

## 基于 SWIR-Red 光谱特征空间的农田干旱监测新方法

冯海霞<sup>1,3</sup>, 秦其明<sup>1\*</sup>, 李滨勇<sup>2</sup>, 刘芳<sup>1</sup>, 蒋洪波<sup>1</sup>, 董恒<sup>1</sup>, 王金梁<sup>1</sup>, 刘明超<sup>1</sup>, 张宁<sup>1</sup>

1. 北京大学遥感与 GIS 研究所, 北京 100871
2. 国家海洋环境监测中心, 辽宁 大连 110623
3. 山东交通学院, 山东 济南 250023

**摘要** 干旱是一种频繁发生的自然灾害, 遥感监测干旱已成为重要的研究方向。可从农田遥感干旱监测最主要的两种地物类型(植被和土壤)的光谱特性分析入手, 选择了对水分变化敏感的红光、短波红外波段来监测干旱状况, 以短波红外与红光的差值和短波红外与红光的和构建新的光谱空间特征, 提出了干旱监测的新方法——归一化的干旱监测指数 NPDI。用野外实测的土壤含水量对 NPDI 模型进行验证, 结果表明: NPDI, MPDI 与 10 cm 处的土壤含水量模型都具有较高的相关性, 其  $R^2$  分别为 0.583 和 0.438, NPDI 模型的监测效果要优于 MPDI。此模型是对 PDI, MPDI 和 SPSI 等模型的进一步改进, 可实现对不同植被覆盖度的、整个生长季的农田干旱监测, 在实际的农田干旱监测中具有较高的应用潜力和推广价值。

**关键词** SWIR-Red 光谱特征空间; 归一化的干旱监测指数; 遥感监测

中图分类号: F301 文献标识码: A DOI: 10.3964/j.issn.1000-0593(2011)11-3069-05

### 引言

干旱是一种频繁发生的自然现象。遥感因能够快速、及时地获取大范围的作物长势和土壤水分信息, 可以实现大范围的旱情监测和评估, 遥感监测干旱已成为干旱监测领域重要的研究方向。遥感干旱监测基于可见光、近红外、热红外、微波等多波段的信息, 提出了众多的模型和方法, 代表性的有热惯量模型、植被缺水指数法、植被距平指数法、温度法和光谱特征空间法等<sup>[1-15]</sup>。光谱特征空间就是利用多波段的光谱信息或者由此得到的两个或者以上的地表生态物理参数构成的光谱空间。詹志明等提出垂直干旱指数(perpendicular drought index, PDI), 利用 NIR-Red 特征空间中任意一点到土壤基线的垂直距离表征干旱状况, 其本质是对裸露的土壤水分监测, 适用于裸土或低植被覆盖地区, 地表覆盖类型差异较大时, 可比性差<sup>[7]</sup>; 阿布都瓦斯提·吾拉木等引入植被覆盖度的概念, 提出改进的垂直干旱指数(modified perpendicular drought index, MPDI), 适用于植被覆盖度较高条件下的土壤水分监测<sup>[8]</sup>; 阿布都瓦斯提·吾拉木等分析地物在 NIR-SWIR 空间的分异规律, 建立了监测植被冠层水分含量

的短波红外垂直失水指数(short-wave infrared perpendicular water stress index, SPSI)<sup>[10]</sup>, 适用于植被冠层叶片含水量的遥感监测<sup>[9]</sup>。本来的目的: 在分析以上方法的适宜性的基础上, 进一步研究土壤、植被在可见光、近红外、短波红外的反射光谱特征, 从光谱特征空间的角度, 分土壤、植被在光谱特征空间中的分异规律, 建立一种适合不同植被覆盖情况下较普适的农田干旱监测办法。

### 1 原理

植被和土壤是遥感干旱监测中主要的两种地物类型, 其反射率特征见图 1(a)。土壤反射率从可见光、近红外、短波红外的反射率依次增加; 而植被因植物叶片组织对蓝紫光和红光有强烈的吸收, 在绿光波段有小反射峰, 在红光波段强吸收, 在近红外高反射, 红光波段的强烈吸收和近红外波段的高反射是植被的显著特点。虽然影响土壤反射率的因子有很多, 如有机质、土壤水分、矿物组成、土壤质地等, 但是对同一种土壤类型而言, 影响土壤反射率的主要因素是土壤的含水量, 其反射率随水分含量增加下降, 土壤反射率随含水量变化情况见图 1(b)。吾拉木等利用 PROSPECT 模型模拟

收稿日期: 2010-12-26, 修订日期: 2011-03-28

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)项目(2008AA121806), 公益性行业(气象)专项(GYHY200806022)和国家自然科学基金项目(40771148)资助

作者简介: 冯海霞, 女, 1976 年生, 山东交通学院讲师 e-mail: fhx76@163.com

\* 通讯联系人 e-mail: qmqin@pku.edu.cn

叶片水分含量,与 ETM 的 band4(0.76~0.90  $\mu\text{m}$ ), band5(1.55~1.75  $\mu\text{m}$ ), band7(2.08~2.35  $\mu\text{m}$ )进行拟合,发现第 5 和第 7 波段反射率都随着植被水分的增加而减少,且叶片水分含量与第 5 波段的相关性比第 7 波段强,第 4 波段(近红)随水分含量变化的幅度较小<sup>[9]</sup>,详见图 1(c)。2009 年 8 月宁夏喊叫水地区严重缺水,虽然正值玉米生长的旺季,但田间玉米因不同的浇灌情况,干旱程度不同,根据叶子情

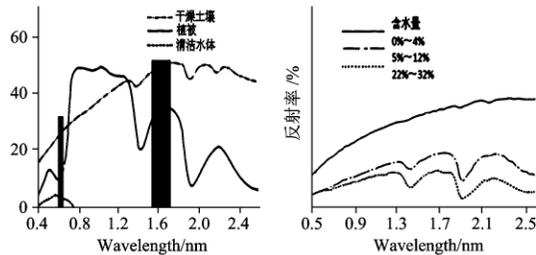
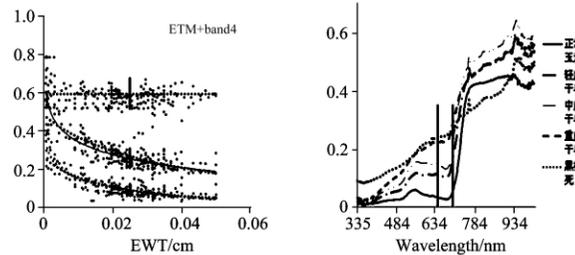


Fig 1 The relationship moisture content and of spectral feature

- (a): Reflectance spectra of dry soil, vegetation and clean water;  
 (b): Relationship of reflectance and soil moisture content;  
 (c): Relationship between simulated ETM+ leaf reflectance and EWT;  
 (d): The reflectance spectra of different drought levels of maize

况,划分了正常、轻度干旱、中度干旱、重度干旱、枯死五种情况,用 ASD 光谱仪测量玉米光谱(测量的光谱范围从 330~1 040 nm),植被从正常到枯死,在测量范围内红光波段的变化最大,详见图 1(d)。综上分析,在可见光到短波红外波段,对(土壤和植被)水分含量变化最为敏感的波段是红光和短波红外波段,因此本文选择对水分变化敏感的红光和短波红外作为水分监测的波段。



## 2 方法

### 2.1 PDI, MPDI 和 SPSI 的构建简介

基于 ETM 数据,詹志明提出垂直干旱指数(PDI),利用 NIR-Red 三角形特征空间中任意一点  $E(R_{\text{red}}, R_{\text{nir}})$  到土壤基线的垂线  $L$  的距离表征区域的干旱状况,见图 2(a),其值越大,距离  $L$  越远,表征地表越干旱<sup>[7]</sup>,其表达式为

$$PDI = \frac{1}{\sqrt{M^2 + 1}} \{R_{\text{red}} + MR_{\text{nir}}\} \quad (1)$$

$B-C$  为土壤基线,  $L$  是过坐标原点且垂直于  $BC$  的垂线,  $M$  为土壤线  $BC$  的斜率,  $R_{\text{red}}$  和  $R_{\text{nir}}$  分别为经过大气校正后的红光、近红外波段反射率<sup>[7]</sup>。

将植被覆盖度引入,提出改进型的垂直干旱指数 MPDI。

$$MPDI = \frac{R_{\text{red}} + MR_{\text{nir}} + f_v(R_{\text{red},v} + MR_{\text{nir},v})}{(1 - f_v) \sqrt{M^2 + 1}} \quad (2)$$

其中,  $R_{\text{red},v}$  和  $R_{\text{nir},v}$  代表植被在 Red 和 NIR 波段的反射率,  $f_v$  为植被覆盖度。

针对全植被覆盖的情况,短波红外垂直失水指数(SPSI)利用 NIR-SWIR 梯形特征空间中任意点到 NIR-SWIR 基线的垂线  $L$  的距离来描述植被干旱状况<sup>[9]</sup>,其表达式为

$$SPSI = \frac{1}{\sqrt{M^2 + 1}} (R_{\text{SWIR}} + MR_{\text{NIR}}) \quad (3)$$

式中,  $R_{\text{SWIR}}$  和  $MR_{\text{NIR}}$  分别为大气校正后的近红和短波红外波段反射率;  $M$  为 NIR-SWIR 基线的斜率。

PDI, MPDI 和 SPSI 经验证,都取得了不错的监测效果<sup>[7-9]</sup>。

### 2.2 基于 SWIR-Red 特征空间的干旱监测模型

本文选择了宁夏回族自治区永宁县为研究区。永宁县地处宁夏河套平原中部,东临黄河,西倚贺兰山,是宁夏回族

自治区首府银川市的郊县。属中温带干旱气候区,大陆性气候特征十分明显,年平均气温 8.7  $^{\circ}\text{C}$ ,年平均降水量很为 201.4 mm,降水量在一年中分配很不均匀,多集中在 7, 8 和 9 三个月,约占全年总降水量的 62.2%。农业以灌溉为主,是国家确定的商品粮基地县之一。

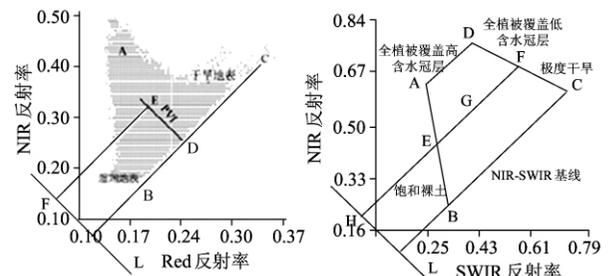


Fig 2 Sketch map of PDI and SPSI

- (a): Sketch map of PDI; (b): Sketch map of SPSI

### 2.2.1 数据处理

研究区的遥感影像为 2009 年 8 月 6 日获取的 TM 数据,利用 6S(second simulation of satellite signal in the solar spectrum)模型进行了大气校正。准确校正需要输入卫星过境时刻的大气廓线数据,如气溶胶、大气水汽含量等,但获取实测数据比较困难,本文选择了 6S 模型提供的标准类型进行校正,大气廓线类型选择为中纬度夏天,气溶胶类型为大陆性,地表为非均匀表面<sup>[16-18]</sup>。根据头文件提供的参数,首先对数据进行辐射校正,把图像灰度值转换为具有物理意义的辐亮度,计算大气顶部反射率,然后利用 6S 模型进行地表真实反射率的反演,得到了校正后的每景影像的地表真实反射率。然后利用地形图对影像进行了几何精校正,纠正后的误差均小于 1 个像元。

### 2.2.2 SWIR-Red 特征空间

利用经过大气校正的研究区 TM 的 band3(Red)、band4 (NIR) 和 band5 (SWIR), 构建 NIR-Red, NIR-SWIR 和 SWIR-Red 空间, 其特征空间如图 3。

在图 3 可看出, 在 SWIR-Red 光谱空间中, 同样存在类似于 NIR-Red 空间中的土壤基线, 称之为 SWIR-Red 基线,

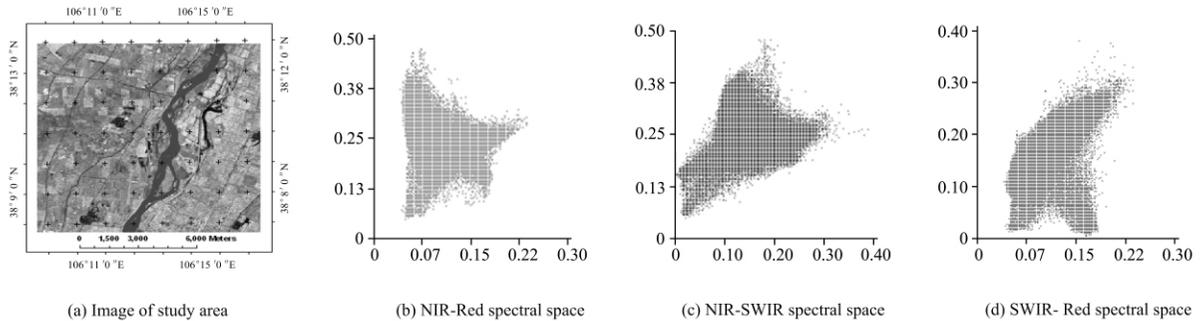


Fig 3 Image of study area and spectrum feature space

(a): Image of study area; (b): NIR-Red spectral space; (c): NIR-SWIR spectral space; (d): SWIR-Red spectral space

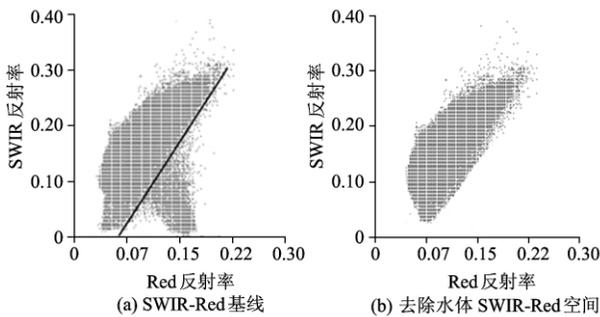


Fig 4 Spectrum feature space of SWIR-Red without water

(a): SWIR-Red base line;  
(b): Spectrum feature space of SWIR-Red without water

### 2.2.3 干旱监测模型的构建

在 SWIR-Red 特征空间上, 与 NIR-Red, NIR-SWIR 特征空间类似, 同样可以用 SWIR-Red 特征空间上的任意一点到直线 SWIR-Red 基线的垂线 L 的距离来描述干旱的情况。植被在红光波段容易饱和, 植被含水量高和植被含水量低时的红光反射率差异较小, 使得植被在特征空间中的分布比较集中; 而土壤 in 红光波段反射率的基值较高, 且干燥的土壤和湿润的土壤在红光和短波红外的差异较大。为了解决植被在红光波段包含较快, 增大植被在含水量较高和较低时在短波红外和红光波段的差异, 缩小干燥的土壤和湿润的土壤在短波红外和红光波段的差异, 进行归一化处理, 以 band5 - band3 和 band5 + band3 重新构建特征空间。以  $R_d$  表示 band5 - band3,  $R_s$  表示 band5 + band3, 利用  $R_d$  和  $R_s$  构建的光谱特征空间见图 5。在  $R_d - R_s$  光谱特征空间中, 从任何一个点到直线 L 的垂直距离可以表示农田的干旱情况, 建立基于  $R_d - R_s$  光谱空间特征的归一化干旱监测指数(normalized perpendicular drought index, NPDI), 如图 6, 其表达式为

$$NPDI = \frac{1}{\sqrt{M^2 + 1}}(R_s + MR_d) \quad (4)$$

如图 4(a)。对照影像和 SWIR-Red 空间, 可发现线下部分是河流(黄河), 因为河流中含沙量较大, 导致其红光反射率增加, 散点图向红光偏移, 线上靠近坐标原点的三角区也是水质比较纯净的水体。去除水体的后, 散点图的成近似梯形分布, 如图 4(b)。

式中,  $R_d$  和  $R_s$  分别表示经过大气校正的短波红外波段和红光反射率的差、和,  $M$  为 B-C 线的斜率, B-C 线在  $R_d - R_s$  特征空间里经过空间统计分析可以得到, 称之为  $R_d - R_s$  基线, 并由 B 至 C 土壤渐干, 其数学表达式为

$$R_d = MR_s + I \quad (5)$$

式中,  $I$  为 SWIR-Red 基线在纵坐标上的截距。L 经过坐标原点且垂直于  $R_d - R_s$  基线。

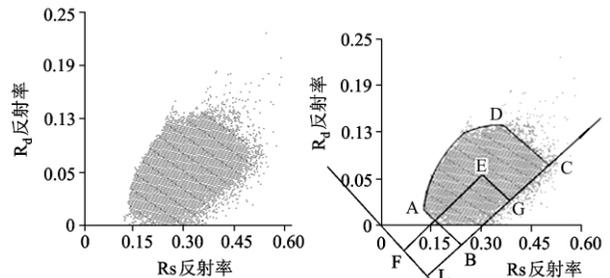


Fig 5 Spectrum feature space of  $R_d - R_s$  Fig 6 Sketch map of NPDI of  $R_d - R_s$

在  $R_d - R_s$  光谱特征空间中, 黑体位于坐标原点, 其余的物体越湿润越接近原点(构造  $R_d - R_s$  空间时, 去除了水体), 距离 L 线越远, NPDI 的值越大, 说明水分胁迫越厉害, 干旱情况越严重。

### 2.2.4 模型分析

在重构的  $R_d - R_s$  特征空间里, 见图 6, A 为水分充足的全植被覆盖区, D 为极低水分含量的全植被覆盖区, B 为水分饱和的裸露土壤分布(重构  $R_d - R_s$  空间时, 去除了水体), C 为极度干旱的裸露土壤。无植被覆盖的裸露土壤落在  $R_d - R_s$  基线, BC 线上的像元从湿润到干旱逐渐变化; 从 A 到 D, 是全植被覆盖的高含水量像元到全植被覆盖低含水量; 散点图中间部分为不完全植被覆盖区域的干旱变化状况。AB 和 CD 几乎是平行的, 且近乎垂直于  $R_d - R_s$  基线, 即极高水分含量的全植被覆盖区的 NPDI 和湿润土壤区域的 NPDI 值基

本相等, 极低水分含量的全植被覆盖区的 NPDI 和极度干旱的裸露土壤的 NPDI 值基本相同。

NPDI 模型选择的是对水分变化敏感的红光和短波红外波段, 比 PDI, MPDI 和 SPSI 对水分的监测精度都高, 且经过归一化处理后, 使植被和土壤的 NPDI 具有一定的可比性。NPDI 解决了 PDI 指数对于地表覆盖类型差异较大的区域之间不具有可比性的问题; NPDI 可以同时监测植被和土壤, 改进了 PDI 只适合于在低植被覆盖或裸露土壤的条件下对土壤水分的监测, 也弥补了 SPSI 只适宜于植被冠层的叶片含水量的监测; 同时因为它是  $R_d$  和  $R_s$  构建的空间散点图, 也较好的解决了 MPDI 的精度依赖于植被盖度的反演精度的问题。

从以上对 NPDI 模型的分析来看, NPDI 模型可以实现对不同覆盖度的农田长时间的干旱监测, 部分解决了农作物整个生长季中, 不同时期各模型的监测精度不同的问题, 可实现植被从播种到收割整个过程的监测。

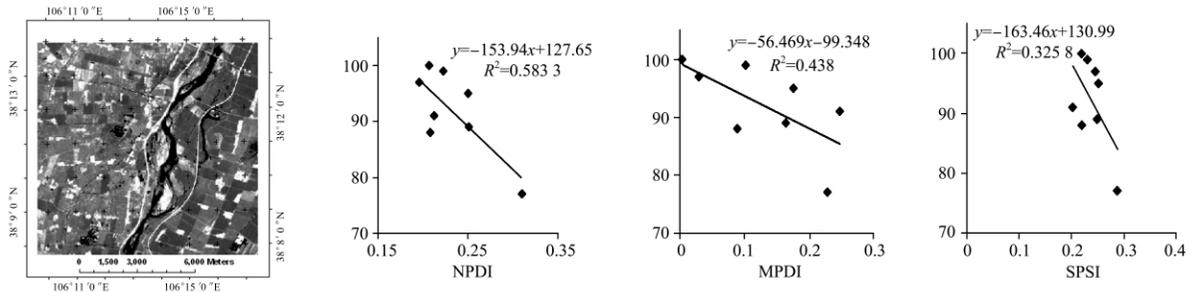


Fig 6 The validation of NDPI

(a): Sample points; (b): Correlation of soil moisture in 10 cm with NPDI, MPDI, SPSI

以宁夏惠农、平罗、陶乐、永宁、盐池、中宁、韦州、同心、兴仁、海原、西吉、固原、隆德、泾源 14 个农业气象站点 2008 年 3 月 8 号、3 月 18 号、3 月 28 号和 4 月 8 号测量的 10 cm 处的土壤水分和 2008 年第 68, 78, 86, 98 天的 MODIS09 反射率产品计算的 NPDI 之间的  $R^2$  分别为 0.574, 0.549, 0.532 和 0.578。

## 2.4 讨论

(1) 基于  $R_d - R_s$  光谱空间特征构建的归一化的干旱监测指数 NPDI, 其数学表达式和相关参数仍然是基于一条固定  $R_d - R_s$  基线, 而基于 SWIR 和 Red 变换的  $R_d - R_s$  基线, 并不是一条固定线,  $R_d - R_s$  基线的确定影响着 NPDI 的精度。

(2) 植被在红光反射率较低, 容易饱和, 植被在红光波段因含水量的差异引起的反射率的变化受大气辐射传输干扰, 准确的大气校正影响着模型的精度。虽然归一化的变换, 消除了部分影响, 但精确的大气校正仍然是影响模型精度的一个方面。

(3) NPDI 考虑了土壤、植被的光谱特征, 监测的是一个像元(基本上都是混合像元)土壤和植被综合的干旱情况, 而野外实验的土壤含水量和植被水分含量数据是单独测量的,

## 2.3 验证和应用

研究区影像构建的  $R_d - R_s$  空间, 经过空间统计可得  $R_d - R_s$  基线的斜率  $M=0.31$ , 根据 NPDI 的公式(6), 利用遥感软件可获取研究区的 NPDI 和 MPDI 分布图如图 6(a)。

2009 年 8 月 10 号, 在研究区永宁县望红村和东方村附近进行实验观测, 实验地的农作物为玉米, 分别测量了玉米的光谱和土壤含水量, 土壤含水量为永宁县望红村和东方村用 TDR100 测量的。查阅气象资料可知, 从 8 月 6 号到 8 月 10 之间无降水, 因此实验数据和影像数据获得的 NPDI 具有较好的可比性。利用采样点的经纬度, 可获取样点在图像上的位置和样点的 NPDI 值。分别用样点 NPDI, MPDI 和 SPSI 的值和 10 cm 土壤含水量值进行拟合, 散点图如图 6(b), (c)和(d)。可见其相关系数分别为  $R^2 = 0.583$ ,  $R^2 = 0.438$  和  $R^2 = 0.326$ , 即 NPDI 模型的监测效果要优于 MPDI 和 SPSI。

很难实测出土壤和植被水分含量的综合值。虽然土壤、植被水分的综合值与各组分的水分含量有很强的相关性, 模型也取得了较好的验证结果, 但对 NPDI 的验证仍是个问题。

## 3 结论

从对农田的遥感干旱监测中最主要的两种地物类型(植被和土壤)的光谱特性分析入手, 选择了对水分变化敏感的 Red 和 SWIR 波段监测干旱状况, 通过归一化处理, 以  $SWIR - Red(R_d)$  和  $SWIR + Red(R_s)$  构建基于  $R_d - R_s$  谱空间特征, 提出了干旱监测的新方法——归一化的干旱监测指数 NPDI。此模型是对 PDI, MPDI 和 SPSI 等模型的进一步改进, 可实现对不同植被覆盖度的地表长时间的干旱监测。利用野外实测的 10 cm 土壤含水量数据对 NPDI 和 MPDI 进行验证, 结果表明: NPDI, MPDI 与 10 cm 处的土壤含水量模型都具有较高的相关性, 其  $R^2$  分别为 0.583 和 0.438, NPDI 模型的监测效果要优于 MPDI。本文提出的方法, 具有较明确的生物物理意义, 适宜于对不同覆盖度的、从播种到收割整个生长季的农田干旱监测, 简单易用, 在实际的农田干旱监测中具有较高的应用潜力和推广价值。

## References

- [ 1 ] Peters A J, Walter-Shea E A, Lei J, et al. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2002, 65(1): 71.
- [ 2 ] Yao Y J, Liang S L, Qin Q M, et al. Journal of Applied Meteorology Climatology, 2010, 49(8): 1665.
- [ 3 ] Jackson T J, Cosh M H, Bindlish R, et al. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(12): 4256.
- [ 4 ] Han Ping, Wang Pengxin, Zhang Shuyu, et al. Mathematical and Computer Modelling, 2010, 51: 1398.
- [ 5 ] WAN Zheng-ming, WANG Peng-xin, LI Xiao-wen. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(1): 61.
- [ 6 ] Chandrasekar K, Sai MVRS, Roy PS, et al. International Journal of Remote Sensing, 2010, 31(15): 3987.
- [ 7 ] Raghavendra B Jana, Binayak P Mohanty. Journal of Hydrology, 2011, 399: 201.
- [ 8 ] Ghulam A, Kusky T, Teyip T, et al. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2011, 77(2): 149.
- [ 9 ] HAN Li-juan, WANG Peng-xin, WANG Jin-di, et al(韩丽娟, 王鹏新, 王锦地, 等). Science in China(Series D: Earth Sciences)(中国科学 D·地球科学), 2005, 35(4): 371.
- [ 10 ] ZHAN Zhi-ming, QIN Qi-ming, Abduwasit Ghulam, et al(詹志明, 秦其明, 阿布都瓦斯提·吾拉木, 等). Science in China(Series D: Earth Sciences)(中国科学 D·地球科学), 2006, 36(11): 1020.
- [ 11 ] Abduwasit Ghulam, QIN Qi-ming, ZHAN Zhi-ming. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2007, 62: 150.
- [ 12 ] Abduwasit Ghulam, LI Zhao-liang, QIN Qi-ming, et al(阿布都瓦斯提·吾拉木, 李召良, 秦其明, 等). Science in China(Series D: Earth Sciences)(中国科学 D·地球科学), 2007, 37(7): 957.
- [ 13 ] Kogan F N. Advances in Space Research, 1995, 15: 91.
- [ 14 ] Tang Ronglin, Li Zhaoliang, Tang Bohui. Remote Sensing of Environment, 2010, 114: 540.
- [ 15 ] Richardson A J, Wiegand C L. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1977, 43(12): 1541.
- [ 16 ] Vermote E F, Tanre D, Deuze J L, et al. User's Guide. France: Laboratoire d'optique Atmospherique, 1997.
- [ 17 ] DU Xin, CHEN Xue-yang, MENG Ji-hua, et al(杜鑫, 陈雪洋, 蒙继华, 等). Remote Sensin for Land & Resource(国土资源遥感), 2010, 2: 22.
- [ 18 ] Abduwasit Ghulam, Qin Qiming, Zhu Lin, et al. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(23): 5509.

## The New Method Monitoring Agricultural Drought Based on SWIR-Red Spectrum Feature Space

FENG Hai-xia<sup>1,3</sup>, QIN Qi-ming<sup>1\*</sup>, LI Bin-yong<sup>2</sup>, LIU Fang<sup>1</sup>, JIANG Hong-bo<sup>1</sup>, DONG Heng<sup>1</sup>, WANG Jin-liang<sup>1</sup>, LIU Ming-chao<sup>1</sup>, ZHANG Ning<sup>1</sup>

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

2. National Marine Environmental Monitoring Center, Dalian 110623, China

3. Shandong Jiaotong University, Ji'nan 250023, China

**Abstract** Drought was a chronic, natural disaster, and Remote sensing drought monitoring had become a potential research field. In the present, short-wave infrared and red bands which sensitive to moisture variation were selected to monitor farmland drought conditions by analyzing the spectral characteristics of vegetation and soil. The goal of this paper was to provide a new method of drought monitoring——normalized drought monitoring index (NPDI), based on new constructed spectrum feature space by the difference of SWIR and Red and the sum of SWIR and Red. Field surveyed soil moisture verified NPDI model, and the result showed that NPDI and MPDI model could effectively monitor agricultural drought, and that had high correlation with soil moisture. The  $R^2$  was 0.583 and 0.438 with soil water of 10 cm. The monitoring effect of NPDI model was better than the MPDI. This model was further improvement to PDI and MPDI, and it could monitor the drought condition of different vegetation coverage and whole growing season. It has high application potential and popularization value.

**Keywords** SWIR-Red spectrum feature space; Normalized drought monitoring index (NPDI); Remote drought monitoring

(Received Dec. 26, 2010; accepted Mar. 28, 2011)

\* Corresponding author