



DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2016.03.029

王啸天,路京选. 基于垂直干旱指数(PDI)的灌区实际灌溉面积遥感监测方法[J]. 南水北调与水利科技, 2016, 14(3): 169-174, 161. WANG Xiaotian, LU Jingxuan. Remote sensing monitoring methods of actual effective irrigation area based on Perpendicular Drought Index (PDI) [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(3): 169-174, 161. (in Chinese)

基于垂直干旱指数(PDI)的 灌区实际灌溉面积遥感监测方法

王啸天^{1,2}, 路京选^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心, 北京 100038)

摘要: 灌溉面积及其分布的准确信息对于灌区的现代化管理非常重要, 传统获取灌溉面积的方式并不能满足现在的需要, 而卫星遥感技术则为获取灌溉面积和分布提供了新的方法与途径。构建了基于干旱指数差异阈值的灌溉面积遥感监测模型, 并以宁夏地区秦汉灌区作为研究区域, 进行模型的应用研究。根据实际需要, 选取了环境减灾卫星(HJ1A/1BCCD)数据, 计算和分析了研究区域内的垂直干旱指数(PDI)的分布和变化, 通过实地考察当地情况确定了差异阈值为0.082, 计算出灌区春灌第一次灌水时期各阶段的灌溉面积。经与地面监测和统计数据校验, 计算结果准确率可以达到75%以上, 说明了遥感干旱指数用于灌溉监测的可行性。

关键词: 遥感; 灌溉面积; 干旱指数; PDI; 干旱指数差异阈值

中图分类号: S162 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2016)03-0169-06

Remote sensing monitoring methods of actual effective irrigation area based on Perpendicular Drought Index (PDI)

WANG Xiaotian^{1,2}, LU Jingxuan^{1,2}

(1. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Research Center on Flood & Drought Disaster Reduction of the Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China)

Abstract: Irrigation area and the accurate information of its distribution are very important for the modern management of irrigation area, while the traditional way to get irrigated area cannot meet the present needs. Satellite remote sensing has provided a relatively inexpensive, accurate, rapid, large scale, and effective way by which nationwide survey irrigated area can be repeated and distributed. In recent years, more and more satellite remote sensing data sources have provided, and data quality has improved. Using remote sensing technology in the modern management of the irrigation area is the trend of the future. This paper investigated the feasibility of monitoring the drought index of remote sensing for irrigation, and built a remote sensing monitoring model for irrigation area based on drought index difference threshold. Taking the Qinhan Irrigated Area in Ningxia Province as a research area, the application research of the model was carried out. The environmental mitigation satellite (HJ1A / 1BCCD) data were selected to calculate and analyze the distribution and change of the Perpendicular Drought Index (PDI) of the study area of. The difference threshold was 0.082 by on the spot investigation of local conditions. Then the first spring irrigation and its changes over time scales of irrigated area were calculated. Compared and verified with the ground monitoring and statistical data, the accuracy of result could reach above 75%. The paper provided a new approach for irrigation area monitoring.

Key words: remote sensing; irrigation area; drought index; PDI; difference threshold of drought index

收稿日期: 2015-11-03 修回日期: 2016-03-04 网络出版时间: 2016-05-05

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20160505.1120.011.html>

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863计划)(2012AA12A309); 中国水科院专项科研基金(减基本科研1504)

Fund: National High tech R&D Program (863 Program); IWHR Research Project(减基本科研1504)

作者简介: 王啸天(1991-), 男, 江苏镇江人, 主要从事水文遥感方向的研究。E-mail: wxtiw@163.com

通讯作者: 路京选(1961-), 男, 陕西大荔人, 教授级高级工程师, 主要从事水利遥感应用研究。E-mail: lujx@iwhr.com

准确的灌区信息对于高效节水的灌区用水管理非常重要,但是由于缺乏有效手段,对于全国灌溉面积数量与分布情况等信息的掌握并不充分,成为长期困扰水利部门的一个严重问题^[1],严重制约着灌区用水管理以及流域水资源合理科学配置的有效进行。有关于灌区灌溉面积的提取问题,除了实地统计这一传统的方法之外,当前有一些依据数理分析的预测方法,例如神经向量法、支持向量机方法^[2]、灰色预测模型^[3]等,但这些单纯依靠数学预测的方法缺少让人信服的理论基础,并且随着数据量的增大和时间上的拓展,预测的结果产生的误差也会增大^[4],并不能满足现实生活中的实际需要。

卫星遥感技术给我们提供了一种准确、快速、大范围、可重复调查全国灌溉面积及其分布的有效途径。目前的卫星遥感技术手段的发展,产生了越来越多的数据源,数据质量也得到了很大提升,从而为灌溉面积的获取提供了数据基础。1960年,美国普度大学利用遥感数据实现对于玉米种植面积的监测,遥感技术开始运用到农作物监测中^[5]。1997年,我国水利部遥感技术应用中心在河南灌区进行试点工作,利用十万分之一比例尺的地形图,采用美国陆地卫星的 TM 影像资料,辅以当地其它水文资料,进行了野外实地踏勘和核实验证^[6],初步实现了灌溉面积遥感监测。2006年,世界水资源管理研究所(IWMI)使用长时间序列的 NOAA/AVHRR 数据开发完成了世界第一份全球灌溉面积分布图(10 km)^[7-12]。国内的沈静^[13]、易珍言^[14]等人基于干旱指数成功提取了内蒙古河套灌区的实际灌溉面积,与地面统计值对比,结果合理。随着技术手段和应用研究的不断发展,卫星遥感在农业灌区水文情况获取方面的优势越来越突出。

为了探讨将干旱指数运用于灌溉面积遥感监测的可行性,本文构建了相关的监测模型,并以宁夏自治区秦汉灌区为研究区域,对模型的进行验证。

1 研究方法

基于遥感影像在不同区域下得到的各类干旱指数^[15],反映了土壤内部水分的变化或者植被含水量的变化,因此能够指示地区干旱程度。

1.1 基于 Nir-Red 光谱特征空间的垂直干旱指数 PDI

植物叶片中的叶绿素对红光和蓝紫光吸收程度较大,而对近红外反射程度较大。而对于裸土,从红光到近红外光,反射率增加幅度低,但是基数高。所以植被覆盖率越高,其近红外光波段反射率越大,红

色光波段反射率越小。

基于上述原理, Richardson 和 Wiegand^[16]使用 Landsat MSS 红波段和近红外波段影像的灰度值建立了 Nir-Red 特征空间,通过 Nir-Red 特征空间中到土壤线的垂直距离来描述植被覆盖情况,这就是垂直植被指数 PVI。据此建立的基于地表光谱特征的土壤含水量监测模型,直接使用光谱特征代替反照率和 LST 的反演,简单又有效。

在 PVI 的基础上 Ghulam 等人(2006)^[17]提出了另外一种干旱指数 PDI (Perpendicular Drought Index),即垂直干旱指数,用来监测土壤的干旱情况。在 NIR-Red 二维散点图上见图 1,影像各处的像元点的分布接近于一个三角形,该空间上任一点到土壤基线的垂直距离代表该点的植被覆盖情况,离土壤基线越远,代表其植被覆盖程度越高,如 A 点所对应的遥感图像的像素点即为植被情况的完全覆盖, E 点为部分覆盖, D 点为裸土,即无植被覆盖。图 1 中直线 L 是土壤基线的法线,且该法线经过坐标原点; PDI 是该法线的垂线,描述了含水量在该特征空间上的分布规律,离土壤基线的法线(直线 L)越远表示越干旱,越近越湿润。

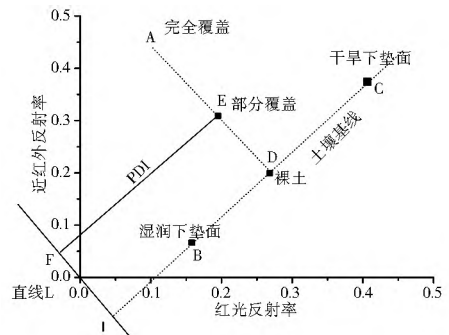


图 1 PDI 原理

Fig. 1 Schematic diagram of PDI

从 Nir-Red 三角形特征空间上任取一点 E (R_{red}, R_{nir}),从该点到土壤基线的法线(直线 L)的距离 EF,即为所求垂直干旱指数 PDI。PDI 以该特征空间中任意一点 E (R_{red}, R_{nir})到该法线的距离 EF 来表征区域干旱状况^[18],图 1 中,EF 距离即为 E 点 PDI 值。

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

式中: R_{red} 、 R_{nir} 为 Red、Nir 波段的反射率, M 为土壤基线 BC 的斜率,直线 L 为经过原点且垂直于土壤基线的垂线。

1.2 基于干旱指数差异的实际灌溉面积监测模型

垂直干旱指数 PDI 可以反映土壤的含水情况,

PDI 越大,土壤含水量越少。因此,可以利用 PDI 进行灌溉面积监测。令前后两期影像得到的垂直干旱指数相减,如果前期指数大于后期指数,意味着土壤含水量增大,表明像元处可能发生灌溉行为。据此建立基于垂直干旱指数差异的实际灌溉面积监测模型如下:

$$I = PDI_{t1} - PDI_{t2} \quad (2)$$

式中: I 代表某个像素区域受灌溉影响的程度, I 越小表明灌溉的影响越小; PDI_{t1} 是灌溉之前的 PDI ; PDI_{t2} 是灌溉之后的 PDI 。

土壤含水量的变化不一定是因为灌溉所造成的,所以需要设定一个差异阈值,只有变化程度大于该阈值时,才可以认为该像元处的土壤水分变化是由灌溉造成的。阈值如果选取过小,没有灌溉的区域会被误认为发生灌溉,反之则发生灌溉的区域会被误认为没有进行灌溉。所以阈值的选取需要符合当地实际情况。阈值的选取方法如下:将实地考察时间段的计算结果与考察的 GPS 点进行校对,如果确认发生灌溉的 GPS 点不在计算结果内,说明该阈值选择过大;如果确认未发生灌溉的 GPS 点出现在计算结果内,说明该阈值选择过小,据此对阈值进行调整。

另外,降雨也会对土壤含水量变化产生很大影响,但是可以选择影像来避开降水时期。

2 研究区概况

宁夏秦汉渠灌区是全国古老的灌区之一,具有两千多年的历史。灌区位于黄河青铜峡出口东岸,南起牛首山,北至灵武与内蒙交界的明长城,东靠鄂尔多斯高原,西临黄河,在册灌溉面积 $39\,333\text{ hm}^2$,真实灌溉面积 $67\,333\text{ hm}^2$ ^[19]。灌区现有河东总干渠 1 条,该处为灌区引水处,分干渠 4 条:分别是秦渠、汉渠、东干渠和马莲渠。干渠下属若干支渠,其中农场渠和波浪渠规模较大,故作为支干渠。干渠总长 223 km ,设计引水能力 $160\text{ m}^3/\text{s}$,年均引水量 11.68 亿 m^3 ,担负着青铜峡市、吴忠市、灵武市的 18 个乡镇,8 个大中型国营农(林)场的灌溉供水任务。灌区渠系信息见表 1。

灌区自然条件优越,农业较发达,农业种植以春小麦、玉米和水稻为主,其次为豆类和经果林菜等。2013 年统计种植面积,其中小麦占作物种植面积的 10%,玉米各占作物种植面积的 46%,水稻占作物种植面积的 24% 左右,其它作物占 20%。

选择该研究区域的原因有两点: 1 该区域地属我国西北内陆地区,降水量较少,可以有效减少降水

表 1 秦汉渠灌区主要渠系信息表

Tab. 1 Main canal system information of Qinhan Irrigation Area

渠道名称	渠道长度 / km	设计流量 / ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	在册面积 / hm^2	实际灌溉面积 / hm^2
秦渠	60.0	70	5 533	10 733
汉渠	44.3	41	5 800	10 133
东干渠	54.4	54	16 133	26 133
马莲渠	27.5	20	2 847	5 400
农场渠	31.6	26	8 987	14 800

对于该模型带来的影响; 2 该区域的土地利用类型以及种植结构都相对比较简单。

利用宁夏回族自治区秦汉渠管理处提供灌区资料和实地考察资料,结合 Google earth 遥感影像,本文将宁夏秦汉渠灌区的渠系信息进行数字化并绘制成图 2。

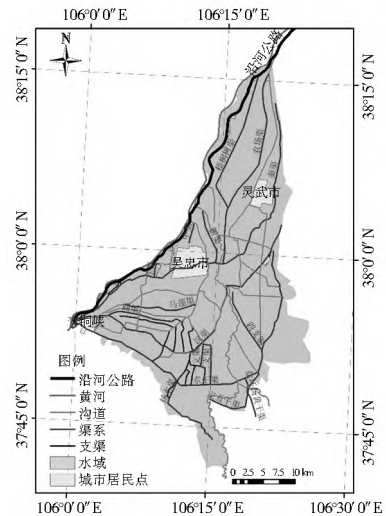


图 2 研究区

Fig. 2 The study area

3 数据来源及处理

3.1 数据来源

本文使用的遥感影像来自环境减灾卫星 HJ-1A/1B CCD 卫星,即中国环境与灾害监测预报小卫星星座。搭载于 HJ-1A 卫星和 HJ-1B 卫星的 CCD 相机系统由两台 CCD 相机单元组成(CCD1 和 CCD2)。双星的轨道完全相同,相位相差 180° 。两台 CCD 相机组网后重访周期仅为 2 天,因此每两天就能实现一次全球覆盖^[20]。

遥感影像由中国资源卫星应用中心网站 (<http://218.247.138.121/DSSPlatform/index.html>) 下载,影像数据见表 2。

3.2 数据处理

首先由 ENVI 对遥感图像进行辐射定标。对于环境小卫星的所使用的 CCD 相机,利用绝对定标

表 2 遥感数据列表

Tab. 2 Remote sensing date

序号	数据名称	成像时间	分辨率(m)	波段
1	HJ1B CCD F 14-68 20140414 L20001143962	2014-4-14	30	4
2	HJ1A- CCD2 12-68 20140419 L20001145499	2014-4-19	30	4
3	HJ1B CCD F 16-70 20140422 L20001146864	2014-4-22	30	4
4	HJ1A- CCD2 13-68 20140423 L20001147436	2014-4-23	30	4
5	HJ1B CCD 2 14-68 20140429 L20001149349	2014-4-29	30	4
6	HJ1B CCD 2 15-68 20140503 L20001150669	2014-5-03	30	4
7	HJ1A- CCD2 15-68 20140505 L20001151227	2014-5-05	30	4
8	HJ1B CCD F 11-68 20140507 L20001152339	2014-5-07	30	4
9	HJ1B CCD F 12-68 20140511 L20001154435	2014-5-11	30	4

系数将 DN 值图像转换为辐亮度图像, 所用公式为:

$$L = \frac{DN}{a} + L_0 \quad (3)$$

式中: L 为辐亮度, a 为绝对定标系数增益, L_0 为偏移量, 转换后辐亮度单位为 $(W/cm^2 \cdot sr \cdot \mu m)$ 。定标

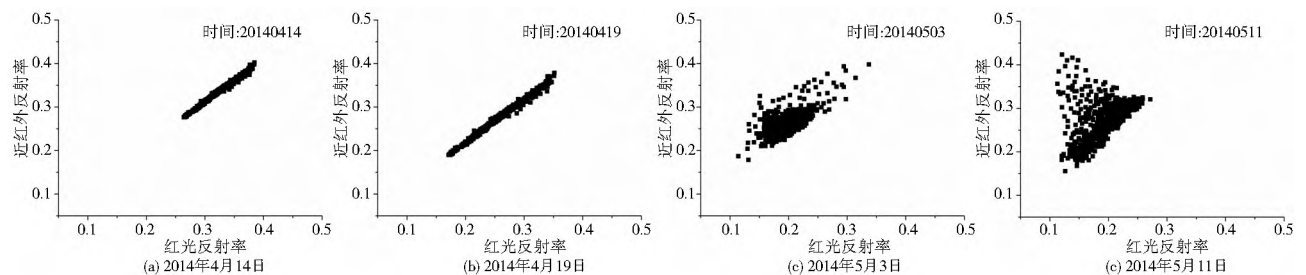


图 3 Nir Red 特征空间散点图(4 月 14 日, 4 月 29 日, 5 月 3 日, 5 月 11 日)

Fig. 3 Nir Red scatterplot of feature space (on 14 April, April 29, May 3, May 11)

从图 3 可以看出, 4 月份和 5 月初 Nir-Red 特征空间中数据点呈现带状分布, 而不是三角形, 主要原因在于该地区属于沙土含量较高的地带, 植被覆盖率较低, 而且在 4 月份该地区的作物还未成长, 基本处于裸土状态, 因此 Nir-Red 特征空间中没有高植被覆盖区和半植被覆盖区; 5 月中旬的数据点开始呈现比较规律的三角形分布形状, 因为此时各种作物均处于生长期, 植被覆盖率比较高, Nir-Red 特征空间开始出现高植被覆盖区和半植被覆盖区。可见, Nir-Red 特征空间的分布基本与实际情况相吻合, 因此能够为 PDI 提供数据支持。图 3 中三角形底边即为土壤线, 其斜率即为 PDI 公式中所需斜率

系数和公式可从所下载的元数据文件中找到。

对图像进行过辐射定标后, 运用 ENVI 的 FLAASH 模块对图像进行大气校正。由于环境卫星传感器对于 ENVI 来说, 属于未知的多光谱传感器, 所以需要获取环境卫星的波谱响应函数, 该响应函数可在中国资源卫星应用中心网站进行下载。

图像进行过辐射定标和大气纠正后, 再对其进行波段融合, 裁切, 几何纠正得到所研究区域的遥感图像。

通过以上处理步骤, 此时得到的遥感图像的灰度值已经转换为各波段的反射率, 选取特征地段, 将像元属性导出, 构建影像的 Nir-Red 三角形特征空间, 由特征空间获得 PDI 公式中需要的 M 值。

最后在 Erdas model 中建模计算 PDI 。以垂直干旱指数 PDI 为指标进行差异阈值的设定如式 (2), 按照此设定对于影像进行波段计算获得结果。

4 结果分析与验证

4.1 Nir-Red 特征空间分析

通过数据处理得到各波段的反射率之后, 选取特征地段, 将像元属性导出, 构建影像的 Nir-Red 三角形特征空间。选取春灌时期的四个时间点的 Nir-Red 特征空间见图 3。

M 。经过计算, M 值的大小为 1.302。

4.2 垂直干旱指数结果分析

通过在 Erdas 的 model maker 中建模, 计算得到图像垂直干旱指数的概况, 将 PDI 平均值绘制成时间序列曲线, 见图 4。

图 4 显示, 干旱指数的平均值从 4 月 14 日开始逐渐升高, 在 4 月 22 日出现峰值, 然后开始逐渐下降, 到 4 月 29 日之后又开始上升, 在 5 月 3 号之后开始下降, 可以推测, 在 4 月 22 日后, 5 月 3 日后, 灌区发生了较大规模的灌溉。

4.3 研究区域实际灌溉面积监测

以垂直干旱指数 PDI 为指标进行差异阈值的

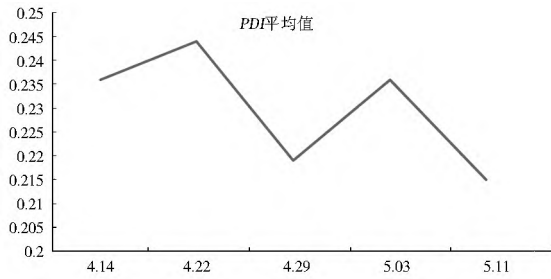


图4 PDI 平均值时间序列曲线

Fig. 4 PDI average time sequence curve

设定, 如式(2)。共在研究区域内选取 50 个 GPS 点, 25 个为确认进行灌溉, 25 个为确认未进行灌溉, 通过阈值的调整, 最终满足计算结果符合所取得 50

个 GPS 点情况, 此时阈值为 0.082。

利用此阈值对影像进行波段计算, 结果见图 5 (红色区域为满足阈值的区域, 即认为是灌溉区域)。

图 5 显示, 灌溉区域呈现明显时间序列性, 不同时间段的灌溉区域不同, 而且灌溉区域大致分布在渠道和河流周围, 灌溉区域的分布符合灌区开闸放水的规律: 4 月 14 日开始, 主要是灌区西部东干渠进行灌溉, 所以图 5a 和图 5b 中红色区域都分布在灌区的西部或中部; 而在 4 月 30 日, 灌区北部的农场渠开闸放水开始进行灌溉, 所以图 5c, 红色区域出现在了灌区的北部。

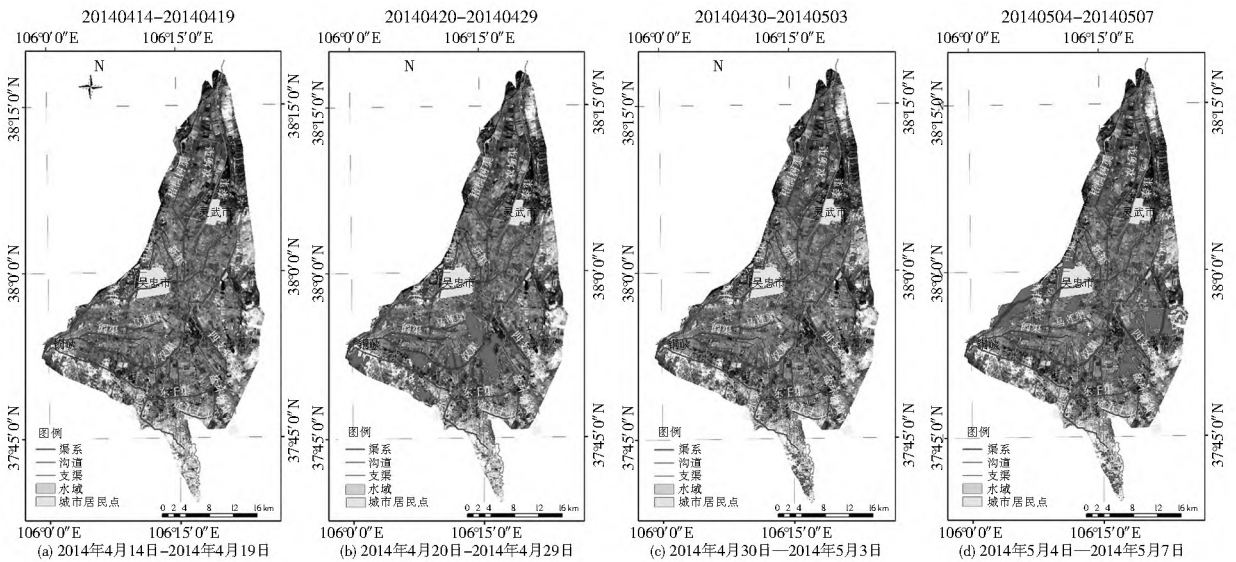


图5 灌溉面积监测结果

Fig. 5 The monitoring results of irrigation area

通过秦汉灌区资料分析, 对比各种作物的灌溉面积与该干旱模型的监测面积见表 3, 可以看出, 监测灌溉面积普遍略大于记录灌溉面积。实地调查发现, 灌溉面积的统计都是由人工上报所得, 其结果存在一些人人为的误差, 使得统计灌溉面积会略小于真实灌溉面积, 所以监测灌溉面积大于记录灌溉面积是符合实际情况的。

经过统计, 2014 年 4 月至 5 月, 宁夏秦汉渠第一次灌水期实际灌溉面积总计, 监测灌溉面积为 29 855. 52 hm², 记录灌溉面积为 24 243. 67 hm², 监测面积的准确率为 76 85%。

4.4 灌溉面积监测结果验证

验证数据选择 2013 年该地区同时期的卫星影像数据, 阈值仍然选择上文中所确定的 0.082, 经过上述方法进行实际灌溉面积监测, 结果见表 4。

表 3 监测灌溉面积与记录灌溉面积比较

Tab. 3 Comparison of measured irrigation area and recorded irrigation area

日期	监测灌溉面积/hm ²	记录灌溉面积/hm ²
4. 14- 4. 19	1 584. 13	1 536. 00
4. 20- 4. 29	8 079. 13	6 985. 67
4. 30- 5. 03	7 795. 13	7 348. 67
5. 04- 5. 07	10 397. 13	8 373. 33

需要说明的是, 通过查询秦汉灌区吴忠市的气象站资料所示, 4 月 16 日、4 月 25 日、5 月 5 日出现过三次降水, 但是每次降水的日降雨量都不足 5 mm, 故降水对于该模型的计算结果影响较小。

表 4 2013 年监测灌溉面积与记录灌溉面积比较

Tab. 4 Comparison of measured irrigation area and recorded irrigation area in 2013

日期	监测灌溉面积/hm ²	记录灌溉面积/hm ²
4. 03- 4. 13	570. 20	433. 33
4. 14- 4. 20	2 283. 27	1 796. 67
4. 21- 4. 26	4 900. 80	3 506. 00
5. 04- 5. 09	7 896. 27	7 196. 67

经过统计, 监测灌溉面积为 15 650 54 hm², 记录灌溉面积为 12 932 67 hm², 监测准确率为 78 98%。

5 结语

本文通过研究垂直干旱指数的理论原理,将其运用在灌区实际灌溉面积的监测中,构建基于垂直干旱指数(PDI)的灌区实际灌溉面积监测模型,以宁夏回族自治区秦汉灌区作为研究区域,计算出灌区春灌第一次灌水时期各阶段的灌溉面积与分布,发现PDI指数呈现出的变化与灌区灌溉的进度相吻合,可见PDI指数确实可以在一定程度上反映土壤水分的变化情况。在灌区4月-5月这一灌溉周期内,灌溉面积的计算结果呈现明显的时间序列性,并且与不同渠道开闸放水的情况对应良好,其总计监测灌溉面积的准确率达到75%以上。

相对于传统方法而言,运用遥感技术监测灌区信息无疑更加省时省力,方便快捷。随着遥感技术的发展,特别是国内环境卫星系列、资源卫星系列、高分卫星系列的应用,遥感技术将会成为灌区管理的重要手段。

不过,本文所采用的方法并没有完全排除降水因素产生的影响,在宁夏这种西北内陆地区降水的影响较小,可是在降水频繁地区,其影响不可忽略。所以,今后还需要对该方法进一步改进,以排除降水影响。此外,还可以针对不同土地类型,考虑引入多光谱数据以确定更精准的阈值,提升灌溉面积监测的准确程度。

参考文献(References):

[1] 韩哲. 小型农村水利工程管理体制体制改革研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2011. (HAN Zhe. Research on the management system reform of rural small water infrastructures[D]. Changsha: Hunan University, 2011. (in Chinese))

[2] 易帆. 神经网络预测研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2005. (YI Fan. Research on neural network prediction[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2005. (in Chinese))

[3] 李建伟, 魏伟, 陈沛然, 等. 农田有效灌溉面积的预测方法及应用[J]. 湖北农业科学, 2013(09): 2157-2160. (LI Jianwei, WEI Wei, CHEN Peiran, et al. Prediction of effective irrigation area and its application[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2013(09): 2157-2160. (in Chinese))

[4] 万玉文, 苏超, 方崇. 我国大中型灌区有效灌溉面积的灰色预测[J]. 人民长江, 2011(15): 96-98. (WAN Yurwen, SU Chao, FANG Chong. Effective irrigation area prediction of large and medium irrigation districts in China based on grey system theory[J]. Yangtze River, 2011(15): 96-98. (in Chinese))

[5] 刘海启, 金敏毓, 龚维鹏. 美国农业遥感技术应用状况概述[J]. 中国农业资源与区划, 1999(02): 58-62. (LIU Haiqi, JIN Minyu, GONG Weipeng. Applications of remote sensing in agriculture in The United States. [J]. Journal of China Agricultural Resources

and Regional Planning, 1999(02): 58-62. (in Chinese))

[6] 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(02): 19-24. (CHEN Zidan, LI Jiren, XIA Fuchuan. Research and application of remote sensing survey of the effective irrigation area—the pilot project of Henan province[J]. Journal of Remote Sensing Information, 1997(11): 19-24. (in Chinese))

[7] D'El P, Siebert S. A digital global map of irrigated areas[J]. ICID Journal 2000, 49(2): 55-66.

[8] Thenkabail P S, Biradar C M, Noojipady P, et al. Global irrigated area map (GIAM), derived from remote sensing, for the end of the last millennium[J]. Int. J. Remote Sens. 2009, 30(14): 3679-3733.

[9] Bastiaansen W G M, Molden D J, Makin I W. Remote sensing for irrigated agriculture: Examples from research and possible applications[J]. Agr. Water Manage, 2000, 46(2): 137-155.

[10] Jakubauskas M E, Legates D R, Kastens J H. Crop identification using harmonic analysis of time series AVHRR NDVI data[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2002, 37(1/2/3): 127-139.

[11] M J Pringle, R J Denham, R Devadas. Identification of cropping activity in central and southern Queensland, Australia, with the aid of MODIS MOD13Q1 imagery[J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012(19): 276-285.

[12] Potgieter A B, Lawson K, Huete A R. Determining crop acreage estimates for specific winter crops using shape attributes from sequential MODIS imagery[J]. International Journal of Applied Earth Observation & Geoinformation, 2013, 23(8): 254-263.

[13] 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. (in Chinese))

[14] 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(05): 166-169. (YI Zhenyan, ZHAO Hongli, JIANG Yurzhong, 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(05): 166-169. (in Chinese))

[15] 张红卫, 陈怀亮, 刘忠阳, 等. 最新干旱指数综述[C]. ZHANG Hongwei, CHEN Huailiang, LIU Zhongyang. The latest drought index review[C]. Proceedings of 2010 International Conference on Remote Sensing (ICRS 2010) Volume 3. 2010. (in Chinese))

[16] Richardson A J, Wiegand C L. Distinguishing vegetation from soil background information[J]. Photogr Eng Rem Sen, 1977, 43(12): 1541-1552

[17] Abduwasit Ghulam, Qiming Qin, Zhiming Zhan. Designing of the perpendicular drought index[J]. Environmental Geology, 2007, 526.

(上转第 161 页)

- [4] Kostas Bitbas, The sustainable residential water use: Sustainability, efficiency and social equity[J]. *Ecological Economics*, 2008, 68: 221-229.
- [5] Alexandra Lutz James M. Thomas Greg Pohl Mamadou Keita W. Alan McKay. Sustainability of groundwater in Mali, West Africa[J]. *Environ Earth Sci*, Published online: 2008-11-28.
- [6] Jie Liu, Kendall Rich, Chunmiao Zheng. Sustainability analysis of groundwater resources in a coastal aquifer, Alabama[J]. *Environ Geol*, 2008, 54: 43-52.
- [7] 杜军, 杨培岭, 李云开, 等. 河套灌区年内地下水埋深与矿化度的时空变化[J]. *农业工程学报*, 2010, 6(7): 26-31 (DU Jun, YANG Peiling, LI Yunkai, et al. Analysis of spatial and temporal variations of groundwater level and its salinity in Hetao Irrigation District[J]. *Transactions of the CSAE*. 2010, 26(7): 26-31. (in Chinese))
- [8] 杨路华, 沈荣开, 曹秀玲. 内蒙古河套灌区地下水合理利用的方案分析[J]. *农业工程学报*, 2003, 19(5): 56-59. (YANG Luhu, SHEN Rongkai, CAO Xiuling. Scheme of groundwater use in Hetao irrigation district in Inner Mongolia[J]. *Transactions of the CSAE*. 2003, 19(5): 56-59. (in Chinese))
- [9] Jaroslav Vrha, Annukka Lipponen. Groundwater Resources Sustainability Indicators[R]. IHP viseries on groundwater, 2007.
- [10] 张光辉, 费宇红, 聂振龙, 等. 区域地下水功能可持续性评价理论与方法研究[M]. 北京, 地质出版社, 2009. (ZHANG Guanghui, FEI Yuhong, NIE Zhenlong, et al. Theory and methodology of regional groundwater function and sustainable utilization assessment in China[M]. *Geology Pressing House*. 2009 (in Chinese))
- [11] 戎晓红, 李春侠, 张晓燕. 基于信息熵的徐州市土地利用结构分析及其 GM 预测[J]. *国土资源科技管理*, 2013, 30(1): 72-77. (RONG Xiaohong, LI Chunxia, ZHANG Xiaoyan. Analysis of land use structure and GM prediction in Xuzhou city based on information entropy[J]. *Scientific and Technological Management of Land and Resources*, 2013, 30(1): 72-77. (in Chinese))
- [12] 陈南祥, 苏荣, 曹文庚. 基于熵权的集对分析法在土默特左旗地下水水质评价中的应用[J]. *干旱区资源与环境*, 2013, 27(6): 30-34. (CHEN Nanyang, SU Rong, CAO Wengeng. Application of the Set Pair analysis method to evaluation of shallow groundwater quality based on entropy weight[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2013, 27(6): 30-34. (in Chinese))
- [13] 巴彦淖尔市统计局. 巴彦淖尔市年国民经济和社会发展统计公报[EB/OL]. 巴彦淖尔市统计信息网, 2010-2012. (Statistics bureau of Bayanur, Statistical bulletin of Bayanauer National Economic and Social Development[EB/OL]. *Statistics Information Network of Bayanur*, 2010-2012. (in Chinese))
- [14] 内蒙古自治区地质环境监测院. 内蒙古自治区主要城市地下水环境监测综合报告[R], 2006. (The Institution of Inner Mongolia Geological Environment Monitoring. Comprehensive report of the Groundwater Environmental Monitoring in the Main City of Inner Mongolia Autonomous Region [R]. 2006. (in Chinese))
- [15] 中华人民共和国国土资源部. 中国地下水资源(内蒙古自治区)[M]. 中国地图出版社, 2004. (Ministry of land and resources of the People's Republic of China. Groundwater resources of China (inner Mongolia autonomous)[M]. *Sinomapress*, 2004. (in Chinese))
- [18] 詹志明, 秦其明, 汪冬冬. 基于 NIR-Red 光谱特征空间的土壤水分监测新方法[J]. *中国科学: D 辑*, 2007, 36(11): 1020-1026. (ZHAN Zhiming, QIN Qiming, WANG Dongdong. A new method of soil moisture monitoring based on NIR-Red spectrum feature space[J]. *Chinese Science: D*, 2007, 36(11): 1020-1026. (in Chinese))
- [19] 李晓鹏, 马晓阳. 河东灌区干渠砌护形式抗冲防渗与抗冻技术的初步分析[J]. *宁夏工程技术*, 2009, 383(04): 383-387. (LI Xiaopeng, MA Xiaoyang. Hedong irrigation area form the main protective impact of anti seepage and anti freeze technology for preliminary analysis[J]. *Journal of Ningxia Engineering*, 2009, 383(04): 383-387. (in Chinese))
- [20] 闫娜娜, 吴炳方, 李强子, 等. HJ1A/B 卫星在干旱应急监测中的应用[J]. *遥感技术与应用*, 2010(05): 675-681. (YAN Nana, WU Bingfang, LI Qiangzi, et al. HJ1A/B satellite applications in drought monitoring[J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2010(05): 675-681. (in Chinese))

(下接第 174 页)