文章编号: 1672 - 3317 (2020) 08 - 0129 - 07

# 基于 VSWI 和 TVDI 差异的河套灌区沈乌灌域

## 耕地灌溉面积遥感监测

田鑫<sup>1,2</sup>,李瑞平<sup>1,3\*</sup>,王思楠<sup>1</sup>,范雷雷<sup>1</sup>,于明辉<sup>4</sup>

(1.内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院,呼和浩特 010018; 2.威海市城市规划技术 服务中心有限公司,山东 威海 264200; 3.内蒙古自治区农牧业大数据研究与应用重点实验室, 呼和浩特 010018; 4.威海市国土资源地理信息中心,山东 威海 264200)

摘 要: 【目的】尝试利用遥感数据实现对河套灌区沈乌灌域灌溉面积的提取,为沈乌灌域现代化管理提供理论依据。【方法】利用 Landsat-8 数据对研究区域的植被供水指数 VSWI、温度干旱指数 TVDI 进行反演,根据实测数据,构建基于 VSWI 和 TVDI 差异的灌溉面积监测模型,对沈乌灌域的灌溉面积进行遥感提取。【结果】2 种模型具有较高的一致性,基于 VSWI 和 TVDI 的灌溉面积监测模型反演精度分别为 85.3%和 89.7%。【结论】证明了 2 种监测模型的可行性,同时发现基于 TVDI 差异的灌溉面积监测模型精度高于基于 VSWI 差异的灌溉面积监测模型。 关键词:灌区管理;灌溉面积;遥感; VSWI; TVDI

中图分类号: S274.3

文献标志码:A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2019273

田鑫, 李瑞平, 王思楠, 等. 基于 VSWI 和 TVDI 差异的河套灌区沈乌灌域耕地灌溉面积遥感监测[J], 灌溉排水学报, 2020, 39(8): 129-135.

TIAN Xin, LI Ruiping, WANG Sinan, et al. Using Remote Sensing to Estimate Irrigation Area in Shenwu Region in Hetao Irrigation District [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(8): 129-135.

## 0引言

【研究意义】我国是个农业发达但水资源匮乏的 国家,伴随着我国农业的发展,水资源合理的分配已 成为我国农业得以健康发展的基础,而灌溉面积监测 作为水资源合理配置的重要依据也越来越受到重视 <sup>[1-2]</sup>。沈乌灌域作为河套灌区的重要组成部分,区域 内干旱少雨,蒸发量远大于降水量,水资源紧缺、有 效灌溉面积增速减缓缓慢的现状日益严重,因此通过 对沈乌灌域的灌溉面积进行监测,为沈乌灌域水资源 合理配置提供理论依据十分必要。

【研究进展】20世纪的90年代初期,杜文才等<sup>[3]</sup> 利用卫星遥感技术对我国宁夏中宁地区的灌溉情况 展开了调查和分析,并绘制出了中宁地区的水资源、 农业灌溉设施分布图等。随后,水利部将河南省的灌 区作为研究对象,结合美国陆地卫星 4~5 号专题制图 仪获取的多波段扫描影像以及河南省现有的数据资 料等,进行实地的勘察,基本实现了利用遥感技术实 现对有效灌溉面积的测量<sup>[4]</sup>。许迪等<sup>[5]</sup>对我国山东省 簸箕李灌区的农业灌溉系统展开了分析和调查,建立 了识别系统,对于灌溉面积测量方法的开发起到了积 极的作用。21 世纪初期,我国开展了宁夏引黄灌溉 面积及作物种植结构遥感调查项目研究,结合遥感技 术、地理信息系统和全球定位系统,实现了对宁夏引 黄灌区的灌溉面积、农作物分布、土地结构等数据的 收集和分析。易珍言等<sup>[6]</sup>、沈静<sup>[7]</sup>分别采用对 PDI、 MPDI 差值的阈值进行确定的方法,结合少量实测数 据,对灌溉面积进行了提取,取得了较好的成果,但 均需提前知晓灌溉行为发生的准确时间。

【切入点】基于以上可以发现,遥感技术在灌区 灌溉面积监测上具有广泛的应用,基于指数差异阈值 的灌溉面积监测方法也取得了一定的进展,但植被供 水指数 VSWI、温度植被干旱指数 TVDI 等在灌溉面 积提取方面的应用较少,多用于研究区的旱情监测等, 因此,本文尝试采用基于 Landsat-8 卫星数据的植被 供水指数 VSWI、温度植被干旱指数 TVDI 结合地表 温度 LST 变化对研究区的灌溉面积进行提取。

【拟解决的关键问题】探索 VSWI、TVDI 在灌溉 面积遥感监测模型创建中作为主要参数的可行性。

收稿日期: 2019-09-19

基金项目:国家自然科学基金项目(51769021)

作者简介:田鑫(1992-),男。硕士研究生,研究方向为节水灌溉与农业水利信息化技术。E-mail:15124726423@163.com

通信作者: 李瑞平(1973-),男。教授,博士生导师,博士,研究方向 为节水灌溉与农业水利信息化技术。E-mail: nmglrp@163.com

## 1 研究区概况与数据来源

#### 1.1 研究区概况

沈乌灌域位于巴彦淖尔市的西南部, 三盛公枢纽 西北部,106 08′E-107 °10′E,40 °08′N-40 °57′N, 沈乌灌域是内蒙古河套灌区的重要组成部分。灌域东 南至黄河与鄂尔多斯市隔河相望,西南与阿拉善盟毗 邻,东北部与解放闸灌域接壤,西北靠阴山山脉,东 西长 92 km, 南北宽 65 km。承担着中国林业科学研 究院沙林中心,巴彦淖尔市6个国营农场,磴口县5 个苏木、镇、办事处, 杭锦后旗1个镇, 阿拉善盟1 个国营农场及鄂尔多斯市杭锦旗巴拉亥镇部分耕地 的灌排任务, 灌域内土壤类型以壤质砂土和砂质壤土 居多,并含有少部分的砂土,沈乌灌域具有明显的大 陆性气候特点,冬季严寒,夏季短促。气候干旱少雨, 蒸发强烈,年平均降雨量在 130~215 mm 之间,年 平均蒸发量在 2100~2400 mm 之间。蒸发量与降水 量的严重失衡造成沈乌灌域对引黄灌溉的绝对依赖。 1.2 数据来源

本次研究选用的数据为 Landsat-8 卫星影像数据, 共选用了3 景影像,根据往年灌溉时间,2016 年 7—9 月,选取每月云量较少的影像,用于研究区8月底第 5 次灌溉面积的提取,详细情况见表1。

表1 研究所用 Landsat OLI/TIRS 影像数据

| Table1 Landsat OLI/TIRS | image data for | r research institute |
|-------------------------|----------------|----------------------|
|-------------------------|----------------|----------------------|

| 轨道号/行号 Track No./Line No | 129/32     | 130/32     |
|--------------------------|------------|------------|
|                          | 2016-07-24 | 2016-08-25 |
| Landsat 8                | 3:36:30    | 3:36:55    |
| 过境时间(GMT)                | 2016-09-19 |            |
|                          | 3:30:50    |            |

收集到耕地野外调查样本 379 份,用于模型构建 及土地利用类型图的绘制,其中玉米 145 个,葵花 177 个,瓜类 57 个。非耕地采样点采用随机采样的 方式,共采集沙地样本点 34 个,建设用地采样点 25 个,林地采样点 26 个,同时于 8 月初对研究区已灌 溉区域进行采样,共计 182 个采样点,用于灌溉面积 反演结果的检验。

## 2 模型构建

本文以內蒙古河套灌区沈乌灌域为研究区,基于 Landsat-8数据产品对灌溉面积进行监测,构建灌溉 面积遥感监测模型。通过对研究区归一化植被指数 NDVI、地表温度 LST、植被供水指数 VSWI、温度植 被干旱指数 TVDI 的反演,计算相邻影像的 VSWI、 TVDI 差值,进而计算耕地实测样本点的 VSWI、TVDI 差值的均值,通过差值的均值来对每幅影像的灌溉行 为进行分析,构建基于 VSWI 差异和 TVDI 差异的灌溉面积监测模型,结合基于 SEE5.0 决策树分类法获取的耕地边界矢量图,对耕地的灌溉面积进行提取。

## 2.1 归一化植被指数 NDVI 反演

遥感光谱数据在计算分析生物量、植被生长状况 上都需要借助植被指数,是一项无量纲参数,在光谱 数据分析中起到了至关重要的作用。没有任何条件的 辅助以及约束,植被状态都可以通过光谱信息表达出 来,同时能够对植被的生长活力、生物量、覆盖面积 等等这些信息进行定性、定量的评价和分析<sup>[8]</sup>。1978 年,Deering<sup>[9]</sup>首次提出了*RVI*(简化比值植被指数), 通过非线性的归一化处理后,能够得到*NDVI*(归一 化植被指数),并将其约束在[-1,1]范围内,那么可 以得到公式:

$$NDVI = \frac{\rho_{\rm NIR} - \rho_{\rm R}}{\rho_{\rm NIR} + \rho_{\rm R}}$$
(1)

式中:ρ<sub>NIR</sub> 近红外波段的真实地表反射率;ρ<sub>R</sub> 为红光 波段的真实地表反射率; *NDVI* 就是 *RVI* 通过非线性 归一化处理后的结果。

#### 2.2 地表温度反演

地表温度是当前我们评估大气层与陆地表层之间的水分以及能量平衡的关键性指标之一,同时也能够反映出土壤墒值、评估作物的产量等,因此对于遥 感模型的建立是非常关键的,此外对于土壤的盐碱化、 保水能力、气候变化等研究都提供了重要的参考价值。 遥感技术的发展推动了地表温度遥感反演算法的精确度和准确度。目前,大范围的地表温度进行监控常常会用到热红外遥感。地表温度反演的算法主要有 3 种:单窗算法、单通道算法及劈窗算法<sup>[10-12]</sup>,本研 究采用劈窗算法,如式(2)所示:

$$B(T_{s}) = [L_{\lambda} - L \uparrow -\tau(1 - \varepsilon)L \downarrow ]/\tau\varepsilon, \qquad (2)$$

式中:黑体热辐射亮度 $\frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot \mu m}$ 、热红外辐射亮度、地表比辐射率、地表真实温度(K)、大气透过率依次由  $B(T_S)$ 、 $L_{\lambda}$ 、 $\varepsilon$ 、 $T_S$ 、 $\tau$ 所代表,而大气向上、向下的辐射亮度 $\frac{W}{m^2 \cdot sr \cdot \mu m}$ 则依次由  $L \uparrow 与 L \downarrow$ 所代表。

根据研究区往年的灌溉时间,8月初的第5次灌溉和10月底的秋灌,灌溉作物种类基本涵盖研究区主要农作物,但10月底前后卫星影像云量普遍较高,因此选取7月24日,8月25日,9月16日3景影像对地表温度分布情况进行反演,反演结果如图1所示根据耕地、林地、建设用地、沙地的实测点坐标,计算7-8月、8-9月的地表温差LST7-LST8、LST8-LST9,根据表2可以看出,林地、建设用地、沙地的地表温

度 7—9 月始终呈下降趋势, 而耕地 7—8 月地表温度 骤降, 降幅较其余 3 种土地类型更为明显, 8—9 月 耕地地表温度小幅回升。 表 2 不同土地类型地表温度时间变化

 Table 2
 Time variation of surface temperature in

| 根据以上分析,造成耕地温度变化的原因是灌溉,   |
|--------------------------|
| 进一步分析,耕地78月的温度降低若是降雨引起,  |
| 首先其温度降幅应低于或持平于其他土地利用类型,  |
| 其次其地表温度变化趋势应与其余 3 种土地利用类 |
| 型基本相同。                   |

| different land types               |           |                     |          | °C            |
|------------------------------------|-----------|---------------------|----------|---------------|
| 地表温差                               | 耕地        | ±± +44              | 建设用地     | <u>wh</u> +++ |
| Surface temperature                | Cultivate | ivate Land used for |          | 79 理<br>Sand  |
| difference                         | d land    | wooulallu           | building | Sanu          |
| LST7-LST8                          | 13.9      | 3.7                 | 5.2      | 9.1           |
| LST <sub>8</sub> -LST <sub>9</sub> | -4.6      | 3.2                 | 3.7      | 6.8           |



图1 沈乌灌域地表温度反演结果

Fig.1 Inversion results of surface temperature in Shenwu irrigation area

#### 2.3 VSWI、TVDI 差异模型构建

Carlson 等<sup>[13]</sup>首次提出了植被供水指数 (Vegetation Supply Water Index, *VSWI*)的概念,其 是在地表温度和植被指数的基础上建立的一种监控 模型,能够实现对植被的干旱情况进行观察。具体的 表达式为:

$$VSWI = B * \frac{NDVI}{T_{\rm s}} , \qquad (3)$$

式中:地表温度以 T<sub>S</sub>表示,单位为 k;归一化植被指数为 NDVI;图像增强系数为 B。

Sandholt 等<sup>[14]</sup>首次提出了温度植被干旱指数 (Temperature Vegetation Dryness Index, *TVDI*)的概念, 其是在 *T<sub>s</sub>-NDVI* 特征空间基础上发展而来的。这种干 旱指数能够计算出植被指数以及地表温度,其数据来 源于遥感影像,为此可以有效地避免出现土壤水分状 态监控中的问题,大大降低了植被覆盖度的影响程度, 进而提高监测数据的准确度,为此对于地形复杂、面 积较大区域的干旱监测具有很好的适应性。计算式(4) 如示:

$$TVDI = \frac{T_{\rm S} - T_{\rm S-min}}{T_{\rm S-max} - T_{\rm S-min}}, \qquad (4)$$

式中:湿边方程以*T*<sub>s-min</sub>表示;干边方程以*T*<sub>s-max</sub>表示; 地表温度以*T*<sub>s</sub>表示。*TVDI*的值域为[0, 1]。

植被供水指数和温度植被干旱指数可以描述植 被的供水情况和土壤的含水率,植被供水指数越大, 植被的供水情况越好,温度植被干旱指数越小,土壤 含水率越高,这2种情况都能证明灌溉行为的发生,因此可以利用以上2种指数对灌溉面积进行监测,对于灌溉面积的提取,关键在于确定灌溉后的影像,基于以上分析可以发现,灌溉后影像的植被供水指数 VSWI 会高于灌溉前的影像。而 TVDI 会低于灌溉前 的影像,以此可以得出灌溉行为与上述2种指数的关 系,如式(5)和式(6):

$$I_{\mathbf{v}} = VSWI_{t1} - VSWI_{t2}, \tag{5}$$

$$T_{\rm T} = TVDI_{t1} - TVDI_{t2}, \tag{6}$$

式中: *I*<sub>v</sub>、*I*<sub>T</sub>分别表示研究区某个像元处的灌溉程度; *VSWI*<sub>11</sub>、*TVDI*<sub>11</sub>为前一幅影像的植被供水指数和温度 植被干旱指数; *VSWI*<sub>12</sub>、*TVDI*<sub>12</sub>为后一幅影像的植被 供水指数和温度植被干旱指数。

在排除降水影响的情况下,对于植被供水指数, 如果后一幅影像某一处像元的植被供水指数大于前 一幅影像,即 I<sub>v</sub>小于 0,可以认为在该像元处,发生 了灌溉行为,且 I<sub>v</sub>值越小,灌溉行为越明显。对于温 度植被干旱指数来说,如果后一幅影像某一处像元的 温度植被干旱指数小于前一幅影像,即 I<sub>T</sub>大于零,则 可以认为在该像元处发生了灌溉行为。且 I<sub>T</sub>值越大, 灌溉行为越明显。

按照所收获到的地表温度的反演结果以及归一 化植被指数的运算数据,以 VSWI 运算公式为基准, 对 B 进行取值,即 B=10 000,在运算之后得出 2016 年 7 月 24 日、8 月 25 日、9 月 16 日的植被供水指数, 根据式 (3),对各幅影像的 VSWI 进行计算,并根 据式(5),计算时间相邻影像的 VSWI 差值,根据 耕地采样点经纬度数据,得到耕地采样点 VSWI 差值 的均值,结果见表 3。从表 3 可以看出, 8 月耕地采 样点的植被供水指数比7月同比高12.5,相比9月同 比高 8.7, 基于以上分析, 结合本文构建的基于 VSWI 差异的灌溉面积监测模型可以看出,8月的灌溉行为 十分明显,可以作为灌溉面积提取的依据。

#### 表3 耕地采样点 VSWI 差值均值

#### Table3 Mean value of VSWI difference of

| cultivated land measured points        |            |  |  |
|--|------------|--|--|
| VSWI <sub>t1</sub> -VSWI <sub>t2</sub> | $I_{ m v}$ |  |  |
| VSWI7-VSWI8                            | -12.5      |  |  |
| VSWI <sub>8</sub> -VSWI9               | 8.7        |  |  |

故而,按照国家气象局气候司所发布的相应规范

对干旱等级进行划分,即重旱、中旱、轻旱、正常、 湿润依次为 10 cm 土壤相对湿度<40%、40%~50%、 50%~60%、60%~80%、>80%; 而基于 VSWI 则依 次为 0~5、5~10、10~15、15~25、25~35。获取了研 究区 7-9 月的旱情分布情况,见图 2。从图 2 同样 可以看出,8月耕地的植被供水指数情况确实相比7 月和9月明显提高。在获取沈乌灌域研究区地表温度 反演结果及 NDVI 运算结果之后,在对研究区 TVDI 进行运算的时候选用了以ENVI感图像处理软件为基 础二次开发的 TVDI 功能模块。按照 NDVI 对应的地 表温度,从起最高、最小值点对干、湿边进行拟合[15-17], 从而得出该区域 Landsat-8 数据 7 月 24 日、8 月 25 日、9月16日的相应拟合曲线,见图3。





图 3 沈乌灌域 Ts-NDVI 特征空间拟合曲线



表4 耕地实测点 TVDI 差值均值

基于干旱等级划分标准把研究区 TVDI 分成了湿 润、正常、轻旱、中旱、重旱5个等级,即:0~0.2、 0.2~0.4、0.4~0.6、0.6~0.8、0.8~1.0<sup>[18]</sup>,图 4 为详尽 的结果。利用式(4)对3幅影像的温度植被干旱指 数进行计算,并根据野外耕地实测点,计算相邻影像 实测点的 TVDI 差值的均值。从表 4 可以看出, 8 月 实测点的 TVDI 均值小于 7 月和 9 月,根据基于 TVDI 差异的灌溉面积监测模型可以看出,8月的灌溉行为 较为明显,因此选取8月的影像对灌溉面积进行提取。

Table4 Mean value of TVDI difference between the

1.0

| TVDI <sub>t1</sub> -TVDI <sub>t2</sub> IT |       |  |
|---|-------|--|
| TVDI7-TVDI8                               | 0.26  |  |
| TVDI <sub>8</sub> -TVDI9                  | -0.33 |  |



Fig.4 Distribution map of drought in Shenwu irrigation area based on TVDI

## 3 结果与分析

## 3.1 土地利用分类

综合 Landsat-8 影像的光谱特征,植被指数, ISODATA 分类结果作为样本集的属性值,将研究区 5 种主要的地物类型作为训练数据集,基于 SEE5.0 的 决策树分类方法进行土地利用分类,其对于耕地、林 地、沙地、建设用地的分类精度分别为 90.0%、88.5%、 88.2%、88.0%,总精度为 88.7%,其土地利用类型分 类结果如图 5 所示,进而得到沈乌灌域耕地矢量边界。



(a) VSWI 差异模型



图 5 沈乌灌域土地利用类型





(b) TVDI 差异模型



Fig.6 Distribution map of irrigation area in Shenwu irrigation area based on cultivated land vector boundary

表 5 灌溉面积监测结果精度评定

| TT 1 1 F | A 1                 |                     | · · · 1/                |
|----------|---------------------|---------------------|-------------------------|
| Tables   | Accuracy evaluation | ation of irrigation | area monitoring results |
| racies   | ricearacy crain     | anon or minganon    | area monitoring results |

| 灌溉面积统计<br>数据/万 hm <sup>2</sup><br>Irrigation area<br>statistics | 方法<br>Method | 灌溉面积/<br>万 hm <sup>2</sup><br>Irrigated<br>area | 反演面积<br>百分比/%<br>Inverse area<br>percentage | 采样点精度/%<br>Sampling point<br>precision |
|---|--------------|---|---|--|
| 5.237   | VSWI         | 4.723   | 90.2  | 85.3                                   |
|   | TVDI         | 4.757   | 91.3  | 89.7                                   |

### 3.2 耕地灌溉面积提取

根据耕地矢量边界,将基于 VSWI 差异模型、 TVDI 差异模型所获取的研究区第 5 次灌溉面积进行 提取,结果如图 6 所示可以看出,二者具有较高的一 致性,提取的灌溉面积区域基本相同,同时根据统计 数据对 2 种模型的精度进行对比,结果如表 5。根据 反演已灌溉点位占灌溉采样点的百分比, VSWI 和 TVDI 的模型精度分别为 85.3%和 89.7%。

## 4 讨 论

通过指数阈值选取对灌溉面积进行提取,关键在 于对于灌溉行为发生时间的确认及阈值的确定,相较 之前的成果,本次研究通过地表温度的变化确定灌溉 行为发生的时间,针对河套灌区等存在大量沙地的区 域可取的较好的成果。今后的*TVDI*模型创设,会用 到一些参数,譬如地表温度、植被信息等<sup>[19-22]</sup>,在遥 感参数繁杂的推算期间或许会对一定的经验和半经 验公式加以运用,关键参数反演结果在地表复杂度较 高的区域内会出现较大的偏差,从而使*TVDI*监测旱 情情况的精准度无法得到有效地确保。因而,在后期 探究中,需要将各个模型参数的适应范畴和运算条件 理清,结合多年数据,对模型参数进行进一步优化, 为定量化遥感分析打好基础。

### 5 结 论

2种模型反演灌溉面积与灌溉面积统计数据的比 值分别为 90.2%和 91.3%, TVDI 的反演结果更接近于 统计数据,根据反演正确点位与野外采样点的比值分 别为 85.3%、89.7%,证明了 2 种模型的可行性,基 于 TVDI 差异的监测模型精度高于基于 VSWI 差异的 监测模型。

#### 参考文献:

 [1] 楼豫红.区域节水灌溉发展水平综合评价研究[D].北京:中国农业 大学, 2014.

LOU Yuhong. Comprehensive evaluation investigation for regional water-saving irrigation development level[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014.

[2] 冯保清. 我国不同尺度灌溉用水效率评价与管理研究[D]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2013.

FENG Baoqing. Study on the evaluation and management of irrigation water use efficiency for different scales in countrywide[D]. Beijing: Sinohydro Research Institute, 2013.

- [3] 杜文才,王建军,郑小红.国土卫星图像在灌溉面积调查、灌溉环境 及水利条件分析评价中的应用[J].河海大学学报,1992,20(2): 72-75.
- [4] 陈子丹,李纪人,夏夫川. 有效灌溉面积遥感调查方法研究与应用: 以河南省试点工作为例[J]. 遥感信息, 1997, 12(2): 19-24.
- [5] 许迪,李益农,蔡林根,等. 卫星遥感影像在农田灌排系统识别中的应用研究[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 36-39.
  XU Di, LI Yinong, CAI Lingen, et al. Applied study of satellite image in identification of irrigation and drainage system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2004, 20(2): 36-39.
- [6] 易珍言,赵红莉,蒋云钟,等. 遥感技术在河套灌区灌溉管理中的应用研究[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(5): 166-169.
  YI Zhenyan, ZHAO Hongli, JIANG Yunzhong, et al. Application and research of remote sensing in irrigation management of Hetao district[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(5): 166-169.
- [7] 沈静.遥感技术在灌溉面积监测上的应用研究[D].大连:大连理工 大学, 2012.

SHEN Jing. The application research of remote sense technology in the monitor of irrigation area[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2012.

[8] 马中刚. 康保县荒漠化地区植被覆盖度遥感反演研究[D]. 长沙: 中

#### 南林业科技大学,2016.

MA Zhonggang. Remote sensing inversion of vegetation coverage in desertification area of Kangbao County. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2016.

- [9] Rangeland reflectance characteristics measured by aircraft and spacecraft sensors. DEERING D W. Texas A&M Univ, 1978
- [10] 张淑霞, 塔西甫拉提•特依拜, 依力亚斯江•努尔麦麦提, 等. 基于 Landsat 8 劈窗算法的地表温度空间响应关系研究:以于田绿洲为例
  [J]. 环境科学与技术, 2017, 40(8): 1-7.
  ZHANG Shuxia, TASHPOLAT•Tiyip, ILYAS•Nurmemet, et al. Study on the spatial response land surface temperature based on landsat 8 data split-window algorithm: Taking Yutian oasis for example[J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(8): 1-7.
- [11] 胡德勇,乔琨,王兴玲,等.利用单窗算法反演 Landsat 8 TIRS 数据 地表温度[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(7): 869-876.
  HU Deyong, QIAO Kun, WANG Xingling, et al. Comparison of three single-window algorithms for retrieving land-surface temperature with landsat 8 TIRS data[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(7): 869-876.
- [12] 杨学森. 基于单通道算法的 Landsat8 卫星数据地表温度反演研究
  [D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2015.
  YANG Xuesen. Research on the single-channel algorithm for land surface temperature retrieval from Landsat8 data[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015.
- [13] CARLSON T N, GILLIES R R, PERRY E M. A method to make use of thermal infrared temperature and NDVI measurements to infer surface soil water content and fractional vegetation cover[J]. Remote Sensing Reviews, 1994, 9(1/2): 161-173.
- [14] SANDHOLT I, RASMUSSEN K, ANDERSEN J A. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(23): 213-224.
- [15] 吴明业. 基于 TVDI 的土壤干旱遥感监测研究及验证[D]. 合肥: 安 徽农业大学, 2014.

WU Mingye. Studies on monitoring soil drought by remote sensing based on the TVDI and their validation[D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2014.

- [16] 于敏,程明虎,刘辉. 地表温度-归一化植被指数特征空间干旱监测 方法的改进及应用研究[J]. 气象学报,2011,69(5):922-931.
  YU Min, CHENG Minghu, LIU Hui. An improvement of the land surface temperature-NDVI space drought monitoring method and its applications[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2011, 69(5): 922-931.
- [17] 姚春生. 使用 MODIS 数据反演土壤水分研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(遥感应用研究所),2003.

YAO Chunsheng. Retrieval of soil moisture using MODIS data[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences (Institute of remote sensing application), 2003.

- [18] A HUETE, K DIDAN, T MIURA, et al.Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices[J].Remote Sensing of Environment: An Interdisciplinary Journal, 2002 (1/2): 195-213.
- [19] 马春芽, 王景雷, 陈震, 等. 基于温度植被干旱指数的土壤水分空间 变异性分析[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(3): 28-34.
  MA Chunya, WANG Jinglei, CHEN Zhen, et al. Spatial distribution of soil moisture estimated using thermal vegetation drought indices[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(3): 28-34.
- [20] 高培霞,张吴平,梁爽,等.基于温度植被干旱指数(TVDI)的土壤干湿反演[J].灌溉排水学报,2018,37(10):123-128.

GAO Peixia, ZHANG Wuping, LIANG Shuang, et al. Retrievably calculating soil moisture based on temperature vegetation drought index of vegetative land[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(10): 123-128.

- [21] 郭瑞宁,郭青霞,冯雨豪,等. 基于 TVDI 的土壤湿度时空分布及影响因子分析[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(4): 52-58. GUO Ruining, GUO Qingxia, FENG Yuhao, et al. Analysis of the factors affecting the spatiotemporal soil moisture distribution based on the temperature-vegetation drought index[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(4): 52-58.
- [22] 尹涛, 王瑞燕, 杜文鹏, 等. 黄河三角洲地区植被生长旺盛期地下水 埋深遥感反演[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(2): 95-100.
  YIN Tao, WANG Ruiyan, DU Wenpeng, et al. Remote sensing inversion of groundwater level in the Yellow River Delta during plants thrive[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(2): 95-100.

## Using Remote Sensing to Estimate Irrigation Area in Shenwu Region in Hetao Irrigation District

TIAN Xin<sup>1,2</sup>, LI Ruiping<sup>1,3\*</sup>, WANG Sinan<sup>1</sup>, FAN Leilei<sup>1</sup>, YU Minghui<sup>4</sup>

(1. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;
 2.Weihai City Planning Technical Service Center Co., Ltd, Weihai 264200, China; 3.Inner Mongolia Autonomous Region Key Laboratory of Big Data Research and Application of Agriculture and Animal Husbandry, Hohhot 010018, China;
 4.Weihai Land and Resources Geographic Information Center, Weihai 264200, China)

Abstract: [Background] China is the most populated country in the world but has limited cultivated land and scarce water resource. The total water resource in China is more than 2.7 trillion  $m^3$ , one of the five water-richest countries in the world. The average for per capita, however, is only 2 263 m<sup>3</sup>, approximately one quarter of the world average. In all water consumed in China, 3/5 is for agriculture and more than 90% of it is used by irrigation. Apparently, 95% of irrigated farmlands in China use flooding or furrow irrigation with irrigation-water use efficiency in the range of 30%~40%. As the conflict between increasing demand for water and dwindling water resources worsens with the development in economy, re-distributing water resource between different sectors has become essential to safeguarding sustainable development in both agriculture and other industries, in which timely monitoring irrigation areas could provide baselines and has received increased attention recently. (Objective) The purpose of this paper is to test the feasibility of using remote sensing to estimate irrigation areas by taking Shenwu in Hetao Irrigation District as an illustrative example. [Method] Our analysis was based on the Landsat-8 data, from which we inversely calculated the vegetation water supply index (VSWI) and the temperature drought index (TVDI) respectively. Using ground-truth data, models linking irrigation areas to the VSWI index and the TVDI index were established respectively. The key in extracting irrigation areas from the satellite imageries was to select an index threshold to determine irrigation time. The models were used to analyze the irrigation areas in different land types. The irrigation time for the VSWI and TVDI models was determined based on the relationship between their associated index and drought level. [Result] Compared with ground-truth data, both models were capable of estimating irrigation areas, with the accuracy of the VSWI model and the TVDI model being 85.3% and 89.7% respectively. [Conclusion] We proved that models based on the TVDI and the VSWI are both able to estimate irrigation areas although the former was slightly more accurate than the latter.

Key words: irrigation management; irrigation areas; remote sensing; VSWI; TVDI

责任编辑:赵宇龙