

基于MODIS16的新疆干湿气候时空变化及影响因素

宋佳, 徐长春, 杨媛媛, 张喜成, 李晓菲

(新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046)

摘要:为研究新疆地区的蒸散发及湿润指数分布与变化情况,采用新疆52个气象站点2000—2013年逐日地面观测资料和MODIS16产品数据,从蒸散发、湿润指数两个方面利用一元线性回归、倾斜率、变异系数、Hurst指数、湿润指数等方法,综合分析了新疆地区近14年干湿状况的变化特征。结果表明:(1)全疆年均蒸散发值空间分布大多处于40~830 mm,ET高值区大多分布在伊犁河谷及额尔齐斯河谷附近,全疆各站点ET平均值变化范围为178.29~214.87 mm,年均ET为197.49 mm,PET平均值变化范围为1 297.12~1 447.48 mm,年均PET为1 374.39 mm;(2)全疆ET倾斜率分布主要呈轻微减少趋势;(3)整体来看近14年新疆气候趋于湿润的变化趋势,各气象因子中,降水和相对湿度与湿润指数呈显著正相关,气温与湿润指数呈显著负相关。

关键词:MODIS16; 蒸散发; 湿润指数; 时空变化

中图分类号:P467

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)05-0210-05

Temporal and Spatial Variation Characteristics of Evapotranspiration and Dry-Wet Climate in Xinjiang Based on MODIS16

SONG Jia, XU Changchun, YANG Yuanyuan, ZHANG Xicheng, LI Xiaofei

(College of Resources & Environmental Science, Xinjiang University, Urumqi 830046)

Abstract: In order to study the distribution and change of evapotranspiration and wetting index in Xinjiang, we use daily ground observation data of 52 meteorological stations and MODIS16 product data in Xinjiang during the period 2000—2013. The characteristics of dry and wet conditions in Xinjiang were comprehensively analyzed by means of linear regression, tilt rate, coefficient of variation, Hurst index and wetting index from the aspects of evapotranspiration and wetting index. The results show that: (1) the spatial distribution of annual average evapotranspiration in Xinjiang is mainly between 40 mm and 830 mm; most of the ET high-value areas are located near the Ili Valley and the Irtysh Valley, and the average value of ET in the stations varies from 178.29 to 214.87 mm; the average annual ET is 197.49 mm, and the average value of PET varies from 1 297.12 to 1 447.48 mm, and the average annual PET is 1 374.39 mm; (2) the distribution of ET slope rate in Xinjiang has a slightly reducing trend; (3) overall, the climate in Xinjiang has tended to be wet in recent 14 years; among the meteorological factors, precipitation and relative humidity are significantly positively correlated with the wetting index, and the temperature is significantly negatively correlated with the wetting index.

Keywords: MODIS16; evapotranspiration; humid index; temporal and spatial variation

地表温度的升高会加强地表蒸散发,降低土壤保持水分的能力,根据水量平衡原理,地表蒸散发的增加将会带来降雨量的增加^[1]。全球变暖加之地域差异性带来降水在时空上的非均匀变化,必然使水资源危机频发,进而对农业生产、作物分布和生态环境等造成重大影响。普宗朝等^[2]认为在不同地区因地理位置、地形、海拔等差异,对干湿气候的分布有较大影响。新疆作为我国典型的干旱半干旱区,身居内陆、

地形复杂,降水分布极度不均,因而研究新疆地区湿润指数的分布情况具有重要意义。

湿润指数是基于大气降水和潜在蒸散量两个参数来表示地表水分的物理量^[3],反映了地表水汽输入与输出的动态盈亏状况^[4-5]。大气降水数据可由气象站获得,而潜在蒸散量数据往往是基于传统方法获取的蒸发皿实测数据,往往受到自然与人为等条件的限制,较难获取大区域蒸散的观测与估算,而遥感技术

收稿日期:2018-11-16

修回日期:2018-12-17

资助项目:国家自然科学基金“基于水资源变化的干旱内陆区典型流域绿洲适宜规模研究”(41561023)

第一作者:宋佳(1993—),女,新疆哈密人,硕士研究生,主要从事干旱区遥感气候模拟研究。E-mail:sj412726@163.com

通信作者:徐长春(1977—),女,新疆阿勒泰人,博士,副教授,主要从事干旱区气候、水文与水资源研究。E-mail:xcc0110@163.com

因其可以大面积、动态、快速的获取地表状况,近年来得到快速发展,使得大尺度非均匀陆面的蒸散发研究得到重大进展^[6-7]。如 Jung 等^[8]发布了基于全球的 1982—2008 年地表蒸散发数据集;EUMETSAT 推出了包括欧洲、非洲和南美洲东部的 LSA-SAF MSG ET 数据集^[9];美国蒙大拿大学研发了从 2000 年开始的全球 MODIS-ET 数据集^[10],MODIS-ET 数据集因其通过了通量观测塔的验证,并且时空分辨率较高,现已广泛应用于蒸散发的研究。Kim、贺添、Liu 等^[11-13]分别利用水文及气象数据验证了 MODIS-ET 产品在亚洲与中国的适用性,并取得了良好效果。

基于此,本文利用 MOD16 产品,结合全疆共 52 个气象站 2000—2013 年的地面观测资料,分析新疆地区蒸散发(ET)的时空变化特征,利用湿润指数对新疆地区干湿气候进行时空分析,并进一步筛选出影响干湿气候分区的主要气象因子,旨在为新疆地区“一带一路”战略中生态环境治理提供理论依据。

1 研究区概况

新疆位于中国西北边陲,地理位置介于 34°15′—48°10′N 与 73°20′—96°25′E 之间,总面积 166 万 km²,是中国面积最大的省级行政区,也是主要的干旱半干旱区^[2]。研究区以温带大陆性干旱气候为主,常年蒸降比大,且降水分布极为不均,日照充足、地表能量丰富。因

其特殊的地理位置、地形、气候等因素,境内植被覆盖率低,荒漠、戈壁、裸地分布广阔,生态系统脆弱。

2 数据资料与方法

2.1 数据来源与处理

(1) 气象数据:本文采用的气象数据来自国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/>),包括全疆境内共 52 个气象站点 2000—2013 年的降水量、气压、风速、气温、水汽压、相对湿度等日值气象要素。首先对数据进行严格筛选,其次针对个别缺测的气象值采用一元线性回归法计算得到,具体如下: y 为某一气象要素值, x 为对应的日序, n 为样本数量,拟合得到一元线性回归方程,

$$y = ax + b \quad (t = 1, 2, 3, \dots, n) \tag{1}$$

式中: a 为斜率; b 为常数,利用等比关系求未知函数其他值的近似计算方法。

(2) 遥感数据:本文选用的遥感数据为地表蒸散发月合成产品集(MOD16A2),该数据集包括:地表蒸散发(ET)及潜在蒸散发(PET),数据基本信息见表 1。首先借助 MRT 投影转换工具将原始的分级数据 HDF 格式转换为 GeoTiff 格式,将 SIN 投影转换为 WGS-1984/Geographic 经纬坐标系,对影像进行拼接;其次根据网站提供的数据说明,剔除无效值并还原真实值;最后对数据进行矢量裁剪并提取研究区各年、月实际蒸散发 ET 与潜在蒸散发 PET。

表 1 MOD16A2 遥感数据属性表

遥感数据产品	卫星轨道号	时间跨度	空间分辨率	时间分辨率	数据来源
MOD16A2	h23v04/h23v05	2000 年 1 月— 2013 年 12 月	1 km×1 km	月	美国蒙大拿大学官网 (http://www.ntsug.umt.edu/)
	h24v04/h24v05				
	h25v04/h25v05				

2.2 研究方法

2.2.1 折算系数法 折算系数是用来统一 E_{601} 型与 E_{20} 型蒸发器实测数据的一种计算方法^[14],能够将部分缺测的蒸散发数据根据二者之间的系数估算出来。 E_{601} 型与 E_{20} 型蒸发皿的 ET 的转换公式为:

$$a = E_{601} / E_{20} \tag{2}$$

式中: a 为蒸发折算系数; E_{601} 为 E—601 型蒸发器的蒸发量(mm); E_{20} 为 20 cm 口径蒸发皿的蒸发量(mm)。

2.2.2 年际 ET 倾斜率计算 根据一元线性回归分析,在 IDL 语言环境中以栅格为单元,计算出 2000—2013 年 ET 的年际变化趋势(S)^[15]。

$$S = \frac{n \sum_{j=1}^n j \times y_j - (\sum_{j=1}^n j) (\sum_{j=1}^n y_j)}{n \times \sum_{j=1}^n j^2 - (\sum_{j=1}^n j)^2} \tag{3}$$

式中: n 为年数; y_j 为第 j 年的 ET; S 为多年 ET 线性拟合概率; S 为正表明多年 ET 呈增加趋势,反之

减少。本文以 $S=0$ 为中心,将计算结果区间等比分为 5 类,分别为:严重减少、轻微减少、基本不变、轻微增加和明显增加。

2.2.3 变异系数法 变异系数是说明一组数据离散程度的统计量,可用于分析蒸散发的空间变异情况及分异规律^[16]。

$$CV_{ET} = \frac{\sigma_{ET}}{ET} \tag{4}$$

式中: CV_{ET} 指 ET 的变异系数; σ_{ET} 为像元的标准差; \overline{ET} 为所有像元的均值。首先对 2000—2013 年每一幅图像的每个像元计算变异系数,统计分析近 14 年 ET 的变化趋势及稳定性。 CV_{ET} 值越大,说明各年份之间数据越离散,时间序列数据波动越大;ET 变化越不稳定; CV_{ET} 值越小,说明各年份之间数据越集中;ET 变化越稳定。

2.2.4 Hurst 指数 Hurst 指数是基于重标极差分析

方法基础,用来判断某组时间序列数据是随机变化还是有方向变化的一种指标,能够揭示时间序列的分形特征,广泛应用于地理、经济等领域^[17]。考虑 ET 时间序列 $\{ET(t)\} (t=1,2,3,4,\dots,n)$, 其时间序列均值为:

$$\overline{ET}_{(\tau)} = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} ET_{(t)} \quad (\tau=1,2,\dots,n) \quad (5)$$

计算累积离差为:

$$X_{(t,\tau)} = \sum_{i=1}^t (ET_{(i)} - \overline{ET}_{(\tau)}) \quad (1 \leq t \leq \tau) \quad (6)$$

极差序列为:

$$R_{(\tau)} = \max_{1 \leq t \leq \tau} X_{(t,\tau)} - \min_{1 \leq t \leq \tau} X_{(t,\tau)} \quad (\tau=1,2,\dots,n) \quad (7)$$

标准差序列为:

$$S_{(\tau)} = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (ET_{(t)} - \overline{ET}_{(\tau)})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\tau=1,2,\dots,n) \quad (8)$$

计算 Hurst 指数:

$$\frac{R_{(\tau)}}{S_{(\tau)}} = (c\tau)^H \quad (9)$$

式中: c 为常数, 当 $R_{\tau}/S_{\tau} \propto \tau^H$ 时, 说明时间序列存在 Hurst 现象; Hurst 指数 (H) 能够揭示时间序列的分形特征。 $0.5 < H < 1$ 时, 表明未来变化趋势与过去一致, 且越接近 1, 持续性越强; $H = 0.5$ 时, 表明未来变化趋势是随机的, 无法预估; $0 < H < 0.5$ 时, 表明未来变化趋势与过去相反, 且越接近 0, 反持续性越强。

2.2.5 湿润指数 (K) 本文采用表征自然条件下的大气水汽输入的降水量 (R) 和潜在蒸散量 (PET) 来计算湿润指数^[18]:

$$K = R/PET \quad (10)$$

式中: R 和 PET 分别为月降水量和月潜在蒸散量 (mm/d)。结合文献^[19-20], 对新疆湿润指数进行分析, 其中湿润指数划分标准为: $K \leq 0.03$ 为极干旱区; $0.03 < K \leq 0.2$ 为干旱区; $0.2 < K \leq 0.5$ 为半干旱区; $0.5 < K \leq 1.0$ 为半湿润区^[3]。

3 结果与分析

3.1 MOD16A2 数据适用性检验

为了验证 MOD16A2 产品在新疆的适用性, 利用 2000—2013 年的 E_{20} 型蒸发器实测数据与 MOD16A2 产品反演的 PET 数据进行相关性分析。由于潜在蒸散发 PET 表示水分不受限制条件下的最大蒸散量, 而实测蒸发器数据也是基于此条件测得, 因此可以通过二者的相关性来验证 MOD-16 的适用性^[21]。

首先基于气象站提取 2000—2013 年 MOD16A2 气象站点潜在蒸散发, 筛选剔除无效站点, 利用有效站点

MOD16A2-PET 与对应气象站点蒸发器实测值作相关性, 通过对数据进行拟合, 发现二者相关系数 (R^2) 达到 0.865 4, 说明 MOD16 产品在新疆地区是适用的, 蒸发器实测蒸发量与 MOD16-PET 之间相关性较大, 且与阿迪莱^[21]、邓兴耀^[22]等人验证结果一致。

3.2 蒸散发空间特征分析

MOD16 产品能够反演 4 个指标包括: 蒸散发 (ET)、潜在蒸散发 (PET)、潜热通量 (LE) 及潜在潜热通量 (PLE)^[12], 由于蒸发器实测 ET 与 MOD16A2 反演的 PET 相关性较大, 说明 MOD16A2 产品反演的数据与实际值较为接近。因此, 为了解新疆 2000—2013 年蒸散发空间分布, 选取 MOD16A2 产品反演的 ET 数据进行分析, 由附图 1A 可知: 近 14 a 新疆年均蒸散量介于 40~830 mm 之间, 蒸散发高值区大多分布在伊犁河谷及额尔齐斯河谷附近, 此区域河流众多, 降水量大, 植被丰富, 因此蒸散量大; 低值区主要位于塔里木盆地边缘, 此区域分布着新疆两大沙漠—古尔班通古特沙漠和塔克拉玛干沙漠, 降水贫乏、植被盖度低, 因此蒸散发值也小。总体来看, 全疆蒸散发量在空间上呈现出北疆大于南疆、西部大于东部、山脉大于盆地的特征。

利用 CV 指数分析新疆 ET 的空间变异性 (附图 1B)。对 CV 指数进行分级, 可以看出, 全疆不同变异程度中, 变异系数 ≤ 0.05 的地区主要是额尔齐斯河谷和天山附近, 表明该区域近十四年 ET 值分布较为集中, 在全疆范围内时序最稳定; 变异系数在 0.05~0.10 的地区主要集中在北疆, 分布广泛, 表明北疆大部分地区 ET 值各年份之间分布较为集中, 时序较稳定; 变异系数在 0.10~0.15 的地区分布广泛, 主要分布在南疆大部分区域及天山山脉地区; 变异系数在 0.15~0.2 的地区主要分布在塔克拉玛干沙漠的南部及伊犁河谷, 表明南疆大部分地区 ET 值时间序列波动较大; 变异系数 > 0.2 的地区主要分布在昆仑山北坡, 表明该区域 ET 值各年份之间分布最不稳定, 时序波动最大; 北疆大部分区域、伊犁河谷, 南疆的塔里木河流域、喀什噶尔河流域均有高波动变化区域, 可能因为这些区域降水量变化较大、人口逐渐增多带来 NDVI 的波动^[23], 故而导致这些区域蒸散发出现波动较高的波动。

由 Hurst 指数法判断近十四年全疆 ET 在时间序列上的可持续性 (附图 1C), 可以看出 Hurst 指数 ≤ 0.5 的区域主要分布在北疆额尔齐斯河河谷, 表明北疆额尔齐斯河河谷周边区域未来的蒸散发量变化情况将与过去相反, 将会出现增加趋势; Hurst 指数 > 0.5 的区域分布广泛, 除额尔齐斯河河谷外, 全疆绝大部分区域蒸散发量在未来的变化情况将与过去

14 a 的变化趋势一样,且天山山脉附近持续性最强,说明天山山脉附近未来 ET 均呈减少趋势,昆仑山附近 ET 将继续呈增加趋势。

3.3 蒸散发时间特征分析

提取全疆各站点 ET 与 PET 年均值(表 2)可知:2000—2013 年全疆各站点 ET 主要在 197.49 mm 附近波

动,其中 2010 年 ET 波动最大,2000 年波动最小;2000—2013 年全疆各站点 PET 主要在 1 374.39 mm 附近波动,其中 2004 年波动最大,2008 年波动最小。整体来看,全疆 ET 年均变化不大,PET 呈波动上升变化。与附图 1A 比较可知,基于遥感影像的蒸散发空间分析,更加直观和清晰,基于站点的蒸散发存在一定的局限性。

表 2 2000—2013 年蒸散发变化特征分析

年份	ET					PET				
	最小值/	最大值/	均值/	标准差	变异 系数/%	最小值/	最大值/	均值/	标准差	变异 系数/%
	mm	mm	m			mm	mm	m		
2000	61.33	317.00	179.35	73.70	41.09	838.25	1993.75	1365.18	281.05	20.59
2001	63.33	388.67	191.58	85.20	44.47	912.75	1957.17	1380.09	275.00	19.93
2002	63.33	371.00	203.66	92.09	45.22	846.25	1957.08	1343.22	279.32	20.80
2003	85.67	410.92	215.35	88.68	41.17	821.25	1855.17	1297.12	259.30	19.99
2004	66.00	419.33	204.12	93.67	45.89	850.50	1949.67	1355.33	282.42	20.84
2005	76.08	426.83	207.84	93.68	45.07	807.25	1900.58	1330.81	270.31	20.31
2006	67.58	402.17	198.88	89.48	44.99	907.02	1981.75	1381.11	274.96	19.91
2007	60.58	397.17	188.88	81.48	43.14	807.54	1882.75	1421.13	264.98	18.98
2008	65.33	340.33	178.29	77.17	43.28	932.03	1927.83	1447.48	242.97	16.79
2009	67.58	370.17	185.62	86.80	46.76	840.17	1958.25	1404.35	286.18	20.38
2010	58.92	455.58	214.87	107.33	49.95	847.50	1969.83	1384.52	283.87	20.50
2011	64.67	365.92	194.99	87.40	44.82	850.83	1897.83	1371.16	263.69	19.23
2012	58.17	420.33	200.57	99.21	49.46	818.92	1922.08	1365.66	267.58	19.59
2013	61.75	372.92	200.93	87.02	43.30	954.83	1945.83	1394.36	267.80	19.21
均值	65.73	389.88	197.49	88.77	44.90	859.65	1935.68	1374.39	271.39	19.79

3.4 年际 ET 时空倾斜率分析

为了解近 14 a 新疆蒸散发空间变化情况,作年际 ET 倾斜率分布图(附图 2)。从图中可以看出全疆 ET 严重减少区域主要分布在天山中部及伊犁河谷附近;轻微减少区域主要分布在北疆的准噶尔盆地及其周边地区;ET 轻微增加区域主要分布在南疆;明显增加区域主要位于天山北麓的乌鲁木齐、昌吉、石河子一带,除此之外,博乐、塔城等地也明显增加。通过统计蒸散发变化面积(表 3),并计算各倾斜率面积与所有倾斜率面积之比可知:近 14 a 的 ET 倾斜率分布面积中,轻微减少趋势占比最多,达到 54.01%;明显增加趋势占比最小,为 1.53%。综合分析可以看出,全疆从 2000—2013 年整体蒸散发处于轻微减少趋势。

表 3 年际 ET 倾斜率变化面积

变化状况	严重减少	轻微减少	基本不变	轻微增加	明显增加
变化面积/km ²	131783	477071	171451	89495	13527
占比/%	14.92	54.01	19.41	10.13	1.53

3.5 湿润指数表征的干湿气候空间变化特征

根据 2000 年与 2013 年新疆湿润指数的分布,分别提取各气候区所占面积(表 4),结合附图 3—4 可以看出:2000 年极干旱区主要分布在莎车县,和田与哈密也零星分布着极干旱区,2013 年新疆极干旱区仅分布于哈密附近,极干旱区面积减少约 196 km²;2000 年干旱

区主要分布在温泉县及南疆地区,2013 年干旱区均主要分布在塔克拉玛干沙漠外缘,较 2000 年干旱区面积明显减少,减少约 1 037 km²;2000 年与 2013 年半干旱区均主要分布在天山南北麓及北疆地区,2013 年半干旱区面积比 2000 年增加约 938 km²;2000 年半湿润区主要分布在额尔齐斯河谷与巴音布鲁克附近且相对较为集中,而 2013 年新疆半湿润地区分布较为零散,呈零星状分布,其中南疆部分地区出现半湿润气候,整体半湿润面积增加 257 km²。全疆干旱、半干旱地区分界线主要是天山山脉,北疆主要为半湿润、半干旱区,南疆主要为干旱区,湿润指数为极干旱的区域主要位于东疆附近,以哈密为典型代表,主要原因是东天山横贯哈密中部,哈密气候干燥、降雨极少、热量丰富、光照充足、温差大,因此湿润指数极低^[24]。

从全疆范围来看,近 14 a 新疆整体极干旱区域呈降低趋势,其中南疆部分地区在 2000 年存在部分极干旱区,而 2013 年南疆均为干旱区与半干旱区,且从湿润指数年均值来看,南疆大部分地区为干旱区,可以看出此区域极干旱程度呈下降趋势,从面积变化情况来看,全疆极干旱区与干旱区面积均在减少,而半干旱区与半湿润区面积在增加,进一步说明全疆气候趋于湿润的变化趋势。

3.6 气象因子与湿润指数(K)的相关性分析

为了更加明确不同气象因子对 K 的作用,本文

探讨了各类气象因子与 K 的相关性。由表 5 可知,气温在 0.05 水平与 K 呈显著性相关($p<0.01$),相关系数为 -0.433 ,气温增高会加速水分的蒸发,进而导致气候变得干旱,温度升高导致蒸发量增大致使气候干燥。降水、相对湿度均与 K 在 $p<0.05$ 水平呈显著正相关,然而,风速、水汽压与 K 呈反向相关,且相关性不显著。普遍观点认为风速越大,会加快地表蒸散发量,气候就会越干旱,则湿润指数越小,张喆^[25]等人研究表明新疆气溶胶呈增长趋势,而南疆

主要是沙尘气溶胶,气溶胶的增加影响了风速,这些都进一步说明新疆地区风速与湿润指数成负相关很可能是因为空气中污染物的增加而引起的。

表 4 2000—2013 年各气候区面积变化 km²

干湿气候区	2000 年	2013 年	变化情况
极干旱区	284	86	—198
干旱区	3483	2446	—1037
半干旱区	8251	9189	+938
半湿润区	2688	2945	+257

表 5 湿润指数与气象因子相关性分析

参数	K	降水量	气压	风速	气温	水汽压	相对湿度
K	1						
降水量	0.374 *	1					
气压	0.072	—0.028	1				
风速	—0.083	—0.059	—0.039	1			
气温	—0.433 **	—0.111	0.410 *	0.132	1		
水汽压	—0.210	0.134	0.537 **	0.174	0.491 **	1	
相对湿度	0.373 *	0.233	—0.069	—0.093	—0.456 **	—0.263	1

注: * 在 0.05 水平(双侧)上显著相关, ** 在 0.01 水平(双侧)上显著相关($n=52$)。

4 结论

(1) 2000—2013 年新疆蒸散发年均值空间分布大多处于 40~830 mm,蒸散发量高值区大多分布在伊犁河谷及额尔齐斯河谷附近;时序波动由弱到强可大致分布为:阿尔泰山<北疆<天山山脉<南疆<昆仑山脉;Hurst 指数说明额尔齐斯河谷附近将呈增加趋势,除此之外全疆绝大部分区域蒸散发量在未来的变化情况将与以往趋势一样,天山山脉持续减少,昆仑山脉将持续增加。2000—2013 年全疆 ET 均值变化范围为 178.29~214.87 mm,年均 ET 为 196.49 mm,PET 均值变化范围为 1 297.12~1 447.48 mm,年均 PET 为 1 374.39 mm。

(2) 2000—2013 年,全疆 ET 在空间上主要呈轻微减少趋势,且轻微减少区域面积占比为 54.01%,严重减少区域占比 19.42%,基本不变区域占比 19.41%,轻微增加区域占比 10.13%,明显增加区域占比 1.53%。

(3) 从湿润指数来看,全疆干旱、半干旱地区分界线主要是天山山脉,北疆主要为半湿润、半干旱区,南疆主要为干旱区,14 a 全疆极干旱区面积减少 198 km²,干旱区面积减少 1 037 km²,半干旱区增加 938 km²,半湿润区增加 257 km²,新疆气候趋于湿润的变化趋势;其次各气象要素中,降水、相对湿度与湿润指数为显著正相关,气温与湿润指数为显著负相关。

参考文献:

[1] Wentz F J, Ricciardulli L, Hilburn K, et al. How Much More Rain Will Global Warming Bring[J]. Science, 2007, 317(5835):233-235.

[2] 普宗朝,张山清,王胜兰,等.近 48a 新疆干湿气候时空

变化特征[J].中国沙漠,2011,31(6):1563-1572.

[3] 胡琦,董蓓,潘学标,等.1961—2014 年中国干湿气候时空变化特征及成因分析[J].农业工程学报,2017(6):131-139.

[4] 张丕远,王铮,刘啸雷,等.中国近 2000 年来气候演变的阶段性[J].中国科学,1994(9):998-1008.

[5] 马柱国,邵丽娟.中国北方近百年干湿变化与太平洋年代际振荡的关系[J].大气科学,2006,30(3):464-474.

[6] 宋鑫博.基于 MODIS 数据的湖西区地表蒸散发遥感估算[D].南京:南京师范大学,2013.

[7] 周剑,程国栋,李新,等.应用遥感技术反演流域尺度的蒸散发[J].水利学报,2009,40(6):679-687.

[8] Jung M, Reichstein M, Ciais P, et al. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply[J]. Nature, 2010,467(7318):951-954.

[9] Ghilain N, Arboleda A, Gellensmeulenberghs F. Evapotranspiration modelling at large scale using near-real time MSG SEVIRI derived data[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2011,15(3):771-786.

[10] Mu Q, Heinsch F A, Zhao M, et al. Development of a global evapotranspiration algorithm based on MODIS and global meteorology data[J]. Remote Sensing of Environment, 2007,111(4):519-536.

[11] Kim H W, Hwang K, Mu Q, et al. Validation of MODIS 16 global terrestrial evapotranspiration products in various climates and land cover types in Asia[J]. Ksce Journal of Civil Engineering, 2012,16(2):229-238.

[12] 贺添,邵全琴.基于 MOD16 产品的我国 2001—2010 年蒸散发时空格局变化分析[J].地球信息科学学报,2014,16(6):979-988.

3 结 论

本研究基于贵州省 1961—2015 年 81 个气象观测站逐日气象资料,采用美国农业部土壤保持局推荐的有效降水量和 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式,分析了贵州烤烟不同生育阶段的有效降水量、需水量和灌溉需求指数变化特征,结果表明:近 55 a,贵州省烤烟伸根期、旺长期、成熟期和大田生育期有效降水量分别为 26.9~75.4 mm,45.2~88.9 mm,66.4~167.6 mm,152.8~284.8 mm;需水量分别为 51.9~78.8 mm,148.8~202.2 mm,85.2~122.8 mm 和 332.5~412.6 mm,以旺长期日均需水量最大;平均灌溉需求指数分别为 0.20,0.32,0.26,0.35,有效降雨量无法满足烤烟需求;烤烟不同生育阶段有效降水量和需水量随时间变化均呈递减趋势,伸根期灌溉需求指数呈递增变化趋势,其他生育期呈递减趋势;空间分布上,伸根期、旺长期灌溉需求指数自西南向东北递减的变化趋势,而成熟期和大田期呈相反趋势。

参考文献:

[1] 郑东方,许嘉阳,卢秀萍,等.云南省烤烟需水量及灌溉需求指数的时空特征[J].应用生态学报,2015,26(7): 2091-2098.

[2] 曹永强,李维佳,赵博雅.气候变化下辽西北春玉米生育期需水量研究[J].资源科学,2018,40(1):150-160.

[3] 邱美娟,郭春明,王冬妮,等.1960—2015 年吉林省玉米生长季有效降水和水分亏缺指数的变化特征[J].干旱地区农业研究,2018,36(1):237-243.

[13] Liu S M, Xu Z W, Zhu Z L, et al. Measurements of evapotranspiration from eddy-covariance systems and large aperture scintillometers in the Hai River Basin, China[J]. Journal of Hydrology, 2013,487(9):24-38.

[14] 段春锋,缪启龙,曹雯,等.西北地区小型蒸发皿资料估算参考作物蒸散[J].农业工程学报,2012,28(4):94-99.

[15] 何宝忠,丁建丽,张喆,等.新疆植被覆盖度趋势演变试验性分析[J].地理学报,2016,71(11):1948-1966.

[16] Milich L, Weiss E. GAC NDVI interannual coefficient of variation (CoV) images: Ground truth sampling of the Sahel along north-south transects[J]. International Journal of Remote Sensing, 2000,21(2):235-260.

[17] Jiapaer G, Liang S, Yi Q, et al. Vegetation dynamics and responses to recent climate change in Xinjiang using leaf area index as an indicator[J]. Ecological Indicators, 2015,58:64-76.

[18] 申双和,张方敏,盛琼.1975—2004 年中国湿润指数时

[4] 郭晓丽,陈素华.内蒙古中部地区春玉米水分亏缺时空特征[J].干旱气象,2018,36(2):295-300.

[5] 庞艳梅,陈超,潘学标.1961—2010 年四川盆地玉米有效降水和需水量的变化特征[J].农业工程学报,2015,31(S):133-141.

[6] 环海军,杨再强,刘岩,等.鲁中地区冬小麦水分盈亏及灌溉需水量的时空变化特征[J].干旱气象,2016,34(5): 866-872.

[7] 陈超,庞艳梅,潘学标.气候变化背景下四川省单季稻水分盈亏的变化特征[J].自然资源学报,2014,29(9): 1508-1519.

[8] 段淑辉,杨亿军,刘建利,等.烟草需水规律研究进展[J].中国烟草科学,2012(4):99-105.

[9] 高晓丽,徐俊增,杨士红,等.贵州地区主要作物需水规律与作物系数的研究[J].中国农村水利水电,2015(1):11-14.

[10] 冷璐,陆引罡.贵州开阳烟区烤烟需水特征与烟田土壤水分变化研究[J].湖南农业科学,2014(14):7-11.

[11] 陈佳勃.喀斯特山区优质烟生产的水分需求特征研究[D].贵阳:贵州大学,2006.

[12] 朱大运,熊康宁,董晓超.贵州 1960—2016 年气温时空变化特征[J].水土保持研究,2018,25(4):168-173,180.

[13] 严小冬,孙翔,杨春艳,等.贵州近 50 a 来夏季不同等级强降水事件特征研究[J].贵州气象,2018,42(2):1-6.

[14] 莫建国,唐远驹,汪圣洪,等.贵州烤烟大田期可用日数与利用分析[J].中国烟草科学,2012,33(1):37-42.

[15] Doll P, Siebert S. Global modeling of irrigation water requirements[J]. Water Resources Research, 2002,38(4):1-8.

[16] 胡玮,严昌荣,李迎春,等.气候变化对华北冬小麦生育期和灌溉需水量的影响[J].生态学报,2014,34(9): 2367-2377.

空变化特征[J].农业工程学报,2009,25(1):11-15.

[19] 王菱,谢贤群,李运生,等.中国北方地区 40 年来湿润指数和气候干湿带界线的变化[J].地理研究,2004,23(1):45-54.

[20] 刘波,马柱国.过去 45 年中国干湿气候区域变化特征[J].干旱区地理,2007,30(1):7-15.

[21] 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(7):47-58.

[22] 邓兴耀,刘洋,刘志辉,等.中国西北干旱区蒸散发时空动态特征[J].生态学报,2017,37(9):2994-3008.

[23] 郭锐,朱燕君,王介民,等.近 22 年来西北不同类型植被 NDVI 变化与气候因子的关系[J].植物生态学报, 2008,32(2):319-327.

[24] 张山清,普宗朝,韩勇,等.近 47 年哈密地区气候变化[J].气象科技,2009,37(5):560-566.

[25] 张喆,丁建丽,王瑾杰,等.新疆干旱区气溶胶间接效应区域性分析[J].中国环境科学,2016,36(12):3521-3530.