

一种由卫星遥感资料获得的修正的 土壤调整植被指数*

文 军 王介民

(中国科学院兰州高原大气物理研究所, 兰州 730000)

摘 要 目前, 通过卫星遥感资料确定区域面上植被分布、类型的研究受到许多实用领域的普遍重视, 并由此提出了许多形式不同的植被指数。由于土壤背景噪声是造成植被指数不确定的重要原因之一, 为此不同学者在标准化差值植被指数的基础上提出了多种旨在能削弱土壤背景噪声的土壤调整植被指数, 如权重差值植被指数、土壤调整植被指数和转化土壤调整植被指数等等。这些植被指数不同程度上削弱了土壤背景噪声, 但是必须预先已知下垫面植被的密度分布或覆盖百分比, 也就是说仅适合于求解某一小范围植被覆盖变化较小下垫面上的植被指数, 而且其动态范围也偏小。本文提出了一种修正的土壤调整植被指数, 土壤调整因子由植被指数自身调整, 不需要其它辅助信息。计算结果表明其动态范围较大, 与最佳土壤调整因子下的土壤调整植被指数差异小, 因此对应用卫星遥感资料求解区域面上土壤调整植被指数极其有效。

关键词 植被指数 土壤背景 植被覆盖度

1 引言

植被指数是由观测的各种光谱反射率经线性或非线性组合构成对植被有指示意义的参数, 它能有效地从光谱反射辐射观测数据中提取植被信息便于分析利用。其应用领域非常广泛, 从植被动态监测、农作物估产到陆面过程参数的参数化等都有不同程度的应用, 如从植被动态监测中分析局地下垫面沙漠化趋势^[1], 由植被指数参数化求解叶面积指数、比辐射率等等^[2]。但是辐射观测角度、大气状况等对反映植被信息的光谱辐射有不同程度的影响, 同时在光谱辐射信号中还附着着土壤背景信号, 相对于植被信号亦称土壤背景噪声。在复杂下垫面地区或植被覆盖度变化较大地区, 植被指数中土壤背景噪声更为明显, 因此, 如何消除或减小土壤背景噪声对植被指数的有效应用极有意义。

为了减小植被指数中土壤背景噪声, 不同学者应用在不同植被生长季节光谱辐射观测资料对植被指数进行了不同程度的改进。然而, 由于地面观测的局限性, 无法得到区域面上考虑土壤背景噪声后的植被指数。卫星遥感资料的应用为获得区域面上的植被信息提供了可能, 但应用卫星遥感资料时, 由于要进行整个区域面上的计算, 因此要求尽量少用或不用地面观测资料, 而直接由卫星遥感资料求解。为此, 我们将从分析不同植被指数受背景土壤噪声的影响中得出一种由卫星遥感资料直接修正、受土壤背景噪声影

1997-07-18 收到

* 本文得到国家自然科学基金委项目 49475244 和重大项目 IMGRASS(No.49790020)资助

响最小的修正的土壤调整植被指数。

2 不同植被指数及其土壤背景噪声

为了能从不同途径得到的遥感信息中提取反映下垫面植被状况的植被信号, 使用最广泛的是标准化差值植被指数

$$I_{ndv} = \frac{\rho_n - \rho_r}{\rho_n + \rho_r}, \quad (1)$$

其中, ρ_n 和 ρ_r 分别为近红外和红光波段的反射率。实验证明, I_{ndv} 对植被覆盖的变化较为敏感, 当植被覆盖度小于 15% 时, 其数值随植被覆盖度的增加而增大得很快, 但覆盖度大于 80% 时, I_{ndv} 对植被密度的灵敏度迅速降低, 因此, I_{ndv} 适合于早期生长阶段或较低覆盖度的植被检测^[3]。为了提高植被指数对浓密植被的敏感性, Jakson 等将近红外与红光波段反射率之比作为一种比值植被指数^[2]。研究表明, 它与植被叶面积指数、植物叶绿素含量等有很高的相关性, 适合于高覆盖度的植被监测, 但当植被覆盖度大于 50% 时, 比值植被指数不能很好地识别植被密度的差异。同时, 比值植被指数受大气透过率的影响比标准化差值植被指数明显, 大气效应极大地降低了它对植被监测的灵敏度, 尤其是在比值植被指数增大时, 其影响相当显著, 因此, 最好应用经大气校正后的卫星遥感资料。

土壤作为植被背景对光谱反射辐射的影响随着波长而变化。对红光波段而言, 植被对入射和反射光光谱辐射的作用主要是吸收, 透过很小, 因此, 在非完全植被覆盖的情况下, 反射光光谱主要受控于植被表层及裸露的土壤, 冠层顶以下叶子的作用甚微, 土壤对红光波段的反射较强, 红光波段反射率或反射辐射因植被覆盖百分数而变化主要是非植被覆盖部分土壤的贡献, 而在植被覆盖下的土壤由于叶子红光透过率很小对冠层顶的反射辐射贡献也很小。近红外波段则完全不同, 冠层顶反射率大, 透射率也大, 吸收率小。在冠层顶的反射辐射中整个植被层在起作用, 在叶面积指数较小时, 低层土壤也起作用。因此, 土壤背景对光谱辐射响应不同是造成植被指数差异的重要原因。为了有效地利用植被指数, 应尽量消除或减小土壤背景噪声。消除土壤背景噪声, 可以通过分离同一像元点或观测响应范围内植被或土壤的光谱辐射信号, 或应用冠层辐射传输模式求得真正的植被和土壤的光谱辐射信号, 但这需要土壤背景的光谱特性、叶子光学特性及植被的内部结构, 显然这样做是非常复杂的。最有效的方法是考虑土壤背景因素, 改变植被指数的形式, 这种植被指数既消弱了背景土壤的影响, 需要的信息量少, 使用起来也很方便。为了得出能够消弱背景土壤噪声的植被指数, 首先应该分析一下下垫面为裸露土壤下红光和近红外波段反射率特性。观测证实, 当土壤湿度改变或其它因素引起的两个波段反射率的变化几乎总是同步的, 但其比值并不变化, 在两波段反射率的二维坐标系中其关系为一条直线, 习惯上称这条直线为土壤线^[4]。为了消弱土壤背景噪声对植被指数的影响, 以土壤线为基准调整红光和近红外波段光谱反射率的比例, Viegard 等^[5]提出将光谱坐标中的点到土壤线的垂直距离作为垂直植被指数

$$I_{pv} = \frac{1}{\sqrt{a^2 + 1}} (\rho_n - a\rho_r - b). \quad (2)$$

垂直植被指数动态范围较小, 应用土壤线参数对红光和近红外光谱反射率进行调整变形后得到权重差值植被指数

$$I_{w dv} = \rho_n - a\rho_r. \quad (3)$$

其间存在下述关系

$$I_{pv} = \frac{1}{\sqrt{1 + a^2}} (I_{w dv} - b), \quad (4)$$

上述表达式中 a 和 b 为分别土壤线的斜率和截距。很明显, 这两种植被指数等值线在红外和近红外光谱反射率坐标系中为一簇平行线。因此, 在植被覆盖较大时, 植被指数与叶面积指数或覆盖百分比的一致性很差, 土壤背景噪声也很大^[6]。为了寻找能够减小土壤背景噪声且能增大动态范围和适用较广的植被指数, Huete等^[7]分析一定叶面积指数或一定植被密度下植被光谱反射率资料后发现植被指数等值线总是与土壤线近似的交于一点。为了减小土壤背景噪声的影响, Huete等^[7]对红光和近红外波段光谱反射率进行调整后得出一种新的植被指数, 称为土壤调整植被指数

$$I_{sav} = \frac{\rho_n - \rho_r}{\rho_n + \rho_r + L} (1 + L), \quad (5)$$

其中, L 为土壤调整因子, 与土壤线及植被分布密度有关。他们给出适合于一定范围中等植被密度下最佳调整因子为0.5。另外, Baret等^[7]在SAVI的基础上又提出了一种更有效地减小背景土壤噪声的转换植被指数

$$I_{tsav} = \frac{a(\rho_n - \rho_r - b)}{a\rho_n - \rho_r - ab + X(1 + a^2)}, \quad (6)$$

其中, X 为一个能够使土壤背景噪声减小的调整因子, 在他们的个例中取值为0.08。

很显然, 在计算以上各种能够减弱土壤背景噪声的植被指数之前必须预先已知土壤线和 X 的最佳估计, 这就限制了这些植被指数在大范围不同土壤背景下的广泛应用, 特别是在应用卫星遥感资料直接求解区域尺度面上土壤调整植被指数时, 不同背景土壤噪声可能对相应植被指数带来潜在的误差。那么能否得到一种由卫星遥感资料直接求解或自身调整的土壤调整植被指数呢?

从(6)式出发, 对某一背景土壤上的植被假设在(5)式中最佳土壤调整因子为 L_0 , 此时称土壤调整植被指数为修正的土壤调整植被指数

$$I_{msav,0} = \frac{\rho_n - \rho_r}{\rho_n + \rho_r + L_0} (1 + L_0). \quad (7)$$

由于考虑了土壤调整因子, 应该使土壤背景噪声明显减小。假设还可以求得另一个调整因子 L_1 , 可以进一步减小土壤背景噪声, 且令

$$L_1 = 1 - I_{msav,0}. \quad (8)$$

把(8)代入(7)式, 则可得到使土壤背景噪声更加减小的土壤调整植被指数

$$I_{msav,1} = \frac{\rho_n - \rho_r}{\rho_n + \rho_r + 1 - I_{msav,0}} (2 - I_{msav,0}). \quad (9)$$

对上述表达式进行多次重复后有 $L_n = 1 - I_{msav,n-1}$, 则

$$I_{msav,n} = \frac{\rho_n - \rho_r}{\rho_n + \rho_r + 1 - I_{msav,n-1}} (2 - I_{msav,n-1}). \quad (10)$$

当 $I_{msav,n} = I_{msav,n-1}$ 时, 便认为土壤背景噪声已减小到最小程度。求解上式并考虑到修正的土壤调整植被指数 $I_{msav} \in (0, 1)$, 进一步求解可得

$$I_{msav} = \frac{2\rho_n + 1 - \sqrt{(2\rho_n + 1)^2 - 8(\rho_n - \rho_r)}}{2}. \quad (11)$$

修正的土壤调整植被指数由迭代方程得出, 既考虑了控制土壤背景调整因子, 且仅由卫星遥感资料或近地面光谱辐射观测资料得到, 因而对于卫星遥感资料求解区域面上的植被指数极其有效。以下将通过应用实际资料的计算对其精度、优点作进一步评述。

2 计算分析与讨论

修正的土壤调整植被指数既然考虑了土壤背景噪声, 那么对土壤背景噪声的削弱与最佳土壤调整因子下土壤调整植被指数差异其动态范围如何? 为了进行这些分析比较, 以 1995 年 8 月在甘肃省临泽县三二村附近黑河流域沙漠绿洲上进行的“干旱区综合环境监测计划”(简称 AECMP95) 野外实验场为背景, 首先选取陆地资源卫星过境时植被变化较大某一线上不同像元点光谱反射率资料, 并计算各种植被指数, 最后给出土壤调整植被指数在整个实验区区域面上的水平分布。

为了求取所取线上不同像元点上的各种土壤调整植被指数, 应先求出相应像元点上土壤线。在红光和近红外波段光谱反射率的二维图中, 相同近红外波段光谱反射率下两个波段反射率之比最小值对应的直线便是土壤线。可以看出, 土壤线并未过原点, 其斜率和截距并非为 0 和 1。同时, 在文献[4]中给出植被覆盖等值线也并非交于某一点, 与图 1 有些类似, 因此, Huete 等^[7]所取土壤调整因子有一定局限性, 只适合于一定植被密度下求解土壤调整植被指数, 对不同植被密度的下垫面, 取不同土壤调整因子是很有必要的。

根据以上得出的土壤线参数分别计算出各种植被指数(见图 2)可以看出, 不同植被指数在同一植被覆盖度下对应值并不相等, I_{wdv} 比其它植被指数动态范围小。在有植被时, I_{msav} 与 I_{tsav} 、 I_{sav} 非常接近, 与 Huete 等^[7]的结论相当一致。在裸露沙漠背景条件下, I_{msav} 比其它植被指数都小, 因而其反映下垫面植被的信息更合理。Huete 等^[7]计算了不同植被覆盖度下各种植被指数后指出, 标准化差值植被指数与下垫面植被覆盖度的线性关系明显不如 I_{sav} 好, I_{wdv} 虽然与植被覆盖度有较好的线性关系, 但其动态范围比 I_{sav} 要小。图 2 也显示出 I_{sav} 和 I_{msav} 的变化趋势一致, 在沙漠上, I_{sav} 比 I_{msav} 要小, 但在绿洲上 I_{msav} 略大于 I_{sav} , 我们虽然无法看到土壤调整植被指数与植被覆盖度或叶面

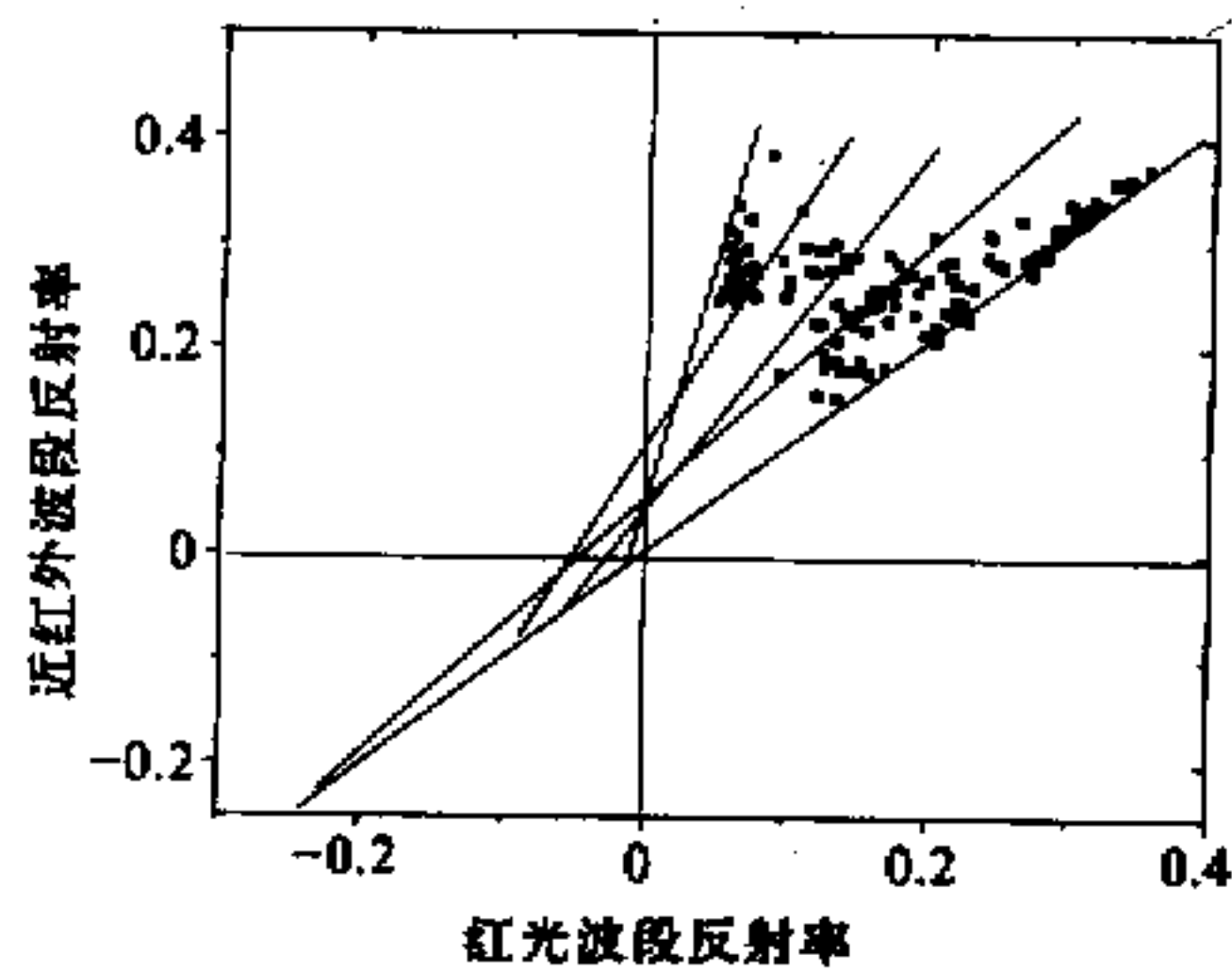


图1 红光和近红外波段反射率散点图

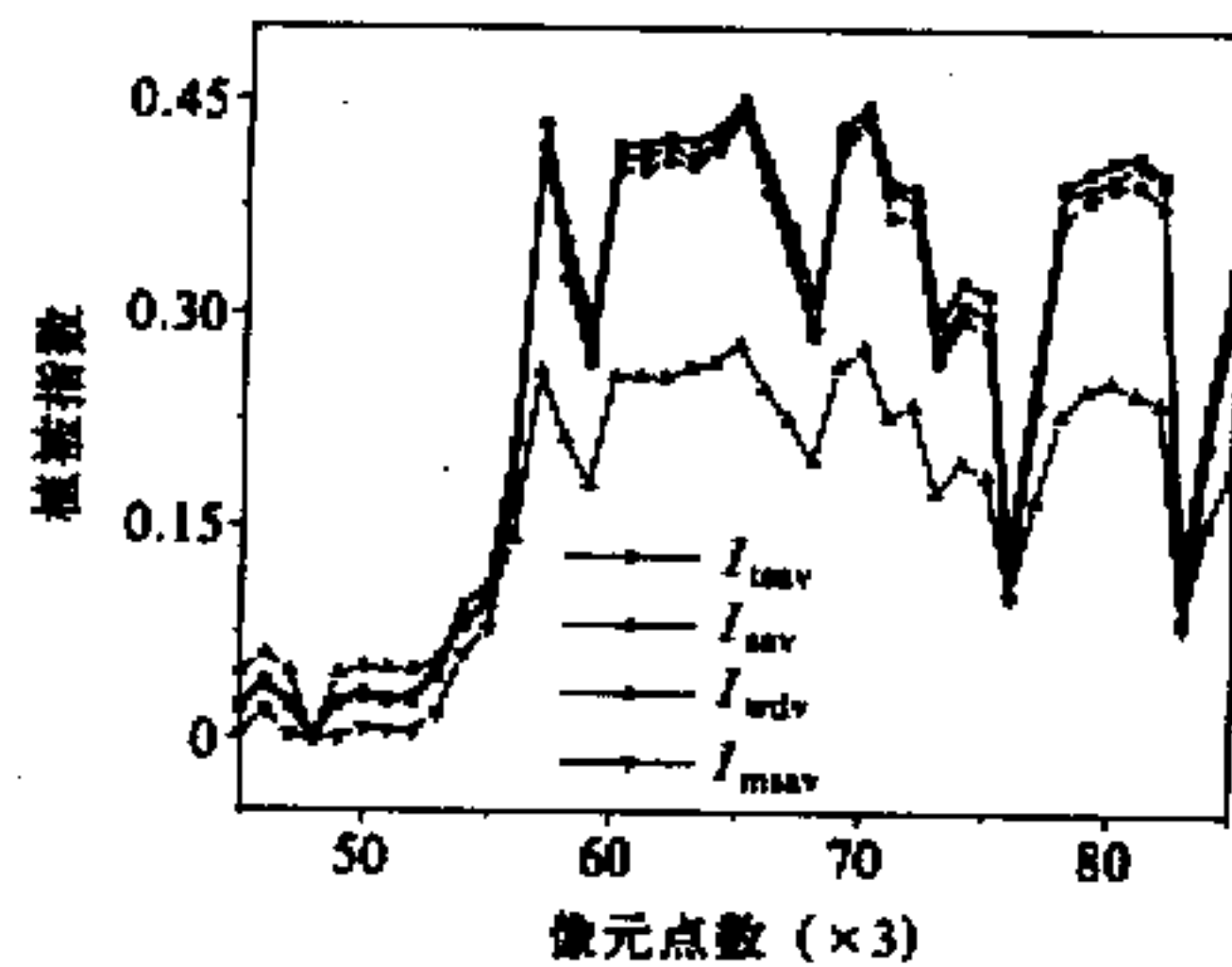


图2 某一剖面不同像元点上各种植被指数

表1 不同土壤调整植被指数的动态范围

植被指数	最小值	最大值	动态范围
I_{wdv}	0.0876	0.6156	0.5280
I_{tsav}	0.0484	0.7050	0.6566
I_{sav}	0.0624	0.7714	0.7092
I_{msav}	0.0593	0.8342	0.7749

积指数的线性关系,但图2表明,在沙漠上 I_{msav} 最小,绿洲上 I_{msav} 与 I_{sav} 和 I_{tsav} 非常接近,说明此时土壤背景噪声被明显削弱,从表1中各种植被指数的动态范围看出, I_{msav} 的动态范围明显大于其它植被指数,因此, I_{msav} 与其它

植被指数增大了植被信号而减小了土壤背景噪声,更适合于这种绿洲戈壁沙漠相间地区求解植被指数。在相同植被覆盖度或相同叶面积指数的情况下应该有相同的植被指数,但由于光谱反射辐射强度随观测时间和地表特性的不同,其间总是有一定的差异,所求植被指数也存在差异。为此,Huete等^[7]将在同一叶面积指数或植被覆盖度下得出不同植被指数的标准差定义为土壤背景对植被指数的影响,也就是土壤噪声,它们的结果表明, I_{ndv} 在土壤植被覆盖较小时土壤背景噪声很大,只有在植被覆盖大于80%时,土壤背景噪声才明显减小,对 I_{sav} 和 I_{mdv} 土壤背景噪声很小,而且在不同覆盖度下土壤背景噪声也比较恒定。如果用植被指数与土壤背景噪声比(信噪比)的大小来判断植被指数反映植被浓密的因子,则 I_{sav} 比其它植被指数更有效。在不同覆盖度下所求土壤调整因子并不严格相等, I_{msav} 是在 I_{sav} 基础上得到一种土壤调整指数,所不同是 I_{sav} 中最佳土壤调整因子必须在预先已知植被覆盖度下或叶面积指数下再由土壤线求得,而 I_{msav} 仅通过植被的反射光谱辐射资料,采用自身调整的方式使土壤调整因子达到最佳值。为了验证 I_{msav} 是否接近最佳土壤因子下的土壤调整植被指数,我们以Huete等^[7]在棉田上观测的光谱观测资料分别计算各种植被指数,并对其与最佳土壤调整因子下的植被指数的差异进行计算,方法如下:

$$e = \frac{I_v - I_{v,0}}{I_{v,0}} \times 100\%, \quad (12)$$

其中 e 为相对误差, I_v 为各种植被指数, $I_{v,0}$ 为最佳土壤调整因子下的土壤调整植被指数。从图3可以看出, I_{wdv} 与 $I_{v,0}$ 的相差最大,而且在植被覆盖度较大或较小时差异非常明显,只有植被覆盖度为25%时,其间相差才比较小。植被覆盖度大于25%时, I_{wdv} 与 $I_{v,0}$ 的差异总是为负,说明其动态范围较小,也就是信噪比较其它植被指数小。

相对而言, I_{sav} 与 $I_{v,0}$ 比较接近说明 I_{sav} 受土壤背景噪声影响小。但 I_{sav} 中由于土壤调整因子取 0.5 仅适合于植被覆盖度为 50% 左右的情形, 此时 I_{sav} 与 $I_{v,0}$ 相差最小。因此不同植被覆盖度下其中仍存在误差, 如植被覆盖度大于 50% 时, 其间仍有 -13% 左右的差异。与之相比较, I_{msav} 由于采用自我调整土壤调整因子, 因此, 其与 $I_{v,0}$ 的相差最小, 而且比较恒定, 当植被覆盖度小于 40% 时其间相差不大于 1%, 当植被覆盖度大于 40% 时, 其间相差百分数也不超过 -6.0%。 I_{sav} 与 $I_{v,0}$ 的差异百分数在 -15.0%

左右, 说明调整因子 X 的取值及土壤线参数是消除土壤背景噪声的关键, 这对使用卫星遥感资料显然不如 I_{msav} 方便。 I_{ndv} 与 $I_{v,0}$ 相差较大, 植被覆盖度小于 50% 时, 其间相差大于 20%, 当植被覆盖度逐渐增大时, 其间相差逐步缩小, I_{ndv} 与 $I_{v,0}$ 逐渐接近。综上所述, I_{msav} 不失为一种既考虑土壤背景影响, 又有土壤调整因子自我调整具有代表性的土壤调整植被指数。

为了分析在区域面上土壤调整植被指数的区域水平分布, 选取沙漠戈壁和绿洲相间的大致为 $99^{\circ}40' \sim 100^{\circ}00'E$, $39^{\circ}20' \sim 39^{\circ}30'N$ 间范围为 $15 \text{ km} \times 12 \text{ km}$ 的 AECMP95 野外实验场地, 分别计算出土壤调整植被指数 (取土壤调整因子为 0.5) 和修正的土壤调整植被指数。可以看出, I_{sav} 和 I_{msav} 的水平分布趋势比较一致, 但由于 I_{sav} 中土壤调整因子取 0.5, 其值总是大于红光反射率, 因此其将缓冲红光反射率的变化, 而 I_{msav} 中采用自我调整土壤调整因子, 使土壤背景噪声削弱更明显。因此 I_{msav} 比 I_{sav} 对下垫面植被的分级更有特色。在两种植被指数水平分布图 4 中, 最大值的最小值并无差异, 但

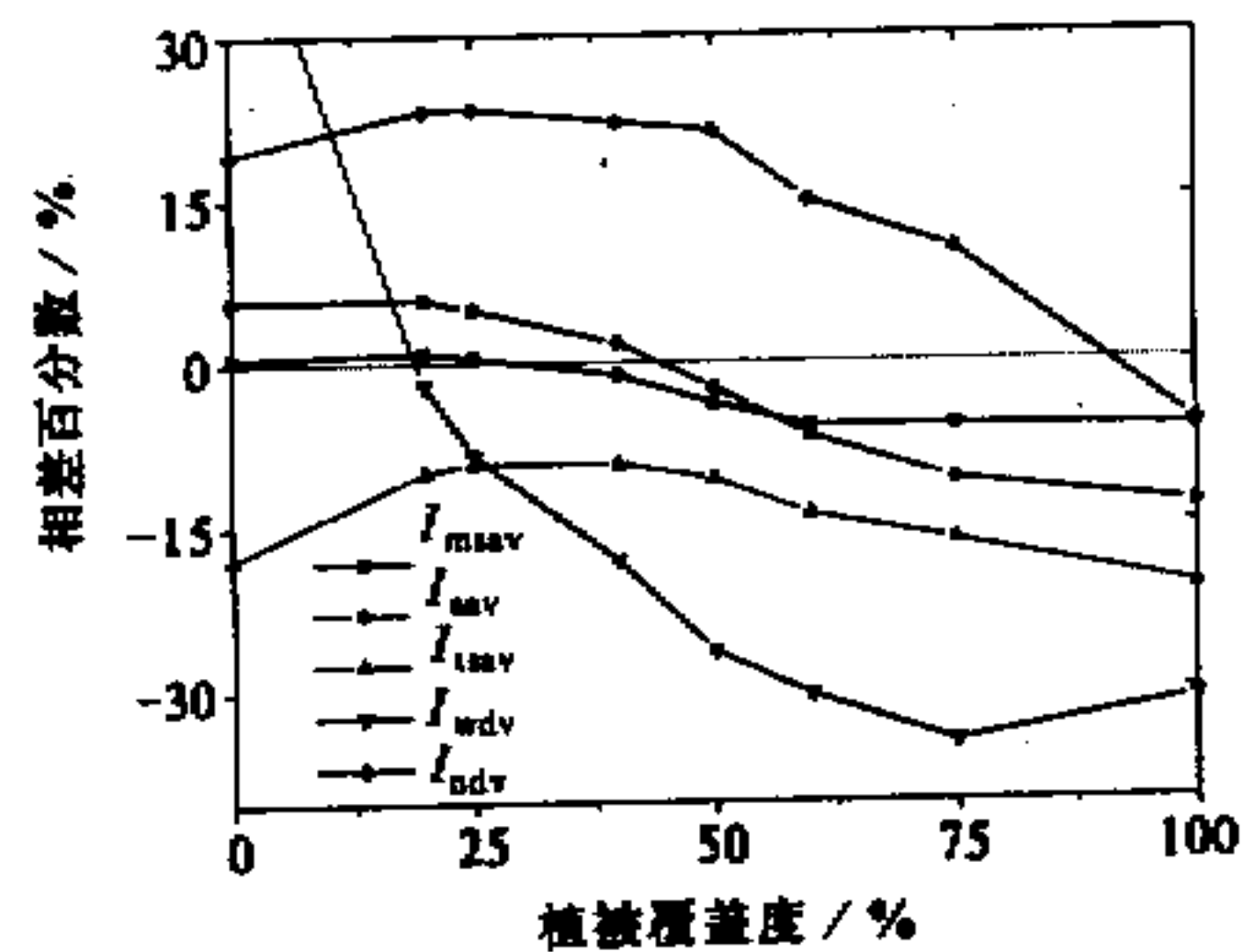


图 3 各种植被指数与最佳土壤调整因子下土壤调整植被指数的差值

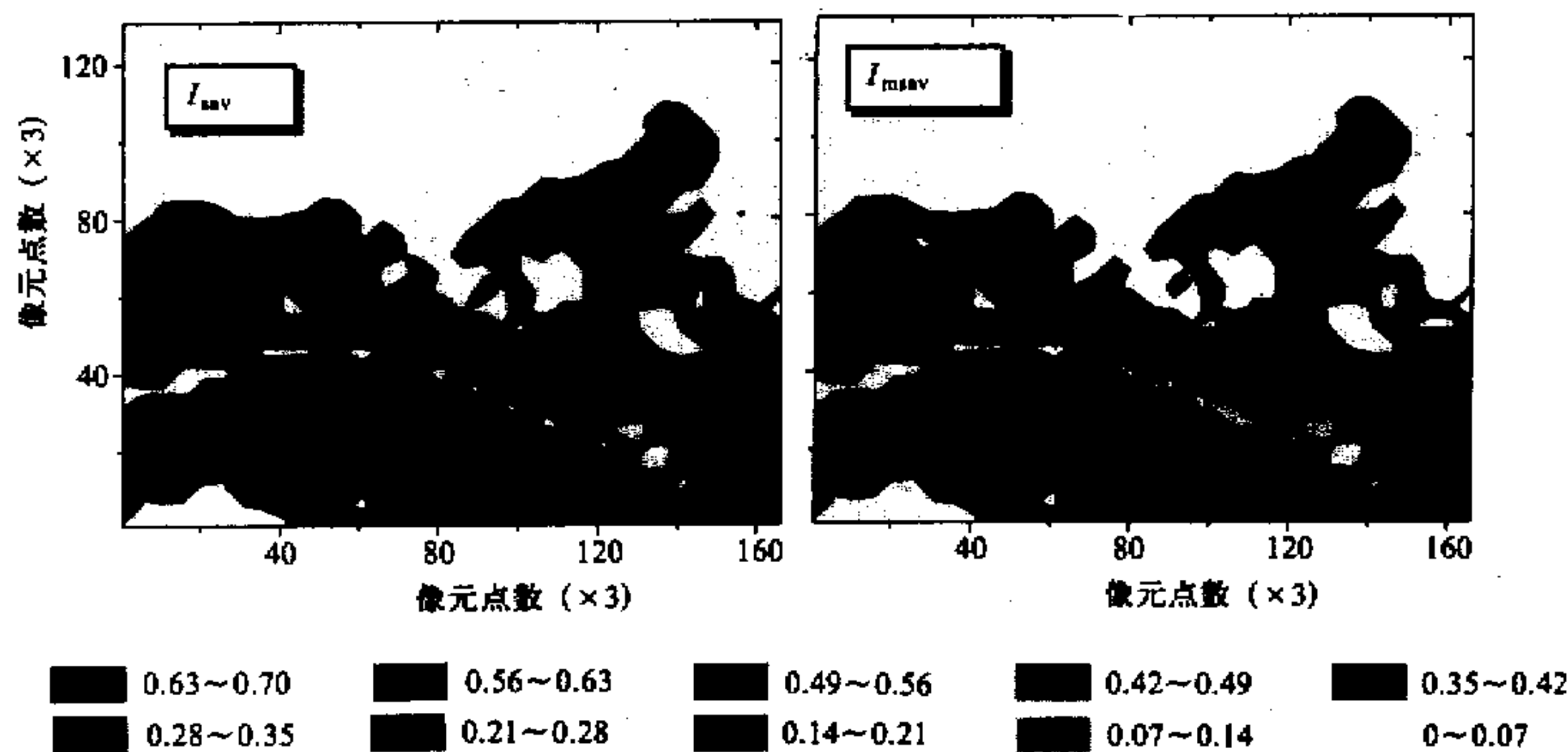


图 4 AECMP95 观测现场区域面上土壤调整植被指数的水平分布

I_{msav} 比 I_{sav} 反映的高值区要小一些,特别是对图中东北反向绿洲区和黑河南岸(图中正下方)绿洲区。同时在 I_{msav} 图中植被指数的高值区比 I_{sav} 要破碎。根据野外实地考察,我们认为 I_{msav} 所反映的植被情况更合理一些,因为在黑河流域浓密植被覆盖区一般范围较小,而且很不均匀,如玉米地和棉花地及防护林带的植被等等。同时地面观测资料分析表明,只有当 I_{ndv} 大于 0.85 时,才出现 I_{msav} 大于 I_{ndv} 的情形,此时 I_{sav} 和 I_{msav} 差异最大^[4]。当 I_{sav} 大于 0.6 时,出现 I_{msav} 明显大于 I_{sav} 的情形。在本文所选地区 I_{msav} 大于 0.6 的像元点极少,因此两种土壤调整植被指数水平分布形态一致,但 I_{msav} 所反映的绿洲区域比 I_{sav} 要小,更适合于复杂下垫面下植被的分级。另外 I_{msav} 或 I_{sav} 的动态范围比地面光谱辐射观测得到的结果小,这说明大气效应对卫星遥感资料求解植被指数的影响是极其重要的,有待进一步研究。

4 小结

本文通过对土壤调整植被指数的修正和迭代得出了一种土壤调整因子由植被指数自身调整修正的植被指数,与其它土壤调整植被指数相比,权重差值植被指数虽然削弱了土壤背景影响,但其动态范围较小,另外包括权重差值植被指数在内的土壤调整植被指数、转换土壤调整植被指数都仅适合于特定密度下的植被(或植被覆盖度),在求解时必须预先已知下垫面植被密度或覆盖度的分布特征,而修正的土壤调整植被指数不但动态范围较大,而且土壤调整因子由植被指数自身调整,因此适合于不同植被覆盖度、不同土壤背景下求解能够消除或减弱土壤背景噪声的植被指数,计算结果表明对应用卫星遥感资料求解区域面上土壤调整植被指数植被指数更有效。

参 考 文 献

- 1 朱震达、刘 恕、杨有林, 1985, 试论中国北方农牧交错区沙漠化土地整治的可能性和现实性, 地理科学, 4(3), 197~206.
- 2 王介民、马耀明, 1995, 卫星遥感在 HEIFE 非均匀陆面过程研究中的应用, 遥感技术与应用, 10(3), 19~25.
- 3 陈述彭、赵英时, 1990, 遥感地学分析, 北京: 测绘出版社, 209~220.
- 4 J. Qi, A. Chehbouni, R. Huete, Y. H. Kerr and S. Sorooshian, 1994, A modified soil adjusted vegetation index, *Remote Sens. Environ.*, 48(2), 209~220.
- 5 Viegand, C. L., Richardson, A. J., Escobar, D. E. and Gerbermann, A. H., 1991, Vegetation indices in crop assessments, *Remote Sens. Environ.*, 35(1), 105~119.
- 6 张仁华, 1996, 实验遥感模型及地面基础, 北京: 科学出版社, 104~128.
- 7 Huete, A. R., 1988, A soil adjusted vegetation index (SAVI), *Remote Sens. Environ.*, 25(2), 295~309.

A Modified Soil-Adjusted Vegetation Index Obtained from Satellite Remote Sensing Data

Wen Jun and Wang Jiemin

(Lanzhou Institute of Plateau Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

Abstract There is currently a increasing attention on obtaining vegetation distribution, type by using satellite remote sensing data, many different vegetation indexes based on normalized deferent vegetation index have been developed. These indexes, such as weighted deferent vegetation index, soil-adjusted vegetation index and transformed soil-adjusted index, can reduce the effects of soil background noise in some degree. However the vegetation density distribution or green cover must be known at first, that is to say, it only fit for undersurface which the vegetation shifted slowly. In this paper, we developed a modified soil-adjusted vegetation index, its soil-adjusted factor is self-modified only using satellite remote sensing data. The calculation results show: its dynamic range is bigger than that of other vegetation indexes, the deviation from the optimal soil-adjusted vegetation index is the smallest one among the other vegetation indexes, therefore it is very efficient to gained regional soil-adjusted vegetation index using satellite remote sensing data.

Key words vegetation index soil background green cover