

基于混合型线性双源遥感蒸散模型的 南疆绿洲地区干旱研究

高瑜莲¹,柳锦宝¹,柳维扬²,于 静^{1,3},刘志红¹

(1.成都信息工程大学,四川 成都 610225;2.塔里木大学植物科学学院,新疆 阿拉尔 843300;
3. 内蒙古自治区通辽市气象局,内蒙古 通辽市 028000)

摘 要:利用 MOD16 蒸散产品数据以及 2001—2014 年新疆气象站点数据,基于混合型线性双源遥感蒸散模型估算南疆绿洲地区地表蒸散,并对比验证 MOD16 蒸散产品、反演蒸散量与研究区气象站蒸发皿实测蒸发量之间的关系。定义了蒸散干旱指数 *EDI*,计算 *EDI* 距平,分析绿洲地区干旱分布特点,同时对降水距平来检验干旱监测的准确程度。结果表明:MOD16 蒸散产品蒸散量、模型估算蒸散量与蒸发皿实测蒸发量数据的相关性较好,说明利用 MOD16 蒸散产品数据估算蒸散量可行,也说明估算的蒸散量可信度高;由于绿洲地区北部水分供应更充足,*EDI* 值空间上由南至北呈减小趋势,*EDI* 值年际变化明显且均大于 0.6;*EDI* 距平与 *EDI* 同向变化,与降水距平反向变化;南疆绿洲地区在 2001、2007、2008、2009、2014 年的 *EDI* 值大于 0.66。因此,*EDI* 距平定义了干旱轻重程度界限:*EDI* 临界值为 0.66;*EDI* 值越大,*EDI* 距平越大,降水距平越小,干旱程度越严重。

关键词:干旱;混合型线性双源遥感蒸散模型;蒸散干旱指数(*EDI*);南疆绿洲地区
中图分类号:S16 **文献标志码:**A

Analysis of drought in the oasis of Southern Xinjiang based on the hybrid linear dual source remote sensing evapotranspiration model

GAO Yulian¹, LIU Jinbao¹, LIU Weiyang², YU Jing^{1,3}, LIU Zhihong¹

(1. Chengdu University of Information Technology, Chengdu, Sichuan 610225, China;
2. Institute of Plant Science and Technology, Tarim University, Alar, Xinjiang 843300, China;
3. Inner Mongolia Tongliao Meteorological Bureau, Tongliao, Inner Mongolia 028000, China)

Abstract: Evapotranspiration was estimated based on mixed linear dual source remote sensing model by using MODIS16 evapotranspiration product data and data of Xinjiang meteorological station from 2001–2014. This article compared the relationship between the MODIS16 evapotranspiration product data, the inversion evapotranspiration and the measured evaporation of the evaporating dish at the meteorological station in the study area. According to e-vapotranspiration, the evapotranspiration drought index (*EDI*) was defined, and the *EDI* anomaly was calculated to analyze the characteristics of drought distribution in the Oasis area. At the same time, the accuracy of drought monitoring was tested by comparing precipitation anomaly. The results showed that the evapotranspiration of MODIS16 products data and the evapotranspiration calculated by the model were highly correlated with measured evapotranspiration data, which indicated that it was feasible to estimate evapotranspiration by using MODIS16 evapotranspiration products data, and also revealed that the estimated evapotranspiration had high reliability. Moreover, as the water supply in the northern part of the Oasis was more abundant, the *EDI* value tended to decrease spatially from the south to north, and the inter-annual variation of *EDI* value was obvious and both were greater than 0.6. *EDI* anomalies changed in phase with *EDI*, and inversely changed with precipitation anomalies. In the Nanjiang Oasis area of

收稿日期:2018-10-15 修回日期:2019-10-07

基金项目:塔里木大学现代农业工程重点实验室开放课题(TDNG20150504);农业部农业信息技术重点实验室开放基金课题(2014002);
国家自然科学基金项目(41561068);兵团重大专项(2016jb03-3)

作者简介:高瑜莲(1995–),女,四川成都人,硕士研究生,研究方向为3S集成与气象应用研究。E-mail:gaoyuliana@163.com

通信作者:柳锦宝(1979–),男,副教授,硕士生导师,主要从事气象地理信息科学研究。E-mail:liujinbao1107@163.com

Xinjiang, the *EDI* value of the five years in 2001, 2007, 2008, 2009 and 2014 was greater than 0.66. Therefore, the *EDI* anomaly defined the dryness and severity limit *EDI* value of 0.66. Finally, the larger the *EDI* value was, the larger the *EDI* anomaly was, the *EDI* smaller the precipitation anomaly was and the more severe the drought was.

Keywords: drought; hybrid linear dual source remote sensing evapotranspiration model; evapotranspiration drought index (*EDI*); oasis area in Southern Xinjiang

在全球变暖的大背景下,近年来由于人类活动对气候变化的影响,一些极端气候事件在国内外相继发生并且灾害频率不断增加^[1-2]。气候变暖会对大气环流和水文过程产生影响,在一定程度上来说,气候变暖的大环境会使干旱加剧^[3]。干旱带来的影响巨大,它的持续时间长,覆盖范围广^[4-5]。因此,干旱监测和研究对气候变化以及防灾减灾都具有重要的现实意义。在干旱半干旱地区的干旱监测研究中,水分的蒸发蒸腾是水循环的重要途径,蒸散与降水共同决定地区干旱程度^[6]。充分认识蒸散的变化过程,对干旱监测等研究有十分重要的参考意义^[7]。干旱形成的原因十分复杂,影响干旱的因素众多,因此针对干旱的研究不仅需要考虑到降水量,还要充分考虑气温、蒸发、径流以及土壤湿度等因素^[8]。针对干旱发生的原因以及规律,许多学者们都进行了干旱研究。随着近年来遥感技术的不断发展,目前有许多干旱监测的方法基于卫星遥感信息来完成,例如基于植被指数的干旱监测指数、基于地表温度的干旱监测指数以及植被指数和地表温度相结合的干旱监测指数等^[9]。利用气象要素进行干旱监测的指数包括帕默尔干旱指数(Palmer Drought Severity Index, *PDSI*)、标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, *SPI*)、作物湿度指数(Crop Moisture Index, *CMI*)、地表供水指数(Surface Water Index, *SWSI*)、标准化降水蒸散指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, *SPEI*)等^[10-16]。其中 *Palme* 指数综合考虑了前期降水、水分供给、水分需求、实际蒸散量、潜在蒸散量等要素,以水分平衡为基础而建立了一个气象干旱指数(Palmer Drought Severity Index, *PDSI*),*PDSI* 指数现被广泛应用在干旱评估、旱情比较、旱情的时空分布特征等的分析中^[9,16]; *SPI* 计算较简单,它利用降水数据反映干旱强度以及持续时间,但是 *SPI* 没有考虑到温度、蒸散等其他因素的影响;*SPEI* 是既有 *PDSI* 对温度的敏感性,又有 *SPI* 多时间尺度以及计算简单的一种干旱监测方法,近年来在干旱研究中得到广泛应用^[17-18]。这些干旱指数主要都是基于降水对干旱进行的相关研究,而引起干旱的因

素是复杂多样的,经常是蒸发量和降水量等因素综合作用而造成的^[19]。近年来全球持续性增温,由于升温所导致的蒸发变化对地表干湿程度产生了很大影响^[1,20-21]。众多学者基于降水以及蒸散相关指数对地区的地表干湿程度进行了分析,研究表明蒸散量能够较好地反映土壤和植被的干旱状况^[22],是干旱指标中重要的水分支出项之一,因此,准确地测定和估算蒸散量是干旱指标能否精确反映干旱程度的关键^[23-24]。

由于在新疆南疆绿洲地区通过蒸散角度探索干旱进程的研究目前并不充分,本文在已有的混合型线性双源遥感模型基础上进行调整,加入植被因素的影响构建适用于南疆绿洲地区的混合型线性双源遥感蒸散模型,从地表蒸散变化的角度,利用 MODIS 蒸散产品数据和南疆地区 2001—2014 年气象站点月数据集等数据,估算近 14 a 新疆南疆绿洲地区的地表蒸散,构建蒸散干旱指数进行干旱监测,为新疆南疆绿洲地区的旱情监测提供参考依据。

1 研究区概况

新疆南疆作为典型的干旱地区之一,沙漠与绿洲共存,水资源极度短缺。绿洲是南疆地区人们居住活动的主要中心,在极端沙漠气候环境下,绿洲为人们的生活提供了各项需求保障^[25]。我国新疆绿洲主要分布在天山南北麓、昆仑山和祁连山北麓、柴达木盆地及河套平原,新疆是我国绿洲分布面积最大的地区。本文通过最新土地覆盖数据以及植被产品数据对南疆地区绿洲的范围进行筛选确定。

2 数据与研究方法

2.1 数据源

本研究中所使用的数据有:(1)中国地面累年值月值数据集,研究中主要利用了新疆南疆地区 2001—2014 年气象站点的月数据集,在本文中用到数据集中的平均气温、降水量、水汽压、蒸发量、最高气温及最低气温数据。(2)本研究采用 MODIS 产品数据,包括 MODI13 归一化植被指数 *NDVI* 产品

数据和 MOD16 蒸散产品数据,蒸散产品数据包含了潜在蒸散(PET)产品数据和实际蒸散(ET)产品数据。

2.2 构建混合型线性双源遥感蒸散模型

在模型的构建过程中,参考 Nishida 等^[26]利用卫星数据通过简单双源遥感蒸散模型估算蒸发量的思路,将地表认为是裸土和植被覆盖的混合物。本研究沿用 Nishida 等区分裸土和植被的思想,考虑 $NDVI$ 对蒸散的影响,利用植被覆盖度(f_v)把蒸散划分为地球表面裸土蒸发和植被蒸腾两部分,具体表达式如下:

$$f_v = \frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \tag{1}$$

$$ET = f_v ET_v + (1 - f_v) ET_s \tag{2}$$

其中, ET 表示总蒸散量, ET_v 表示植被蒸腾, ET_s 表示土壤蒸发, $NDVI_{max}$ 表示整个植被情况下的 $NDVI$,此时, $f_v = 1$; $NDVI_{min}$ 为整个裸土情况下的 $NDVI$,此时, $f_v = 0$ 。

为降低线性双源蒸散模型的复杂性,利用地表净辐射(R_n)和空气昼夜温差的倒数($1/(T_{max} - T_{min})$)来简化裸土的蒸散模型,空气昼夜温差的倒数可以用来表示土壤含水量,同时增加经验性系数 a_1 ,土壤蒸散模型具体公式如下:

$$ET_s = \frac{a_1 R_n}{T_{max} - T_{min}} \tag{3}$$

式中, a_1 是经验系数, R_n 为地表净辐射, T_{max} 和 T_{min} 分别为最高和最低空气温度。利用空气昼夜温差来代替地表昼夜温差,空气温度可以通过气象资料获得,而遥感反演的地表温度产品受云影响很难获取每日完整数据。

为了简化植被蒸散函数,在本研究中,认为地表净辐射(R_n)是植被蒸散的最主要控制因子,选择其他的重要参数包括空气温度(T)、空气昼夜温差的倒数($1/(T_{max} - T_{min})$),通过增加经验系数 a_2 和 a_3 获得简易植被蒸散方程:

$$ET_v = a_2 R_n T + \frac{a_3 R_n}{T_{max} - T_{min}} \tag{4}$$

为了获取整个植被和土壤的蒸散量,本研究增加 $a_0 R_n$ 作为整个蒸散的订正项,因为地表净辐射是蒸散的最主要控制因素。考虑方程(1)、(2)、(3)和(4),蒸散方程可以表达为:

$$ET = (1 - f_v) \frac{a_1 R_n}{T_{max} - T_{min}} + f_v \left(a_2 R_n T + \frac{a_3 R_n}{T_{max} - T_{min}} \right) + a_0 R_n \tag{5}$$

进一步考虑到 $NDVI$ 对蒸散的影响,因此利用 $NDVI$ 进行简化得到混合型线性双源遥感蒸散模型:

$$ET = R_n \left(b_0 + b_1 NDVI \times T + \frac{b_2 NDVI}{T_{max} - T_{min}} + \frac{b_3}{T_{max} - T_{min}} \right) \tag{6}$$

式中, ET 表示地表蒸散, R_n 表示地表净辐射, $NDVI$ 代表归一化植被指数, T_{max} 为最高空气温度, T_{min} 为最低空气温度, b_1 、 b_2 、 b_3 、 b_4 为回归系数。通过上述方法,能够反演计算研究区的实际蒸散量。

2.3 潜在蒸散模型

采用 Hargreaves 公式来进行新疆南疆绿洲地区潜在蒸散的估算,Hargreaves 公式只需要地理纬度、空气温度和空气温差 3 个参数来完成计算。Hargreaves 公式可以表达为:

$$PET = 0.0023 R_a (T_{mean} + 17.8) \sqrt{T_{max} - T_{min}} \tag{7}$$

式中, PET 表示地表潜在蒸散, T_{mean} 表示空气平均温度, T_{max} 表示空气最高温度, T_{min} 表示空气最低温度, R_a 表示太阳辐射。利用式(7)能够反演研究区的潜在蒸散量。

2.4 蒸散干旱指数

蒸散干旱指数(EDI)根据蒸散胁迫指数 ESI 的机理,得到蒸散干旱指数 EDI 的表达式,即

$$EDI = 1 - \frac{ET}{PET} \tag{8}$$

其中, ET 为实际蒸散, PET 为潜在蒸散。理论上 EDI 的值在 0 ~ 1 之间。地区干旱越严重,水分胁迫就越严重,对应潜在蒸散与实际蒸散的差值就越大,即 EDI 值越高。反之,土壤越湿润, EDI 值越低。

为了突出年、季、月的 EDI 指数与多年相应的平均值的差异,引入 EDI 距平指数,表示为:

$$\Delta EDI(j) = EDI(j) - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n EDI(j) \tag{9}$$

式中, j 为年份。

EDI 距平能够在一定程度上判断干旱轻重程度, EDI 距平值为正的年份干旱较严重,反之, EDI 距平值为负的年份干旱程度稍轻。

2.5 降水距平

利用实测降水数据,在南疆进行降水距平(ΔR)计算,利用历史平均水平作为基础来确定干旱程度^[27],能够有效地反映 EDI 在绿洲地区的干旱监测合理程度。

降水距平 ΔR 的计算公式:

$$\Delta R_i = R_i - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n R(j) \tag{10}$$

式中, i 为月份, j 为年份。

3 结果与分析

3.1 精度检验分析

本研究参考 Nishida^[26] 等利用卫星遥感数据估算蒸散量的思路,利用 MOD16 蒸散产品数据对新疆南疆绿洲地区的蒸散量进行估算。本研究首先验证 MOD16 蒸散产品数据在新疆南疆绿洲地区的适用性,检验 MOD16 蒸散产品数据与气象站蒸发皿实测蒸发量数据之间的相关程度,判定利用 MOD16 蒸散产品数据估算绿洲地区蒸散量的可行性。结果(图 1)表明,蒸发皿实测蒸发量数据与 MOD16 蒸散产品数据相关性较高,并且通过了 0.01 显著性检验,说明 MOD16 蒸散产品数据在南疆绿洲地区的适用性较好。

进一步验证反演蒸散量与蒸发皿实测蒸发量数据之间的相关性,结果(图 2)表明,气象站蒸发皿实测蒸发量数据与反演蒸散量相关性较高,检验结果通过 0.01 显著性检验。说明利用 MOD16 蒸散产品数据进行蒸散量的估算可信度较高。

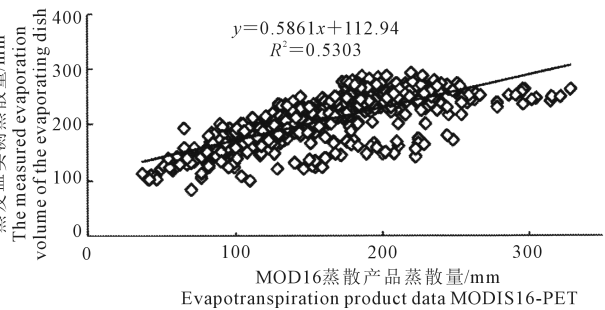


图 1 蒸发皿实测蒸散量与 MOD16 蒸散产品关系图
Fig.1 Correlation between the measured evaporation volume of the evaporating dish and the MOD16 evapotranspiration product

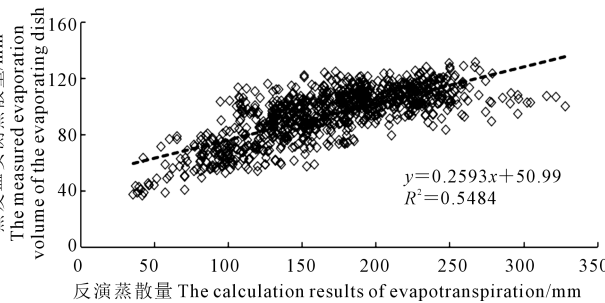


图 2 蒸发皿实测蒸散量与反演蒸散量关系图
Fig.2 Correlation between the measured evaporation volume of the evaporating dish and inversion evapotranspiration

观察图 1 和图 2 发现,蒸发皿实测蒸发量比 MOD16 蒸散产品数据和反演蒸散量都偏大。夜间不会产生蒸散量,但是由于日间残余热量在夜间持续影响蒸发皿,使蒸发皿实测的蒸散量偏大。因此,导致蒸发皿实测蒸发量与 MOD16 蒸散产品数据和反演蒸散量之间存在一定差异。

3.2 EDI 的年际、四季变化分析

南疆绿洲地区四季中 EDI 均值春季最高达 0.75,夏季其次 0.74,秋冬 EDI 依次降低,分别为 0.68 和 0.38。绿洲在南疆地区呈现环状分布,由图 3 可知,南部绿洲地区 EDI 值普遍高于北部。由于地域特征,北部的绿洲有积雪融水的供应,水分来源比南部的绿洲更充足,绿洲地区的 EDI 空间上呈现出明显的由南至北减小趋势。图 4 表明了 EDI 在新疆南疆绿洲地区的年际变化情况,能够看出 2001—2014 年间 EDI 值均在 0.6 以上,因此南疆绿洲地区干旱程度总体较严重。EDI 年均值变化情况与 EDI 距平变化一致,即南疆绿洲地区 EDI 值越高、EDI 距平正值越大的年份干旱越严重。通过 EDI 距平的计算来判断干旱的严重程度,新疆南疆绿洲地区在 2001、2007、2008、2009、2014 年 EDI 值较大,EDI 距平呈正值,说明在 2001—2014 年间干旱较严重。

3.3 新疆南疆绿洲地区干旱特点分析

多年 EDI 平均值能够反映研究时限内的平均干湿程度,但是想要反映出地区的干湿状况就需要进行 EDI 距平值的计算。本文分别针对新疆南疆绿洲地区的四季 EDI 进行了距平计算,使四季的干旱情况能够有更详细的展示。图 5A 反映出新疆南疆绿洲地区的春季干旱情况,2003 年和 2005 年的干旱较轻,其余 12 a 的春季干旱均较严重;图 5B 反映绿洲地区夏季在 2001、2002、2004、2006、2007、2008、2009 年干旱情况偏严重,其余 7 a 干旱较轻;在图 5C 中,南疆绿洲地区秋季在 2001、2002、2006、2007、2008、2013 年干旱严重;冬季的干旱情况可以从图 5D 反映出来,新疆南疆绿洲地区在 2001、2002、2007、2009、2011、2013、2014 年干旱情况较为严重。针对春、夏、秋、冬 4 个季节对绿洲地区进行距平计算,详细地反映出近 14 a 研究区四季干旱的情况。

本文基于混合型线性双源遥感蒸散模型在新疆南疆绿洲地区进行干旱监测,计算出南疆绿洲地区的 EDI,利用降水距平与 EDI 结果进行比较,旨在论述蒸散干旱指数在绿洲地区的适用程度^[28]。

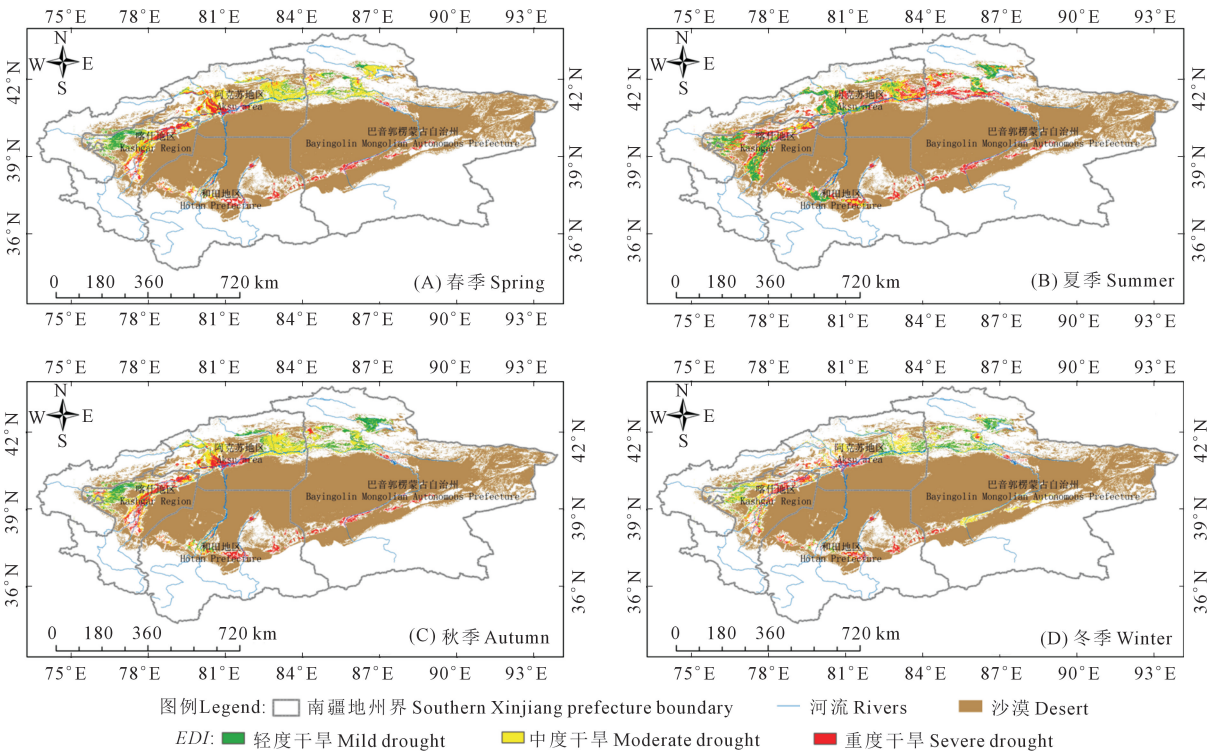


图3 EDI 四季空间变化图

Fig.3 Spatial change map of EDI in four seasons

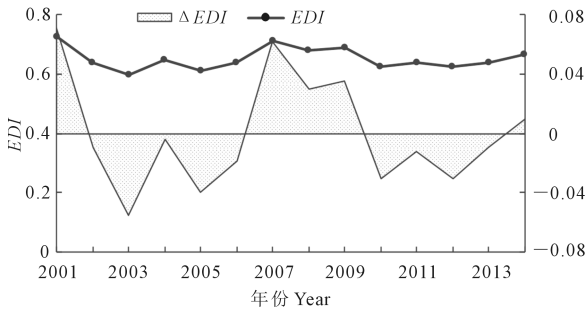


图4 EDI 与 EDI 距平 (ΔEDI) 变化

Fig.4 Diagram of EDI and EDI anomaly (ΔEDI) variation

从表1可以发现,近14 a 新疆南疆绿洲地区的 EDI 值全部都在0.6以上,说明在研究时段内绿洲地区整体干旱比较严重。其中2001、2007、2008、2009、2014年的 EDI 距平值均为正值,反映出这5 a 的干旱异常严重。将 EDI、EDI 距平值以及降水距平进行竖向对比,在干旱异常严重的5 a 中降水距平都为负值,EDI 与 EDI 距平均为正值。在新疆南疆绿洲地区 EDI 值越大,降水量越少,干旱情况越严重。

图6为年际降水距平值与年际 EDI 距平值对比图,可以发现降水距平值与 EDI 年际变化以及 EDI 距平值变化呈相反的趋势,反映出在实测降水量降低的情况下,降水距平值负值越小、EDI 距平正值越大则 EDI 值越大,地区干旱情况越严重。

4 讨论

1)定义干旱指数是干旱监测的基础,干旱指数的大小能够反映干旱轻重程度。本研究的结果表明,南疆绿洲地区的干旱轻重程度四季变化分明,春季干旱比夏季严重^[29],秋冬干旱严重程度递减。

2)从时间尺度来看,在2001、2007、2008、2009、2014年新疆南疆绿洲地区的干旱较为严重,其中 EDI 值最小为0.66。因此,本研究以0.66的 EDI 值作为界限,EDI 值小于0.66的年份干旱相对较轻,反之,EDI 值大于0.66的年份干旱较为严重。从空间尺度来看,南疆绿洲地区的土壤湿度南部低于北部,干旱严重程度南部高于北部^[30]。

3)降水距平值作为单因素指数,由于降水数据的不连续性,使得降水距平在月以上尺度才具有意义^[31]。由于单一距平不能准确地反映影响蒸散以及干旱的全面因素,将降水距平作为对照,对比验证 EDI 反映地区干旱情况的能力以及准确度。

4)利用混合型线性双源遥感蒸散模型估算新疆南疆绿洲地区地表蒸散,在估算地表蒸散的基础上,建立干旱指数进行干旱监测,展示出了利用遥感资料和地面资料简化进行大尺度干旱监测的能力^[32-33]。由于地表蒸散受多种气象、地理要素的综合影响,不同下垫面的蒸散能力不尽相同。因此,进一步估算不同下垫面的蒸散将是下一步研究的重点。

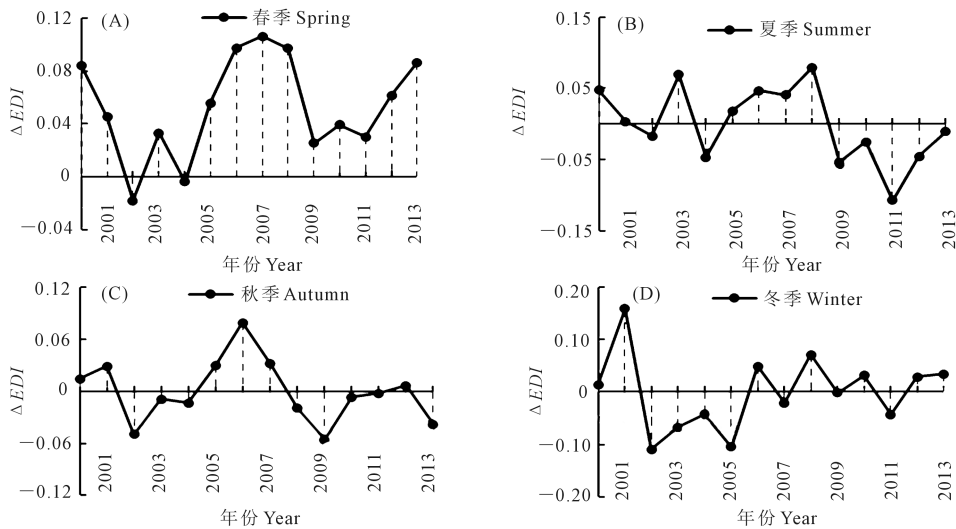


图 5 EDI 四季距平 (ΔEDI)
Fig.5 EDI four seasons anomaly (ΔEDI)

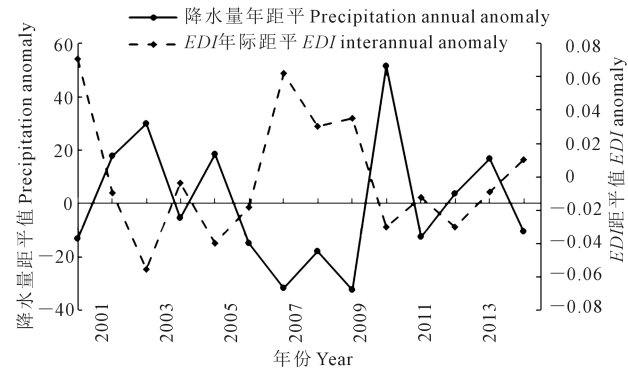


图 6 年际降水距平、年际 EDI 距平对比图

Fig.6 Comparison of interannual precipitation anomaly and interannual EDI anomaly

5 结 论

基于混合型线性双源遥感蒸散模型在新疆南疆绿洲地区进行蒸散计算进而实现干旱监测,通过 *EDI*、 ΔEDI 及降水距平在新疆南疆绿洲地区的对比应用,有如下结论:

(1)*EDI* 指数的空间分布特征呈现南高北低的总体趋势,北部的绿洲地区毗邻天山,不仅有来自河流的水分,还有来自天山的积雪冰山等融水,导致四季绿洲地区的干旱情况均比南部更为严重。

(2)通过计算 *EDI* 距平值,定义一个区分干旱轻重程度的临界值。*EDI* 大于 0.66 的年份干旱较为

表 1 2001—2014 年 *EDI*、*EDI* 距平值 (Δ*EDI*) 和降水距平值 (Δ*R*) 对比表

Table 1 Comparison of *EDI*, *EDI* anomaly (Δ*EDI*) and precipitation anomaly (Δ*R*)

项目 Item	年份 Year													
	2001 *	2002	2003	2004	2005	2006	2007 *	2008 *	2009 *	2010	2011	2012	2013	2014 *
<i>EDI</i>	0.73	0.64	0.60	0.65	0.61	0.64	0.71	0.68	0.69	0.62	0.64	0.62	0.64	0.66
Δ <i>EDI</i>	0.07	-0.01	-0.06	0.00	-0.04	-0.02	0.06	0.03	0.04	-0.03	-0.01	-0.03	-0.01	0.01
Δ <i>R</i>	-13.15	17.91	29.97	-5.53	18.54	-14.99	-31.65	-17.78	-32.39	51.57	-12.40	3.52	16.77	-10.40

注: * 标注年份为干旱严重年份
Note: The year marked by * is the year of severe drought.

严重,*EDI* 值小于 0.66 的年份干旱较轻。新疆南疆绿洲地区在 2001—2014 年间,在 2001、2007、2008、2009、2014 年的 *EDI* 值都大于 0.66,说明在这 5 a 绿洲地区的干旱情况较为严重。

(3)验证了气象站蒸发皿实测蒸发量数据与 MOD16 蒸散产品数据之间的相关性,结果通过 0.01 显著性检验;进一步验证蒸发皿实测蒸发量数据与反演蒸散量之间的关系,验证结果通过 0.01 显著性检验。说明 MOD16 蒸散产品数据在新疆南疆绿洲

地区具有较好的适用性,也表明了利用 MOD16 蒸散产品数据估算蒸散量具有较高合理性。

(4)混合型线性双源遥感模型在新疆南疆绿洲地区干旱监测的合理程度,通过降水距平进行了间接验证。降水距平的年际变化与年均 *EDI* 值变化和 *EDI* 距平值变化情况相反,即降水距平值为越小的负值时,*EDI* 值越大,*EDI* 距平值为越大的正值,干旱越严重。

参 考 文 献:

[1] 马柱国.我国北方干湿演变规律及其与区域增暖的可能联系[J].地球物理学报,2005,48(5):1011-1018.

[2] 普宗朝,张山清,王胜兰,等.近 36 年天山山区潜在蒸散量变化特征及其与南、北疆的比较[J].干旱区研究,2009,26(3):424-432.

[3] 尹鹤,吴绍洪,赵东升,等.1981—2010 年气候变化对青藏高原实际蒸散的影响[J].地理学报,2012,67(11):1471-1481.

[4] 董婷,孟令奎,张文.1961—2012 年我国干旱演变特征[J].干旱区研究,2018,35(1):96-106.

[5] 郭小芹,李广,罗永忠.甘肃省季节性干旱综合指数的特征[J].干旱地区农业研究,2018,36(4):282-288.

[6] 阿迪来·乌甫,玉素甫江·如素力,热伊莱·卡得尔,等.伊犁河谷蒸散量时空分布特征及变化趋势[J].地球信息科学学报,2018,20(2):217-227.

[7] 阿迪来·乌甫,玉素甫江·如素力,热伊莱·卡得尔,等.基于 MODIS 数据的新疆地表蒸散量时空分布及变化趋势分析[J].地理研究,2017,36(7):1245-1256.

[8] 刘英,岳辉,李遥,等.基于 MODIS 的河南省春旱遥感监测[J].干旱地区农业研究,2018,36(3):218-223.

[9] 尹文杰,张梦琳,胡立堂.柴达木盆地干旱时空变化特征[J].干旱区研究,2018,35(2):387-394.

[10] 邵小路,姚凤梅,张佳华,等.基于蒸散干旱指数的华北地区干旱研究[J].气象,2013,39(9):1154-1162.

[11] Lorenzo-Lacruz J, Vicente-Serrano S M, Lopez-Moreno J I, et al. The impact of droughts and water management on various hydrological systems in the headwaters of the Tagus River (central Spain) [J]. Journal of Hydrology, 2010, 386(1-4):13-26.

[12] Wang W, Zhu Y, Xu R G, et al. Drought severity change in China during 1961–2012 indicated by SPI and SPEI [J]. Natural Hazards, 2015, 75(3):2437-2451.

[13] 明博,陶洪斌,王璞.基于标准化降水蒸散指数研究干旱对北京地区作物产量的影响[J].中国农业大学学报,2013,18(5):28-36.

[14] 温国涛,白建军,孙嵩松.基于时间序列遥感数据的陕西省 2004—2014 年干旱变化特征分析[J].干旱地区农业研究,2018,36(1):221-229.

[15] 吴燕锋,巴特尔·巴克,罗那那.1961—2012 年北疆干旱时空变化[J].中国沙漠,2017,37(1):158-166.

[16] 卫捷,马柱国. Palmer 干旱指数、地表湿润指数与降水距平的比较[J]. 地理学报, 2003, 58(S1):117-124.

[17] 马明卫,宋松柏.渭河流域干旱指标空间分布研究[J].干旱区研究,2012,29(4):681-691.

[18] 徐一丹,任传友,马熙达,等.基于 SPI/SPEI 指数的东北地区多时间尺度干旱变化特征对比分析[J].干旱区研究,2017,34(6):1250-1262.

[19] 张菡,张喜亮,李金建,等.基于 SPEI 的四川省盆地区季节性干旱时空变化特征分析[J].干旱地区农业研究,2018,36(5):242-250,256.

[20] 曹雯,段春锋,申双和.1971—2010 年中国大陆潜在蒸散变化的年代际转折及其成因[J].生态学报,2015,(15):5085-5094.

[21] 刘冲,齐述华,汤林玲,等.植被恢复与气候变化影响下的鄱阳湖流域蒸散时空特征[J]. 地理研究,2016,35(12):2373-2383.

[22] 田静,苏红波,陈少辉,等.近 20 年来中国内地地表蒸散的时空变化[J]. 资源科学,2012,(7):1277-1286.

[23] 轩俊伟,郑江华,刘志辉.基于 SPEI 的新疆干旱时空变化特征[J].干旱区研究,2016,33(2):338-344.

[24] 吴桂平,刘元波,赵晓松,等.基于 MOD16 产品的鄱阳湖流域地表蒸散量时空分布特征[J]. 地理研究,2013,32(4):617-627.

[25] 宁娟,丁建丽,杨爱霞,等.基于高光谱与电磁感应技术的干旱区绿洲土壤含水量反演研究[J].干旱地区农业研究,2018,36(3):258-265.

[26] Nishida K, Nemani R R, Running S W, et al. An operational remote sensing algorithm of land surface evaporation [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2003, 108(9):469-474.

[27] 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,2004,19(6):982-991.

[28] 庄晓翠,杨森,赵正波,等.干旱指标及其在新疆阿勒泰地区干旱监测分析中的应用[J].灾害学,2010,25(3):81-85.

[29] 刘星含,张佳华,许晓宏. MODIS–TVDI 指数监测新疆干旱动态[J].遥感信息,2015,30(2):111-115.

[30] 何建村,白云岗,张严俊.基于 MODIS 数据新疆土壤干旱特征分析[J].干旱区地理,2015,38(4):735-742.

[31] 韩斌. ASCAT 土壤湿度数据在新疆干旱监测中的应用[J].沙漠与绿洲气象,2016,10(6):88-92.

[32] 郭晓寅,程国栋. 遥感技术应用于地表蒸散发的研究进展[J]. 地球科学进展,2004,19(1):107-114.

[33] 辛晓洲,田国良,柳钦火.地表蒸散定量遥感的研究进展[J].遥感学报,2003,7(3):233-240.