势是空间覆盖范围广、时间序列长、数据具有一致可比性。但是,获得这样的植被指数至少需要解决以下问题:

(1)大气影响 大气中的水汽、臭氧、气溶胶、瑞利散射等增加或减少Red和NIR反射。700km厚的大气通过散射和吸收等作用,使传感器只收到来自目标的部分信号,同时收到部分噪音。由于传感器的视角范围 $0\sim 55^\circ$,实际穿越的大气层更厚。因此,必须恢复已经被大气扭曲的Red和NIR反射值,或通过其它方法消除这些影响,才能保证植被指数真实可信。

(2)土壤影响 尽管研究对象是植被,但植被只覆盖实际观测目标的一部分,传感器接收的信号包括植被以外的背景。在植被状况相同,植被背景有变化时,传感器接收到的信号也可能变化。必须分割土壤背景的影响,才能观测真实的植被变化。

(3)角度影响 全球平均云雾覆盖55%,为了弥补云雾影响,需要多次观测地面同一地点才有可能获得较大区域的无云观测。但每次观测时“太阳-地物-传感器”的几何关系都可能变化,这种变化除了强化以上的大气影响外,还可能直接影响植被指数计算。如一棵树,从树顶(被观测对象处于星下点)、迎光面(前向散射)、背光面(后向散射)等角度观测,所得到的植被指数可能不同。必须去除这些角度变化引起的植被指数变化,如使角度影响归一化,才能使系列数据具有可比性。

为实现“在较大空间、在较长时间序列、数据具有一致可比性”的目标,必须首先解决以上问题,否则,定量遥感研究的基础就不稳固。以下就以目前使用最广泛的全球1km AVHRR-NDVI数据集为例,讨论植被指数AVHRR-NDVI研究现状及存在的问题。

2 植被指数AVHRR-NDVI研究现状

目前广泛应用的AVHRR-NDVI还有某些不足,这主要表现在:(1)在植被高覆盖区容易饱和,原因之一一是红光通道容易饱和,之二是NDVI算式本身固有的容易饱和的缺陷;(2)对大气干扰所做的校正有限;(3)没有考虑树冠背景对植被指数的影响;(4)NDVI的比值算式和最大值合成算法(MVC)确实消除了某些内部和外部的噪音,但MVC不能确保选择最小视角内的最佳像元,最终的合成产品仍然有较多噪音。

2.1 AVHRR-NDVI算式本身具有容易饱和的缺陷

饱和是指当植被越来越茂密时,植被指数无法同步增长的现象。饱和的原因有二:首先,叶绿素 a 吸收红光通道(Red,中心波长 650nm)很快饱和, NIR 是唯一反映植被变化的因子。如图 1 中,冬小麦在 4 月以后,对 Red 的吸收基本饱和,只有 NIR 反射率继续增加。其次,NDVI 算式本身是“非线性的”。根据定义, $NDVI = (NIR/Red - 1) / (NIR/Red + 1)$ 。当植被覆盖持续增加时, Red 的吸收趋于饱和,对 NIR 的反射继续增加,因此比值 NIR/Red 持续增加。但是根据定义,NDVI 的增加与 NIR/Red 的增加不是线性关系。图 2 显示 NIR/Red 和 NDVI 的纯数学关系, NIR/Red 在 1~10 范围增长时,对应的 NDVI 在 0~0.83 范围增长,但存在低覆盖区植被指数被夸大,高植被覆盖区植被指数被压缩的现象。这夸大了植被稀疏区的植被指数,压缩了植被稠密区的植被指数。当 $NIR/Red < 3$ 时, NDVI 夸大了 NIR/Red 的效果;当 $NIR/Red > 4$ 时,饱和问题开始显现。根据地面观测资料^[21]以及图 3 和图 4 的 MODIS 数据,覆盖较好的天然植被和农作物的 NIR/Red 值都在 5~9 之间,使用 NDVI 饱和问题比较严重。

2.2 AVHRR-NDVI 对大气干扰的处理有限

NOAA-AVHRR 本来是为大气和海洋研究设计的,并没有特别考虑陆地研究所需要的大气校正,因此对大面积、长时间序列数据进行常规化大气校正非常困难。目前广泛使用的 AVHRR-NDVI 数据,仅对瑞利散射和臭氧吸收作了校正^[1,2]。对其它噪音影响的处理,寄希望于基于 NIR/Red 比值的 NDVI 和最大值合成法(MVC)。下面的例子说明 NDVI 的合理性和有限性。

表 2 显示 4 种大气噪音(臭氧、水汽、瑞利散射、气溶胶)对 Red、NIR 以及 NDVI 的影响。这 4 种噪音对两种特定土地覆盖 NDVI 的影响为:臭氧吸收 Red 增加了 NDVI;水汽同时吸收 Red 和 NIR,但对后者作用更大,总的效果是降低 NDVI;瑞利散射和气溶胶减少了 NDVI^[22]。

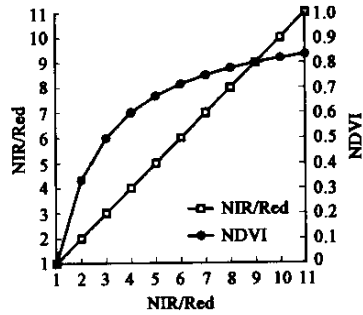


图 2 NDVI 算式定义本身的非线性特点
Fig. 2 The non-linearity of NDVI based on its equation

表 2 大气因子对 AVHRR-NDVI 影响分析

Table 2 The effect of atmospheric factors on NDVI^[22]

	臭氧 Ozone 0.247~0.480 cm/101325Pa	水汽 Water vapor 0.5~4.1 g/cm ²	瑞利 Rayleigh 1013mb	气溶胶 Aerosol V: 60~10km
Red reflectance	4.2%~12% ↓	0.7%~4.4% ↓	0.02~0.06 ↑	0.005~0.12 ↑
NIR reflectance	—	7.7%~25% ↓	0.006~0.02 ↑	0.003~0.083 ↑
裸露土壤 Bare soil NDVI Red = 0.19, NIR = 0.22	0.02~0.06 ↑	0.011~0.12 ↓	0.036~0.094 ↓	0.006~0.085 ↓
落叶林 Deciduous forest NDVI Red = 0.03, NIR = 0.36	0.006~0.017 ↑	0.036~0.038 ↓	0.086~0.23 ↓	0.022~0.35 ↓

表 2 说明,一方面,主要大气噪音对 NIR 和 Red 的影响的确具有“乘法性(同时增加或减少)”,因此,基于 NIR/Red 比值的 NDVI 在一定程度上确实可以减少这些噪音的干扰。但另一方面,经过比值处理后,残留噪音对 NDVI 的影响依然比较严重。这些残留噪音对 NDVI 影响的总趋势为“使 NDVI 衰减”,因此,理论上讲,可以通过 MVC 进一步消除残留大气影响。但是,在实际处理过程中,许多因素(云、雾、云影、地形阴影、坏线)限制了能够参与 MVC 合成的数据,而某些气溶胶在大气中持续时间远长于 10~30d 合成期,这些因素使得 MVC 合成后的数据质量具有一定的不确定性。因此,理想的情况是,对参与计算的原始数据做尽可能仔细的大气校正。

2.3 AVHRR-NDVI 没有考虑土壤背景干扰的影响

土壤干扰的实质是,土壤本身对 NIR 和 Red 具有不同的反射值,这种差异在经过 NIR/Red 比值计算后,在 NDVI 仍然有残留。因此,相同的植被生长在不同的土壤上,尽管理论上应该具有相同的 NDVI,实际上则因为土壤的变化而发生变化。

土壤背景影响 NDVI 的基本规律是,当背景变暗时,NDVI 有增加趋势。土壤影响最大的地区不是植被非常稀少的地区,而是中等覆盖地区。研究表明,当植被覆盖 40%,LAI=1 时,树冠背景土壤变化对植被指数影响最大,这时 Red 变化范围 0.06~0.33,对应的 NDVI 变幅 0.30。当 LAI>2 时,土壤影响消失,植被指数的饱和问题出现^[23]。当 LAI<1 时,因为 NDVI 本身数值小,由土壤引起的变幅也比较小。土壤噪音损害了 NDVI 的空间一致性,为了消除土壤背景影响,在较小的尺度已经开展了许多研究。如,Richardson 和 Wiegand 建立了基于“土壤线”概念的“垂直植被指数(PVI)”^[24],Clevers^[25]建立的“权重差植被指数(WDVI)”改善了对 LAI 的估计,同时减小了土壤背景的影响。Huete^[26]利用植被等值线方程建立了“土壤调节植被指数(SAVI)”,该指数后来又多次改进^[27,28]。但在更大的区域和全球尺度,目前的 NDVI 还没有对土壤背景影响进行特别订正。

2.4 AVHRR-NDVI 的 MVC 合成算法不能确保选择最佳像元

AVHRR 数据的特点之一,是对地面特定地物做每日 1 次观测,因此在某一特定时期(10d, 30d),可获得多次观测,即多个像元。这些像元的质量受两类因素的影响,一类是观测对象,另一类是观测系统本身。

来自观测对象方面的噪音,来自大气、云、雾、云影、地形阴影等。在计算 NDVI 前,首先要进行“去云”,残云残雾以及云影和地形阴影对 NDVI 主要起“衰减”作用,因此,可以使用 MVC 合成。

来自观测系统本身的噪音,与“太阳-地物-传感器”三者之间几何位置有关。当地面上一地物在合成期被传感器多次观测时,由于“太阳-地物-传感器”三者之间关系的变化,可能对植被指数计算带来噪音。在空间几何方面,AVHRR 星下点像元大小为 1000m×1000m,但在传感器视角 55°时,像元大小为 4 倍以上。再比如 MODIS,CH1 和 CH2 星下点像元大小为 250m×250m,但在传感器视角 30°时,像元大小为 350m×285m;在传感器视角 45°时,像元大小为 610m×380m。这样的变形可以恢复,但距离星下点越远,数据精度越差。在光谱特征方面,当视角增大时,从地物反射到传感器所经过的大气层距离增加,使大气衰减程度增加。所以从理论上讲,在其它方面相同的前提下,理想的像元应该是观测角(视角)最小的像元。MVC 合成就是假设可以优先选择“最小视角时受其它噪音影响最小的像元”。

但是,对全球合成 NDVI 数据所对应的视角统计数据显示,以上假设不完全成立。图 6 显示 3 种合成算法植被指数对应的原始数据的传感器视角,其中 MVC 合成法所获得的 NDVI 并非像预期的那样集中在星下点附近,而是偏向右侧。可能原因是,对下午卫星,这时植被处于前向闪射位置,植被指数有被放大的倾向,所以在合成过程中,有更多的机会被选中。这表明,虽然 MVC 可以进一步去除残云对 NDVI 的影响,但不能保证优先选取星下点附近的最佳像元。

3 增强型植被指数 MODIS-EVI 在 AVHRR-NDVI 基础上的改进

1999 年 12 月 18 日和 2002 年 5 月 4 日,美国分别发射 Terra 和 Aqua 两颗卫星,都载有“中分辨率成像光谱仪”(MODerate resolution Imaging Spectroradiometer,MODIS)。MODIS 具有 36 个波段,计划中的数据产品共 44 种,其中包括植被指数^[19,20,23]。MODIS 植被指数是一组产品,它的基本输入是分辨率为 250m 的 NIR 和 Red,以及分辨率 500m 的 Blue,基本产品是 250~1000m 的两种植被指数:归一化植被指数(NDVI)和增强型植被指数(Enhanced Vegetation Index, EVI)。虽然 MODIS-NDVI 和 AVHRR-NDVI 也有差别,但本文主要讨论 MODIS-EVI。除了地面分辨率提高 4 倍外,MODIS-EVI 在植被指数设计和合成算法两方面比 AVHRR-NAVI 有较大改进。

3.1 增强型植被指数 MODIS-EVI 原理和特点

3.1.1 MODIS-EVI 对基础数据进行了全面的大气校正 MODIS-EVI 的大气校正分 3 步。第一步是“去云处理”,包
 括 44 种标准产品中的 2 个产品:“云分类(MOD06)”和“云掩膜(MOD35)”。第二步是大气校正处理,校正内容除了 AVHRR-NDVI 已有的瑞利闪射和臭氧外,还包括大气分子、气溶胶、水汽

等。经过大气校正,获得另外一种标准产品:“地表反射率(MOD09)”。第三步是进一步处理残留气溶胶影响,方法是借助蓝光和红光通过气溶胶的差异。由于输入的 NIR、Red、Blue 都经过比较严格的大气校正,所以在设计植被指数算式时,无须为了消除乘法性噪音而采用基于 NIR/Red 比值的植被指数,因此也就解决了由此引起的植被指数容易饱和以及与实际植被覆盖缺乏线性关系的问题。

3.1.2 MODIS-EVI 采用“大气抵抗植被指数”对残留的气溶胶做了进一步校正 在对所有输入波段做大气校正的基础上,采用“大气抵抗植被指数(Atmospherically Resistant Vegetation Index, ARVI)”,对残留气溶胶做了进一步校正。ARVI 由 Kaufman 和 Tanre 在 1992 年提出^[29],基本原理是,大气气溶胶对 Blue 和 Red 散射程度不同,气溶胶越厚,二者差别越大,因此可以通过 Blue 和 Red 的差别反过来补偿气溶胶对 Red 的影响。大气抵抗植被指数的基本公式为:

$$ARVI = (\rho_{NIR}^* - \rho_{rb}^*) / (\rho_{NIR}^* + \rho_{rb}^*), \quad (1)$$

其中, $\rho_{rb}^* = \rho_{Red}^* - \gamma(\rho_{Blue}^* - \rho_{Red}^*)$, ρ^* 为经过大气校正的地面反射, γ 为光路辐射订正系数。

3.1.3 MODIS-EVI 采用“抗土壤植被指数”对土壤背景影响做了校正 对土壤背景干扰的处理,采用了 Huete^[26] 提出的抗土壤植被指数(Soil Adjusted Vegetation Index, SAVI):

$$SAVI = [(\rho_{NIR}^* - \rho_{Red}^*)(1 + L)] / (\rho_{NIR}^* + \rho_{Red}^* + L), \quad (2)$$

其中, L 为土壤调节参数。

3.1.4 MODIS-EVI 综合处理土壤、大气、饱和问题的增强型植被指数 Liu 和 Huete^[30] 在把公式(1)和(2)综合在一起时发现,土壤和大气互相影响,减少其中一个噪音可能增加了另一个,于是通过参数构建了一个同时校正土壤和大气的反馈机制,即“增强型植被指数”(Enhanced Vegetation Index, EVI):

$$EVI = 2.5(\rho_{NIR}^* - \rho_{Red}^*) / (\rho_{NIR}^* + C_1\rho_{Red}^* - C_2\rho_{Blue}^* + L) \quad (3)$$

其中, ρ^* 分别为经过大气校正的反射值(NIR, Red, Blue)。 $L=1$, 为土壤调节参数。参数 C_1 和 C_2 分别为 6.0 和 7.5, 描写通过 Blue 来修正大气对 Red 的影响。

3.1.5 MODIS-EVI 与 MODIS-NDVI 的比较实例

用 2000 年 4 月 26 日晴天江苏北部农田、长江下游森林 MODIS 数据,分别计算 NDVI 与 NIR/Red, 并按照以上公式(3)计算增强型植被指数 EVI。结果显示,正如图 2 理论预测那样,由 MODIS 计算的 NDVI 与 NIR/Red 存在“非线性关系”,但 EVI 与 NIR/Red 存在比较好的“线性关系”。对植被持续敏感的 NIR 与比值植被指数 NIR/Red 整体上线性关系良好,但在植被覆盖较低的地区 NIR/Red 反应不够灵敏(图 3)。NDVI 在植被覆盖高的地区逐渐饱和(NDVI>0.6 以后),但 EVI 保持比较好的线性关系(图 4)。此外还发现,EVI 计算对原始数据质量有严格要求,如果有残留云雾或其它大气噪音,可能产生异常大的 EVI 值,为后续合成增加了困难。所以,严格的去云处理和大气校正正是 EVI 计算和合成的前提。此外,对 EVI 性能改善检验,还需要用其它生物物理参数(如 NPP, LAI)尤其是地面实测数据进行验证。

3.2 MODIS-EVI 合成算法的改进

MODIS 的植被指数大致分两类,其中 MODIS-NDVI 是对 AVHRR-NDVI 的继承和发展,虽然在某些方面也有改进,但本文主要讨论 MODIS-EVI 的合成。MODIS-EVI 的合成算法,是根据合成期 16d 内数据质量状况,分 4 步逐步合成(图 5)。如果在 16d 内,符合质量要求的数据多于 4d,根据“双向反射分布函数”,把不同视角角点反射值,分别计算植被指数,然后采用限定视角内最大值原理合成(BRDF/CV-MVC)”,这一算法目前仍然在试验阶段;如果 16d 内符合质量要求的数据只有 2~4d,只计算这些好数据

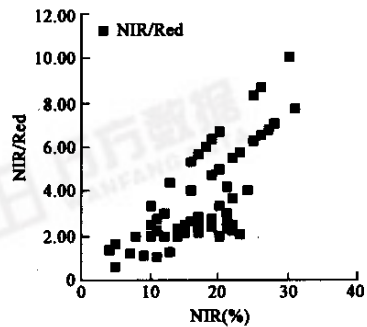


图 3 NIR 与 NIR/Red 的关系

Fig. 3 The relationship of NIR with NIR/Red.

江苏 2001-04-26, MODIS 数据 Jiangsu Province, China, MODIS imagery, April 26, 2001

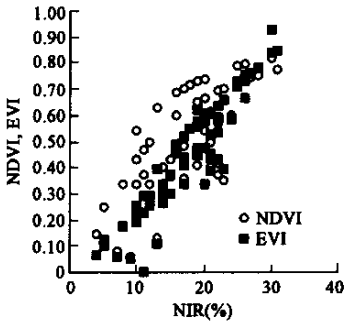


图 4 EVI 与 NDVI 线性关系比较

Fig. 4 The relationship of NIR with NDVI and EVI
江苏 2001-04-26, MODIS 数据 Jiangsu Province,
China. MODIS imagery, April 26, 2001

也比较集中; 但传统的 MVC 所获像元不仅离散, 而且倾向于选择前向散射的像元(右侧), 在视角为 45 度时还有很多像元被选中。

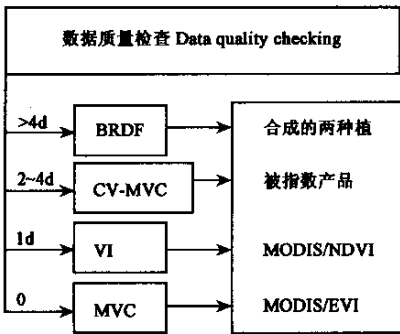


图 5 MODIS-EVI 合成算法示意图

Fig. 5 The flowchart of vegetation index composition

植被指数, 对限定角度内采用最大值合成法合成 (Constr-ained View Angle Maximum Value Composite, CV-MVC)”; 如果只有一个晴天, 就直接采用该日的植被指数。如果所有的天气状况都很差时, 无法进行 EVI 计算, 仍然使用传统的 NDVI 以及“最大值合成法 (MVC)”。最后合成的植被指数以及所对应的原始数据都保留在最后产品中, 以备未来更好的算法检验和改进。目前, 除 BRDF/CV-MVC 外, 其余 3 种方法已经应用, 生产的植被指数产品仍为“临时产品 (provisional)。”

MODIS-EVI 的合成算法, 的确提高了选择小视角最佳像元的机会。图 6 为采用 1989 年全球陆地 16d AVHRR 模拟数据对 3 种合成方法进行比较的结果。统计数据显示, 采用 BRDF/CV-MVC 所合成的像元视角集中在星下点附近; 采用 CV-MVC 所选择的像元

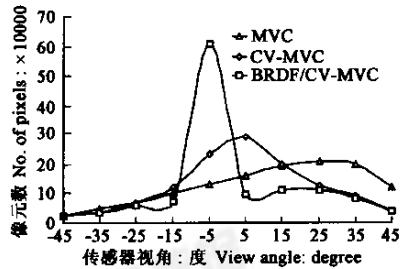


图 6 3 种合成算法所获像元视角分布比较 [23]

Fig. 6 The view angle distribution of selected pixels by three composition algorithms using simulated data [23]

4 结论

(1) 目前广泛应用的植被指数 AVHRR-NDVI 的缺陷主要表现在: 由于对原始数据大气噪音处理有限, 被迫采用可以部分消除大气噪音但有明显缺陷的比值算式, 结果 NDVI 在高植被覆盖区容易饱和。此外, NDVI 也没有考虑背景土壤噪音的影响, MVC 合成方法也不能确保选取最小视角内的最佳像元等。这些缺陷可能使某些定量研究的质量受到一定影响。

(2) 增强型植被指数 MODIS-EVI 对原始数据经过较好的大气校正, 所以 EVI 的设计避免了基于比值的植被指数的饱和问题。同时, 利用蓝光和红光对气溶胶的差异, 采用“抗大气植被指数”进一步减小了气溶胶的影响, 采用“土壤调节植被指数”减少了土壤背景的影响, 耦合以上两种植被指数, 开发了同时减少大气和土壤背景影响的“增强型植被指数 (EVI)”。EVI 的合成, 是以数据质量为基础, 优先选择晴天时传感器视角小的像元。EVI 在这些方面的改进, 为遥感定量研究提供了更好的基础。

(3) 采用 2001 年 4 月 26 日晴天 MODIS 数据, 对江苏省部分地区所做的初步研究显示, 增强型植被指数 EVI 与万方数据 NIR/Red 的线性关系获得改善。但是, EVI 与其它生物物理参数 (如 NPP 和 LAI) 尤其是地面实测数据的关系, 还需要做进一步的研究。

References:

- [1] AVHRR-NDVI:[<http://edcdaac.usgs.gov/1KM/comp10d.html>]
- [2] Teillet P M, Saleous N EL, Hansen M C, *et al.* An valuation of the global 1-km AVHRR land dataset. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, **21**, (10):1987~2021.
- [3] Li X B, Shi P J. Research on regulation of NDVI change of Chinese primary vegetation types based on NOAA/AVHRR data. *Acta Phytocologica Sinica*, 1999, **41**(3):314~324.
- [4] Li B G, Tao S. Correlation between AVHRR NDVI and climate factors. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, **20**(5): 898~902.
- [5] Zhang J, Ge J P, Guo Q X. The relation between the change of NDVI of the main vegetational types and the climatic factors in the northeast of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(4):522~527.
- [6] Zhao M S, Fu C B, Yan X D. *et al.* Study on the relationship between different ecosystems and climate in China using NOAA/AVHRR data. *Acta Geographica Sinica*, 2001, **56**(3):287~296.
- [7] Chen Y H, Li X B, Shi P J. Variation in NDVI driven by climate factors across China. 1983~1992. *Acta Botanica Sinica*, 2001, **25**(6):716~720.
- [8] Sun R, Liu C M, Zhu Q J. Relationship between the fractional cover change and rainfall in the Yellow River Basin. *Acta Geographica Sinica*, 2001, **56**(6): 667~672.
- [9] Duchemin B, Guyon D, and Lagouarde J P. Potential and limits of NOAA-AVHRR temporal composite data for phenology and water stress monitoring of temperate forest ecosystems. *International Journal of Remote Sensing*, 1999, **20**, (5): 895~917.
- [10] Lucht W, Prentice C, Myneni R B, *et al.* Climatic Control of the High-Latitude Vegetation Greening Trend and Pinatubo Effect. *Science*, 2002, **296**(31):1687~1689.
- [11] Guo Z H, Peng S L, Wang B S. Combing multi-temporal NOAA-AVHRR NDVI and ground auxiliary data for estimating terrestrial net primary production in Guangdong. *Acta Ecologica Sinica*, 2001, **21**(9):1444~1449.
- [12] Peng S L, Guo Z H, Wang B S. Use of GIS and RS to estimate the light utilization efficiency of the vegetation in Guangdong, China. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, **20**(6):903~909.
- [13] Sun R, Zhu Q J. Distribution and seasonal change of net primary productivity in China from April 1992 to March 1993. *Acta Geographic Sinica*, 2000, **55**(1):36~45.
- [14] Chen L J, Liu G H, Feng X F. Advances in study on net primary productivity of vegetation using remote sensing. *Chinese Journal of Ecology*, 2002, **21**(2):53~57.
- [15] Zheng Y R, Zhou G S. A forest vegetation model based on NDVI. *Acta Phytocologica Sinica*, 2000, **24**(1):9~12.
- [16] Qian J P, Li Y, Liao Q F, *et al.* Applying vegetation index in the mapping of NPP pattern along the NSTEC. *Chinese Journal of Ecology*, 2001, **20**(6):46~49.
- [17] Chi H K. Study on winter wheat yield estimation model with spectral data. *Acta Phytocologica Sinica*, 1995, **19**(4):337~344.
- [18] Jiang D, Wang N B, Yang X H, *et al.* Principles of the interaction between NDVI profile and the growing situation of crops. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, **22**(2): 247~252.
- [19] Terra MODIS. <http://daac.gsfc.nasa.gov/MODIS/Terra/>
- [20] MODIS homepage. <http://modis.gsfc.nasa.gov/>, <http://daac.gsfc.nasa.gov/MODIS/products.shtml>.
- [21] Center for space science, Chinese Academy of Sciences. Data compilation of Chinese earth resources spectral information Beijing: Energy Press, 1987.
- [22] Vermote E F and Vermeulen A. atmospheric correction algorithm: spectral Reflectance (mod09). 1999.
- [23] Huete A, Justice C, Leeuwen W van, 1999. MODIS vegetation index (mod13).
- [24] Richardson A G, Wiegand C L. Distinguishing vegetation from soil background information, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1977, **43**:1541~1552.

- [25] Clevers J G P W. The Application of a weighted infrared-red vegetation index for estimating leaf area index by correcting soil moisture, *Remote Sens. Environ.*, 1989, **29**:25~37.
- [26] Huete A R. A soil adjusted vegetation index (SAVI), *Remote Sens. Environ.*, 1988, **25**:295~309.
- [27] Huete A R. and Liu H Q. An error and sensitivity analysis of the atmospheric- and soil-correcting variants of the NDVI for the MODIS-EOS, *IEEE Tans. Geosci. Remote Sens.*, 1994, **32**(4):897~905.
- [28] Huete A R, Justice C and Liu H Q. Development of vegetation and soil indices for MODIS-EOS, *Remote Sens. Environ.*, 1994, **49**:224~234.
- [29] Kaufman Y J and Tanre D. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS-MODIS, *IEEE Tans. Geosci. Remote Sens.*, 1992, **30**:261~270.
- [30] Liu H Q and Huete A R. A feedback based modification of the NDVI to minimize canopy background and atmospheric noise. *IEEE Tans. Geosci. Remote Sens.*, 1995, **33**:457~465.

参考文献:

- [3] 李晓兵, 史培军. 基于 NOAA/AVHRR 数据的中国主要植被类型 NDVI 变化规律研究. *植物学报*, 1999, **41**(3).
- [4] 李本纲, 陶澍. AVHRR NDVI 与气候因子的相关分析. *生态学报*, 2000, **20**(5): 898~902.
- [5] 张军, 葛剑平, 国庆喜. 中国东北地区主要植被类型 NDVI 变化与气候因子的关系. *生态学报*, 2001, **21**(4):522~527.
- [6] 赵茂盛, 符淙斌, 延晓冬, 等. 应用遥感数据研究中国植被生态系统与气候的关系. *地理学报*, 2001, **56**(3):287~296.
- [7] 陈云浩, 李小兵, 史培军. 1983~1992 年中国陆地 NDVI 变化的气候因子驱动分析. *植物生态学报*, 2001, **25**(6):716~720.
- [8] 孙睿, 刘昌明, 朱启疆. 黄河流域植被覆盖度动态变化与降水的关系. *地理学报*, 2001, **56**(6): 667~672.
- [11] 郭志华, 彭少麟, 王伯荪. GIS 和 RS 支持下广东省植被吸收 PAR 的估算及其时空分布. *生态学报*, 1999, **19**(4): 1444~1449.
- [12] 彭少麟, 郭志华, 王伯荪. 利用 GIS 和 RS 估算广东植被光利用率. *生态学报*, 2000, **20**(6):903~909.
- [13] 孙睿, 朱其疆. 中国陆地植被净第一性生产力及季节变化研究. *地理学报*, 2000, **55**(1):36~45.
- [14] 陈利军, 刘高焕, 冯险峰. 2002. 遥感在植被净第一性生产力研究中的应用. *生态学杂志*, 2002, **21**(2):53~57.
- [15] 郑元润, 周广胜. 基于 NDVI 的中国天然森林植被净第一性生产力模型. *植物生态学报*, 2000, **24**(1):9~12.
- [16] 钱峻屏, 李岩, 廖其芳, 等. 2001. 利用遥感植被指数分析中国东北样带农业生态系统的生产力格局. *生态学杂志*, 2001, **20**(6):46~49.
- [17] 池宏康. 冬小麦单产的光谱数据估测模型研究. *植物生态学报*, 1995, **19**(4):337~344.
- [18] 江东, 王乃斌, 杨小暎, 等. NDVI 曲线与农作物长势的时序互动规律. *生态学报*, 2002, **22**(2): 247~252.
- [21] 中国科学院空间科学技术中心. 中国地球资源光谱信息资料汇编, 北京: 能源出版社, 1987. 623~1035.