

基于植被指数和地表温度特征空间的农业干旱监测模型研究综述

高磊^{1,3}, 覃志豪^{1,2}, 卢丽萍^{1,3}

(1. 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093; 2. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 3. 南京大学地理与海洋科学学院, 南京 210093)

摘要: 遥感技术是监测区域农业旱情时空变化的主要手段, 其反演的植被指数(NDVI)和地表温度(Ts)两个参数可以通过表征绿色植被对干旱胁迫生境的反应揭示土壤水分信息, 反映作物受旱状况, 但两者单独使用时均存在局限性。而基于植被指数和地表温度的二维特征空间综合了两个参数特有的生理生态意义, 不仅可以指示作物受旱时的水热胁迫环境, 同时揭示了作物在这种胁迫环境下表现出的症状, 可有效提高农业干旱监测的精度和效率。本文在较为详细地阐述植被指数-地表温度特征空间评估农业旱情的原理基础上, 综述了这方面有代表性的4个干旱监测模型, 初步分析了影响这类模型特征空间的部分非土壤水分因子, 并对它们在应用中的优缺点做了评述和总结, 为今后此领域研究中需要关注的问题做了展望。

关键词: 植被指数; 地表温度; 特征空间; 干旱监测

中图分类号: TP 79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-070X(2007)03-0001-07

0 引言

农业干旱是指因土壤供水不足导致农作物正常生长发育受阻的生态逆境现象, 一般由降水与蒸发的失衡引起。土壤含水量的降低和作物缺水枯萎都是作物遭受干旱胁迫的反映, 因此通过研究土壤水分含量^[1-3]和作物长势状况^[4-6]可以实现旱情的监测。传统基于台站网络的干旱监测方法较难获得准确及时的农业旱灾发生与发展的时空信息, 具有局限性。随着对地观测技术的发展, 多光谱、多时相遥感充分利用了大面积地物表面的光谱、时间、空间和方向特征^[7-9], 能够获得时空上连续的数据, 综合分析这些面状信息, 建立相应的遥感反演模型, 可以进一步了解大区域范围的农田土壤水分时空动态变化, 结合农田作物长势, 可以判断农业旱灾的发生与发展程度和范围, 因此遥感技术已被证明是监测区域植被生长状况和干旱胁迫的有效手段。遥感获取的植被指数和地表温度(Ts)是描述地球表面特征的两个十分重要参数, 与植被生理生化特性之间具有内在联系, 而植物生长状况的好坏又和土壤水分密切相关, 因此干旱发生时, 可通过植被指数或地表温度的变化揭示作物生理异常特征, 间接反映农田

水热胁迫环境状况。若将两者合理融合, 则可以衍生出丰富、清晰的地表植被覆盖和土壤水分含量等变化信息, 有助于更准确地认知旱情时空动态演变规律。所以, 对于植被指数和地表温度结合所蕴涵的生理生态学意义引起了诸多学者的重视^[10-12], 并开始应用于干旱监测等领域^[13-15]。

本文介绍了植被指数和地表温度应用于农业干旱监测的原理, 并针对这两个参数单独使用的局限性, 重点解释了两者的必要性和可行性, 较为详细地阐述和分析了植被指数-地表温度特征空间以及这方面现有的几个干旱监测模型, 并评述了该类方法的优缺点, 最后对将来研究中值得关注的问题提出了展望。

1 植被指数/地表温度在干旱监测中的应用

1.1 监测干旱的原理

植被指数通过绿色植物在红光和近红外波段不同反射率的各种组合实现对植被状态信息的表达^[16], 其表征的地表绿度与植被生长密度和状态密切相关, 在一定条件下能定量说明植被的生理参数, 如植物生物量和覆盖度等^[17]。对某一地区来说, 在一定的连续时间内, 气候、土壤和生产水平等都相对

稳定,只有天气变化对作物生长有短期效应^[18],降水过少导致的水分短缺会引起植物生理反应,改变叶片的光谱特征以及植被冠层的光谱反射率,因此,可以通过植被指数,依靠土壤植被水分含量和特定光谱指数之间的经验关系建立土壤含水量估算模型^[19]。有研究证明,归一化植被指数 NDVI 与深度 10 cm 处的土壤湿度相关性较好^[20-21],与绿色植物的密度和活力关系密切,能够描述地面上的生物量状态^[22-23],而且 NDVI 和降雨之间也有显著的相关性^[24-26],在干旱和半干旱地区,甚至可以直接通过与降雨进行比较来评估旱情^[27-28];Peters 等^[29]对 NDVI 偏离历年平均值的程度进行归一化,采用概率函数的形式估测植被干旱状态,证明植物指数与水分状态密切相关,确实可用来监测干旱。地表温度(T_s)综合了大气-土壤-植被系统内物质(水分)和能量(热能)交换的结果,可反映表土含水量的变化,进而揭示植物覆盖量的潜力^[30]。同时,地表温度的高低还可用来间接判断地表水分蒸散状况^[31]——当作物受到干旱胁迫时,为减少蒸腾引起的水分散失,叶片气孔自卫性关闭,导致潜热通量减少,根据能量平衡原理,感热通量必然增加,因而叶面温度会上升。这种热反应的敏感性使得 T_s 在植被覆盖度降低甚至植被光谱指数发生变化之前就会升高,因此地表(冠层)温度的异常升高是作物水分胁迫和干旱先兆的良好指标。Gutman^[28]、Kogan^[32]及 Vogt^[33]等研究证明,利用卫星遥感的热红外波段,可有效地反映与水分胁迫有关的植被热状况,从而使得遥感监测农业旱情的方法在利用植被指数的基础上又增加了热红外波段的应用。

1.2 植被指数和地表温度相结合监测干旱的必要性

上述通过植被指数/地表温度法监测干旱的实质都是通过作物在水分胁迫的逆境下表现出来的一些生长发育和生理反应特性,间接推算土壤水分的亏缺状况或干旱的严重程度,仅采用二者之一时都存在某些不足,例如地理位置、气候类型、作物品种和分布的不同对 NDVI 均有影响,而 NDVI 法只能孤立性地反映天气因素的情况,很难用统一的定量标准来判断作物长势和监测旱涝灾害的程度^[34]。NDVI 只考虑植被状态,而植物在受水分胁迫时短期内仍能保持原有绿色,所以它是一个比较保守的植被水分胁迫指标^[35],在时间上有滞后性,无法反映突然出现的干旱事件。干旱监测中必须考虑植物的有效水分^[36],不同生长期影响植物生长的有效水分各不相同,在分析 NDVI 的时间序列和降雨关系时若没有考虑到季节变化尺度,也会产生不精确的结果^[37]。地表温度法是基于土壤含水量与地

表(冠层)温度之间此消彼长的内在关系,但影响遥感地表温度测量的因素众多:地气之间传导、对流和辐射等热交换方式会改变能量平衡状态时的地表温度^[39];植被覆盖度的大小会影响地表温度的测量^[40],在无植被区域测量到的是土壤表面温度,在植被较多的区域,则是植被冠层的表面温度^[41];而一般情况下,地表温度是由土壤、植被及建筑等不同地物类型组成的混合像元的温度,会随着卫星观测角而变化^[42]。因此,仅仅利用遥感地表热辐射信息探测土壤水分状况无法排除以上等各因素对表面温度变化造成的影响,在监测旱情时也会产生片面性。为了避免单独依据植被指数或地表温度监测干旱时存在的缺陷,有必要将二者结合起来使用。

1.3 植被指数和地表温度相结合监测干旱的可行性

鉴于单独利用植被指数或地表温度监测农业干旱均有各自的局限性,很多学者试图将两者结合起来,充分利用植被指数与地表温度的互补特性提供的作物水分亏缺信息来监测旱情。Oke^[43]研究发现,与地表温度相关的潜热和感热状况可以反映地表土壤含水量和植被覆盖度的变化信息:在植被覆盖度高的地区,潜热通量较多;反之,感热通量较多。由此可见,地表温度和植被覆盖度之间的关系对于监测植被生理状况的重要性^[44-47]。

在一定生长期内,影响作物生长的其它条件相对变化不大时,若土壤供水正常,则遥感反演的植被指数和作物冠层温度将稳定在一定的范围;当遇到旱情时,作物生长发育必然受到影响,植被指数将降低,同时,由于没有足够的水分供给叶子表面蒸腾,叶面温度增高,使得冠层温度随之升高。植物体具有的这些生理生长非正常变化特征成为作物受到干旱胁迫的指示器,结合植被指数和地表温度监测作物覆盖下的土壤水分状况,其机理便是基于植被在光谱和热辐射等方面同时表现出的这些特征来间接实现的。Goetz^[35]指出, T_s 和 NDVI 之间的负相关关系主要是由于植被覆盖度和土壤湿度的变化,水分胁迫时下垫面温度会急剧升高。Nemani^[48]发现, T_s 与 NDVI 的斜率与作物水分指数呈负相关, $T_s/NDVI$ 的比值在干旱发生时增大。目前在这方面的研究热点是利用 NDVI 和 T_s 的特征空间,结合气象数据以及基于过程的模型对干旱状况进行更详细的机理性解释。

2 NDVI - T_s 特征空间及相关干旱监测模型

2.1 NDVI - T_s 特征空间简介

NDVI - T_s 构筑的二维特征空间与地表植被覆盖和土壤水分状况有非常密切的联系。基于 NDVI

- T_s 散点图,很多学者对二者的关系进行了深入研究,发现当区域植被覆盖度范围较大时,NDVI - T_s 特征空间有两种情况:一种是在不同土壤表层含水量和地表覆盖条件下,通过 T_s 和 NDVI 的比率表现出的三角形空间^[49-52];另一种是在作物缺水指数(CWSI, Crop Water Stress Index)基础表现出的梯形空间^[18, 48]。Lambin^[7]从土壤蒸发、植被蒸腾及植被覆盖度间的关系出发,对 NDVI - T_s 空间做了系统的分析,认为在以植被指数为横坐标,地表温度为纵坐标的特征空间中,通过散点图的干湿边,可以确定相同植被覆盖度下因土壤供水不同而形成的温度变化的干湿边界,并以此为基准条件估算像元点土壤水分;像元点在特征空间中的位置信息在反映该像元植被覆盖状况的同时,还可以利用其温度信息与同一植被覆盖状况下干湿边界的对比,提取土壤水分信息。以 NDVI - T_s 特征空间建立的各种土壤水分估算或干旱监测模型,基本都以这一原理为基础^[53]。

2.2 基于 NDVI - T_s 特征空间的干旱监测模型

2.2.1 植被供水指数模型

干旱发生时作物水分亏缺,生长受到影响,归一化植被指数降低,冠层温度升高,因此利用它们的简单比值可以反映干旱状况。Carlson^[54, 55]综合考虑了作物受旱时在红光、近红外及热红外波段上的反应,提出了植被供水指数(VSWI, Vegetation Supply Water Index),表示为

$$VSWI = NDVI/T_s \quad (1)$$

VSWI 越小,旱情越严重。该指数适用于植被覆盖区,尤其在作物覆盖良好的情况下非常有效。由于其同时考虑了植被指数和作物冠层温度对植被生长环境中水分胁迫强弱的响应,物理意义明确,参数组合简单,易于实现,在我国应用较多。刘丽等^[56]、莫伟华等^[57]使用该方法进行干旱遥感监测均取得了良好的效果。但 VSWI 法也存在一些问题:在作物生长前期地表植被较少时,该法往往会夸大植被的作用;且其所反映的干旱环境背景无法与农业干旱明确区分,在实际运用中要参考地面气象数据做区域订正,使之与地面真实旱情相吻合^[58]。

2.2.2 水分亏缺指数模型

在植被覆盖区,土壤水分的盈亏直接影响植被蒸腾作用,进而导致冠层温度发生变化。Moran 等考虑到 Idso 等^[59]提出的作物缺水指数(CWSI)中多数理论参数与植被覆盖度有近线性关系,以及完全植被覆盖和裸土条件下的很多参数相对容易获取这两个原因,对其应用范围进行扩展,建立了水分亏缺指数(WDI, Water Deficit Index)模型^[18]。如图 1,

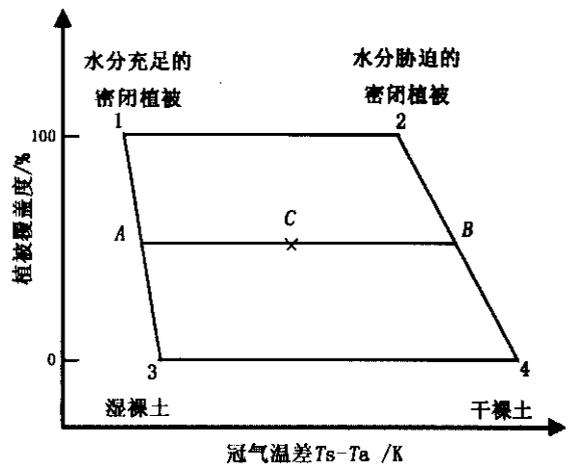


图 1 WDI 梯形特征空间(1~3 为干边 2~4 为湿边)^[18]

其以冠气温差为横坐标,以植被指数体现的覆盖度为纵坐标,构建梯形特征空间,其中 1~4 分别代表水分充足和水分胁迫时的密闭植被以及湿润裸土和干燥裸土。一定植被覆盖度下的 WDI 定义为

$$WDI = \frac{\Delta T - \Delta T_{i,13}}{\Delta T_{i,24} - \Delta T_{i,13}} \quad (2)$$

式中, $\Delta T_{i,13}$ 、 $\Delta T_{i,24}$ 、 $\Delta T_{i,13}$ 分别为某一植被覆盖度下以及湿边、干边上的冠气温差。对照图形可以看出,WDI 实际上就是线段 AC 与 AB 长度的比值。

WDI 是在 CWSI 基础上,假设土壤与植被冠层之间没有感热交换,结合冠气温差与植被指数得到的区域干旱指标。在作物生长初期冠层稀疏时反演精度较 CWSI 好,并且克服了后者只能应用于观测点尺度的郁闭植被冠层条件的缺陷。但是其梯形特征空间 4 个顶点的确定是从蒸散发和能量平衡的角度推导出来的,需要气象数据的配合。同时,尽管 WDI 与 CWSI 非常相近,但其定义与作物水分胁迫并不严格相关,因为它同时考虑到了裸土的蒸发。因此,WDI > 0 时并不一定像 CWSI 那样表示作物出现水分胁迫,遥感视角里出现的无水胁迫植被以及干土等也会导致其值大于 0^[60];另外,在炎热干旱的夏季,土壤背景温度与冠层温度相差较大时,忽略土壤与冠层之间的感热通量会导致 WDI 与 CWSI 有较大差异,从而降低了 WDI 的适用性^[61]。

2.2.3 温度植被干旱指数模型

Sandholt 等^[40]发现在简化的植被指数 - 地表温度特征空间中有很多等值线,提出了温度植被旱情指数(TVDI, Temperature Vegetation Dryness Index)。在该特征空间中(图 2),湿边($T_{s_{min}}$)简化为与 NDVI 轴平行的直线,旱边($T_{s_{max}}$)与 NDVI 成线性关系,表达式为

$$TVDI = \frac{T_s - T_{s_{max}}}{T_{s_{max}} - T_{s_{min}}} = \frac{T_s - T_{s_{min}}}{a + b NDVI - T_{s_{min}}} \quad (3)$$

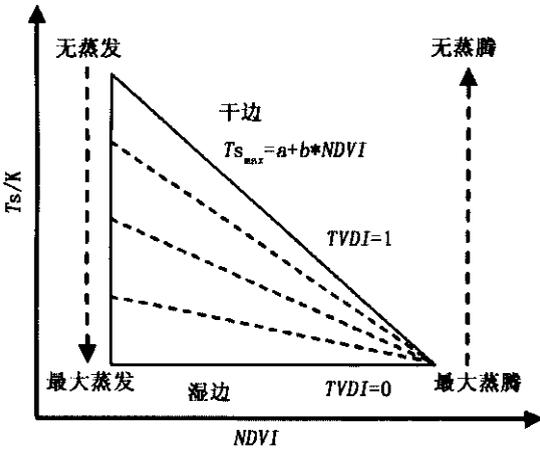


图 2 简化的 NDVI - Ts 特征空间^[40]

式中, T_s 为研究区像元的地表温度; $T_{s_{min}}$ 为某一 $NDVI$ 值时的最低地表温度, 对应湿边时 $TVDI = 0$; $T_{s_{max}}$ 为某一 $NDVI$ 值时的最高地表温度, 对应干边时 $TVDI = 1$ 。 $TVDI$ 越接近 1, 土壤湿度越低。

$TVDI$ 通过统计特征空间中的数据确定顶点与干湿边, 不需要其它辅助数据, 比 WDI 方便实用, 可以定性地反映土壤湿度情况。但为了使特征空间的边界具有代表性, 影像覆盖范围必须有裸土到密闭植被的变化, 而且它在不同时间和区域不具有可比性, 不适宜大面积地区^[58], 同时对特征空间的干湿边物理意义也缺乏严格定义, 边界拟合具有一定主观性^[62]。

2.2.4 条件植被温度干旱指数

为了解决条件植被指数(VCI)^[15]、条件温度指数(TCI)^[32]及距平植被指数(AVI)^[63]等 3 种模型造成的某一特定时期内不同像素间监测结果的可比性较差这一问题, 王鹏新等^[64, 65]提出了条件植被温度指数($VTCI$, Vegetation Temperature Condition Index)的概念, 即

$$VTCI = \frac{T_{s_{max}}(NDVI_i) - T_s(NDVI_i)}{T_{s_{max}}(NDVI_i) - T_{s_{min}}(NDVI_i)} \quad (4)$$

$$T_{s_{max}}(NDVI_i) = a + bNDVI_i \quad (5)$$

$$T_{s_{min}}(NDVI_i) = a' + b'NDVI_i \quad (6)$$

式中, $T_{s_{max}}$ 和 $T_{s_{min}}$ 分别为在研究区内当 $NDVI_i$ 等于某一特定值时的地表温度最大值和最小值; a 、 b 、 a' 、 b' 为待定系数, 可通过研究区 $NDVI$ 和 T_s 的散点图近似获得。 $VTCI$ 的取值范围为 $[0, 1]$, 其值越小表示干旱程度越严重。从定义看, $VTCI$ 可解释为 $NDVI$ 值相等时 T_s 差异的比率, 强调了相同植被覆盖下 T_s 的变化(图 3)。 $T_{s_{max}}$ 被认为是“热边界”, 土壤水分的有效性很低, 干旱程度最严重; $T_{s_{min}}$ 被认为是“冷边界”, 在此边界上土壤水分不是植物生长的限制因素。

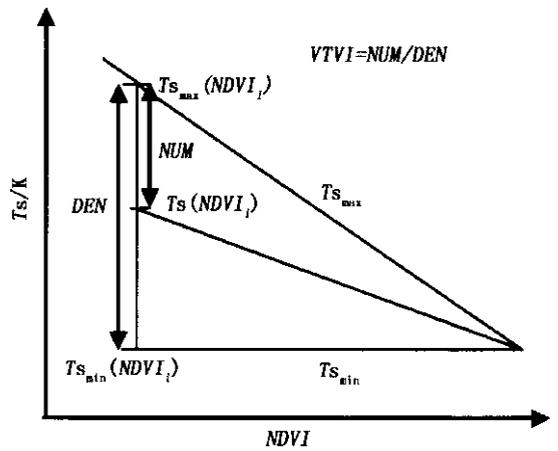


图 3 VTCI 三角形特征空间^[65]

指数的变化, 又考虑了在植被指数相同条件下地表温度的变化, 可以反映特定年内某一时期整个区域相对干旱程度及其变化规律^[65]。研究表明, $VTCI$ 与近期及前几个月的累计降水均有关, 是一种近实时的干旱监测方法^[52]。 $VTCI$ 干旱模型的不足之处在于对所选择的研究区域要求较高, 除了 $NDVI$ 值的动态变化范围要大外, 土壤表层含水量的动态变化范围应从萎蔫含水量到田间持水量。在实际应用中, 与 $TVDI$ 一样, 冷热边界的确定方法需进一步完善。

3 NDVI - Ts 特征空间影响因子的初步分析

基于 $NDVI - T_s$ 特征空间模型进行干旱监测的原理是地表(土壤或植被冠层表面)水分的蒸散通过控制表面的能量平衡影响表面温度的高低。地表水分状况是决定 $NDVI - T_s$ 空间关系的重要因素, 但并非唯一因素。任何能影响地表能量平衡的因子均会对平衡状态的 T_s 产生影响并最终改变模型的监测结果。一般说来, $NDVI$ 在较短的监测周期内相对稳定, 变动不是很大, 而地表温度日变化是动态的, 因此卫星过境时间会影响 $NDVI - T_s$ 关系, 利用 MODIS 遥感器对同一地区上下午反演的土壤湿度可能有较大差别; 纬度决定太阳入射辐射, 研究区纬度跨度较大时, 即使土壤湿度和植被覆盖相同, 纬度差异也会引起地表温度不同进而改变特征空间与土壤湿度的关系^[66]; 气温通过大气与下垫面的湍流热交换影响地表温度, 用 DEM 可以对地表温度进行简单的高程订正^[67], 但无法排除坡度、坡向等对高程与气温关系的影响以及水汽压、大气动力等对气温与地温关系的影响, 地形阴影、云影区或在卫星过境前云影掠过的地区, 地表辐射能量平衡同样会受到干扰从而影响地表温度。在利用 $NDVI - T_s$ 特征空间的干旱监测模型中若不综合考虑这些因

条件植被温度指数既考虑了区域内归一化植被

素,会引起一定的偏差。

4 结论与展望

农业干旱的发生有着及其复杂的机理,受降水、温度、地形、作物类型及布局等影响,其监测模型也涉及到大气、作物和土壤环境等各个方面。利用遥感数据反演的参数作为干旱指标已经发展了几十年,应用最多的有NDVI产品和 T_s 产品^[68]。单独应用NDVI或 T_s 产品的干旱监测模型都有局限性,无法合理揭示农业干旱出现时作物水热胁迫环境和症状的耦合反应。综合应用NDVI和 T_s 的模型,将两者信息集成在一个三角形或梯形的二维特征空间中,在考虑到不同植被覆盖影响的同时,利用相同植被覆盖下下垫面温度的差异主要与土壤水分状况有关的特性,通过一些指数形式推算土壤含水量。实际应用中,特征空间的形状应根据研究区植被状况或遥感数据源来选择,当植被覆盖度较低或使用航空遥感数据时,宜采用三角形特征空间;植被覆盖度较大或使用卫星遥感数据时,采用梯形特征空间更好^[69]。

NDVI- T_s 特征空间集成模型在干旱监测中具有突出的优势,它所需遥感参数少,物理意义明确,与单独使用NDVI或 T_s 的模型相比,提高了作物干旱状况的遥感监测精度;与需要输入气象数据的基于过程的模型相比,提高了模型运行的效率和实用性,有利于业务化工作的开展。一般来说,其应用于干旱环境背景的地区时可靠性更高,指示性更强;这类模型的缺点则在于对研究区域的特点,如土壤表层含水量和植被覆盖度的范围等往往要求较高,且对冠层温度和植被指数的反演精度以及干湿边拟合准确度的敏感性很强,尤其对于干湿边拟合的物理意义缺乏严格定义,目前在确定时往往带有很大的主观性,而且对于地表温度来说,除了受土壤水分因子的控制外,还有其它非土壤水分因子的影响。

综上所述,基于植被指数-地表温度特征空间的干旱监测模型使得这两个反映地表特征最重要的参数有机结合,优势互补,是农业干旱遥感探测的重要发展方向,在今后相关的研究和工作中需要关注的方面有:

(1)比较各种不同的干旱指数,寻求在各种尺度上能明确反映干旱胁迫时序演变和空间分异的最佳干旱指标。

(2)在反映干旱环境的基础上,合理界定出农业干旱的阈值,并且对干旱指数在雨养农业区和灌溉农业区的不同表现进行详细考察,增强农业干旱

监测的针对性和在不同时空尺度上的可比性。

(3)目前MODIS数据应用越来越普遍,但它的NDVI容易饱和,会影响高密度高生物量植被监测时的精度,因此需要探索其它植被指数,如叶面积指数(LAI)、增强型植被指数(EVI)等在与地表温度结合监测干旱方面的适用性。

(4)进一步在机理上发掘植被指数-地表温度特征空间所蕴含的植被生理生态学涵义,考虑如何在特征空间中合理融合气象资料、土壤属性及作物类型等辅助数据,以便更好地为农业旱情定量监测提供参考。

参考文献

- [1] 张仁华. 实验遥感模型及地面基础[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [2] 刘志明, 张柏, 晏明, 等. 土壤水分与干旱遥感研究的进展与趋势[J]. 地球科学进展, 2003, 18(4): 576-581.
- [3] 刘晓英, 郝卫平, 张健. 农田尺度下干旱指标及应用[J]. 中国农业气象, 2005, 26(2): 99-105.
- [4] 杨邦杰, 裴志远. 农作物长势的定义与遥感监测[J]. 农业工程学报, 1999, 15(3): 214-218.
- [5] 冯强, 田国良, 王昂生, 等. 基于植被状态指数的全国干旱遥感监测试验研究——资料分析与处理部分[J]. 干旱区地理, 2004, 27(2): 131-136.
- [6] 李星敏, 刘安麟, 王钊, 等. 植被指数差异在干旱遥感监测中的应用[J]. 陕西气象, 2004, (5): 172-191.
- [7] Lambin E F, Ehrlich D. The Surface Temperature-vegetation Index for Land Cover and Land Cover Change Analysis[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17: 463-487.
- [8] Liu W T, Kogan F N. Monitoring Regional Drought Using the Vegetation Condition index[J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17: 2761-2782.
- [9] Li Shengxiu, Xiao Ling. Distribution and Management of Dryland in the People's Republic of China[J]. Advances in Soil Science, 1992, 18: 148-278.
- [10] Justice Townshend, Holben B H, Tucker C J. Analysis of the Phenology of Global Vegetation Using Meteorological Satellite Data[J]. International Journal of Remote Sensing, 1985, 6: 1271-1381.
- [11] 刘良云, 张兵, 郑兰芬. 利用温度和植被指数进行地物分类和土壤水分反演[J]. 红外与毫米波学报, 2002, 21(4): 269-273.
- [12] 江东, 王乃斌, 等. 植被指数-地面温度特征空间的生态学内涵及其应用[J]. 地理科学进展, 2001, 20(2): 146-152.
- [13] Wang C, Qi S, Niu Z, et al. Evaluating Soil Moisture Status in China Using the Temperature-vegetation Dryness Index (TVDI)[J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2004, 30(5): 671-679.
- [14] Szilagyi J. Can a Vegetation Index Derived from Remote Sensing be Indicative of Areal Transpiration?[J]. Ecological Modeling, 2000, 127: 65-79.
- [15] Kogan F N. Remote Sensing of Weather Impacts on Vegetation in

- Non-homogeneous Areas[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1990, 11 : 1405 - 1419.
- [16] 陈述彭, 童庆禧, 郭华东. 遥感信息机理研究[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [17] Lillesand T M, R W Kiefer. *Remote Sensing and Image Interpretation*[M]. New York: John Wiley and Sons Inc, 2000.
- [18] Moran M S, Clarke T R, Inoue U, et al. Estimating Crop Water Deficit Using the Relation Between Surface Air Temperature and Spectral Vegetation Index[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1994, 49 : 246 - 263.
- [19] Ceccato P, Flasse S, Tarantola S, et al. Detecting Vegetation Water Content Using Reflectance in the Optical Domain[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2001, 77 : 22 - 33.
- [20] 张树普, 赵杰明, 袁亚社, 等. NOAA/AVHRR 资料在陕西省干旱动态监测中的应用[J]. *中国农业气象*, 1998, 19(5) : 26 - 32.
- [21] 詹志明, 冯兆东. 区域遥感土壤水分模型的方法初探[J]. *水土保持研究*, 2002, 9(3) : 227 - 230.
- [22] Bannari A, D Morin, F Bonn. A Review of Vegetation Indices [J]. *Remote Sensing Reviews*. 1995, 13 : 95 - 120.
- [23] Justice C O, Townshend J R G, Holben B N, et al. Analysis of the Phenology of Global Vegetation Using Meteorological Satellite Data [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1985, 8 : 1271 - 1318.
- [24] Li B, Tao S, Dawson R W. Relation Between AVHRR - NDVI and Ecoclimatic Parameters in China[J]. *International Journal of Remote Sensing* 2002, 22 : 989 - 999.
- [25] Rundquist B C, Harrington J A, Goodin D G. Mesoscale Satellite Bioclimatology[J]. *Professional Geographer* 2000, 52 : 331 - 334.
- [26] Wang J, Rich P M, Price K P. Temporal Response of NDVI to Precipitation and Temperature in the Central Great Plains, USA [J]. *International Journal of Remote Sensing* 2003, 24 : 2345 - 3364.
- [27] Tucker C J. Comparing SMMR and AVHRR Data for Drought Monitoring[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1989, 10 : 1663 - 1672.
- [28] Gutman G G. Towards Monitoring Drought from Space[J]. *Journal of Climate*, 1990, 3 : 282 - 295.
- [29] Peters A J, Walter - Shea E A, Ji L. Drought Monitoring with NDVI - based Standardized Vegetation Index[J]. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 2002, 68 : 71 - 75.
- [30] Owen T W, Carlson T N, Gillies R R. An Assessment of Satellite Remotely - sensed Land Cover Parameters in Quantitatively Describing the Climatic Effect of Urbanization[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1998, 19 : 1663 - 1681.
- [31] Park S, Feddemab J J, Egberta S L. Impacts of Hydrologic Soil Properties on Drought Detection with MODIS Thermal Data[J]. *Remote Sensing of Environment* 2004, 89 : 53 - 62.
- [32] Kogan F N. Application of Vegetation Index and Brightness Temperature for Drought Detection[J]. *Advances in Space Research*, 1995, 15(11) : 91 - 100.
- [33] Vogt J V, Niemeyer S, Somma F, et al. Drought Monitoring from Space[J]. *Advanced in Natural and Technological Hazards Research*, 2000, 14 : 167 - 183.
- [34] 蔡斌, 陆文杰, 郑新江. 气象卫星条件植被指数监测土壤状况[J]. *国土资源遥感*, 1995, (4) : 45 - 50.
- [35] Goetz S J. Multisensor Analysis of NDVI, Surface Temperature and Biophysical Variables at a Mixed grassland Site[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(1) : 71 - 94.
- [36] Teare I D, Peet M M. *Crop - Water Relations*[M]. New York : AWIP, 1983.
- [37] 张超, 王纪华, 赵春江, 等. 利用多时相遥感影像监测季节性裸露农田[J]. *农业工程学报*, 2005, 21(11) : 90 - 94.
- [38] 陆文杰, 李正浩. 植被指数序列中的天气影响评估[J]. *中国农业气象*, 1996, 17(2) : 36 - 40.
- [39] 张仁华. 对定量热红外遥感的一些思考[J]. *国土资源遥感*, 1999, (1) : 1 - 7.
- [40] Sandholt, Rasmussen K, Anderson J. A Simple Interpretation of the Surface Temperature/vegetation Index Space for Assessment of the Surface Moisture Status[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79 : 213 - 224.
- [41] Goward S N, Xue Y, Czajkowski K P. Evaluating Land Surface Moisture Conditions from the Remotely Sensed Temperature - vegetation Index Measurements : An Exploration with the Simplified Simple Biosphere Model[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79 : 225 - 242.
- [42] 覃志豪, 高懋芳, 秦小敏, 等. 农业旱灾监测中的地表温度遥感反演方法——以 MODIS 数据为例[J]. *自然灾害学报*, 2005, 14(4) : 64 - 71.
- [43] Oke T R. The Energetic Basis of the Urban Heat Island[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1982, 108 : 1 - 24.
- [44] Weng Q. A Remote Sensing - GIS Evaluation of Urban Expansion and Its Impact on Surface Temperature in the Zhujiang Delta, China[J]. *International Journal of Remote Sensing* 2001, 22 : 1999 - 2014.
- [45] Clarke T R. An Empirical Approach for Detecting Crop Water Stress Using Multispectral Airborne Sensors[J]. *Hort Technology*, 1997, 7(1) : 9 - 16.
- [46] Gillies R R, Carlson T N, Gui J. A Verification of the ' Triangle ' Method for Obtaining Surface Soil Water Content and Energy Fluxes from Remote Measurements of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) and Surface Radiant Temperature[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1997, 18(15) : 3145 - 3166.
- [47] Sobrino J A, Raissouni N. Toward Remote Sensing Methods for Land Cover Dynamic Monitoring : Application to Morocco[J]. *International Journal of Remote Sensing* 2000, 21 : 353 - 366.
- [48] Nemani R R, Pierce L, Running S. Developing Satellite - derived Estimates of Surface Moisture Status[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1993, 32(3) : 548 - 557.
- [49] Price J C. Using Spatial Context in Satellite Data to Infer Regional Scale Evapotranspiration[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1990, 28 : 940 - 948.
- [50] Carlson T N, Capehart W J, Gillies R R. A New Look at the Simplified Method for Remote Sensing of Daily Evapotranspiration[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 54 : 161 - 167.
- [51] Gillies R R, Carlson T N. Thermal Remote Sensing of Surface Soil Water Content with Partial Vegetation Cover for Incorporation into Climate Models[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1995, 34 : 745 - 756.

- [52] Wan Z M , Wang P X , Li X W. Using MODIS Land Surface Temperature and Normalized Difference Vegetation Index Products for Monitoring Drought in the Southern Great Plains , USA[J]. International Journal of Remote Sensing , 2003 , 24 : 1 - 12.
- [53] 王昌佐. 基于温度 - 植被指数空间的土壤水分遥感及农业应用研究 [D]. 北京师范大学 , 2004.
- [54] Carlson T N et al. Remote Sensing Estimation of Soil Moisture Availability and Fractional Vegetation Cover for Agricultural Fields [J]. Agricultural and Forest Meteorology , 1990 , 52 : 45 - 69.
- [55] Carlson T N , et al. A Method to Make Use of Thermal Infrared Temperature and NDVI Measurement to Infer Surface Soil Water Content and Fractional Vegetation Cover [J]. Remote Sensing Environment , 1994 , 9 : 161 - 173.
- [56] 刘丽 , 周颖 , 杨凤 , 等. 用遥感植被供水指数监测贵州干旱 [J]. 贵州气象 , 1998 , 22(6) : 17 - 21.
- [57] 莫伟华 , 王振会 , 孙涵 , 等. 基于植被供水指数的农田干旱遥感监测研究 [J]. 南京气象学院学报 , 2006 , 29(3) : 396 - 401.
- [58] 田国良 , 等. 红外遥感 [M]. 北京 : 电子工业出版社 , 2006.
- [59] Idso S B , Jackson R D , Pinter P J , et al. Normalizing the Stress Degree Day for Environmental Variability [J]. Agricultural Meteorology , 1981 , 24 : 45 - 55.
- [60] 齐述华 , 张源沛 , 牛铮 , 等. 水分亏缺指数在全国干旱遥感监测中的应用研究 [J]. 土壤学报 , 2005 , 42(3) : 367 - 372.
- [61] Paul D C , Edward M B , Thomas R C , et al. Water Stress Detection Under High Frequency Sprinkler Irrigation with Water Deficit Index [J]. Journal Of Irrigation And Drainage Engineering , 2003 , 1 : 36 - 43.
- [62] 齐述华 , 王长耀 , 牛铮 , 等. 利用温度植被旱情指数(TVDI) 进行全国旱情监测研究 [J]. 遥感学报 , 2003 , 7(5) : 420 - 427.
- [63] 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.
- [64] 王鹏新 , 龚健雅 , 李小文. 条件温度植被指数及其在干旱监测中的应用 [J]. 武汉大学学报(信息科学版) , 2001 , 26(5) : 412 - 418.
- [65] 王鹏新 , Wan Z M , 龚健雅 , 等. 基于植被指数和土地表面温度的干旱监测模型 [J]. 地球科学进展 , 2003 , 18(4) : 527 - 533.
- [66] Nemani R R , Running S W. Estimation of Regional Surface Resistance to Evapotranspiration from NDVI and Thermal IR AVHRR Data [J]. Journal of Applied Meteorology , 1989 , 28 : 276 - 284.
- [67] 冉琼 , 张增祥 , 张国平 , 等. 温度植被干旱指数反演全国土壤湿度的 DEM 订正 [J]. 中国水土保持科学 , 2005 , 3(2) : 32 - 36.
- [68] Mc Vicar T R , Jupp D L B. The Current and Potential Operational Use of Remote Sensing to Aid Decisions on Drought Exceptional Circumstances in Australia : A Review [J]. Agricultural System , 1998 , 57 : 399 - 468.
- [69] 韩丽娟 , 王鹏新 , 王锦地 , 等. 植被指数 - 地表温度构成的特征空间研究 [J]. 中国科学 D 辑 , 2005 , 35(4) : 371 - 377.

AN OVERVIEW ON AGRICULTURAL DROUGHT MONITORING MODELS BASED ON VEGETATION INDEX AND SURFACE TEMPERATURE FEATURE SPACE

GAO Lei^{1,3} , QIN Zhi - hao^{1,2} , LU Li - ping^{1,3}

(1. International Institute for Earth System Science of Nanjing University , Nanjing 210093 , China ; 2. Institute of Natural Resources and Regional Planning , Chinese Academy of Agricultural Sciences , Beijing 100081 , China ; 3. School of Geography and Ocean Science of Nanjing University , Nanjing 210093 , China)

Abstract : Remote sensing technology is the major method for monitoring temporal and spatial changes of regional agricultural drought , from which both the vegetation index(NDVI) and the surface temperature (Ts) derived can reveal information of soil water content and drought - suffering status of crops via indicating the response of green vegetation to drought intimidation habitat. Nevertheless , there still exist some limitations when only one of the two parameters is used. The two - dimensional feature space based on NDVI and Ts integrates the physiological and ecological connotations of both parameters , and hence can not only indicate the water - heat threat environment when drought occurs but also display the symptom of crops , thus effectively improving the precision and efficiency of agricultural drought monitoring. Based on a detailed description of the principle of applying NDVI - Ts space to the evaluation of agricultural drought , this paper deals with four representative models for drought monitoring , preliminarily analyzes some non - soil - moisture factors affecting the space , and sums up their advantages and disadvantages in application. Some problems worthy of further attention in this field are also discussed.

Key words : Vegetation index ; Surface temperature ; Feature space ; Drought monitoring

第一作者简介 : 高磊 (1982 -) , 男 , 硕士 , 主要从事农业干旱监测、生态遥感、GIS 应用等方面的研究。

(责任编辑 : 李 瑜)