

## 基于多维光谱空间的干旱指数

刘芳<sup>1</sup>, 詹志明<sup>2</sup>, 冯海霞<sup>1</sup>, 赵少华<sup>2</sup>

(1. 北京大学地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 环境保护部卫星环境应用中心, 北京 100094)

**摘要:** 遥感干旱指数是用遥感数据定量描述区域受旱程度以及作物产量灾损的机理性数学模型. 干旱指数在农业、林业和生态环境监测方面有较高的研究价值与非常广阔的应用前景, 是当前的研究前沿和热点之一. 介于遥感干旱指数起步至今还未形成研究系统, 开展了这方面工作的梳理和归纳. 首先, 对多维光谱特征空间概念作延伸, 将多维光谱特征空间的多维变量由光谱值拓展为与一切干旱相关的遥感产品, 将光谱特征统一归纳到多维坐标框架当中, 使得干旱指数的数学建模意义更明确, 构造更清晰; 其次, 对30种干旱指数进行归纳, 从“三要素”的角度将干旱指数分为四类, 并评价其各自优势和局限性, 将干旱遥感监测模型家族抽象为一个金字塔形式, 从底层到顶层分析模型家族的一般构成要素和复合形式, 解析干旱指数通用的数学构建规律及其物理内涵; 最后, 分析大气影响、土壤、传感器差异等环境影响因素, 指出干旱指数未来发展重点在数据源、监测对象、表达形式三个方面. 通过对干旱指数的研究工作有助于进一步完善发展干旱指数体系, 推进干旱遥感监测模型在农情遥感监测、水资源规划和环境科学管理等领域的应用.

**关键词:** 地物波谱学; 干旱遥感监测模型; 多维光谱空间  
**中图分类号:** TP722.5 **文献标识码:** A

## Multi-dimensional spectral space based drought indices

LIU Fang<sup>1</sup>, ZHAN Zhi-Ming<sup>2</sup>, FENG Hai-Xia<sup>1</sup>, ZHAO Shao-Hua<sup>2</sup>

(1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China;

2. Satellite Environment Center, Ministry of Environment Protection, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Multiband drought indices (DIs) have been developed for quantitatively characterizing the degree of region drought-hit and crop yield loss. Nowadays, drought indices are currently one of the hot topics with potential applications in agriculture, forestry and ecological environment monitoring. However, it is still lack of a systematic research for the multiband drought indices. This paper made a review of latest remote sensing derived drought indices. The concept of multi-dimensional spectral space was extended, where multi-dimensional variables are expanded from the remote sensing spectral bands to all the satellites derived products concerned with drought. Over 30 drought indices developed during the past years were categorized by constitution elements into four groups. Advantages and limitations of each group were analyzed. Further more, the family of drought indices was viewed as a “pyramid”, and the whole family’s composition were deconstructed from the bottom to the top. Environmental impacts like atmosphere, sensor calibration and soil effects on the drought monitoring are analyzed and expressed as improved factors into the models.

**Key words:** surface features spectroscopy; remote sensing drought monitoring model; multi-dimensional spectral space  
**PACS:** 95.75.Rs

### 引言

旱灾是我国最严重的自然气象灾害之一, 是环境中严重制约可持续发展的一种自然灾害, 每年都会为农业生产带来巨大损失. 2009年全国特大干旱

造成全国耕地受灾面积1.45亿亩, 2010年继发了西南特大干旱, 经济损失超过190亿元, 因此准确的干旱监测就成为近几十年国际减灾防灾的一个热点和难点.

旱灾具有突发性、频发性, 传统的干旱监测方法

收稿日期: 2011-05-18, 修回日期: 2012-01-18

Received date: 2011-05-18, revised date: 2012-01-18

基金项目: 国家科技支撑计划“基于环境一号等国产卫星的宏观生态环境遥感监测应用技术与软件研发”(2008BAC34B06); 中国博士后科学基金“耦合作物生长模型和遥感信息的灌溉策略研究”(20110490200)

Foundation item: Supported by the national science and technology support program (2008BAC34B06); China postdoctoral Science Fund (20110490200)

作者简介 (Biography): 刘芳 (1981-), 女, 山西太原人, 讲师, 博士, 主要研究领域为定量遥感. E-mail: newaddy@pku.edu.cn.

耗时耗力、范围有限,难以满足实时、大范围监测的需求.随着遥感技术发展,不同尺度多源光谱数据的获取,为实时定量反演作物供缺水、土壤含水量,地表蒸散发、地表温度、土壤热容、植物水分胁迫等要素,以及作物旱情研究提供了必要手段.因此,遥感干旱监测是当前我国农业干旱监测及早灾防御的主战场<sup>[1-5]</sup>.

## 1 干旱遥感监测模型的汇总与分类

迄今为止,国内外许多学者(主要从作物水分、土壤含水量等方面)开展了一系列干旱遥感监测研究,提出了丰富的干旱遥感监测的理论与方法.发展至今,模型机理各不相同,有些是基于地表土壤水分和能量平衡理论,有些是基于田间作物需水与耗水机制,由于应用目的不同模型结果也不尽相同<sup>[6-12]</sup>.作为一类简单有效的干旱监测模型,干旱指数具有准确性、简易性、适用性.目前至少已有 30 多种农田遥感监测相关的干旱指数(附表 1).本文按照与干旱相关的敏感波段、植被指数和干旱指数、敏感参数观测值这三类构成要素对其进行归类.

对某一特征呈规律性显著响应的波段称作敏感波段.从图 1 中波谱曲线可以看到,不同含水量地表的光谱响应存在显著差异,因此用反射光谱及热辐射监测干旱非常有效.通常,对土壤和植物水分敏感的遥感波段主要分布在可见光、近红外、短波红外、中红外和热红外波段(Visible, NIR, SWIR, MWIR/TIR).对于 MODIS Level 1B 来说,对干旱的几个主要敏感波段为:2 个近红外区间(波段中心波长为 748 nm 和 869 nm),4 个短波红外区间(波段中心波长为 1.24  $\mu\text{m}$ , 1.38  $\mu\text{m}$ , 1.62  $\mu\text{m}$  和 2.1  $\mu\text{m}$ ).

植被指数和干旱指数可以表示成可见光、近红外、短波红外几个波段的复合形式.在干旱胁迫条件

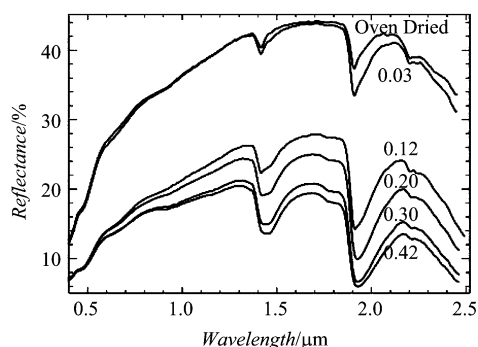


图 1 土壤不同含水量光谱反射曲线

Fig. 1 Reflectance Spectra of soil under different gravimetric water content (g/g)<sup>[13]</sup>

下,植株的生长状态表征为一些生理指标,如:冠层叶片水分含量、冠层温度、叶片的蒸散量、叶面积指数、叶片光合色素含量方面.研究表明,利用植被指数和干旱指数表征受旱程度,开展旱情研究效果显著,在探测生物旱情及灾损状况方面较单波段具有更好的灵敏性.

敏感参数观测值是指可用于识别某种现象的遥感产品以及第一手观测资料.研究表明,可以识别干旱并判定干旱程度的敏感参数观测值主要包括:反映植被裸土蒸散发的陆表温度(Land Surface Temperature, LST)、光合有效辐射比率(Fraction of Photo-synthetically Active Radiation absorbed by the canopy, FPAR)、反照率(Albedo)、叶面积指数(Leaf Area Index, LAI)等,也称为干旱敏感因子.

在已有的农田干旱遥感监测模型中,附表 1 按构成要素可将其分为四类:第一类,基于敏感波段以及干旱敏感参数构建的遥感监测模型.包括由可见光、红外波段辅助一些修正系数如土壤线调节系数、植被覆盖度构建的干旱监测模型,或是由干旱敏感参数观测值与敏感波段复合构建的干旱监测模型.例如,归一化水分指数 NDWI 是红-近红外-短波红外三个波段的组合形式, PDI、SPSI 在红-近红外波段、短波红外-近红外波段基础上加入了土壤线斜率  $M$ , MPDI 在红-近红外波段基础上加入了土壤线斜率  $M$ 、植被覆盖率  $f_v$ . 第二类,基于指数(植被指数或干旱指数)构建的遥感监测模型.如 AVI、SVI、VCI 是以 NDVI 为自变量的数学形式, VTCI 是干旱指数 VCI、TCI 的复合形式. 第三类,基于指数与敏感波段/干旱敏感因子混合构建的遥感监测模型.包括由植被指数(或干旱指数)与干旱敏感参数观测值(或敏感波段)的组合形式构成,如 VCADI 是由 NDVI、albedo 组合而成, TVX 是 LST、NDVI 的组合形式. 第四类,基于热惯量、蒸散模型构建的遥感干旱监测模型,如 ATI、EDI、CWSI、SWSI 等.

## 2 多维光谱特征空间概念的延伸及应用

光谱特征空间是指利用多个波段光谱信息或由此得到的地表生态物理参数组成的光谱空间<sup>[14]</sup>.光谱特征空间充分利用多光谱波段数据及反演得到的一系列地表生态物理参数,衍生出更丰富、清晰的地表信息,从而在不同空间尺度和时间尺度上更准确地认识陆面过程及土地覆盖土地利用的时空变化规律.

光谱特征空间是对遥感光谱信息在多维空间所

作的科学抽象,用解析几何方法将光谱特征统一归纳到坐标框架当中,使得数学建模意义更明确,构造更清晰. 本文将多维光谱特征空间的多维变量由光谱值拓展为一切与干旱相关的遥感产品以及衍生产品. 包括从可见光至红外对植被土壤水分敏感的波段、反映植被裸土蒸散发的陆表温度(LST)、光合有效辐射比率(FPAR)、反照率(ALBEDO)、叶面积指数(LAI)、植被指数(NDVI)、干旱指数等.

为明确干旱监测模型在多维特征空间的构建模式,本文可以将干旱遥感监测模型家族抽象为一个金字塔形式,具体方法如下.

首先,提取干旱敏感波段(包括对植被土壤水分敏感的红-近红外-短波红外波段等)、干旱敏感参数(能够反映植被裸土蒸散发的陆表温度-大气温度、影响植被蒸腾速率的光合有效辐射比率、反映干旱背景异质性的反照率、反映植物受旱胁迫的叶面积指数等)作为特征变量,运用解析几何等数学方法,在多维特征空间中以边、角、距离的形式构建一级干旱指数,位于金字塔的中层,如图 2 所示.

然后,运用数学方法将一级干旱指数表达为复合形式,或是使用土壤背景系数、植被覆盖度修正一级干旱指数,构建二级干旱指数,位于金字塔的顶层(见图 2).

金字塔从底层到顶层,构成要素和复合形式越来越复杂. 举例说明,垂直干旱指数 PDI(Perpendicular Drought Index)是二维空间的距离指数;SASI(Shortwave Angle Slope Index)是二维空间的角度指数;植被水分亏缺指数 VWSI(Vegetation Water Stress Index)是二维空间的边指数;将光谱值替换为 albedo,构建了植被条件反照率干旱指数 VCADI(Vegetation Condition Albedo Index);将多维变量替换为干旱指数,构建了归一化垂直干旱指数 NPDI(Normalized Perpendicular Drought Index);增加一个维度,形成的三角分布干旱指数 TDI(Triangle Distribution Drought Index);推演到  $n$  个维度,构成  $n$  维干旱指数 NDDI( $n$ -Dimensional Drought Index). 如此类推,按照这样的规则还可以衍生构建出不同应用目的的干旱监测指数.

总之,以上干旱指数都可以在多维光谱空间中运用解析几何等数学方法表示成边、角度、空间距离等形式. 这里的多维光谱空间维度由与干旱相关的敏感波段、指数、敏感参数观测值三类要素构成. 按照这样的规则,为满足应用需求还可以不断发现并

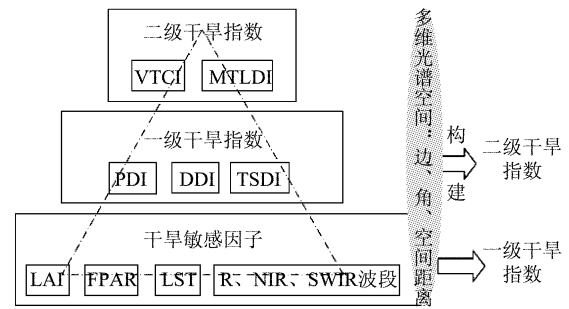


图 2 干旱监测模型设计思路  
Fig. 2 Design scheme of drought monitoring model

注:LAI-叶面积指数; FPAR-光合有效辐射; LST-陆表温度; R/NIR/SWIR-红、近红外、短波红外波段; PDI-垂直干旱指数; DDI-距离干旱指数; TSDI-三角空间干旱指数; VTCI-条件植被温度指数; MTLDI-改进的温度叶面积干旱指数.

引入遥感反演的干旱敏感参数,继续构建更高级的干旱指数.

### 3 模型的构建规律分析

#### 3.1 常用的数学表达形式及其含义

干旱指数通常表达为(非)线性函数、对数函数、三角函数等形式,并采用平面解析几何、立体几何、概率统计知识在内构建模型. 表 1 列出了一些常用的数学表达形式及其表征的物理意义.

表 1 干旱监测模型数学表达式  
Table 1 Mathematical expression of drought monitoring model

形式	名称	用途
$\frac{x-y}{x+y}$ 反正切函数: $y = \arctan(x) * 2/\pi$ 对数函数: $y = \log_{10}(x)$ 线性函数: $\frac{x-x_{min}}{x_{max}-x_{min}}$ 或 $\frac{x_{max}-x}{x_{max}-x_{min}}$	归一化形式	放大两个变量的差异并将数值归一化
$\frac{x}{y}$ 或 $x-y$	相减或相比形式	放大两个变量差异
$\sqrt{x^2+y^2}$ 或 $\int \Omega x dz$	加和形式	放大变量的共性
$Z_i = \frac{NDVI_i - \overline{NDVI}}{\sigma_i}$	标准化形式	对变量标准化
$\frac{x+My}{\sqrt{1+M^2}}$	点到直线的距离公式	可表示为 $z = ax + by$
$\frac{mx-ny}{mx+ny}$	加权归一化形式	加权两个变量再将数值归一化
$a/b$ $c/d$	嵌套比值	放大变量比率
$\frac{z-(x-y)}{z+(x+y)}$	嵌套归一化	放大归一化结果

### 3.2 干旱指数的实用修正

#### 3.2.1 干旱指数的影响因素分析

传感器差异、波段带宽、大气校正、植被覆盖度、土壤背景、地形起伏、太阳高度角或入射辐射量变化等都会影响干旱指数<sup>[15]</sup>.

#### 3.2.2 干旱指数的修正

在土壤-植被-大气系统中,影响干旱指数有大气影响、传感器差异、土壤背景等环境因素,以及土壤、植被间的相互作用,如植被不同覆盖情况,都可以作为修正因子加入到干旱模型当中.

##### 3.2.2.1 消除土壤的影响

土壤背景对干旱指数有相当大的影响,土壤背景和环境反射率与土壤结构、性质、颜色和湿度有关.许多干旱指数就是为了控制土壤背景的影响产生的,以归一化垂直干旱指数(NPDI)为例说明<sup>[14]</sup>.NPDI的作用是消除区域之间由土壤类型、植被覆盖差异而引起的误差,提高其区域可比性.由于干燥暗色土壤反射率可能比湿润亮色土壤反射率低,使得MPDI低于湿润亮色的MPDI.因此,以便消除区域土壤类型,施肥条件之间的差异和土壤颜色对干旱监测的污染,对MPDI进行归一化.表达式如下:

$$NPDI = \frac{MPDI_{i,j} - MPDI_{\min}}{MPDI_{\max} - MPDI_{\min}}, \quad (1)$$

其中, $MPDI_{i,j}$ 为像元*i,j*处MPDI值.经验证,NPDI和 $W_{20\text{cm}}$ 的 $R^2$ 可以达到0.78<sup>[14]</sup>.

另外,也可以将土壤线作为参数,消除或减弱土壤背景差异的扰动.通过附加一个“X”值改进指数,将土壤背景亮度的影响减到最小值.

除了土壤亮度外,土壤颜色也是影响干旱指数的一个重要因素.土壤颜色变化使土壤线加宽. Escadafal证明, TM2和TM3反射率值与土壤颜色饱和度有关,并发展了颜色指数.其中红色指数(RI)是消除土壤颜色影响的一个校正系数<sup>[16]</sup>.

##### 3.2.2.2 消除大气的影响

由于大气的影 响,在气溶胶较厚时必须进行大气校正.根据Pitts等的研究,大气吸收可减小近红外信息量的20%以上<sup>[17]</sup>.

由于大气对红光通道的影响比近红外通道大得多,可以利用通过蓝色、红色通道的辐射差别建立一个新的波段——红—蓝波段(RB),替代红波段.在去大气影响方面干旱监测指数构建可以借鉴抗大气植被指数(ARVI).有研究表明,ARVI对大气的敏感性比NDVI约减小4倍<sup>[18]</sup>.

Kanfman推荐将参数 $\gamma$ 设为常数1仅能消除某

些尺寸气溶胶的影响;张仁华等(1996)运用大气下向光谱的同步观测获取大气实况参数,并得到了适用于不同季节和区域的指数的关键参数 $\gamma$ ,提出新的抗大气影响植被指数(IAVI)<sup>[19-20]</sup>,可以借鉴使用到旱情监测指数大气扰动影响.

##### 3.2.2.3 消除遥感器的影响

遥感器定标、遥感器光谱响应、调制传递函数、双向反射都会对指数计算有影响.不同遥感器的光谱波段响应函数、空间分辨率及观察视场不同,导致计算同一目标的指数结果可能不同<sup>[21]</sup>.由于地球表面是非朗伯体,观察角和太阳方位角对自然表面的双向反射产生很大的影响,双向反射特性必须考虑<sup>[22]</sup>.对于不同波段宽度,可对响应函数和光谱值在波长范围内积分,再除以相同波长范围的响应函数积分值来解决.为了校正双向反射对指数的影响,通常利用双向反射分布函数对反射率进行了双向反射订正.

### 3.3 微波和红外数据的干旱指数构建

除了多光谱干旱指数以外,还可以利用高光谱遥感数据、微波遥感数据及热红外遥感数据构建相关的干旱指数.

#### 3.3.1 微波遥感干旱指数方法研究

构建干旱指数可以利用AMSR-E等微波传感器获得的亮温数据,植被透过率和含水量等几何物理特性参数,建立与光学干旱指数相对应的微波干旱指数.由于土壤含水量影响土壤介电系数,雷达回波对土壤湿度十分敏感,并且微波具有全天候、穿透能力强等优势,采用微波遥感进行土壤湿度监测具有很大的潜力.根据雷达不同频率和极化通道对土壤湿度、植被含水量响应特性,可以利用微波传感器的亮温数据监测地表干旱.马媛(2010)采用AMSR-E星载被动微波传感器获得微波遥感亮温数据,提出微波极化差异指数MPDI,通过实验证明该指数能够较好的表征土壤湿度时空变化<sup>[23]</sup>.金亚秋运用星载微波SSM/I的7个通道辐射亮度温度数据研究中国东北、华北农田的土壤水分,提出用微波数据生成的散射指数与极化指数来分析农田微波辐射特征及季节变化值,它可以用来监测农田作物和土壤水分的变化<sup>[24]</sup>.

#### 3.3.2 高光谱遥感旱情指数方法研究

高光谱数据精细的光谱值有利于地表干旱参数反演. Hyperion高光谱影像是美国地球观察卫星EO-1搭载的成像光谱仪,包括可见光、近红外和短波红外(SWIR, 900~2500 nm)光谱数据,共有242个波段.构建干旱指数流程:最佳波段提取、组合分析、参数提取、回归模型、指数计算.

刘维东(2004)等用(EO-1)星载成像光谱仪数据,通过运用相对反射率、微分光谱、差分等技术,对土壤水分进行定量反演,取得了比较好的精度,实验证明窄波段高光谱指数具有干旱敏感性<sup>[25]</sup>。

### 3.3.3 红外遥感干旱指数方法研究

近红外(0.76~1.1  $\mu\text{m}$ ):植被在近红外波长具有高的光谱反射率同时伴随有一个阶跃,光谱反射率随叶片内部的细胞形状、大小、细胞间隔、细胞与空气临界面的状况不同而不同;

短波红外(1.1~3.0  $\mu\text{m}$ ):影响短波红外光谱反射率的是叶片的含水量,在光谱曲线的1.4  $\mu\text{m}$ 、1.9  $\mu\text{m}$ 、2.5  $\mu\text{m}$ 处3个水分吸收带,当遭遇干旱时会从光谱反射率判断叶片含水量,从而结合地面情况确定具体灾害程度;

中红外及热红外(3.0~6.0  $\mu\text{m}$ , 10.4~12.6  $\mu\text{m}$ ):温度对植被的生理过程和土壤理化作用有重要影响,通过热红外对土壤、植被的温度探测就能获得土壤水分状况以及作物干旱的有关信息。

一般来说,构建干旱指数可以根据通道数据采用红外通道的和差积商、差分 and 积分等形式。

Abduwasit Ghulam(2008)提出了基于近红外和短波红外的植被水分胁迫指数,该指数具有鲁棒性不需要其他的气象水文信息,试验表明该指数与使用MODIS短波红外波段估算得到的可燃物湿度 fuel moisture content(FMC)呈显著正相关<sup>[26]</sup>。Yunjun Yao(2011)提出了基于潜热蒸散的混合双源蒸散模型 Evaporative Drought Index(EDI),实验证明了与Palmer Drought Severity Index(PDSI)具有良好的时空相关性<sup>[27]</sup>。

## 4 遥感干旱指数的趋势发展

### 4.1 监测对象方面,由农田环境参数向植物水分亏缺生理特征转变

作物需水量随土壤理化性状、作物品种及生育阶段等因素实时实地变化,农业干旱监测的对象是作物而不是土壤。气象数据和遥感数据可以获得连续的作物生长环境参数如土壤表层含水量、冠层含水量、冠层温度、气温和降水量,无法全面科学的描述农田受旱胁迫信息。作物遭受水分胁迫后,在生理上产生一系列的反应,表现在叶水势降低,光合速率、蒸腾速率和气孔导度下降,叶面积指数及遮光率减少。以叶面积为例说明,叶片在水分亏缺时细胞壁先失水,叶片内部水势状况和渗透调节表现为叶片卷曲,因此叶面积能直观地反映作物对土壤水分胁迫的

敏感程度<sup>[28-30]</sup>。因此,获得作物水分亏缺的生理反应信息可以更准确把握旱情状况并指导灌溉实施。

### 4.2 形式上,干旱指数由二维向多维、由线性组合向复合形式转变

目前有75%的干旱指数不超过两个特征参数,增加参数的数量、提高参数的质量、采用非线性模型有利于解决实际情况中的复杂问题。今后,针对干旱系统中普遍存在的模糊性和随机性,干旱参数将向多目标、多层次、多功能、多阶段、多维与随机的方向发展。

### 4.3 数据源上,光谱细分及光谱范围的延伸

遥感数据类型丰富,遥感技术的应用前景十分广阔。高光谱遥感具有“图谱合一”的特点,高光谱数据精细的光谱波段有利于地表参数反演,有利于精细识别地物目标类型,提高遥感信息提取的精度。干旱指数目前是基于可见光、热红外及微波遥感而发展的,光谱范围的延伸有助于识别地物目标类型与遥感信息提取精度的提高。

## 5 结论

研究了基于多维光谱特征的干旱指数,并讨论了其今后的发展趋势。从“三要素”的角度将干旱指数分为四类,并评价其各自优势和局限性;将干旱遥感监测模型家族抽象为一个金字塔形式,从底层到顶层分析了金字塔的一般构成要素和复合形式;分析了大气、土壤、传感器差异等对干旱监测的影响,并指出了干旱指数未来的发展方向。

随着干旱监测模型的进一步完善和成熟,以及高分辨率的遥感信息产品不断推出,干旱遥感监测研究将会向多目标、多层次、多功能、多阶段、多维与随机的方向发展。随着干旱指数体系的健全和完善,农田干旱信息的准确获取为水资源规划和环境科学管理提供至关重要的依据,干旱遥感监测模型具有巨大的应用潜力和研究价值。

## REFERENCES

- [1] YAO Yun-Jun, QIN Qi-Ming, ZHAO Shao-Hua, et al. Retrieval of soil moisture based on MODIS shortwave infrared spectral feature[J]. *J. Infrared Millim. Waves* (姚云军, 秦其明, 赵少华, 等. 基于MODIS短波红外光谱特征的土壤含水量反演. *红外与毫米波学报*), 2011, 30(1): 9-14.
- [2] FENG Qiang, TIAN Guo-Liang, WANG Ang-Sheng, et al. Experimental study on drought monitoring by remote sensing in China by using vegetation condition indexes (I)-data analysis and processing[J]. *Arid Land Geography* (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(I)——资料分析与处理部分. *干旱区地理*), 2004, 27(2): 131-136.

- [3] FENG Qiang, TIAN Guo-Liang, WANG Ang-Sheng, *et al.* Experimental study on the RS-based drought monitoring in China by using the vegetation condition indexes ( II )-models of RS-based drought monitoring and the analyzed results [J]. *Arid Land Geography* (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 ( II )——干旱遥感监测模型与结果分析部分. 干旱区地理), 2004, **27**(4): 477-484.
- [4] ZHAN Zhi-Ming, QIN Qi-Ming, GHULAM A, *et al.* A new method of soil moisture monitoring based on NIR-Red spectral space [J]. *Scientia Sinica Terrae* (詹志明, 秦其明, 阿布都瓦斯提·吾拉木, 等. 基于 NIR-Red 光谱特征空间的土壤水分监测新方法. 中国科学. D 辑: 地球科学), 2006, **36**(11): 1020-1026.
- [5] TAN Ke-Long. *Semi-arid ecotone of China Remote Sensing Theory and Practice* [M]. Beijing: Science Press (谭克龙等. 中国半干旱生态脆弱带遥感理论与实践. 北京: 科学出版社), 2007.
- [6] TAN Xue-Zhi, SU Xiao-Ling, SHAO Dong-Guo. Analysis of Spatial and Temporal Characteristics of Meteorological Drought in Guanzhong Region of Shaanxi Province [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas* (谭学志, 粟晓玲, 邵东国. 基于 SPI 的陕西关中地区气象干旱时空特征分析. 干旱地区农业研究), 2011, **29**(02): 224-229.
- [7] QIAN Yi-Bing, ZHANG Hai-Yan, WU Zhao-Ning, *et al.* Vegetation cover change and the driving factors over north-west China [J]. *Journal of Arid Land*, 2010, **3**(1): 25-33.
- [8] ZHAO Shao-Hua, YANG Yong-Hui, QIU Guo-Yu, *et al.* Remote detection of bare soil moisture using a surface temperature based soil evaporation transfer coefficient [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2010, **12**(5): 351-358.
- [9] GILLES B, BERNARD M, TARIK B A. An evaporation test based on Thermal Infra Red remote sensing to select appropriate soil hydraulic properties [J]. *Journal of Hydrology*, 2009, **376**(3-4): 589-598.
- [10] LU Sen, JU Zhao-Qiang, REN Tu-Sheng, *et al.* A general approach to estimate soil water content from thermal inertia [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, **149**(10): 1693-1698.
- [11] SARAH A L, PETER R R, BRUCE E F, *et al.* Using hyperspectral imagery to predict post wild fire soil water repellency [J]. *Geomorphology*, 2008, **95**(3-4): 192-205.
- [12] YILMAZ M T, Hunt-Jr E R, Jackson T J, *et al.* Remote sensing of vegetation water content from equivalent water thickness using satellite imagery [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2008, **112**(5): 2514-2522.
- [13] CECCATO P, Flasse S, Tarantola S, *et al.* Detecting vegetation leaf water content using reflectance in the optical domain [J]. *Remote Sensing of environment*, 2001, **77**(1): 22-33.
- [14] GHULAM A. *Remote Monitoring of Farmland Drought based on n-Dimensional spectral feature space* [D]. Beijing: Peking University (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. 博士学位论文, 北京: 北京大学), 2006.
- [15] HOU Ying-Yu, HE Yan-Bo, LIU Qin-Huo, *et al.* Research progress on drought indices [J]. *Chinese Journal of Ecology* (侯英雨, 何延波, 柳钦火, 等. 干旱监测指数研究. 生态学杂志), 2007, **26**(06): 892-897.
- [16] ESCADAFAL R. Remote sensing of arid soil surface color with Landsat thematic mapper [J]. *Advances in space research*, 1989, **9**(1): 159-163.
- [17] FINLAYSON-PITTS B J, PITTS J N. *Chemistry of the upper and lower atmosphere* [M]. Academic press San Diego, CA, 2000.
- [18] KAUFMAN Y J. Atmospherically resistant vegetation index (ARVI) for EOS — MODIS [C]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1992, **30**(2): 261-270.
- [19] ZHANG Ren-Hua, RAO Nong-Xin, LIAO Guo-Nan. Approach for a vegetation index resistant to atmospheric effect [J]. *Acta Botanica Sinica* (张仁华, 饶农新, 廖国男. 植被丰度的抗大气影响探讨. 植物学报), 1996, **38**(1): 53-62.
- [20] GUO Ni. Vegetation Index and Its Advances [J]. *Arid Meteorology* (郭妮. 植被指数及其研究进展. 干旱气象), 2003, **21**(4): 71-75.
- [21] GU Z, ZENG Z, SHI X, *et al.* Estimating models of vegetation fractional coverage based on remote sensing images at different radiometric correction levels [J]. *Frontiers of Forestry in China*, 2009, **4**(4): 402-408.
- [22] DEMATTÈ J A, ANTONIO A S, MARCELO C A, *et al.* Retrieval of Leaf Area Index (LAI) and Soil Water Content (WC) using Hyperspectral remote sensing under controlled glass house conditions for Spring Barley and Sugar Beet [J]. *Remote Sensing*, 2009, **2**(7): 1702-1721.
- [23] MA Yuan, CAO Yue-E, TASHPOLAT T, *et al.* Monitoring of soil moisture anomaly based on microwave remote sensing [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)* (马媛, 曹月娥, 塔西甫拉提·特依拜, 等. 基于微波遥感的土壤湿度异常监测. 兰州大学学报自然科学版), 2010, **46**(001): 29-32.
- [24] JIN Ya-Qiu. Data analysis of the spaceborne SSM/I over cop areas of the Northern China [J]. *Journal of Remote Sensing* (金亚秋. 星载微波 SSM/I 遥感在中国东北华北农田的辐射特征分析. 遥感学报), 1998, **2**(1): 19-25.
- [25] LIU Wei-Dong, FRÉDÉRIC B, ZHANG Bing, *et al.* Extraction of soil moisture information by hyperspectral remote sensing [J]. *Acta Pedologica Sinica* (刘伟东, Frédéric Baret, 张兵, 等. 高光谱遥感土壤湿度信息提取研究. 土壤学报), 2004, **41**(5): 700-706.
- [26] GHULAM A, LI Zhao-Liang, QIN Qi-Ming, *et al.* Estimating crop water stress with ETM + NIR and SWIR data [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2008, **148**(11): 1679-1695.
- [27] YAO Yun-Jun, LIANG Shun-Lin, QIN Qi-Ming, *et al.* Monitoring global land surface drought based on a hybrid evapotranspiration model [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2011, **13**(3): 447-457.
- [28] STANCALIE G, MARICA A, TOULIOS L. Using earth observation data and CROPWAT model to estimate the actual crop evapotranspiration [J]. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 2010, **35**(1-2): 25-30.
- [29] DUCHEMIN B, Hadria R, Erraki S, *et al.* Monitoring wheat phenology and irrigation in Central Morocco: On the use of relationships between evapotranspiration, crops coefficients, leaf area index and remotely sensed vegetation indices [J]. *Agricultural Water Management*, 2006, **79**(1): 1-27.
- [30] ZHAO C J, *et al.* Relationship of 2100 ~ 2300 nm spectral characteristics of wheat canopy to Leaf Area Index and Leaf N as affected by Leaf Water Content [J]. *Pedosphere*, 2006, **16**(3): 333-338.

## [M1]

## 附表 1 主要的遥感干旱监测模型

Appendix Table 1 Summary of Drought Monitoring Models

类型	名称	表达式	备注
	归一化水分指数	$NDWI = \frac{(R_{nir} - R_{swir})}{(R_{nir} + R_{swir})}$	Gao et al., 1996;
	垂直干旱指数	$PDI = \frac{1}{\sqrt{M^2 + 1}}(R_{red} + MR_{nir})$	詹志明等, 2006; M 为土壤线斜率
	短波红外垂直失水指数	$SPSI = \frac{1}{\sqrt{M^2 + 1}}(R_{swir} + MR_{nir})$	Ghulam et al., 2007; M 为 Nir-Swir 基线斜率
	改进的垂直干旱指数	$MPDI = \frac{R_{red} + MR_{nir} - f_v(R_{red,v} + MR_{nir,v})}{(1 - f_v) \sqrt{1 + M^2}}$	Ghulam et al., 2006; $f_v$ 为植被覆盖率
光谱反射率的组合、光谱反射率和干旱敏感参数的组合	温度条件指数	$TCI = \frac{T_{max} - T}{T_{max} - T_{min}} \times 100$	Kogan et al., 1995; $T, T_{max}$ 和 $T_{min}$ 分别表示某个特定时期的地表温度, 最大值和最小值
	条件植被温度指数	$VTCI = \frac{LST_{NDVI \cdot max} - LST_{NDVI}}{LST_{NDVI \cdot max} - LST_{NDVI \cdot min}}$	王鹏新等, 2003; $LST_{NDVI \cdot max} - LST_{NDVI \cdot min}$ 分别代表在研究区域内, 当 $NDVI_i$ 值等于某一特定值时的土地表面温度的最大值和最小值
	水分亏缺指数	$WDI = \frac{(T_s - T_a)_{max} - (T_s - T_a)_r}{(T_s - T_a)_{max} - (T_s - T_a)_{min}}$	Moran et al., 1996; 其中, $(T_s - T_a)_r$ 为陆气温差
	短波红外水分亏缺指数	$SIWSI = \frac{R_{nir} - R_{swir < 1640 \text{ nm}}}{R_{nir} - R_{swir > 1640 \text{ nm}}}$	Cheng et al., 2006
	温度条件-植被状态指数	$VTCI = \alpha VCI + \beta TCI$	Unganai 和 Kogan, 1998; $\alpha$ 和 $\beta$ 分别表示 VCI 和 TCI 的权重
	距平植被指数	$AVI = (NDVI_i - \overline{NDVI})$	肖乾广等, 1994; $\overline{NDVI}$ 为多年的归一化植被指数平均值
指数组合	水分指数/归一化水分指数	$\frac{WI}{NDVI} = \frac{R_{nir900}}{R_{nir970}} \frac{(R_{nir895} - R_{r675})}{(R_{nir895} + R_{r675})}$	Peñuelas et al., 1997;
	四波段干旱指数	$\frac{SRWI}{NDWI} = \frac{R_{swir1640}}{R_{swir2130}} \frac{(R_{nir855} - R_{g555})}{(R_{nir855} + R_{g555})}$	Zhang et al., 2006;
	改进的温度-叶面积干旱指数	$MTLDI = \begin{cases} TVDI & NDVI \in [0.2, 0.3] \\ TLDI & NDVI \in [0.5, 0.6] \end{cases}$	随欣欣, 2010;
	距离干旱指数	$DDI = \frac{\sqrt{R_{nir}^2 + R_{red}^2}}{1 + NDVI}$	金川等, 2008;
	三角空间干旱指数	$TSDI_c =  CAv _{sta} +  CBv _{sta}$ $ CAv  = \sqrt{(Cx - Ax)^2 + (Cy - Ay)^2 + (Cz - Az)^2}$ $ CBv  = \sqrt{(Cx - Bx)^2 + (Cy - By)^2 + (Cz - Bz)^2}$	金川等, 2008; $ CBv $ 为 C 点到水分极值点 B 的三维距离, $ CAv $ 为 C 点到植被极值点 A 的三维距离, $ CAv _{sta}$ 、 $ CBv _{sta}$ 为经过标准化的三维距离
指数和光谱反射率反射率/干旱敏感参数的组合	植被条件反照率干旱指数	$VCADI = \frac{A_{i, NDVI_i} - A_{min, NDVI_i}}{A_{max, NDVI_i} - A_{min, NDVI_i}}$	Ghulam et al., 2006; $A_{min, NDVI}$ 和 $A_{max, NDVI}$ 分别为 $NDVI$ 等于某特定值时的最小和最大反照率
	温度-植被比值法	$TVX = LST/NDVI$	Lambin 和 Ehrlich et al., 1996;
	温度植被角度指数	$NTVA = \frac{\arctg[(T_s + 50/(100 \times NDVI))]}{\pi/2}$	王长耀等, 2005; 解决了当 $NDVI$ 较小, 土壤水分变化引起的 TVX 值存在着负相关关系
	温度植被干旱指数	$TVDI = \frac{T_s - T_{smin}}{T_{smax} - T_{smin}} = \frac{T_s - T_{smin}}{a + bNDVI - T_{smin}}$	Sandholt et al., 2002; $T_s$ 代表任意像元的地表温度, $T_{smin}$ 和 $T_{smax}$ 是地表最低和最高温度

(续表)

类型	名称	表达式	备注
	热惯量模型	$P = \sqrt{\lambda\rho C}$	Watson et al., 1974 赵英时, 2003; $\lambda$ 为热导率, $\rho$ 为密度, $C$ 为比热
	表观热惯量	$ATI = \frac{1 - ABE}{\Delta T}$	田国良等, 1992; ABE 为反照度, $\Delta T$ 为地面昼夜温差
基于热惯量、 蒸散模型	土壤干旱指数	$SWSI = 1 - \frac{\lambda E}{\lambda E_p}$	李韵珠, 1995; $E$ 为实际土面蒸发, $E_p$ 是土壤潜在蒸发
	蒸散干旱指数	$EDI = 1 - \frac{ET}{PET}$ $ET = R_n(0.279 + 0.01372NDVI * T_{mean}$ $+ \frac{0.936NDVI}{T_{max} - T_{min}} + \frac{0.16}{T_{max} - T_{min}})$ $PET = 0.0023R_a(T_{mean} + 17.8) \sqrt{T_{max} - T_{min}}$	姚云军等, 2010; $T_{mean}$ 为空气平均温度, $T_{max} - T_{min}$ 为昼夜温差, $R_n$ 为地表净辐射, $R_a$ 为星际辐射

(上接 440 页)

结构或材料参数, 可设计出偏振独立的定向耦合器。

## REFERENCES

- [1] SOREFF R. The past, present, and future of silicon photonics[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2006, **12**(6):1678-1687.
- [2] BARWICZ T, WATTS M R, POPOVIC M, et al. Polarization transparent microphotonic devices in the strong confinement limit[J]. *Nature Photonics*, 2006, **1**(1):57-60.
- [3] ALMEIDA V R, XU Qian-Fan, BARRIOS C A, et al. Guiding and confining light in void nanostructure[J]. *Optics Letters*, 2004, **29**(11):1209-1211.
- [4] XU Qian-Fan, ALMEIDA V R, PANEPUCCHI R R, et al. Experimental demonstration of guiding and confining light in nanometer-size low-refractive-index material[J]. *Optics Letters*, 2004, **29**(14):1626-1628.
- [5] FENG Ning-Ning, MICHEL J, KIMERLING L C. Optical field concentration in low-index waveguides[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2006, **42**(9):885-890.
- [6] SUN Rong, DONG Po, FENG Ning-Ning, et al. Horizontal single and multiple slot waveguides-optical transmission at  $\lambda = 1550$  nm[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(26):17967-17972.
- [7] XIAO Jin-Biao, LIU Xu, SUN Xiao-Han. Design of a compact polarization splitter in horizontal multiple-slotted structure[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2008, **47**(5):3748-3754.
- [8] GUIDER R, DALDOSSO N, PITANTI A, et al. NanoSi low loss horizontal slot waveguides coupled to high Q ring resonators[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(23):20762-20770.
- [9] BAEHR-JONES T, HOCHBERG M, WANG G, et al. Optical modulation and detection in slotted silicon waveguides[J]. *Optics Express*, 2005, **13**(14):5216-5226.
- [10] HOCHBERG M, BAEHR-JONES T, WANG G, et al. Towards a millivolt optical modulator with nano-slot waveguides[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(13):8401-8410.
- [11] FUJISAWA T, KOSHIBA M. Theoretical investigation of ultrasmall polarization-insensitive  $1 \times 2$  multimode interference waveguides based on sandwiched structures[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2006, **18**(11):1246-1248.
- [12] FUJISAWA T, KOSHIBA M. Polarization-independent optical directional coupler based on slot waveguides[J]. *Optics Letters*, 2006, **31**(1):56-58.
- [13] XIAO Jin-Biao, LIU Xu, SUN Xiao-Han. Design of polarization-independent optical couplers composed of three parallel slot waveguides[J]. *Applied Optics*, 2008, **47**(14):2687-2695.
- [14] XIAO Jin-Biao, LIU Xu, SUN Xiao-Han. Design of an ultracompact MMI wavelength demultiplexer in slot waveguide structures[J]. *Optics Express*, 2007, **15**(13):8300-8308.
- [15] BARRIOS C A, GYLFASON K B, SANCHEZ B, et al. Slot-waveguide biochemical sensor[J]. *Optics Letters*, 2007, **32**(21):3080-3082.
- [16] CLAES T, MOLERA J G, VOS K D, et al. Label-free biosensing with a slot-waveguide-based ring resonator in silicon on insulator[J]. *IEEE Photonics Journal*, 2009, **1**(3):197-204.
- [17] KARGAR A, CHAO C. Design and optimization of waveguide sensitivity in slot microring sensors[J]. *Journal of the Optical Society of America A*, 2011, **28**(4):596-603.
- [18] KOSHIBA M, MARUYAMA S, HIRAYAMA K. A vector finite element method with the high-order mixed-interpolation-type triangular elements for optical waveguiding problems[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1994, **12**(3):495-502.
- [19] LI D U, CHANG H C. An efficient full-vectorial finite-element modal analysis of dielectric waveguides incorporating inhomogeneous elements across dielectric discontinuities[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2000, **36**(11):1251-1261.
- [20] LUI W W, XU Cheng-Lin, HUANG Wei-Ping, et al. Full-vectorial mode analysis with considerations of field singularities at corners of optical waveguides[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1999, **17**(8):1509-1513.
- [21] XIAO Jin-Biao, NI Hong-Xing, SUN Xiao-Han. Full-vector mode solver for bending waveguides based on the finite-difference frequency domain method in cylindrical coordinate systems[J]. *Optics Letters*, 2008, **33**(16):1848-1850.
- [22] SACKS Z S, KINGSLAND D M, LEE R, et al. A perfectly matched anisotropic absorber for use as an absorbing boundary condition[J]. *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, 1995, **43**(12):1460-1463.
- [23] JIN Jian-Ming. *The Finite Element Method in Electromagnetics*[M]. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 2002.