文章编号:1000-7601(2020)04-0266-12 doi:10.7606/j.issn.1000-7601.2020.04.34

基于多源遥感数据的河套灌区干旱时空演变特征

牛乾坤[1,2],刘 浏[1,2],程湫雅[1,2],李 浩[1,2]

(1.中国农业大学水利与土木工程学院, 北京 100083; 2.中国农业大学中国农业水问题研究中心,北京 100083)

摘 要:利用中国气象局陆面数据同化系统(CLDAS)验证了 2015—2016 年土壤水分主动-被动微波数据集(SMAP)在河套灌区的适用性,基于土壤水分亏缺指数(*SWDI*)和干旱周百分比(*PDW*)分析了作物生育期内灌区农业干旱时空演变规律,通过两个参考指标检验了 *SWDI* 在河套灌区的精度。结果表明:(1)SMAP 在河套灌区的适用性较好;区域尺度上,SMAP 和 CLDAS 的相关系数为 0.65;栅格尺度上,约有 69%的栅格表现良好(R>0.5),且多集中在灌区西南部和东北部。(2)严重干旱主要发生在 4 月下旬到 5 月中旬、7 月下旬到 8 月下旬以及 9 月中旬到 10 月中旬,主要集中在灌区的西南部、中部和东部;2015—2016 年 *PDW* 值略有增大,干旱事件的持续时间有所延长。(3)大气水分亏缺量(*AWD*)表征的气象干旱在时间上显示 2 a 内灌区干旱月份为 5—8 月;空间上,除去地形原因,*SWDI* 和 *AWD* 的相关性较为显著,且有一半格点通过了显著性水平为 0.01 的显著检验,表明基于 *SWDI* 对河套灌区进行干旱状况分析具有较高的可信度。

关键词:农业干旱;土壤水分亏缺指数;遥感;干旱时空分布;河套灌区

中图分类号:S423 **文献标志码**:A

Spatiotemporal characteristics of drought in the Hetao irrigation district based on remote sensing data from multi-sources

NIU Qiankun[1,2], LIU Liu[1,2], CHENG Qiuya[1,2], LI Hao[1,2]

(1.*College of Water Resources and Civil Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083;
2.*Center for Agricultural Water Research in China*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083)

Abstract: The China Meteorological Administration land data assimilation system (CLDAS) was used to evaluate the applicability of the Soil Moisture Active Passive (SMAP) dataset. The soil water deficit index (*SWDI*) and percentage of drought week (*PDW*) were calculated to investigate the spatiotemporal evolution of agricultural drought in the Hetao Irrigation District (HTID). The accuracy of *SWDI* was examined by comparing with the atmospheric water deficit (*AWD*) that calculated based on the China Meteorological Assimilation Datasets for SWAT model (CMADS) dataset. The main results were as following: (1) A good applicability of soil moisture produced by SMAP was demonstrated in the HTID. At the regional scale, temporal variation trends of soil moisture between SMAP and CLDAS was consistent and the mean correlation coefficient of the whole irrigation area was 0.65. At the grid scale, approximately 69% of grids showed a high correlation (R>0.5), which was mainly located in the Southwest and Northeast of the HTID. (2) Severe drought mainly occurred in three periods (from the end of April to the mid-May, from the end of July to the end of August, and from the mid-September to mid-October, respectively) and concentrated in the Southwest, Middle and East of the HTID. The values of *PDW* during 2015-2016 increased slightly, implying a prolonged duration of drought events. (3) Except for topographical factors, the correlation between *SWDI* and *AWD* was very significant with half of the grids passing the significance test of 0.01, indicating that

收稿日期:2020-05-19 **修回日期**:2020-05-24

资助项目:国家重点研发计划重点专项(2018YFC1508702)

作者简介:牛乾坤(1996-),女,河南商丘人,硕士研究生,研究方向为水文水资源。E-mail: s20193091589@cau.edu.cn

通信作者:刘浏(1986-),男,江苏宿迁人,博士,副教授,主要从事水文水资源相关研究。E-mail: liuliu@cau.edu.cn

investigation of drought conditions in the HTID based on *SWDI* derived from SMAP is credible.

Keywords: agricultural drought; *SWDI*; remote sensing; spatiotemporal distribution of drought; Hetao Irrigation District

干旱这一极端天气事件具有持续时间长、发生频率高、影响范围广的特点,它通常发展缓慢,但会造成广泛的生态破坏和经济损失[1-2]。有研究得出,1979 - 2010 年中国干旱事件数量增加了109%[3]。由于全球变暖这一气候变化,我国未来的极端干旱灾害事件可能会进一步增加。国内外通常将干旱划分为 4 种通用类型,分别为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱[4-5]。我国是农业大国,农业干旱灾害频发。1995—2005 年间,因农业干旱导致平均每年粮食损失量约为2 600万 t,足以满足6 000万人的需求[6]。因此,准确预测和监测农业干旱在保障国家粮食安全和提高风险管理方面具有重要的意义。

农业干旱是指在作物生育期内因土壤水分有效性降低而使作物产量降低、农田土壤盐渍化加重等[7-8]。为了更好地监测和分析农业干旱状况,通常使用干旱指数进行定量描述。早期基于气象要素的干旱指标一般只将降水和气温作为影响因素进行计算,而不考虑特定地点的土壤特性[9-11]。然而在农业生产中,土壤水分不但影响土壤的理化性质,包括土壤内氧气含量、矿物质离子浓度和微生物代谢活动等[12],它还直接指示土壤墒情,影响着作物的生长发育[13]。因此,土壤水分是干旱监测和农业干旱指数估算的关键变量[14-15],评估农业干旱时采用与土壤水分有关的干旱指标更能反映出地区的农业干旱情况。目前,由 Martínez - Fernández 等[16]提出的土壤水分亏缺指数(Soil water deficit index,*SWDI*)已经广泛应用于农业干旱监测、卫星土壤水分数据评价等方面,并被认为是利用土壤物理特性来测量作物根系吸收有效土壤含水量的一种应用前景较好的方法[17-20]。Martínez - Fernández 等[21]证实 *SWDI* 与由西班牙杜罗盆地当地实测数据计算的大气水分亏缺量(Atmospheric water deficit,*AWD*)一致性较好。Paredes-Trejo 等[22]同样得到 *SWDI* 在巴西东北部适用性较好的结论。

与降水、温度等容易观测的气象要素不同,土壤水分因其具有较高的不确定性和较大的空间异质性,在许多地区难以准确地进行原位观测[23]。相较于传统测量手段来说,卫星遥感技术具有空间连续性的优点,能够获取大范围的土壤水分信息。同时遥感技术的发展丰富了不同时空分辨率下表层土壤水分的反演[24-26]。基于遥感土壤水分推导出的农业干旱指数已经被应用于干旱、洪水预报和大规模水文建模[17,27-28]。在目前应用最广泛的遥感土壤水分数据集中,土壤水分主被动遥感卫星(Soil moisture active-passive,SMAP)采用主动、被动微波联合反演土壤水分,具有精度高、适用范围广等优点,能够克服时间差异性小这一缺点,且空间分辨率可精确至 3 km[29-31]。Bai 等[17]利用 *SWDI* 评估了国内 SMAP L3 土壤水分在中国的表现,结果表明,从偏差(BIAS)角度看,*SWDI* 在北方地区的干旱预测效果优于南方地区。Liu 等[40]采用支持向量机(Support vector machines,SVM)和数据同化方法研究了 SMAP 土壤水分在干旱监测应用中的有效性,并利用 *SWDI* 预测了美国邻近地区的农业干旱,结果表明,采用 SVM 对 SMAP 数据进行修正可以显著提高干旱监测的准确性。Zhu 等[19]通过 *SWDI* 验证了 SMAP L2 土壤水分在湘江流域的适用性,得出 SMAP 数据能较好地反映出湘江流域干旱状况的结论。

河套灌区位于内蒙古巴彦淖尔市,在我国农业生产和农产品输出中起着重要作用,2018 年灌区粮食总产量达到全国粮食总产量的 4%,而灌区面积仅占为我国陆地总面积的 0.16%左右。目前有关河套灌区农业方面的研究多集中于土壤盐碱化程度[32-35],有关作物生育期内干旱状况的研究较少,这可能与灌区内仅有一个国家基本气象站,难以获取大量实测资料有关。侯琼等[36]利用近50 a的气候资料和近 27 a 的作物生育期资料,分析了内蒙古气候变化特征,发现河套灌区 ≥10℃ 积温已达到 12.384 ℃ · d · a^{-1},同为温暖农业区的科尔沁仅为 5.402 ℃ · d · a^{-1},这意味着河套灌区增温迅速,蒸散发量也将逐渐增大。李虹雨等[37]利用内蒙古及周边地区 70 个气象站近 60 a 的降水数据,对内蒙古气候干旱时空变化进行了分析,发现内蒙古中部干旱趋势速率较西、东部快。本研究通过验证 SMAP 土壤水分在河套灌区的适用性,分析河套灌区农业干旱时空演变特征,为探讨河套灌区作物生育期内水分亏缺量的变化趋势、降水以及灌溉等人为因素对河套灌区作物产量的影响提供科学依据,

同时也为河套灌区实现合理水资源调度、完善农业干旱监测机制,发展灌区经济提供理论基础。

1 研究区域和数据来源

1.1 研究区域概况

河套灌区位于中国内蒙古自治区巴彦淖尔市,其地理位置为东经 106°20″~109°19″,北纬 40°19″~41°18″,北靠阴山,南临黄河,西与乌兰布和沙漠相接,东至包头市郊区,如图 1 所示。它是亚洲最大的一首制自流灌区,同时它也是中国 3 个特大型灌区之一。灌区东西总长 250 km,南北宽约 50 km,海拔在 1 000 m 左右,西南高,东北低,坡度仅有 0.125‰~0.2‰。灌区总面积为 15 032 km^2,占全国总面积的 0.16%,年排水量达到 3~5 亿 m^3[38],总灌溉面积达 11 622 km^2,其中引黄灌溉面积为 5 740 km^2,达到灌区总灌溉面积的 50%,年引黄河水量约 50 亿 m^3[34],属于无灌溉即无农业地区[39]。

灌区属于干旱半干旱气候区,夏季高温干热,冬季严寒少雪,无霜期短。灌区多年平均降水量为 130~220 mm,年际变幅大,年内分布不均匀,降水量多集中在 6—8 月,占全年总降水量的 70%左右,且年蒸发量高达 2 400 mm,蒸降比超过了 10[38]。年内热量充足,年平均气温在 7℃左右,全年日照时数约为 3 100 h,是我国光能资源最丰富的地区之一。

河套灌区的灌溉制度除了常规 4—5 月的春灌和 6—8 月的夏灌 2 次集中用水高峰期之外,在 9 月下旬至 11 月上旬即秋收之后,还会对耕地进行“秋浇”,即洗盐保墒灌溉[40],这是灌区传统的秋季留盐、春季保墒的一种特殊灌溉制度。灌溉方式一般采用喷灌、滴灌、膜下灌溉等节水技术,同时也会采用一些高效节水农艺措施,如平地缩块、覆膜栽培和测土施肥等。

1.2 数据来源

1.2.1 SMAP 遥感数据 SMAP 卫星由 NASA 于 2015 年 1 月发射,并于 2015 年 3 月 31 日开始提供数据。它结合 L 波段主动雷达和 L 波段被动辐射计从太空直接观测全球土壤水分和冻融状态,为用户提供高分辨率(3、9、36 km)和高精度的土壤水分。然而主动雷达于 2015 年 7 月 7 日发生故障,被动辐射计的产品成为 SMAP 唯一可用的土壤水分产品。本研究采用的是被动 SMAP 3 级 L 波段辐射计降序土壤水分产品加强版(SMAP_L3_SM_P_E, SMAP enhanced L3 radiometer global daily 9 km EASE-Grid soil moisture version 2, doi: https://doi.org/10.5067/RFKIZ5QY5ABN),数据原空间分辨率

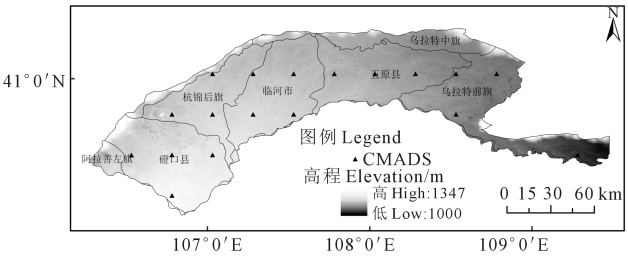

图 1 河套灌区地理位置

Fig.1 Geographical position of the Hetao irrigation district

为 9 km ×9 km,时间分辨率为逐日,利用双线性插值法处理为 0.1°×0.1°。数据集可以在线免费下载(https://earthdata.nasa.gov/)。

1.2.2 CLDAS 同化数据 中国气象局陆面数据同化系统(China meteorological administration land data assimilation system, CLDAS)采用由国家气象信息中心发布的大气驱动场数据(2 m 气温、2 m 比湿、10 m 风速、地面气压、小时降水和短波辐射)为数据源,利用集合卡尔曼滤波(EnKF)数据同化方法和陆面模式计算了垂直剖面的 5 层土壤水分,分别为 0~5、0~10、10~40、40~100 cm 和 100~200 cm,时间分辨率分为逐小时和逐日,空间分辨率为 0.0625°×0.0625°,覆盖整个亚洲[41]。

朱智等[42]以气象站土壤水分观测数据为基准,对比评估了 CLDAS 和 GLDAS 4 个陆面模式的土壤水分,发现 CLDAS 能更好地表征河套灌区土壤水分特征。CLDAS 数据集自 2017 年 1 月 19 日起可用,搜集数据时仅能下载至 2018 年 9 月 18 日。结合河套灌区作物生育期,选用 2018 年 4 月 1 日至 9 月 18 日 CLDAS 河套灌区 0~5 cm 土壤水分,时间分辨率选择为逐日。数据集由中国气象数据共享服务系统在线提供(http://data.cma.cn/)。

1.2.3 CMADS 同化数据 SWAT(Soil and water assessment tool)模型的中国气象同化驱动数据集(The China meteorological assimilation driving datasets for the SWAT model, CMADS)是引入世界各类再分析场及 CLDAS 技术,采用数据嵌套、重采样、双线性插值等各类计算机技术手段而建立的水文模型能直接调用的高分辨率数据集,它弥补了传统气象站点实测数据不足的空缺[43-45]。选取 CMADSV1.1 版本(doi:10.3972/westdc.002.2016.db)数据集作为国家基本气象站点实测数据的替代数据集,并选取与 SMAP 数据相重合的时间序列,即 2015 年 4 月 1 日至 2016 年 10 月 31 日的日最高最低 2 m 气温(℃)和 24 h 累积降水量(mm)数据。Tian 等[46]利用世界粮农组织(FAO)的 Penman-Monteith 公式,对比了由

CMADS 和实测数据计算出的潜在蒸散量(Potential evapotranspiration,*PET*),证实了 CMADS 再分析资料能够作为实测气象数据替代集,尤其是在缺少站点的偏远地区。数据来源于国家青藏高原科学数据中心(https://westdc.westgis.ac.cn/data)。

2　研究方法

2.1　土壤水分亏缺指数(*SWDI*)

利用卫星土壤水分计算得到的 *SWDI* 在确定干旱级别和严重程度方面表现良好,能够充分显示干旱动态,尤其是干旱等级[17-18,21]。利用 SMAP 0~5 cm 土层土壤水分对河套灌区农业干旱状况进行定量分析。*SWDI* 计算如下:

$$SWDI = \frac{\theta - \theta_{FC}}{\theta_{AWC}} \times 10 \tag{1}$$

$$\theta_{AWC} = \theta_{FC} - \theta_{WP} \tag{2}$$

式中,θ 是 SMAP 土壤水分的时间序列,θ_{WP}、θ_{FC} 和 θ_{AWC} 分别代表凋萎含水量、田间持水量和土壤有效含水量。θ_{WP} 和 θ_{FC} 有 3 种定义方法:(1) 时间序列的第 5% 组和第 95% 组土壤水分为 θ_{WP} 和 θ_{FC};(2) −33 kPa 和 −1 500 kPa 土壤水势的土壤水分即为 θ_{WP} 和 θ_{FC};(3) 根据土壤基本物理特征,如粘土和沙子的比例,经由土壤传递函数计算得到 θ_{WP} 和 θ_{FC}[11]。农业干旱的主要承灾体为作物,它与作物生育期土壤水分的有效性有关。因此,选择河套灌区作物生育期(4−10 月)时间序列的第 5% 组和第 95% 组土壤水分来获得 θ_{WP} 和 θ_{FC}[16,21]。*SWDI* 为正值时表明灌区无干旱,为负值时表明发生了干旱,其对应的干旱类别如表 1 所示。

表 1　不同干旱类型土壤水分亏缺指数分类[16]

Table 1　Classification of *SWDI* for different drought categories[16]

干旱类别 Drought categories	*SWDI*
无旱 No drought	> 0
轻度干旱 Slightly dry	0~−2
中度干旱 Moderately dry	−2~−5
严重干旱 Severely dry	−5~−10
极端干旱 Extremely dry	<−10

2.2　干旱周百分比

当发生严重干旱为干旱周(Drought week)[31],即周 *SWDI* 数值低于−5。干旱周百分比(Percentage of drought week,*PDW*)可表示河套灌区的干旱状况,其分为 4 类,分别为 0~25%,25%~50%,50%~75% 以及 75%~100%。干旱周百分比由下式计算:

$$PDW = \frac{D}{W} \times 100\% \tag{3}$$

式中,D 为干旱周数;W 为研究期总周数,本研究为 31 周。

2.3　大气水分亏缺量(*AWD*)

AWD 是降水与潜在蒸散发的差值[47],它是一个与气象参数相关的反映干旱状况的合适指标[31]。当 $AWD<0$ 时,表示干旱;当 $AWD<-50$ mm 时,即为严重干旱。公式如下:

$$AWD_i = P_i - PE\,T_i \tag{4}$$

式中,i 代表了研究期内周数;P_i 和 PET_i 分别是第 i 周降雨和潜在蒸散发的总和。日 *PET* 由 FAO Penman − Monteith 公式计算得出。

2.4　评价指标

利用 Pearson 相关系数(*R*)、偏差(*BIAS*)和无偏均方根误差(*ubRMSE*)对 SMAP 在灌区内的精度和在干旱监测中的表现进行评价。计算公式如下:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \overline{X})(Y_i - \overline{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \overline{X})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Y_i - \overline{Y})^2}} \tag{5}$$

$$BIAS = \frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - Y_i)}{\sum_{i=1}^{n}X_i} \tag{6}$$

$$ubRMSE = \frac{1}{n}\sqrt{n\sum_{i=1}^{n}(Y_i - X_i)^2 - \left(\sum_{i=1}^{n}(Y_i - X_i)\right)^2} \tag{7}$$

式中,X_i 和 Y_i 分别代表了实测数据集和遥感数据集,$\overline{X}$ 和 $\overline{Y}$ 分别为两套数据集的平均值。只要有当地土壤水分和降水、气温或替代数据集,本研究方法就可以广泛应用于评估 SMAP 在其他地区干旱监测中的能力。

3　结果与分析

3.1　SMAP 适用性评估

从栅格尺度和区域尺度对 SMAP 在河套灌区的适用性进行评估。栅格尺度上,对 2018 年 4 月 1 日—9 月 18 日的 SMAP 和 CLDAS 0~5 cm 土壤水分进行平均,计算出每个栅格的 *R*、*BIAS* 和 *ubRMSE*。区域尺度上,对全灌区进行平均后得到河套灌区日平均土壤水分。

在栅格尺度上,通过 *R*、*BIAS* 和 *ubRMSE* 3 个统计参数对比各栅格 CLDAS 日土壤水分和 SMAP 日土壤水分。在 *R* 值方面(图 2a),69%的栅格表现较好($R>0.5$),17%表现一般($0.4<R<0.5$),只有 14%

表现不佳($R<0.4$)。可以看出,两套数据一致性较高的地区主要是灌区的东部和西南部。在 *BIAS* 方面(图 2b),大约 27%的栅格在-0.1 和 0.1 之间,63%的栅格在-0.3 和 0.3 之间,只有 6%超过 0.5,同时 *ubRMSE* 在 0.03 $m^3 \cdot m^{-3}$到 0.05 $m^3 \cdot m^{-3}$之间,这意味着 SMAP 土壤水分在河套灌区表现良好。此外,在灌区西南部 *R* 值虽然较高,但 *BIAS* 也较高,这可能因为西南部为解放闸灌区,受人工灌溉补充土壤水分这一影响因素较大,且作物进入生育期后,解放闸灌区会通过覆膜来养护农作物以提高作物产量。在区域尺度上,SMAP 与 CLDAS 日平均土壤水分如图 3 所示。总体上 SMAP 和 CLDAS 的相关性较好($R = 0.65$),且 $BIAS = 0.091$, $ubRMSE = 0.031\ m^3 \cdot m^{-3}$,这表明 SMAP 在捕捉 CLDAS 土壤水分特征时有相对较好的表现,可以用于评估河套灌区 2015—2016 年的干旱状况。虽然 SMAP 和 CLDAS 在 4 月份差异显著,但在 6 月底至 8 月底表现出相似的变化趋势,并且最大值均出现在 7 月中下旬,分别为 7 月 23 日的 0.31 $m^3 \cdot m^{-3}$和 7 月 19 日的 0.30 $m^3 \cdot m^{-3}$。整体来说,CLDAS 略高于 SMAP 土壤水分值。这两套数据在 4 月份存在较大差距的原因可能是灌区 4 月份便进入生育期,农作物覆膜后会导致 SMAP 卫星的 L 波段无法穿透,致使反演的土壤水分偏小。

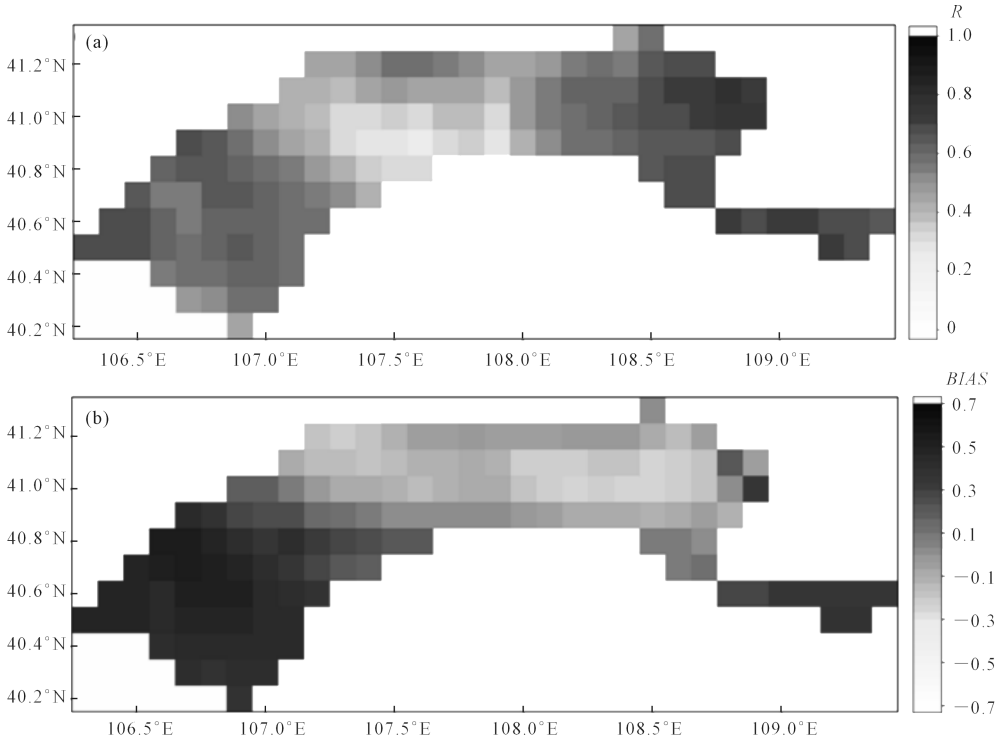

图 2 SMAP 和 CLDAS 土壤水分的 *R*(a)和 *BIAS*(b)

Fig.2 *R* (a) and *BIAS* (b) between SMAP and CLDAS

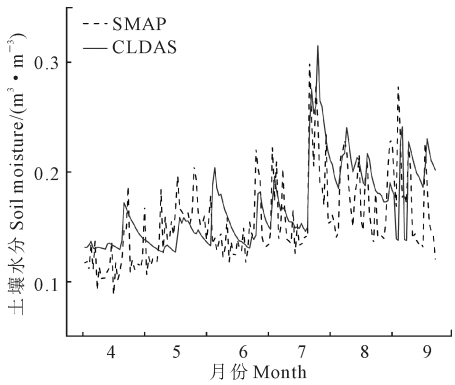

图 3 SMAP 和 CLDAS 土壤水分对比

Fig.3 Comparison of soil moisture between SMAP and CLDAS

3.2 河套灌区干旱评估

3.2.1 *SWDI* 时空分析 SMAP 时间序列较短,为更准确地分析河套灌区作物生育期内的干旱分布特征,相较于周 *SWDI*,日时间尺度更容易看出灌区 2015 年和 2016 年的干旱变化趋势,因此在分析河套灌区干旱演变时空分布时采用日 *SWDI*。

SWDI 的时间变化趋势如图 4 所示。可以看出,整体上 *SWDI* 随时间推进而下降,说明河套灌区在生育期内缺水严重。2015 年和 2016 年日 $SWDI<-5$ 的天数分别为 168 d 和 167 d,约占生育期总天数的 80%。两年平均日 *SWDI* 分别为-6.3 和-6.5,且 2015 年 *SWDI* 最小值(-10.2)高于 2016 年(-11.1),这意

味着河套灌区 2016 年农业干旱程度比 2015 年有所增加。与此同时,2015 年 4 月初 *SWDI* 明显高于 2016 年,原因在于 2015 年 4 月初全灌区平均降水量为 104.29 mm,当月日平均降水量为 45.7 mm,为 2016 年 4 月份的 40 倍(图 5),极大地补充了土壤水分,*SWDI* 值偏大;2015 年 9 月底 *SWDI* 由-8.6 陡增为-1.7,因河套灌区 9 月份降水量偏大,且 9 月底至 10 月底,灌区进入秋浇时期,灌溉水量增加,土壤水分随之增加。2016 年 *SWDI* 陡增阶段变为 10 月底,查询资料得知,2015 年 11 月 10 日秋浇工作已全部结束,而 2016 年 11 月 16 日秋浇才进入收官阶段,两年秋浇结束的时间点并完全不相同。除去降水和灌溉等不确定因素的影响,两年 *SWDI* 值在时间序列上较为接近,即干旱严重程度接近。此外,2016 年 6 月份 *SWDI* 由>0 骤减到<-5,即河套灌区由不干旱变为严重干旱,虽然 6 月存在较大月平均降雨量可以补充土壤水分,但是同时存在较高的月平均气温,并且潜在蒸散发达到整个生育期最大值(图 5)。

由图 4 可以看出,2015 年和 2016 年 4 月底、8 月初以及 9 月底的 *SWDI* 变化趋势较为接近,说明河套灌区在这 3 个时间段内的干旱状况较为稳定,比其他阶段更具有代表性。故选择 4 月下旬、8 月上旬以及 9 月下旬这 3 个时间段进行灌区干旱演变特征的空间分析,如图 6、图 7 和图 8 所示。

空间尺度上,总体来说,2015—2016 年 3 个时间段内灌区干旱严重程度没有明显增加。2015 年 4 月底和 8 月初灌区的干旱类型分布与 2016 年相似。4 月底干旱最严重区域由灌区西南部向东北方向移动,东南部干旱程度减弱,东北部均为中度干旱。8 月初,东北部和西南部地区为严重干旱,西北地区干旱程度加重,由中度干旱变为严重干旱。2015 年和 2016 年 9 月底 *SWDI* 最大值分别为-2.75 和-5.56,最小值分别为-9.29 和-10.2,说明 2016 年 9 月份干旱程度加剧。同时东南部地区 *SWDI* 减小,严重干旱区主要集中在灌区中部,干旱程度也有所加重,这可能是由于 2016 年 9 月份月平均降水量相较于 2015 年偏少,且当年秋浇时间推迟,除了灌溉途径,土壤水分没能得到天然补充。

3.2.2　*PDW* 时空分析　通过计算生育期内各栅格的 *PDW*,可以得到 2015 年和 2016 年 *PDW* 空间变化情况,如图 9 所示。2015—2016 年生育期内全灌区 *PDW* 由55.8%上升至 57.5%,意味着 2016 年较 2015 年干旱程度有所增加。两年内最西侧的栅格均为 *SWDI* 最低值所在栅格,可能是由于河套灌区西侧紧邻乌兰布和沙漠。*PDW* 较高的地区主要集中在灌区西南部、中部和东部,说明这些区域的干旱程度较为严重,应重视对该地区的干旱监测和预防,在作物生育期内需要及时灌溉,否则可能会影响作物生长。东北地区和西北地区 *PDW* 较小,中部地区的干旱程度基本上无变化。

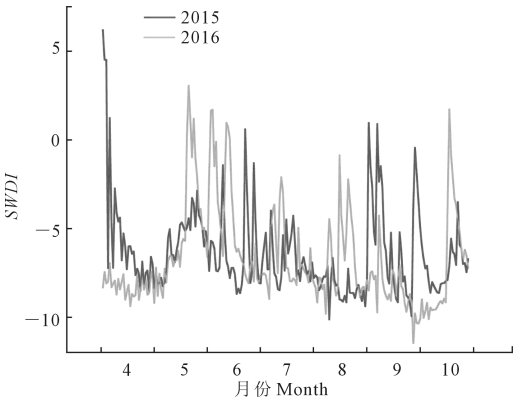

图 4　2015 年和 2016 年 *SWDI* 对比

Fig.4　Comparison of *SWDI* between 2015 and 2016

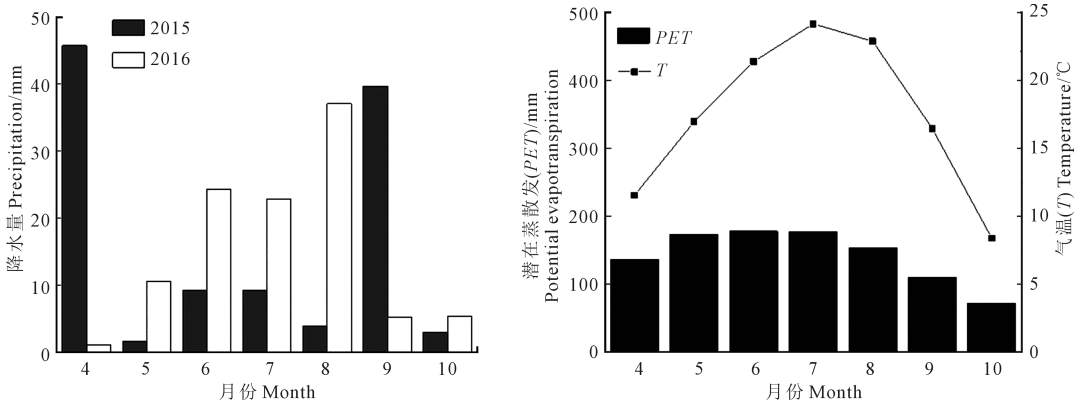

图 5　2015 年和 2016 年月平均降水、月平均气温和潜在蒸散发

Fig.5　Mean monthly precipitation, mean monthly temperature and potential evapotranspiration from April to December in 2015 and 2016

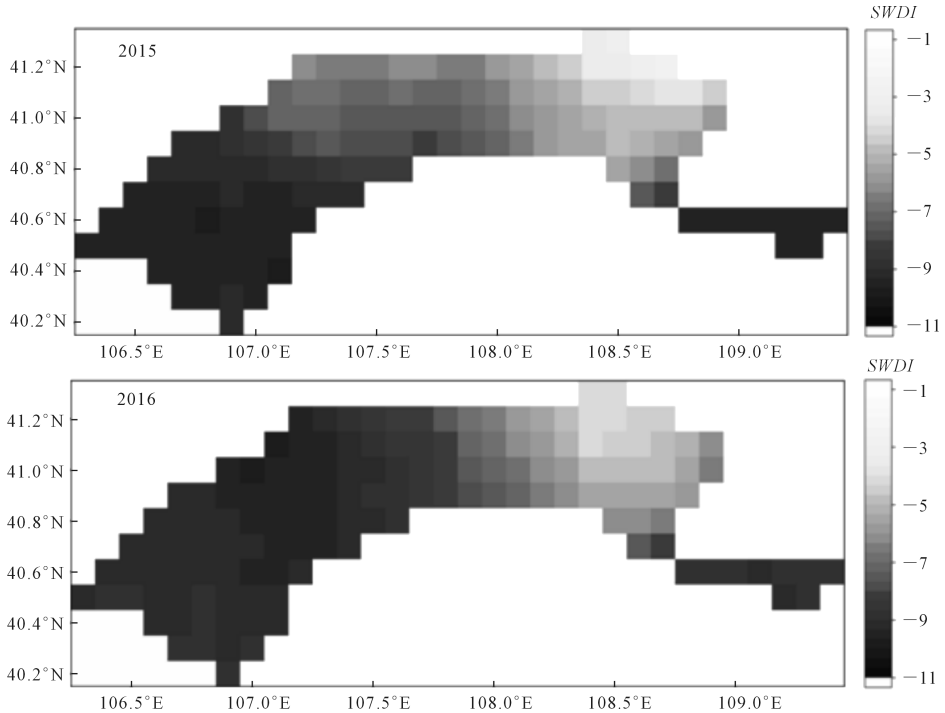

图 6 *SWDI* 在 4 月下旬的空间分布

Fig.6 Spatial distribution of *SWDI* in the late April

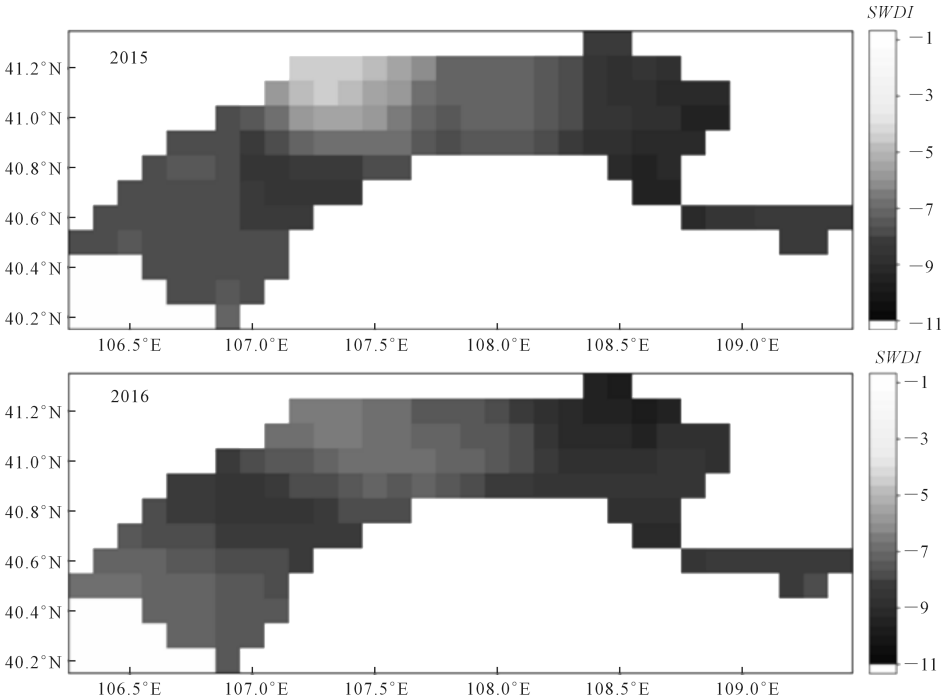

图 7 *SWDI* 在 8 月上旬的空间分布

Fig.7 Spatial distribution of *SWDI* in early August

PDW 可分为 4 类,如图 10 所示,当 $P \leqslant 25\%$时,即为干旱事件小于 8 周;当 $P \geqslant 75\%$时,即代表了超过 23 周的干旱事件。位于 50%~75%区间和 75%~100%区间的栅格比例越高,说明干旱事件的比例越高[31]。对河套灌区的 *PDW* 进行研究,发现 2015 年和 2016 年 *PDW* 位于 0~25%栅格的个数均只有一个。从图 10 中可以看出,4 个区间内的栅格百分比代表了两年不同的 *PDW* 值,大部分的 *PDW* 值在 50%~75%之间,并且两年中位于此区间的栅格总数相近,分别为 118 个和 119 个,此外位于其余 3 个区间内的栅格数较少,说明河套灌区农业干旱事件发生比例较高,持续时间较长,干旱程度较为严重。

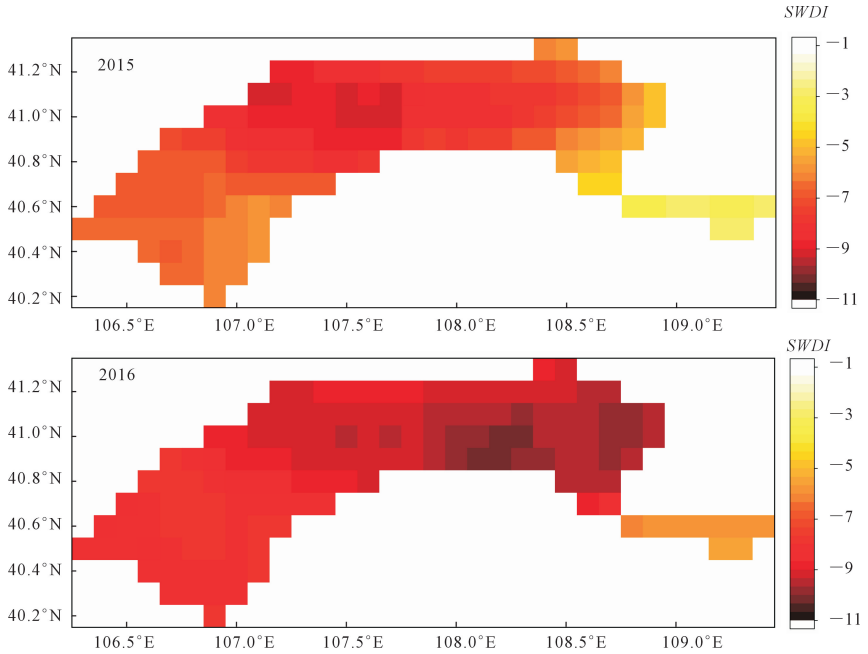

图 8　*SWDI* 在 9 月下旬的空间分布

Fig.8　Spatial distribution of *SWDI* during the end September

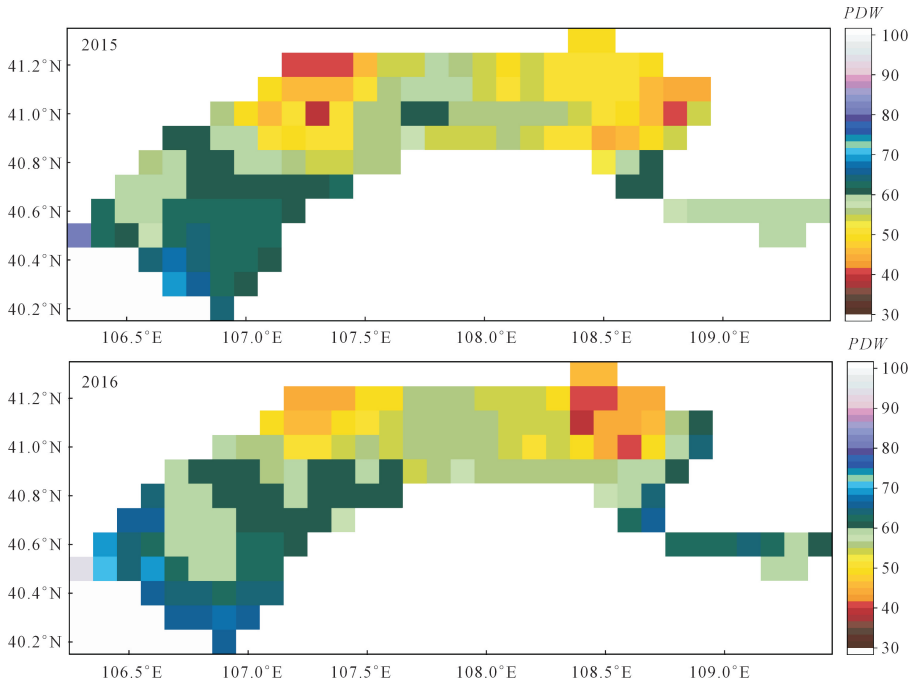

图 9　2015 年和 2016 年 *PDW* 空间分布

Fig.9　Spatial distribution of *PDW* (%) in 2015 and 2016

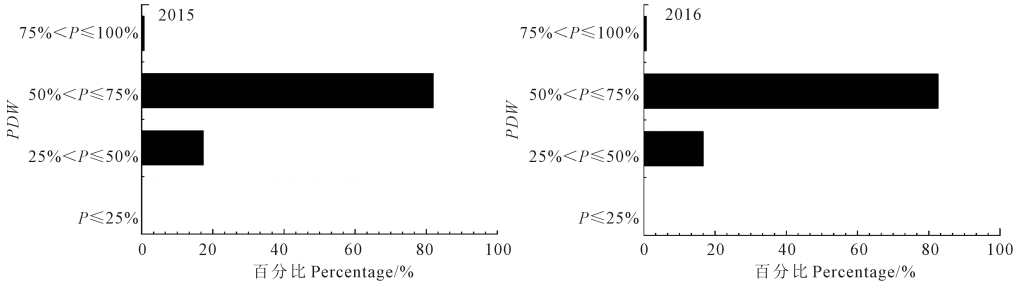

图 10　2015 年和 2016 年栅格尺度 *PDW* 占比

Fig.10　Percentage of grids in the four intervals of *PDW* in 2015 and 2016

为了更加详细地对比两年内 *PDW* 百分比,确定灌区的干旱演变趋势,将 50%~75%和 75%~100%这两个区间细分为如图 11 所示。2015 年区间 50%~60%栅格所占百分比最大;2016 年区间 60%~70%的栅格数有所增加,高于 2015 年此区间栅格数。这些结果表明,两年间干旱事件的持续时间增加,大部分 *PDW* 仍处于 50%~60%区间。

综上所述,2015—2016 年作物生育期内,河套灌区基本处于严重干旱状态,时间上,在蒸发量最大的 7 月份最为干旱,空间上,灌区西南部干旱程度最为严重;2016 年干旱级别高于 2015 年,且干旱事件持续时间有增长趋势。今后应重视灌区内部的干旱监测,为灌区制定合理的灌溉制度,亟需出台相应的用水制度。

3.3 *SWDI* 精度验证

虽然 SMAP 卫星所测数据的精度、时空分辨率相较于其他遥感数据较高,但其时间序列较短,难以进行长序列干旱时空演变特征分析。然而卫星观测数据的影响因素还包括其他方面,例如地形和云层。为了验证 *SWDI* 的可靠性,将其与气象干旱指数 *AWD* 进行比较。一方面,*AWD* 是一种基于气象数据、应用广泛的气象干旱指数;另一方面,*AWD* 是表征与土壤储水量相关干旱动态的合适指标[37]。河套灌区内部仅有一个国家级实测气象站点(临河站),难以代表全灌区的降水以及蒸散情况,选择 CMADS 降水、气温数据代替实测数据计算 *AWD*。

由图 12 及图 13 可以看出,时间上灌区 *AWD* 最大值出现在 2015 年 4 月初,这是由于当月降水量在两年里达到最大,同时蒸散发较小导致。两年内均在 5—8 月发生气象干旱,峰值的时间变化趋势和 *SWDI* 基本一致。此外,2015 年(-36.69)比 2016 年(-36.33)略微干旱,但灌区仍是湿润状态。空间上 2 a 平均气象干旱程度较低,灌区东部的乌梁素海区域 *AWD* 值最大,西南部和北部 *AWD* 最小,这和 *SWDI* 的空间分布相似,即灌区西南部农业干旱最严重。2 个指标之间存在差异的可能是因为 *SWDI* 是与土壤水分相关的农业干旱指标,*AWD* 是与降水、蒸散相关的气象干旱指标,两者在物理机制上考虑的影响因素不同,并且导致得到的结果不同。

为了从栅格尺度判断 *SWDI* 与 *AWD* 的相关性,选取与 SMAP 栅格对应的 CMADS 格点进行对比,对于每个格点,*AWD* 和 *SWDI* 的对应位置和相关系数分布如图 14 所示。可以看出,*AWD* 和 *SWDI* 之间的相关系数-0.05~0.53,均值为 0.26。因河套灌区降水、气温和土壤水分呈正态分布,因此选用双尾 Student *T* 检验对 *R* 进行显著性检验[38-39]。其中,共有 9 个格点通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验,还有 2 个通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,说明 *SWDI* 与 *AWD* 的相关性较为显著。可以看出,*SWDI* 和 *AWD* 的相关系数在五原县境内及县界周边格点较小,且没有通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,然而其余地区的相关性均较好(图 1、图 14)。这可能是因为五原县境内的地形条件不同于灌区内其他地区,县内存在着许多由长期的风蚀作用和黄河改道冲刷而成的天然壕沟和洼地。这些壕沟和洼地的高程低于五原县平均高程,在长年积水的环境下变成了大大小小的湖泊,俗称海子。经统计,水深大于 1.5 m 的海子共有 116 个,总面积达到 18.1 km^2;面积在 0.2 hm^2 以上的海子 171 个,占地 36.3 km^2。这些海子会对 SMAP 卫星探测精度产生影响。

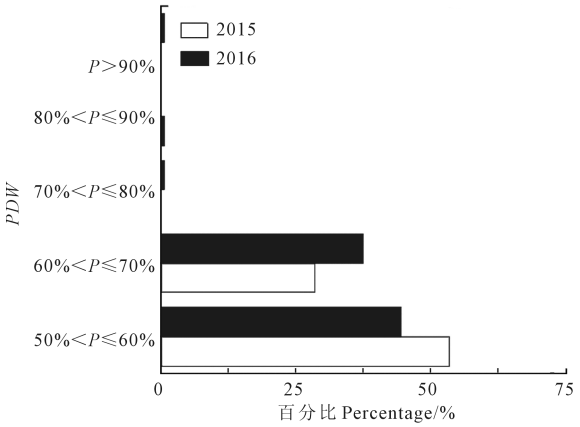

图 11 5 个区间内栅格尺度 *PDW* 对比

Fig.11 Comparison percentage of grids in the five intervals of *PDW*

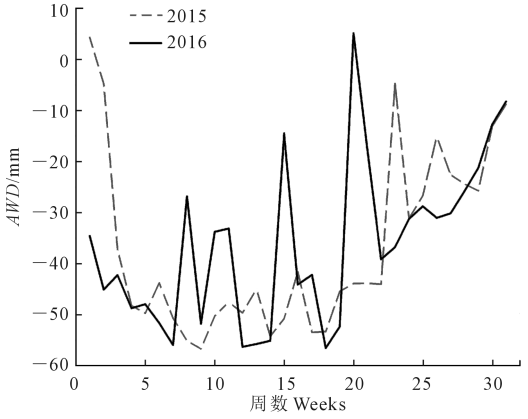

图 12 2015 年和 2016 年 *AWD* 变化趋势

Fig.12 Trends in weekly time series of *AWD* changes in 2015 and 2016

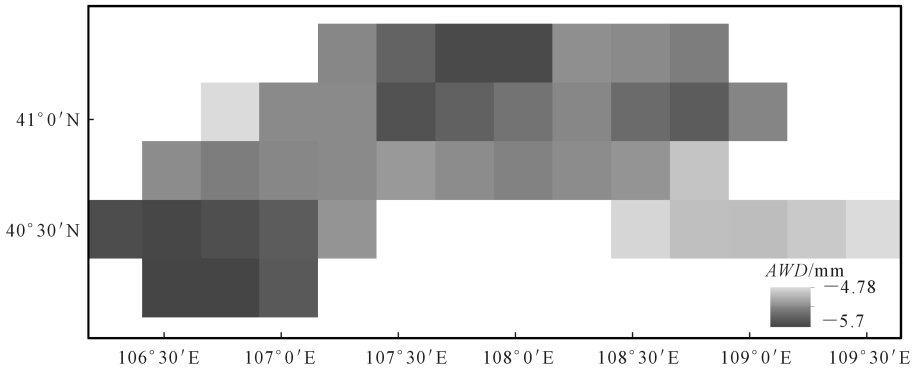

图 13　*AWD* 的空间分布

Fig.13　Spatial distribution of *AWD*

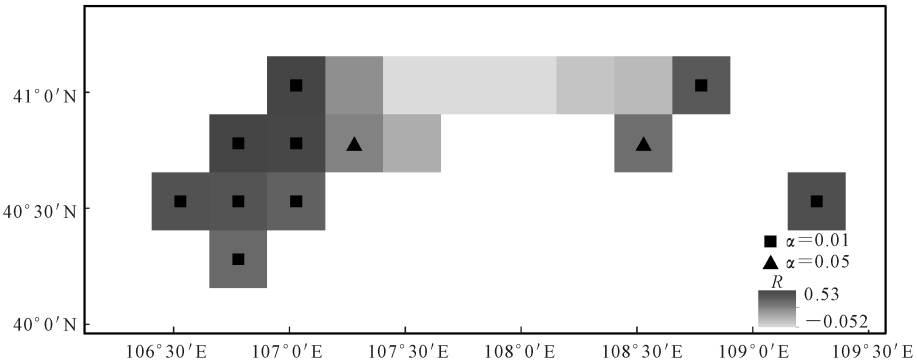

图 14　*SWDI* 和 *AWD* 的相关系数和显著性检验

Fig.14　Correlation coefficients and the significance test of *SWDI* and *AWD*

4　讨　论

农业干旱对作物产量影响巨大,不但对农业生产造成不利影响,而且还会威胁到粮食安全,准确判断农业干旱程度以及演变过程对控制干旱、提出合理的应对措施具有重要意义[48]。河套灌区作为我国 3 个特大型灌区之一,同时是我国重要的商品粮生产基地,近年来年均粮食总产量达 30 亿 kg 以上,作为主要作物的玉米产量达到约 10 亿 kg,成为国内举足轻重的玉米生产加工基地,因此灌区农业干旱系统评价对灌区农业可持续发展有着不可忽视的作用。由 Tsakiris 等[49] 提出的勘察干旱指数(Reconnaissance drought index,*RDI*)是评估气象干旱的普适性指标。由于它同时具备计算简便和高敏感度、高稳定性的特点,*RDI* 逐渐被用于评估干旱半干旱地区的农业干旱状况[50-53],其对应的干旱类别如表 2 所示。利用 CMADS 降水、气温数据计算出 *RDI* 并进行时空分析,以从农业干旱角度验证 *SWDI* 在河套灌区的精度。

表 2　不同干旱类型勘察干旱指数(*RDI*)

Table 2　*RDI* for different drought categories

干旱类别 Drought Category	*RDI*
无旱 No drought	>1
轻度干旱 Slightly dry	1~-1
中度干旱 Moderately dry	-1~-2
严重干旱 Severely dry	-2~-4
极端干旱 Extremely dry	-4~-5

由图 15 和图 16 可以看出,灌区在作物生育期内基本处于轻度干旱和中度干旱,结合图 4 可以看出,*RDI* 和 *SWDI* 的变化趋势相似,两者均在 4 月初和 9 月初显示为轻度干旱和不干旱状态,并且均在 5 月显示为严重干旱。同时 2015 年(*RDI* 为-1.04)灌区农业干旱程度略小于 2016 年(*RDI* 为-0.89),说明河套灌区在作物生育期内干旱状况较为严重,也再次证实了 *SWDI* 在河套灌区的精度较高。空间上,灌区西南部和北部最为干旱,这和 *SWDI* 的空间分布较为一致。与 *AWD* 类似,东部的乌梁素海处 *RDI* 值最低,不同的是 *RDI* 代表的农业干旱为轻度干旱,气象干旱则显示为不干旱状态,而 *SWDI* 代表的农业干旱在 3 个时间段内均为严重干旱。综合 3

个干旱指标,虽然灌区气象干旱状况较轻,然而农业干旱却较为严重,因此河套灌区内部灌溉、覆膜等农艺、农业抗旱措施对补充土壤水分、促进作物生长发育起着不可替代的作用。

5 结 论

本研究以作物生育期农业干旱为背景,选取黄河上游内蒙古河套灌区为典型研究区,基于多源遥感数据,开展了灌区 2015—2016 年农业干旱时空演变特征研究,旨在为灌区干旱预警与监测提供理论依据与科学指导,主要结论如下:

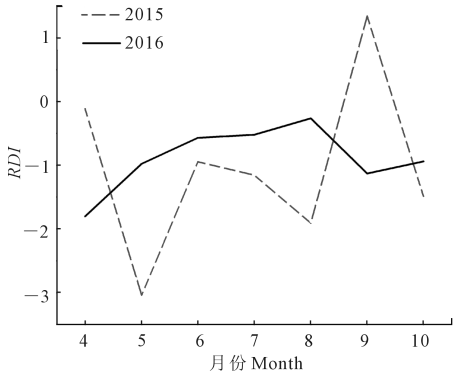

图 15 2015 年和 2016 年 *RDI* 变化趋势

Fig.15 Trends in monthly time series of *RDI* changes in 2015 and 2016

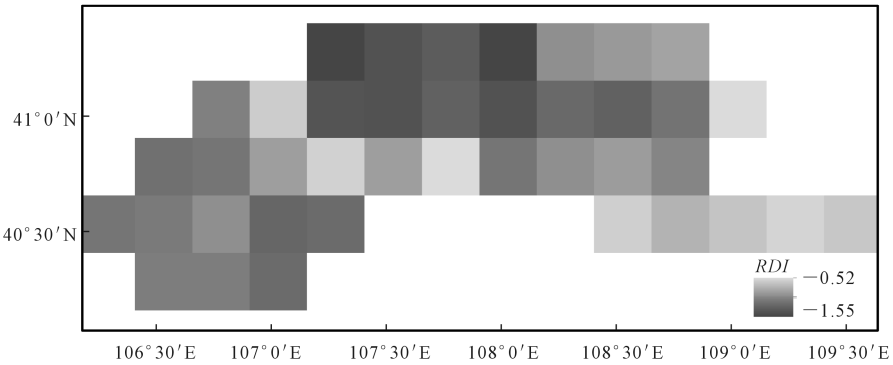

图 16 *RDI* 的空间分布

Fig.16 Spatial distribution of *RDI*

1)SMAP 在河套灌区的适用性较好。栅格尺度上,69%的栅格表现较好(R>0.5),只有 14%表现不佳(R<0.4);在区域尺度上,两套数据相关系数为 0.65。结果表明,SMAP 土壤水分与 CLDAS 土壤水分的时空变化特征一致性较好。

2)2015—2016 年 4 月下旬,农业干旱最严重区域由灌区西南部向东北方向移动,东南部干旱程度减弱;8 月初,西北地区干旱程度加重,由中度干旱变为严重干旱;9 月底灌区干旱程度有所加重,严重干旱区主要集中在灌区中部。在作物生育期内,河套灌区大部分地区都处于严重干旱状态,主要集中在灌区西南部、中部和东部,并且 2016 年农业干旱事件时间持续比 2015 年有所延长。

3)以 *AWD* 为代表的气象干旱在时间上显示为两年内灌区干旱月份为 5—8 月,在空间上则是全灌区基本不发生气象干旱。除去因地形原因的五原县境内以及县界附近的格点,*SWDI* 和 *AWD* 的相关性较显著,R 均值为 0.26,一半格点通过了显著性水平为 0.01 的检验,说明 *SWDI* 在河套灌区的精度能够接受,即基于 *SWDI* 对灌区进行干旱状况分析的可信度较高。

参 考 文 献:

[1] Dai A. Drought under global warming: a review[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews Climate Change, 2011, 2(1):45-65.

[2] Cook B I, Smerdon J E, Seager R, et al. Global warming and 21st century drying[J]. Climate Dynamics, 2014, 43(9):2607-2627.

[3] Wang L Y, Yuan X, Xie Z H, et al. Increasing flash droughts over China during the recent global warming hiatus[J]. Scientific Reports, 2016, 6:30571.

[4] 袁文平,周广胜. 干旱指标的理论分析与研究展望[J]. 地球科学进展, 2004, 6(19): 982-991.

[5] 刘宪锋,朱秀芳,潘耀忠,等. 农业干旱监测研究进展与展望[J]. 地理学报, 2015, 70(11): 1835-1848.

[6] 李文娟,覃志豪,林绿. 农业旱灾对国家粮食安全影响程度的定量分析[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(3): 111-118.

[7] Liu X F, Zhu X F, Pan Y Z, et al. Agricultural drought monitoring: progress, challenges, and prospects[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(6):750-767.

[8] 陈怀亮,张红卫,刘荣花,等. 中国农业干旱的监测、预警和灾损评估[J]. 科技导报, 2009,(11): 81-91.

[9] 姚玉璧,张存杰,邓振镛,等. 气象、农业干旱指标综述[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(1): 185-189, 211.

[10] 李忆平,李耀辉. 气象干旱指数在中国的适应性研究进展[J]. 干旱气象, 2017, 35(5): 709-723.

[11] 王劲松,郭江勇,周跃武,等. 干旱指标研究的进展与展望[J]. 干旱区地理, 2007, 30(1): 60-65.

[12] 张建兵,熊黑钢,李宝富,等. 干旱区农田土壤水分地温变化规律及其相互关系[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(02): 127-133.

[13] 魏童,谭军利,马中昇. 黄土高原地区水土保持措施对土壤水分影响研究综述[J]. 节水灌溉, 2018,(10): 97-99.
[14] 黄晚华,杨晓光,曲辉辉,等. 基于作物水分亏缺指数的春玉米季节性干旱时空特征分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 28-34.
[15] 刘志明,张柏,晏明,等. 土壤水分与干旱遥感研究的进展与趋势[J]. 地球科学进展, 2003, 18(4): 576-583.
[16] Martínez-Fernández J, González-Zamora A, Sánchez N, et al. A soil water based index as a suitable agricultural drought indicator[J]. Journal of Hydrology, 2015, 522:265-273.
[17] Bai J Y, Cui Q, Chen D Q, et al. Assessment of the SMAP-Derived Soil Water Deficit Index (SWDI-SMAP) as an agricultural drought index in China[J]. Remote Sensing, 2018, 10(8):1302.
[18] Baik J, Zohaib M, Kim U, et al. Agricultural drought assessment based on multiple soil moisture products[J]. Journal of Arid Environments, 2019, 167:43-55.
[19] Zhu Q, Luo Y L, Xu Y P, et al. Satellite soil moisture for agricultural drought monitoring: Assessment of SMAP-derived soil water deficit index in Xiang River Basin, China[J]. Remote Sensing. 2019, 11(3):362.
[20] Keshavarz M R, Vazifedoust M, Alizadeh A. Drought monitoring using a Soil Wetness Deficit Index (*SWDI*) derived from MODIS satellite data[J]. Agricultural Water Management, 2014, 132:37-45.
[21] Martínez-Fernández J, González-Zamora A, Sánchez N, et al. Satellite soil moisture for agricultural drought monitoring: Assessment of the SMOS derived Soil Water Deficit Index[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 177:277-286.
[22] Paredes-Trejo F, Barbosa H. Evaluation of the SMOS-derived soil water deficit index as agricultural drought index in Northeast of Brazil[J]. Water, 2017, 9(6):377.
[23] 邱扬,傅伯杰,王军,等. 土壤水分时空变异及其与环境因子的关系[J]. 生态学杂志. 2007,(1): 102-109.
[24] 闫峰,覃志豪,李茂松,等. 农业旱灾监测中土壤水分遥感反演研究进展[J]. 自然灾害学报, 2006,15(6): 118-125.
[25] 赵天杰. 被动微波反演土壤水分的 L 波段新发展及未来展望[J]. 地理科学进展, 2018, 37(2): 198-213.
[26] 王让会. 土壤水分遥感研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2012,(4): 61-65.
[27] Bindlish R, Crow W T, Jackson T J. Role of passive microwave remote sensing in improving flood forecasts[J]. IEEE Geoscience & Remote Sensing Letters, 2009, 6(1):112-116.
[28] Brocca L, Moramarco T, Dorigo W, et al. Assimilation of satellite soil moisture data into rainfall-runoff modeling for several catchments worldwide[C]//IEEE. International Geoscience & Remote Sensing Symposium-1GARSS. Melbourne, VIC. Australia: IEEE, 2013.
[29] Ebrahimi M, Alavipanah S K, Hamzeh S, et al. Exploiting the synergy between SMAP and SMOS to improve brightness temperature simulations and soil moisture retrievals in arid regions[J]. Journal of Hydrology, 2018, 557:740-752.
[30] Liu D, Mishra A K, Yu Z B, et al. Performance of SMAP, AMSR-E and LAI for weekly agricultural drought forecasting over continental United States[J]. Journal of Hydrology, 2017, 553:88-104.
[31] Mishra A, Vu T, Veettil A V, et al. Drought monitoring with soil moisture active passive (SMAP) measurements[J]. Journal of Hydrology, 2017, 552:620-632.
[32] 黄权中,徐旭,吕玲娇,等. 基于遥感反演河套灌区土壤盐分分布及对作物生长的影响[J]. 农业工程学报. 2018, 34(1): 102-109.
[33] 岳卫峰,杨金忠,童菊秀,等. 干旱地区灌区水盐运移及平衡分析[J]. 水利学报, 2008, 39(5): 623-626, 632.
[34] 李亮,史海滨,贾锦凤,等. 内蒙古河套灌区荒地水盐运移规律模拟[J]. 农业工程学报, 2010,26(1): 45-49.
[35] 管孝艳,王少丽,高占义,等. 盐渍化灌区土壤盐分的时空变异特征及其与地下水埋深的关系[J]. 生态学报,2012,32(4): 199-207.
[36] 侯琼,郭瑞清,杨丽桃. 内蒙古气候变化及其对主要农作物的影响[J]. 中国农业气象, 2009, 30(4): 560-564.
[37] 李虹雨,马龙,刘廷玺,等. 基于标准化降水指数的内蒙古地区干旱时空变化特征[J]. 水文, 2018, 38(5): 47-51, 90.
[38] 贺元甲. 内蒙古河套灌区水资源利用与管理研究[J]. 内蒙古水利, 2010,(3): 16-17.
[39] 刘美含,史海滨,李仙岳,等. 基于河套灌区间作种植优势概述[J]. 中国农村水利水电, 2016,(8): 63-66.
[40] 张璇,郝芳华,王晓,等. 河套灌区不同耕作方式下土壤磷素的流失评价[J]. 农业工程学报, 2011,27(6): 69-75.
[41] Shi C X, Xie Z H, Qian H, et al. China land soil moisture EnKF data assimilation based on satellite remote sensing data[J]. Science China, 2011, 54(9):1430-1440.
[42] 朱智,师春香. 中国气象局陆面同化系统和全球陆面同化系统对中国区域土壤湿度的模拟与评估[J]. 科学技术与工程, 2014,14(32): 138-144.
[43] 孟现勇. 基于改进的 CLDAS 驱动 CLM3.5 及 SWAT 模式的陆分量模拟及验证[D]. 乌鲁木齐:新疆大学, 2016.
[44] 孟现勇,吉晓楠,刘志辉,等. SWAT 模型融雪模块的改进与应用研究[J]. 自然资源学报, 2014, 29(3): 528-539.
[45] 孟现勇,师春香,刘时银,等. CMADS 数据集及其在流域水文模型中的驱动作用——以黑河流域为例[J]. 人民珠江, 2016, 37(7): 1-19.
[46] Tian Y, Zhang K J, Xu Y P, et al. Evaluation of potential evapotranspiration based on CMADS reanalysis dataset over China[J]. Water, 2018, 10(9):1126.
[47] Purcell L C, Sinclair T R, Mcnew R W. Drought avoidance assessment for summer annual crops using long-term weather data[J]. Agronomy Journal, 2003, 95(6):1566.
[48] Anderson M C, Zolin C A, Sentelhas P C, et al. The evaporative stress index as an indicator of agricultural drought in Brazil: An assessment based on crop yield impacts[J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 174:82-99.
[49] Tsakiris G, Tigkas D, Vangelis H, et al. Regional Drought identification and assessment. Case study in crete[C]//Methods and Tools for Drought Analysis and Management. Netherlands: Springer, 2007.
[50] Vicente-Serrano S M, Beguería S, Lorenzo-Lacruz J, et al. Performance of drought indices for ecological, agricultural, and hydrological applications[J]. Earth Interactions, 2012, 16(10):1-27.
[51] Tigkas D, Vangelis H, Tsakiris G. An Enhanced effective reconnaissance drought index for the characterisation of agricultural drought[J]. Environmental Processes, 2017, 4(Suppl.1):S137-S148.
[52] Chen T, Xia G, Liu T, et al. Assessment of drought impact on main cereal crops using a standardized precipitation evapotranspiration index in Liaoning Province, China[J]. Sustainability, 2016, 8(10):1069.
[53] Thomas T, Jaiswal R K, Galkate R V, et al. Reconnaissance drought index based evaluation of meteorological drought characteristics in bundelkhand[J]. Procedia Technology, 2016, 24:23-30.