

基于 MODIS 数据的河套灌区遥感干旱监测

罗彪 刘潇 郭萍*

(中国农业大学 水利与土木工程学院,北京 100083)

摘要 基于 MODIS 数据,以河套灌区为研究对象,计算灌区 2000—2018 年作物主要生育期内(5—8 月)4 种遥感干旱指数、温度植被干旱指数(TVDI)、植被供水指数(VSWI)、植被状态指数(VCI)、温度状态指数(TCI),并分析了 4 种干旱指数与 0~20 cm 土壤相对含水量、降水量、灌区引水量相关性以及 4 种干旱指数之间的相互关系。结果表明:经过相关分析,TVDI 与土壤相对含水量的相关性优于其他 3 种遥感干旱指数;在灌溉水量较多的灌区,遥感干旱指数与降雨量相关性较小而与灌区引水量呈现一定的相关关系。本研究发现 TVDI 在河套灌区有着良好的适用性。此外,在干旱监测中综合利用多种干旱指数进行分析对提高监测精度,科学合理地预报旱情具有重要意义。

关键词 河套灌区; MODIS 数据; 温度植被干旱指数; 植被供水指数; 植被状态指数; 温度状态指数

中图分类号 S274.3 **文章编号** 1007-4333(2020)10-0044-11 **文献标志码** A

Remote sensing drought monitoring of Hetao irrigation area based on MODIS data

LUO Biao, LIU Xiao, GUO Ping*

(College of Water Resource & Civil Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract Based on MODIS data, four remote sensing drought indexes (temperature vegetation drought index (TVDI), vegetation water supply index (VWSI), vegetation condition index (VCI) and temperature condition index (TCI)) during the main growth period of crops (May-August) in the Hetao irrigation area from 2000 to 2018 are investigated. The relationship between the four drought indexes and their correlations with the relative water content of 0–20 cm soil, precipitation and irrigation water diversion are analyzed. The results show that: The correlation between TVDI and soil relative water content is better than the other three remote sensing drought indexes through correlation analysis; In the irrigation area with more irrigation water, the correlation between remote sensing drought index and rainfall is weak. However, there is a certain correlation between TVDI and irrigation water volume. Through the analysis, it is found that TVDI has a good applicability in Hetao irrigation area. In addition, the comprehensive use of various drought indexes in drought monitoring is of great significance to improve monitoring accuracy and predict drought scientifically and reasonably.

Keywords Hetao irrigation area; MODIS data; temperature vegetation drought index; vegetation water supply index; vegetation condition index; temperature condition index

干旱因其持续时间长、影响范围广及灾害损失大等特点逐渐成为当前世界影响最为严重的自然灾害之一^[1]。在各类农业气象灾害中,农业干旱造成

的损失巨大,严重威胁农业生产^[2]。农业干旱是当土壤含水量低于植物需水量时导致作物减产甚至绝收的自然现象,其发生原因十分复杂,与气象、地形

收稿日期: 2020-02-04

基金项目: “十三五”国家重点研发计划项目(2018YFC1508705)

第一作者: 罗彪,硕士研究生, E-mail: 549772070@qq.com

通讯作者: 郭萍,教授,主要从事水资源与环境系统不确定性研究, E-mail: guop@cau.edu.cn

环境、土壤条件、作物品种等因素都有着密切的联系^[3]。如何有效地监测农业干旱,选择适宜的监测指标,及时准确地了解农业旱情发生、发展、消退情况已成为当地政府抗旱减灾部门和农业管理部门面临的一项紧迫任务^[4]。传统的农业旱情监测主要基于地面站点的土壤墒情数据来划分干旱等级,其准确性、代表性、完整性有限,且成本较大^[3]。遥感技术的发展为农业旱情监测提供了新的途径,其优势在于能够及时、客观地获取大范围的地表综合信息,同时监测土壤供水和作物需水状况,使其已成为区域旱情监测的重要手段。

目前有关遥感监测干旱的研究很多,已有的监测方法可大致分为 3 类:光学遥感监测干旱、微波遥感监测干旱、降水遥感监测干旱。光学遥感监测干旱方法中常用的有植被条件指数、温度植被干旱指数、植被供水指数、距平植被指数和温度状态指数^[5-10]。微波遥感监测干旱可分为主动微波遥感和被动微波遥感^[11-14]。降水遥感监测干旱主要针对于气象干旱监测,常常与其他干旱指数共同使用^[15-17]。其中光学遥感监测干旱发展成熟、应用广泛,对于不同的下垫面条件有着良好的应用情况。

内蒙古自治区河套灌区是我国干旱区灌区的典型代表,是我国北方的主要灌区之一,同时也是我国重要的粮食生产基地^[18]。有效的实时监测灌区干旱情况能够为灌区水资源管理提供决策支持,但是现有的针对灌区的遥感干旱指数应用研究较少,如:乌兰吐雅等^[19]使用温度植被干旱指数对河套灌区临河区进行旱情监测;柯丽娟^[20]使用温度植被干旱指数反演土壤含水量从而为灌区灌溉管理提供决策支持;白艳英等^[21]采用土壤水分光谱法反演土壤

含水量。已有的研究只是将一些干旱指数应用到灌区,应用的干旱指数较少而且暂无对干旱指数在灌区的适用性研究。温度植被干旱指数(TVDI)、植被供水指数(VSWI)、植被状态指数(VCI)和温度状态指数(TCI)等 4 种遥感干旱指数,计算方便、数据易获取,已经得到广泛应用。因此,本研究基于 MODIS 数据,以河套灌区为研究对象,拟运用上述 4 种遥感干旱监测方法对灌区旱情进行监测,并对计算所得遥感干旱指数进行土壤相对含水量相关分析、降水量相关分析,分析与讨论各干旱指数在河套灌区适用性,以为灌区干旱监测及灌溉管理提供决策支持。

1 研究区域概况

河套灌区位于内蒙古自治区巴彦淖尔市如图 1 所示:该区引黄控制面积 共计 116.2 万 hm^2 ,引黄有效灌溉面积 57.4 万 hm^2 ,农业人口 100 余万。河套灌区是全国 3 个特大型灌区之一,也是重要的商品粮、油生产基地^[22]。灌区地处我国干旱的西北地区,降水量少,蒸发量大,属于没有引水灌溉便没有农业的地区。据统计灌区多年平均降雨量为 138.29 mm,而多年平均蒸发量约 2 000 mm,因此,灌区气象干旱情况较为严重。气象干旱之所以没有演化成严重的农业干旱,是因为河套灌区灌溉水资源 90%以上来自于黄河,其年均净引黄水量在 45 亿 m^3 左右。

根据黄河水资源调度需要,河套灌区黄河年可引用水资源不断下降,预计需要在 2020 年降低至 40 亿 m^3 。在水资源约束的条件下,如何准确的实时把握灌区农业干旱情况及其空间分布对于水资源高效分配具有十分重要的意义。

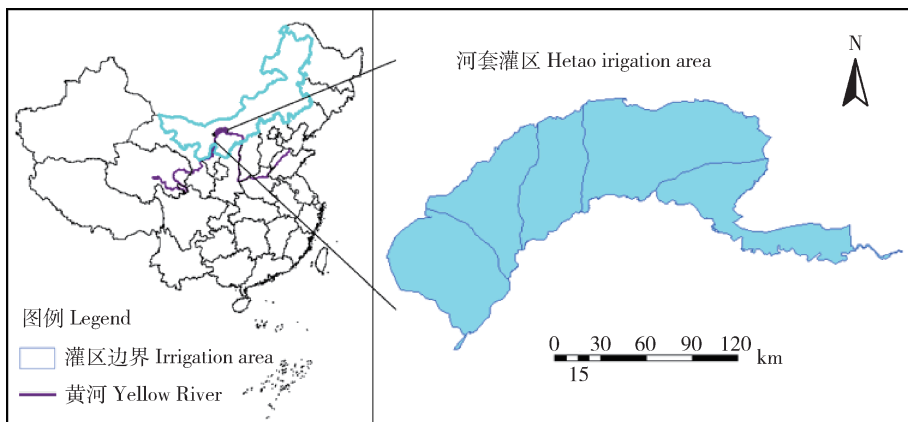


图 1 河套灌区位置示意图

Fig. 1 Location of Hetao irrigation area

2 数据收集与处理

2.1 数据收集

2.1.1 气象数据

本研究使用河套灌区的 2000—2018 年各月降

水量数据,以及灌区月平均 0~20 cm 土壤相对含水量数据。气象数据来自于中国气象科学数据共享服务网(<http://data.cma.cn>),其中降水量数据来自临河气象站,土壤相对含水量数据来自乌拉特前旗、临河气象站,气象站位置如图 2 所示。

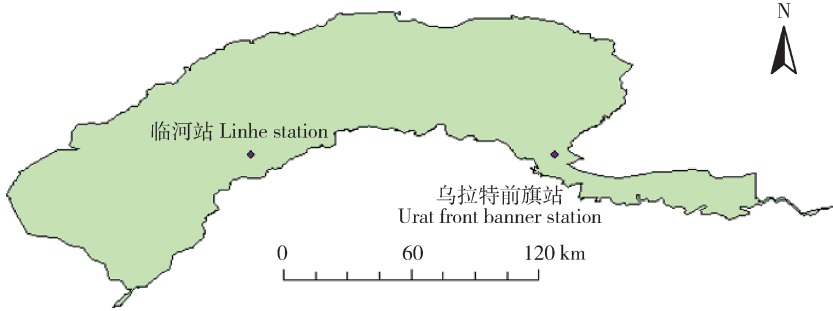


图 2 气象站点位置示意图

Fig. 2 Location of meteorological stations

2.1.2 遥感数据

MODIS 是美国 NASA 对地观测系统系列遥感卫星平台上的主要传感器,具有 36 个光谱通道,每 1~2 d 可以获取一次全球地表数据^[23],因其波段范围广,数据更新频率快,在全球实施免费接收等优点在研究中具有重要的实际意义^[1]。本研究获取的 2000—2018 年 5—8 月的 MOD 13A3 植被指数数据是 1 个月合成的 NDVI,MOD 11A2 地表温度数据是 8 d 合成的 LST。并对下载的遥感数据使用 MRT 具进行投影转换、裁剪、融合得到所需要的河套灌区范围内的每月归一化植被指数(NDVI)数据和地表温度(LST)数据。

2.2 遥感干旱监测指标

干旱的发生往往与地球表面的植被生长状况相联系,而植被生长又与土壤湿度、作物蒸散、温度等有直接相关。卫星遥感干旱监测技术则是通过植被生长的好坏、土壤湿度、作物蒸散、温度等方面研究干旱的发生情况^[24]。本研究选取了常用的 4 种典型遥感干旱监测指数:植被状态指数(VCI)、温度状态指数(TCI)、温度植被干旱指数(TVDI)、植被供水指数(VSWI)。

2.2.1 植被状态指数(VCI)

植被状态指数是利用多年资料的第 i 个时期的 NDVI 最大值和最小值计算某一年的第 i 个时期的 NDVI 值的相对变化^[24]。相对 NDVI 而言,条件植被状态指数不仅包含 NDVI 的当前信息,还包含 NDVI 的历史信息^[25],其计算公式为:

$$VCI = \frac{NDVI_i - NDVI_{\min}}{NDVI_{\max} - NDVI_{\min}} \quad (1)$$

式中:NDVI _{i} 为当前时期的 NDVI 值;NDVI_{max} 为这一时期的 NDVI 值的最大值;NDVI_{min} 为这一时期的 NDVI 值的最小值。VCI 值越大代表植被生长状况好,反之则代表植被生长状况差,从而反映出旱情。

2.2.2 温度状态指数(TCI)

植物冠层的温度可以作为判定干旱发生的依据,基于 Avhrr 的热波段观测结果被用来建立温度状态指数。该指数用于测定与温度相关的植被胁迫和过度湿润引起的胁迫^[26]。其计算方法与 VCI 指数计算方法类似:

$$TCI = \frac{LST_i - LST_{\min}}{LST_{\max} - LST_{\min}} \quad (2)$$

式中:LST _{i} 为当前时期地表温度;LST_{max}、LST_{min} 分别为这同期 LST 的最大最小值。TCI 值越大干旱情况越严重,反之则相反。

2.2.3 温度植被干旱指数(TVDI)

Sandholt 等^[27]利用简化的 NDVI-Ts 特征空间提出水分胁迫指标,即温度植被干旱指数,在该简化的特征空间,将湿边(Ts-min)处理为与 NDVI 轴平行的直线,干边(Ts-max)与 NDVI 成线性关系。可定义为:

$$TVDI = \frac{T_s - (a_1 + b_1 \times NDVI)}{(a_2 + b_2 \times NDVI) - (a_1 + b_1 \times NDVI)} \quad (3)$$

式中: a_1 、 b_1 和 a_2 、 b_2 分别为“干边”“湿边”方程的拟

合系数; T_s 为地表温度, 两者皆由遥感数据获得。对于干湿边的拟合方程的获得, 本研究采用最大值合成法确定天边界、最大最小值合成法确定湿边界^[28], 能够减少由于单个时段卫星数据的特征空间存在的不稳定性^[29]。

2.2.4 植被供水指数(VSWI)

当土壤水分充足时, 植被生长正常; 当土壤水分不足时, 植物生长受土壤水分胁迫。后者会同时出现 2 种情况: 一是作物由于缺水导致生长状况受到影响, NDVI 减小; 二是作物被迫关闭部分气孔以减少蒸腾量, 从而导致冠层温度升高^[30]。

$$VSWI = \frac{NDVI}{LST} \quad (4)$$

式中: LST 为地表温度。VSWI 值越小代表土壤含

水量越小, 反之则相反。

3 结果与分析

3.1 遥感干旱指数与土壤相对含水量的相关性

为验证遥感干旱指数监测的精确性, 本研究利用乌拉特前旗、临河 2 个气象站的 2000—2013 年 5—8 月的 0~20 cm 土壤相对含水量数据进行验证。利用 ENVI 及 Arcgis 软件对 4 个遥感干旱监测指数进行计算, 并提取 2 个气象站所处栅格的干旱指数值, 分别对 2 个站点 4 个月进行遥感干旱指数与土壤相对含水量的相关性分析以及显著性检验。各个干旱指数与土壤相对含水量的相关性评价如表 1 所示。2018 年 5—8 月 4 种干旱指数监测结果见图 3 至图 6。

表 1 干旱指数与 0~20 cm 土壤相对含水量相关系数表

Table 1 Correlation coefficient between drought index and relative water content of 0—20 cm soil

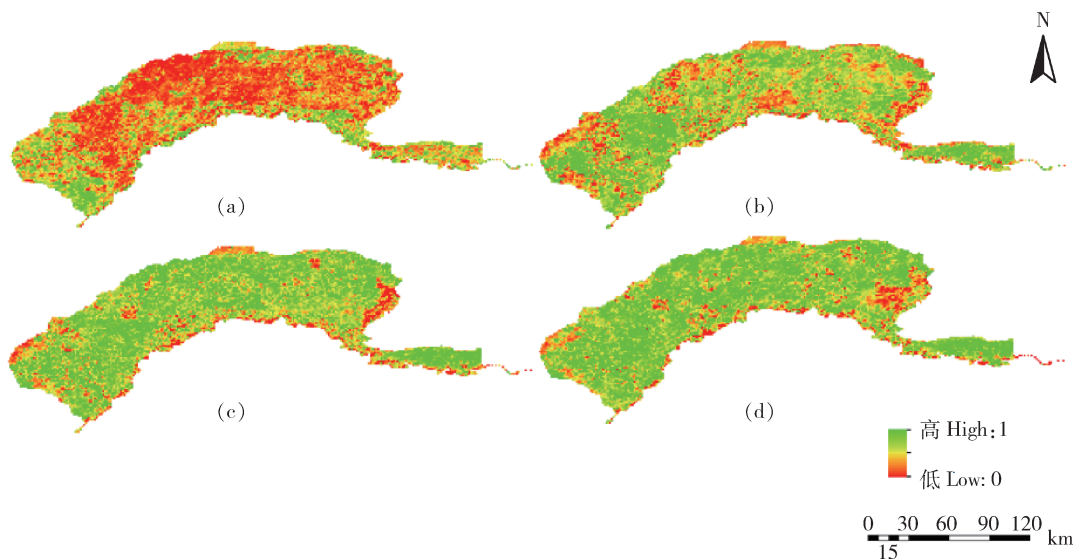
月份 Month	TVDI		TCI		VCI		VSWI	
	乌拉特前旗	临河	乌拉特前旗	临河	乌拉特前旗	临河	乌拉特前旗	临河
5 月 May	-0.19	-0.56 **	-0.13	-0.44 *	0.40 *	0.44 *	0.38 *	0.43 *
6 月 June	0.07	-0.51 **	-0.01	-0.50 **	0.37 *	-0.05	0.52 **	-0.03
7 月 July	-0.40 *	-0.44 *	-0.47 *	-0.34	0.49 **	-0.05	0.52 **	-0.03
8 月 August	-0.50 *	-0.56 **	-0.14	-0.62 **	-0.05	0.59 **	-0.01	0.60 **

注: * 代表 0.90 的置信水平下显著相关, ** 代表 0.95 的置信水平下显著相关。TVDI、TCI、VCI、VSWI 分别表示温度植被干旱指数、温度状态指数、植被状态指数、植被供水指数。下同。

Note: * represents significant correlation at a confidence level of 0.90 and ** represents a significant correlation at a confidence level of 0.95. TVDI, TCI, VCI and VSWI respectively represent temperature vegetation drought index, temperature condition index, vegetation condition index and vegetation water supply index. The same below.

由表 1 可见: TVDI 与 TCI 与 0~20 cm 土壤相对含水量呈显著的负相关; VCI 与 VSWI 与 0~20 cm 土壤相对含水量呈显著的正相关, 与实际相符。从整体来看: TVDI 与 TCI 在临河站表现情况优于 VCI 与 VSWI, 而 VCI 与 VSWI 在乌拉特前旗站表现情况优于 TVDI 与 TCI。4 种干旱指数中 TVDI 与 0~20 cm 土壤相对含水量的相关性要比其他 3 种指数更好, 这表明 TVDI 更适于反映土壤相对含水量的变化, 能够较好的监测干旱情况。

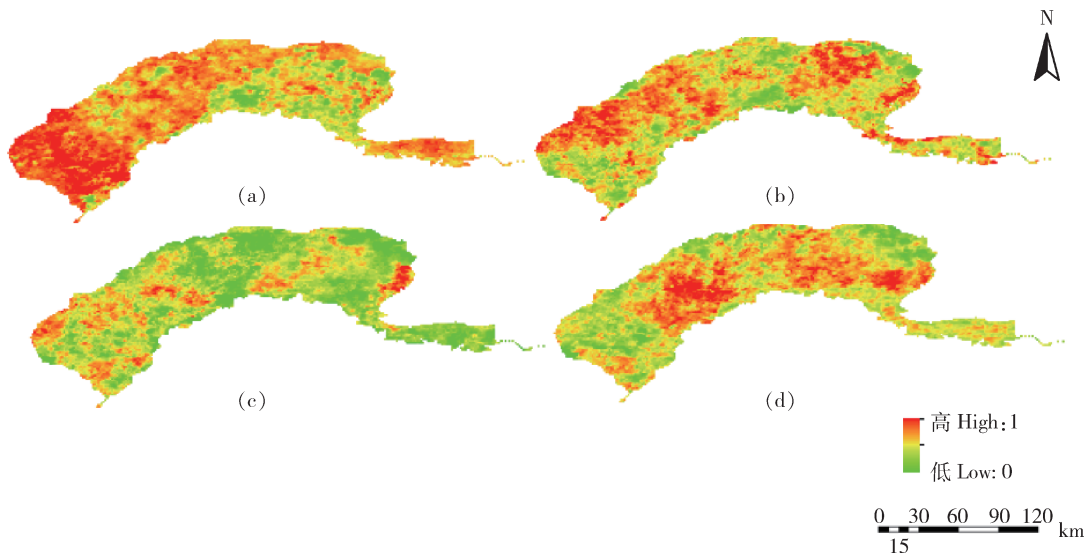
由图 3 至图 6 可见: 在 5 月时灌区干旱较为严重, 随着时间的推移旱情逐渐减轻, 与灌区灌溉实际相符。灌区从 5 月开始夏灌工作, 随着灌水量不断的增加灌区旱情不断减轻。由图 5 和图 6 可知灌区最西端常年干旱, 而最东端常年湿润, 这是因为灌区西部为乌兰布和沙漠, 东部为乌梁素海。TVDI 与 VSWI 相比于 TCI 和 VCI 能够更好的反映不同下垫面情况对旱情带来的影响, 能更好的反映灌区干旱情况。



(a) 5月 May; (b) 6月 June; (c) 7月 July; (d) 8月 August。

图3 2018年5—8月植被状态指数VCI图

Fig. 3 Vegetation condition index from May to August 2018



(a) 5月 May; (b) 6月 June; (c) 7月 July; (d) 8月 August。

图4 2018年5—8月温度状态指数TCI图

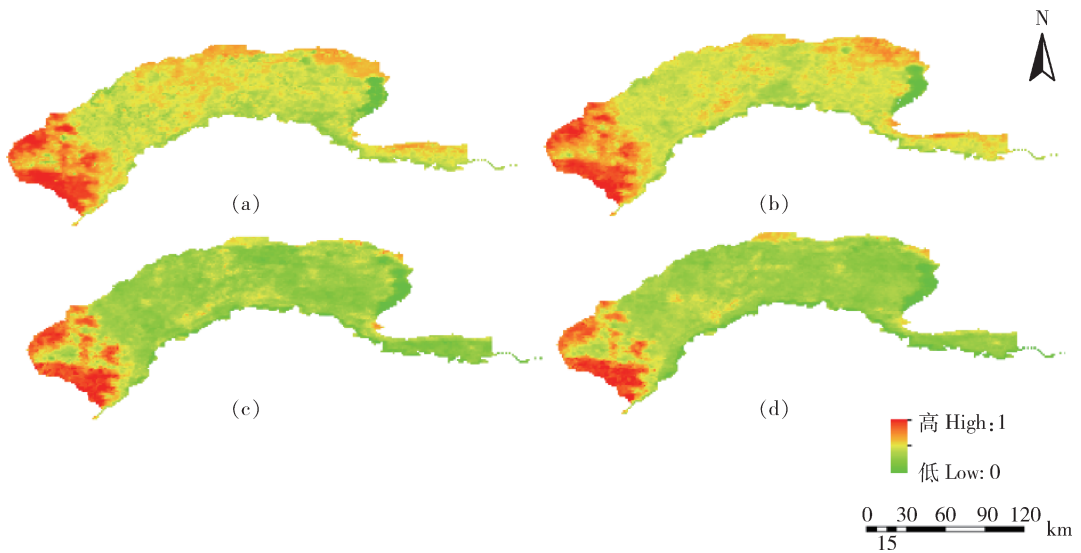
Fig. 4 Temperature condition index from May to August 2018

3.2 遥感干旱指数与降水量的相关性

因为降水数据的缺失,所以本次分析只采用了临河气象站月降雨量。为精确验证遥感干旱指数,计算了气象站月降水量与气象站所处的栅格干旱指数值之间的相关系数,相关分析结果如表2所示。

分析结果表明:4种干旱指数在8月时与降水

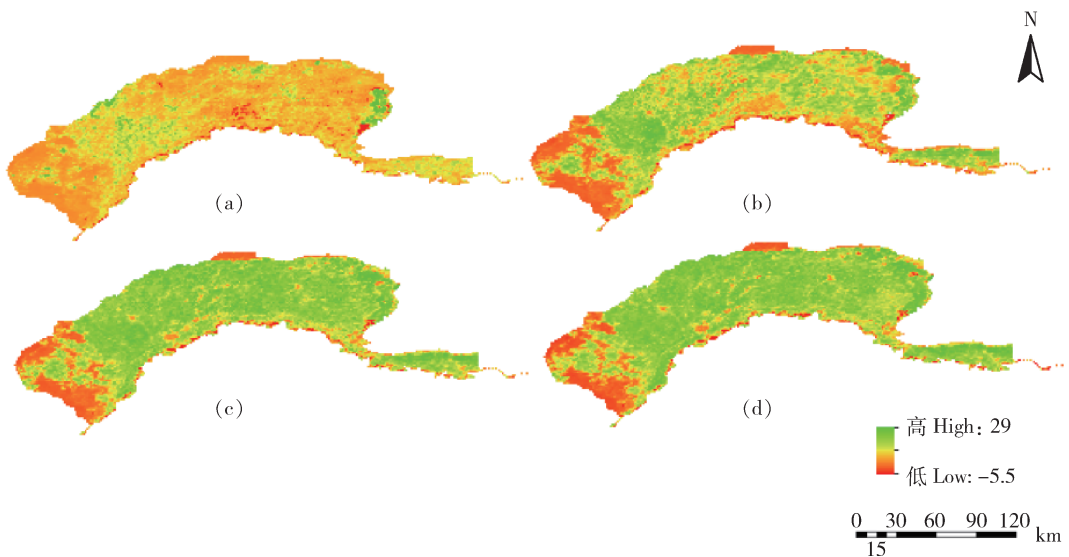
量出现了较好的相关关系;在8月TVDI与TCI与月降雨量呈良好的负相关,VCI与VSWI与月降雨量呈良好的正相关;总体上,当降水量越大时,灌区干旱情况越轻,即降水量与旱情呈负相关趋势(图7);4种干旱指数中TVDI与月降雨量的相关性明显优于其他3种,说明在这4种干旱指数当中TVDI比VSWI、VCI、TCI对降水更敏感(表2)。



(a) 5月 May; (b) 6月 June; (c) 7月 July; (d) 8月 August。

图 5 2018 年 5—8 月温度植被干旱指数 TVDI 图

Fig. 5 Temperature vegetation drought index from May to August 2018



(a) 5月 May; (b) 6月 June; (c) 7月 July; (d) 8月 August。

图 6 2018 年 5—8 月植被供水指数 VSWI 图

Fig. 6 Vegetation water supply index from May to August 2018

4 种干旱指数与月降雨量相关性并不稳定,特别是在 5、6、7 月 VSWI、VCI 与降雨量之间基本不存在相关性,而 TCI、TVDI 与降雨量存在微弱的相关性。

3.3 遥感干旱指数与灌区引水量相关性

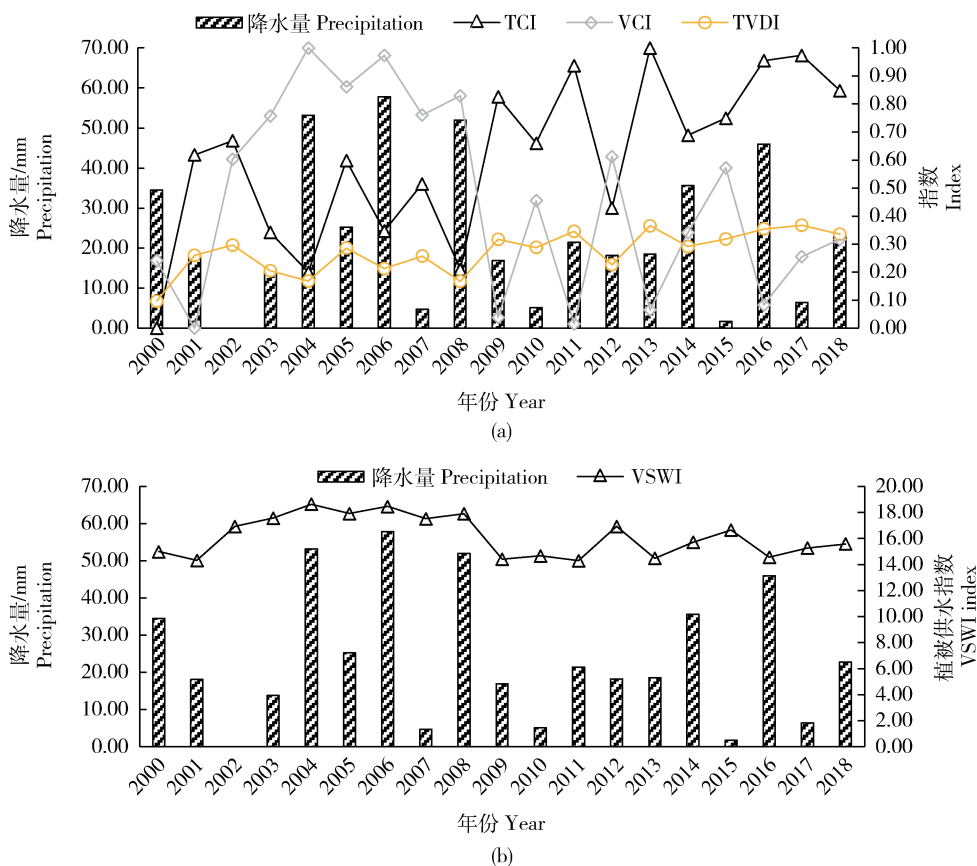
为了更进一步验证引水量与干旱指数的关系,本研究计算了灌区月引水量与灌区范围内干旱指数平均值之间的相关系数,结果见表 3。由表 3 可见: VSWI、VCI 与灌区引水量之间基本呈负相关;

TVDI、TCI 与灌区引水量呈明显的正相关。灌区引水量受人为调控,当灌区旱情严重时灌区引水量越多。TVDI 与 TCI 与灌区引水量的相关性要优于 VSWI 与 VCI,这表明 TVDI 与 TCI 对于因灌溉而带来的土壤墒情变化更加敏感。在 8 月时 4 种干旱指数与引水量之间的相关性微弱,是由于 8 月引水量少,所以引水量对于旱情的影响不大,与 3.2 节的结果也相吻合。

表2 干旱指数与月降雨量相关系数

Table 2 Correlation coefficient between drought index and monthly rainfall

月份 Month	VSWI	VCI	TCI	TVDI
5月 May	-0.04	-0.03	-0.10	-0.05
6月 June	-0.07	-0.09	-0.33	-0.35
7月 July	-0.04	-0.05	-0.20	-0.25
8月 August	0.46	0.42	-0.57	-0.57



(a)降水量与 TVDI、VCI、TCI; (b)降水量与 VSWI。

(a) Precipitation and TVDI, VCI and TCI; (b) Precipitation and VSWI.

图7 2000—2018年8月4种干旱指数与降水量

Fig. 7 Response analysis of four drought indexes and precipitation of August from 2000 to 2018

3.4 遥感干旱指数间相关性

在进行上述分析时,发现4种干旱指数表现好坏存在两两同步情况。因此,为了进一步分析指数之间的聚类效应,以临河站所处栅格为对象,提取

2000—2018年各干旱指数值并进行相关分析。

由表3可知VSWI与VCI之间、TVDI与TCI之间显著相关。已有研究依据遥感指数相关性将一些典型的遥感指数划为4类^[5]。本研究根据已有的

表 3 干旱指数与灌区引水量相关系数表

Table 3 Correlation coefficient between drought index and irrigation diversion volume

月份 Month	VSWI	VCI	TCI	TVDI	平均引水量/(10 ⁸ m ³) Average water diversion
5 月 May	-0.53 **	-0.46 **	0.42 **	0.56 **	8.84
6 月 June	-0.38 *	-0.42 **	0.42 **	0.31	5.11
7 月 July	-0.09	-0.03	0.32 *	0.35 *	6.43
8 月 August	0.13	-0.10	0.25	0.23	2.51

表 4 遥感干旱指数相关系数矩阵

Table 4 Correlation coefficient matrix of remote sensing drought index

指数 Index	5 月 May				6 月 June			
	VSWI	VCI	TCI	TVDI	VSWI	VCI	TCI	TVDI
VSWI	1	0.784 **	-0.274	-0.787 **	1	0.627 **	0.024	-0.325
VCI	0.784 **	1	-0.425 *	-0.791 **	0.627 **	1	-0.103	0.057
TCI	-0.274	-0.425 *	1	0.798 **	0.024	-0.103	1	0.780 **
TVDI	-0.787 **	-0.791 **	0.798 **	1	-0.325	0.057	0.780 **	1
指数 Index	7 月 July				8 月 August			
	VSWI	VCI	TCI	TVDI	VSWI	VCI	TCI	TVDI
VSWI	1	0.724 **	-0.247	-0.549 **	1.000	0.590 **	0.010	-0.182
VCI	0.724 **	1.000	-0.473 *	-0.532 **	0.590 **	1.000	-0.393 *	-0.371
TCI	-0.247	-0.473 *	1.000	0.920 **	0.010	-0.393 *	1.000	0.966 **
TVDI	-0.549 **	-0.532 **	0.920 **	1.000	-0.182	-0.371	0.966 **	1.000

指数分类体系^[31]可将 VSWI 与 VCI 归类为基于植被指数的遥感干旱指数, TVDI 与 TCI 可归类为基于地表温度的遥感干旱指数。结合前面对于 4 种干旱指数的评价可以得出, 基于地表温度的遥感干旱指数对于干旱的指示作用最强^[31]。

4 讨论与结论

在干旱指数与土壤相对含水量相关分析当中,

不同的干旱指数在不同时间不同站点, 其表现情况不同。这可能是因为不同地区种植作物不同, 生育期不尽相同, 从而导致在不同时间不同区域地表植被覆盖度差异较大, 进而导致了不同干旱指数监测情况的不相同。除此之外, 4 种干旱指数与 0~20 cm 土壤相对含水量之间的相关性并不很稳定, 归纳可能原因如下: 一是在进行站点处数据提取时, 一个站点对应的是 1 km×1 km 的栅格, 这

种以点带面的方式本身就会存在一定的偏差；二是各年大气条件、观测角度等对卫星观测的影响不同^[32]；三是人为影响的存在，如灌溉、测量错误等。

本研究中干旱指数与降雨量的相关性并未呈现良好的相关关系，主要原因可能是河套灌区年降水量较小，农业灌溉水资源90%来自于黄河，即：引水灌溉影响了干旱指数与降水量之间的相关关系。在不考虑人类活动干预下，气象干旱是农业干旱的唯

一驱动因素^[32]。在自然情况下，气象干旱会转化为农业干旱，而灌区引水量大从而阻断了气象干旱向农业干旱的转变(图8)^[33]。干旱指数与引水量相关分析表明当引水量大时干旱指数与降水量相关性弱，反之则相反，具体表现为：5月引水量最大，干旱指数与降水量无相关性；8月引水量最小，干旱指数与降水量出现了一定的相关关系。因此通过灌水量与遥感干旱指数间的相关分析，也可以评价干旱指数的适用情况。

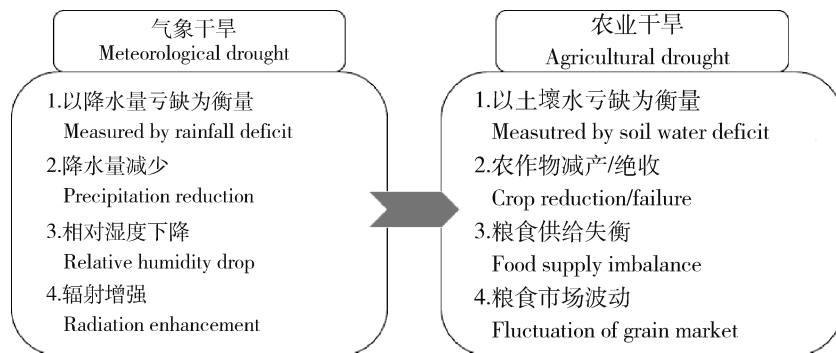


图8 自然情况下干旱的传递过程^[33]

Fig. 8 Transfer process of drought under natural conditions

本研究以MODIS产品为遥感数据源，以河套灌区为研究对象，计算了灌区2000—2018年作物主要生育期内(5—8月)4种遥感干旱指数，并分别对其进行0~20 cm土壤相对含水量相关性分析、降水量相关性分析、灌区引水量相关性分析以及指数之间的相关性分析，从而对4种干旱指数在河套灌区的适用性情况进行了综合评价，结论如下：

1) 4种遥感干旱指数在不同的地域和时间表现情况不同，其中温度植被干旱指数与0~20 cm土壤相对含水量相关性、降水量相关性、灌区引水量相关性优于其他3种干旱指数，在河套灌区使用温度植被干旱指数能得到较好的效果。除此之外，在干旱监测中综合利用多种干旱指数进行分析对提高监测精度，科学合理地预报旱情具有重要的意义。

2) 4种干旱指数相关分析结果可将其分为：VSWI与VCI为基于植被指数的遥感干旱监测指数，TVDI与TCI为基于地表温度指数的遥感干旱监测指数，其中基于地表温度的遥感干旱监测指数相比基于植被指数的遥感干旱监测指数对于旱情有更好的监测结果。

3) 在引水量较大的干旱半干旱地区灌区，遥感干旱指数与降水量之间的相关关系微弱这是由于人

为影响较大。在这样的灌区也可以采用灌区引水量与干旱指数进行相关分析，来评价干旱指数适用性。

综上，TVDI在河套灌区干旱监测有着良好的应用，但是其特征空间仍然存在着一一定的不稳定性，特征空间中的干边、湿边的提取技术有待进一步完善。

参考文献 References

- [1] 王宗敏, 杨海波, 计淇才, 李小涛. 基于MODIS的河南省遥感干旱监测研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(1): 139-143
Wang Z M, Yang H B, Ji Q C, Li X T. Remote sensing monitoring for drought in Henan Province based on MODIS [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2012, 32(1): 139-143 (in Chinese)
- [2] 宋扬, 房世波, 卫亚星. 农业干旱遥感监测指数及其适用性研究进展[J]. 科技导报, 2016, 34(5): 45-52
Song Y, Fang S B, Wei Y X. Comparison of typical remote sensing drought indexes and their adaptability in agriculture [J]. *Science & Technology Review*, 2016, 34(5): 45-52 (in Chinese)
- [3] 杨绍镔, 闫娜娜, 吴炳方. 农业干旱遥感监测研究进展[J]. 遥感信息, 2010(1): 103-109
Yang S E, Yan N N, Wu B F. Advances in agricultural drought monitoring by remote sensing [J]. *Remote Sensing*

- Information, 2010(1): 103-109 (in Chinese)
- [4] 黄友昕, 刘修国, 沈永林, 刘诗诗, 孙飞. 农业干旱遥感监测指标及其适应性评价方法研究进展[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 186-195
Huang Y X, Liu X G, Shen Y L, Liu S S, Sun F. Advances in remote sensing derived agricultural drought monitoring indices and adaptability evaluation methods[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(16): 186-195 (in Chinese)
- [5] 张宏民, 赵书河, 陈诚, Elnazir Ramadan, 雷步云. 苏丹遥感干旱指数及其适用性[J]. 遥感信息, 2016, 31(4): 48-55
Zhang H M, Zhao S H, Chen C, Elnazir Ramadan, Lei B Y. Adaptability of remote sensing drought index in Sudan[J]. *Remote Sensing Information*, 2016, 31(4): 48-55 (in Chinese)
- [6] 赵承华. 基于 MODIS 数据的多种干旱监测方法及其在锡林郭勒草地的应用[D]. 呼和浩特: 内蒙古师范大学, 2014
Zhao C H. The variety of drought monitoring method based on the MODIS data and the application in the Xilingol Grassland [D]. Huhehaote: Inner Mongolia Normal University, 2014 (in Chinese)
- [7] 孙灏, 陈云浩, 孙洪泉. 典型农业干旱遥感监测指数的比较及分类体系[J]. 农业工程学报, 2012, 28(14): 147-154
Sun H, Chen Y H, Sun H Q. Comparisons and classification system of typical remote sensing indexes for agricultural drought[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(14): 147-154 (in Chinese)
- [8] 毕力格, 银山, 包玉龙, 关彦如. 基于 TVDI 的内蒙古植被生长期干旱研究[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(10): 5945-5948
Bi L G, Yin S, Bao Y L, Guan Y R. Research on the drought during the vegetation growth period of Inner Mongolia based on TVDI[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(10): 5945-5948 (in Chinese)
- [9] 管晓丹, 郭锐, 黄建平, 葛颀铭, 郑志海. 植被状态指数监测西北干旱的适用性分析[J]. 高原气象, 2008(5): 1046-1053
Guan X D, Guo N, Huang J P, Ge J M, Zheng Z H. Applicability analysis of VCI to monitoring northwest China drought[J]. *Plateau Meteorology*, 2008(5): 1046-1053 (in Chinese)
- [10] 姚春生, 张增祥, 汪潇. 使用温度植被干旱指数法(TVDI)反演新疆土壤湿度[J]. 遥感技术与应用, 2004(6): 473-478
Yao C S, Zhang Z X, Wang X. Evaluating soil moisture status in Xinjiang using the temperature vegetation dryness index (TVDI) [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2004(6): 473-478 (in Chinese)
- [11] 陈修治, 苏泳娴, 李勇, 陈水森, 韩留生. 基于被动微波遥感的中国干旱动态监测[J]. 农业工程学报, 2013, 29(16): 151-158
Chen X Z, Su Y X, Li Y, Chen S S, Han L S. Monitoring drought dynamics of China using passive microwave remote sensing technology[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(16): 151-158 (in Chinese)
- [12] 郑有飞, 徐芳, 詹习武, 关福来, 杨彬云, 吴荣军. 基于 AMSR-E 数据的被动微波遥感干旱指数研究[J]. 南京气象学院学报, 2009, 32(2): 189-195
Zheng Y F, Xu F, Zhan X W, Guan F L, Yang B Y, Wu R J. Drought indices from passive microwave remote sensing AMSR-E data [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2009, 32(02): 189-195 (in Chinese)
- [13] 高炜, 安如, 王喆. 基于微波遥感技术的干旱监测指数及其应用研究: 以三江源区为例[J]. 干旱区研究, 2017, 34(3): 541-550
Gao W, An R, Wang Z. Drought index and its application based on microwave remote sensing technology: A case study in the Three-River headwaters region[J]. *Arid Zone Research*, 2017, 34(3): 541-550 (in Chinese)
- [14] 田辉, 文军, 史小康, 王欣, 刘蓉, 张静辉, 吕少宁. 主动微波遥感黄河上游玛曲地区夏季土壤水分[J]. 水科学进展, 2011, 22(1): 59-66 (in Chinese)
Tian H, Wen J, Shi X K, Wang X, Liu R, Zhang J H, Lv S N. Estimation of soil moisture in summer by active microwave remote sensing for the Maqu area at the upper reaches of the Yellow River [J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(1): 59-66 (in Chinese)
- [15] 陈少丹, 张利平, 郭梦瑶, 柳鑫. TRMM 卫星降水数据在区域干旱监测中的适用性分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(15): 126-132
Chen S D, Zhang L P, Guo M Y, Liu X. Suitability analysis of TRMM satellite precipitation data in regional drought monitoring [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(15): 126-132 (in Chinese)
- [16] 林妍, 高伟, 师晋平, 王静. 基于 MODIS 和 FY-2D 卫星降水数据的遥感旱情监测研究[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(12): 51-57
Lin Y, Gao W, Shi J P, Wang J. Remote sensing monitoring of drought based on MODIS and FY-2D satellite rainfall data [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2014, 28(12): 51-57 (in Chinese)
- [17] 王兆礼, 钟睿达, 陈家超, 黄文炜. TMPA 卫星遥感降水数据产品在中国大陆的干旱效用评估[J]. 农业工程学报, 2017, 33(19): 163-170
Wang Z L, Zhong R D, Chen J C, Huang W W. Evaluation of drought utility assessment of TMPA satellite-remote-sensing-based precipitation product in mainland China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(19): 163-170 (in Chinese)
- [18] 蒋磊, 尚松浩, 杨雨亭, 王仰仁. 基于遥感蒸散发的区域作物估产方法[J]. 农业工程学报, 2019, 35(14): 90-97
Jiang L, Shang S H, Yang Y T, Wang Y R. Method of

- regional crop yield estimation based on remote sensing evapotranspiration model [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2019, 35(14): 90-97 (in Chinese)
- [19] 乌兰吐雅, 于利峰, 乌兰, 包珺玮, 许洪滔. 基于 Landsat8 TVDI 的河套灌区旱情分析: 以临河区为例[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(5): 123-127
- Wu L T Y, Yu L F, Wu L, Bao J W, Xu H T. Drought analysis of Hetao irrigation district based on Landsat 8 TVDI: Taking Linhe district as an example[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2017, 38(5): 123-127 (in Chinese)
- [20] 柯丽娟. 遥感反演土壤含水量在灌溉用水管理中的应用研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015
- Ke L J. Application of remote sensing inversion of soil moisture in the irrigation water management research[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2015 (in Chinese)
- [21] 白燕英, 魏占民, 刘全明, 李泽鸣. 基于 ETM+ 遥感影像的农田土壤含水率反演研究[J]. 灌溉排水学报, 2013, 32(4): 76-78
- Bai Y Y, Wei Z M, Liu Q M, Li Z M. Inversion of soil water content based on remote sensing image [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2013, 32(4): 76-78 (in Chinese)
- [22] 屈忠义, 刘廷玺, 康跃. 内蒙古引黄灌区不同尺度灌溉水效率测试分析与节水潜力评估[M]. 北京: 科学出版社, 2018
- Qu Z Y, Liu T X, Kang Y. *Test and Analysis of Irrigation Water Efficiency of Different Scales and Evaluation of Water Saving Potential in Yellow River Diversion Irrigation Area of Inner Mongolia*[M]. Beijing: The Science Publishing Company, 2018 (in Chinese)
- [23] 徐冠华, 田国良, 王超, 牛铮, 郝鹏威, 黄波, 刘震. 遥感信息科学的进展和展望[J]. 地理学报, 1996(5): 385-397
- Xu G H, Tian G L, Wang C, Niu Z, Hao P W, Huang B, Liu Z. Remote sensing information science: Progress and prospect [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1996(5): 385-397 (in Chinese)
- [24] 张峰. 川渝地区农业气象干旱风险区划与损失评估研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013
- Zhang F. Regionalization of agricultural meteorological drought risk and loss evaluation in Sichuan-Chongqing area [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013 (in Chinese)
- [25] Kogan F N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection [J]. *Advances in Space Research*, 1995, 15(11): 91-100
- [26] Kogan F N. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection [J]. *Advances in Space Research*, 1995, 15(11): 91-100
- [27] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 79(2): 213-224
- [28] 孙威, 王鹏新, 韩丽娟, 颜凯, 张树誉, 李星敏. 条件植被温度指数干旱监测方法的完善[J]. 农业工程学报, 2006(2): 22-26
- Sun W, Wang P X, Han L J, Yan K, Zhang S Y, Li X M. Further improvement of the approach to monitoring drought using vegetation and temperature condition indexes from multi-years' remotely sensed data [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006(2): 22-26 (in Chinese)
- [29] 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 M, Chen M H, Liu H. An improvement of the land surface temperature NDVI space drought monitoring method and its applications [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2011, 69(5): 922-931 (in Chinese)
- [30] 冯锐, 张玉书, 李党红. 利用 AVHRR 资料监测植被土壤含水量[J]. 辽宁气象, 1998(4): 30-31
- Feng R, Zhang Y S, Li D H. Using AVHRR data to monitor vegetation soil water content [J]. *Journal of Meteorology and Environment*, 1998(4): 30-31 (in Chinese)
- [31] 于敏, 王春丽. 不同卫星遥感干旱指数在黑龙江的对比应用[J]. 应用气象学报, 2011, 22(2): 221-231
- Yu M, Wang C L. Satellite remote sensing drought monitoring methods based on different biophysical indicators [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2011, 22(2): 221-231 (in Chinese)
- [32] 彭少明, 王煜, 蒋桂芹. 黄河流域主要灌区灌溉需水与干旱的关系研究[J]. 人民黄河, 2017, 39(11): 5-10
- Peng S M, Wang Y, Jiang G Q. Study on the relationship between irrigation water requirement and drought in the main irrigation area of the Yellow River basin [J]. *Yellow River*, 2017, 39(11): 5-10 (in Chinese)
- [33] 刘宪锋, 朱秀芳, 潘耀忠, 李双双, 刘焱序. 农业干旱监测研究进展与展望[J]. 地理学报, 2015, 70(11): 1835-1848
- Liu X F, Zhu X F, Pan Y Z, Li S S, Liu Y X. Agricultural drought monitor: Progress, challenges and prospect [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(11): 1835-1848 (in Chinese)

责任编辑: 杨爱东