

西北干旱区 1960—2019 年实际蒸散发时空变化特征

刘 洋^{1,2}, 于恩涛^{3,4}, 杨建军^{1,2}, 黄文君^{1,2}

(1.新疆大学 资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046; 2.新疆大学

教育部绿洲生态重点实验室, 乌鲁木齐 830046; 3.中国科学院 大气物理研究所

竺可桢—南森国际研究中心, 北京 100029; 4.南京信息工程大学 气象灾害预报与评估协同创新中心, 南京 210044)

摘 要:为了分析气候变化背景下西北干旱区实际蒸散发的时空变化特征及影响因素,利用西北干旱区 50 个气象站点,1960—2019 年的气象观测资料,采用 Granger-Gray 模型(GG 模型)估算研究区的实际蒸散发,分析其空间分布特征和时间变化趋势,并探讨了气象因子对实际蒸散发的影响。结果表明:(1) 1960—2019 年西北干旱区年平均实际蒸散发约为 586.9 mm,夏季大而冬季小,研究区西南部和东部的 ET_a 较高,西北部和中部较低。(2) 60 a 来西北干旱区实际蒸散发呈微弱的上升趋势,其变化速率为 0.24 mm/10 a; ET_a 在春季和冬季呈增加趋势,在夏季和秋季则呈下降趋势。(3) ET_a 与气温、相对湿度、日照时数呈正相关关系,与风速呈负相关关系,气温、相对湿度、日照时数和风速均对实际蒸散发有影响。总体来说,西北干旱区实际蒸散发在 1960—2019 年间呈增加趋势,其变化主要受气温、相对湿度和风速的影响。

关键词:实际蒸散发; Granger-Gray 模型(GG 模型); 西北干旱区; 时空变化

中图分类号:P426.2; S161.4

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)06-0075-06

Characteristics of Spatial and Temporal Variation of Actual Evapotranspiration in the Arid Region of Northwest China from 1960 to 2019

LIU Yang^{1,2}, YU Entao^{3,4}, YANG Jianjun^{1,2}, HUANG Wenjun^{1,2}

(1.College of Resources and Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2.Key Laboratory of Oasis Ecology of Education Ministry, Xinjiang University, Urumqi 830046,

China; 3.Nansen-Zhu International Research Center, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy
of Sciences, Beijing 100029, China; 4.Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of

Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In order to analyze the characteristics of temporal and spatial variation and influencing factors of actual evapotranspiration in the arid region of northwest China under the background of climate change. The Granger-Gray model (GG model) was used to estimate the actual evapotranspiration in the study area based on the meteorological observation data from 50 meteorological stations in the arid region of northwest China during 1960—2019. The spatial distribution characteristics and temporal variation trend of the actual evapotranspiration were analyzed, and the influence of meteorological factors on the actual evapotranspiration was also discussed. The results showed that: (1) from 1960 to 2019, the average annual actual evapotranspiration (ET_a) in the arid region of northwest China was about 586.9 mm, which was greater in summer and smaller in winter; ET_a was higher in the southwest and east of the study area, but lower in the northwest and central part; (2) In the past 60 years, ET_a in the arid region of northwest China showed a slight increasing trend, with a change rate of 0.24 mm/decade; ET_a increased in spring and winter but decreased in summer and autumn; (3) ET_a was positively correlated with air temperature, relative humidity and sunshine hours, and negatively correlated with wind speed. ET_a in the arid region of northwest China was mainly affected by temperature, relative humidity, sunshine duration and wind speed. In general, ET_a in the arid region of northwest China showed an increasing trend during

收稿日期:2020-11-18

修回日期:2020-12-01

资助项目:国家自然科学基金(51269030);国家自然科学基金(42075168)

第一作者:刘洋(1996—),女,新疆阜康人,硕士,研究方向为生态系统与全球变化生态学。E-mail:1592470483@qq.com

通信作者:杨建军(1978—),男,新疆乌苏人,博士,副教授,主要从事干旱区水土保持与荒漠化防治的研究。E-mail:yjj@xju.edu.cn

1960—2019, and its changes were mainly affected by temperature, relative humidity and wind speed.

Keywords: actual evapotranspiration; Granger-Gray model(GG model); arid region of northwest China; spatial and temporal variation

陆地水循环是地球系统中的重要过程之一,决定着地区的水资源总量^[1]。联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)的第5次气候变化评估报告指出,1880—2012年期间全球平均气温上升了 0.85°C ($0.65\sim 1.06^{\circ}\text{C}$),全球变暖已成为事实^[2]。全球平均气温的升高会引起蒸发速率加快和水汽输送量的增加,从而引起全球水文循环的快速变化,导致区域水资源短缺及极端气候事件的频繁发生,给人类社会和生态系统带来一系列的不利影响^[3-4]。作为水循环的重要环节之一^[5],蒸散发是联系能量平衡和水量平衡的枢纽,也是全球气候变化研究的重要课题^[6-7],其在植被恢复、农业生产及水资源利用等方面发挥着关键作用,开展蒸散发研究有利于区域水资源的评估管理、旱涝预警、生态需水以及水资源的未来规划^[8-9]。

蒸散发(Evapotranspiration, ET)既包括发生在土壤表面或水面的蒸发,又包括在植物叶片表面发生的蒸腾^[10]。根据土壤下垫面的供水条件,蒸散发可以分为实际蒸散发(Actual evapotranspiration, ET_a)和潜在蒸散发(Potential evapotranspiration, ET_p),其中实际蒸散发能表征直接参与水文循环的量^[11],这使实际蒸散发受到水文、农业、生态、气象等行业的广泛关注和研究。由于难以直接测量实际蒸散发^[12],目前多采用模型模拟^[13]和遥感反演的^[14-15]方法来估算实际蒸散发。1963年Bouchet^[16]提出了实际蒸散与潜在蒸散之间存在互补相关关系,探索出了实际蒸散发估算的新方法。随后很多研究学者基于此原理提出了很多实际蒸散发估算模型,如CRAE模型(Complementary Relationship Areal Evapotranspiration model)^[17]、AA模型(Advection-Aridity model)^[18]、GG模型(Granger and Gray)^[19]。其中GG模型由于其估算所需的参数少、精度高、算法相对简便,且可估算不充足供水条件下的实际蒸散,因而得到了广泛的应用。如朱非林等^[20]评估AA模型、GG模型和CRAE模型3种模型在洹河流域的估算能力,结果表明GG模型的估算效果较好。韩松俊等^[21]分析比较AA模型、Granger模型和P-M-Katerji模型的适用性,结果表明GG模型在蒸散比变化范围较大的情况下具有良好的适用性。由于GG模型在干旱区估算蒸散发的报道相对较少,而水资源又是制约和影响干旱区社会经济发展和生态环境保护的战略性资源,因此对于干旱区的实际蒸散发进行估算研究具有重要的理论和实际意义。

中国的西北干旱区是中亚干旱区的重要组成部分,

该地区地域广阔,地形复杂,气候恶劣,各自然要素的时空分布极其不均匀,其生态环境也异常脆弱,是受全球气候变化影响最明显的地区之一^[22]。为此,本文利用西北干旱区50个标准气象站点1960—2019年逐日气象观测资料,利用Granger-Gray模型(GG模型)估算西北干旱区的实际蒸散发,并通过非参数化M-K统计检验法和空间插值法对实际蒸散发的时间变化和空间分布特征进行分析,进一步探讨4种主要的气象因子对实际蒸散发的影响。这不仅有利于深入了解全球气候变化对西北干旱区水分循环的影响,还可以为西北干旱区水资源的合理配置、生态环境的保护和修复以及可持续发展等提供一定的科学依据。

1 研究区概况

中国西北干旱区位于亚欧大陆的中部,地处大陆腹地深处,远离海洋,多年平均降水量不足200 mm,是典型的大陆性气候^[23]。该地区东以贺兰山为界,南至昆仑山—阿尔金山—祁连山,北侧和西侧直抵国界,介于 $73^{\circ}\sim 107^{\circ}\text{E}$, $35^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$,包括新疆维吾尔自治区全境、甘肃省河西走廊、内蒙古阿拉善高原及宁夏回族自治区贺兰山以西的地区^[24](图1)。区域内主要有两大内陆盆地(塔里木盆地和准噶尔盆地)和一些主要的山地(阿尔泰山、天山、昆仑山、祁连山等)。该区是中亚干旱区的重要组成部分之一,也是全球同纬度中最干旱的地区,该区域气候干燥、降水稀少且蒸发量大,气温年较差、日较差大,地形复杂多样,植被覆盖面积小,是生态环境异常脆弱的地区,也是最容易受全球变化影响的地区^[25]。

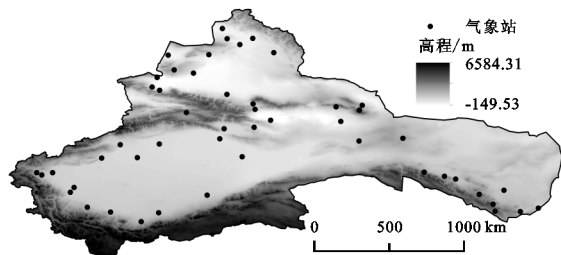


图1 研究区概况与气象站点分布

2 数据和方法

2.1 数据来源及处理

选择西北干旱区1960—2019年资料较完整的50个标准气象站点资料,站点分布见图1,地面观测站逐日气象数据来自国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn/>),包括:平均气温($^{\circ}\text{C}$)、最高气温($^{\circ}\text{C}$)、最低气温($^{\circ}\text{C}$)、平均相对湿度($\%$)、最大相对湿度($\%$)、最小相对

湿度(%)、日照时数(h)、风速(m/s)、降水量(mm)。季节划分为春季(3—5月)、夏季(6—8月)、秋季(9—11月)、冬季(12—翌年2月)。对原始数据进行检查、处理,检查所有站点数据的缺失率均不超过5%,数据中的缺失值用多年同日平均值进行插补处理。

2.2 研究方法

2.2.1 实际蒸散发模型 本研究采用 Granger-Gray 模型(GG 模型)估算西北干旱区的实际蒸散发。该模型为 Granger and Gray(1989)基于 Penman 公式推导出的,可估算不同非饱和地表的实际蒸散发 ET_a :

$$ET_a = \frac{\frac{\Delta}{\gamma} \cdot R(R_n - G) + R \cdot E_a}{\frac{\Delta}{\gamma} \cdot R + 1} \quad (1)$$

式中: Δ 为温度—饱和水汽压曲线斜率; γ 为干湿表常数(kPa/℃); R_n 为地表净辐射[MJ/(m²·d)]; G 为土壤热通量(W/m²); E_a 为干燥力; R 为相对蒸散,它与相对干燥力 D 的关系式为:

$$R = \frac{1}{1 + b_2 \exp(b_1 D)} \quad (2)$$

式中: D 为相对干燥力, $D = E_a / (R_n - G + E_a)$; b_1 , b_2 为经验系数,其取值分别为 0.793, 0.20^[26-27]。

2.2.2 分析方法 根据 GG 模型计算出实际蒸散发后,利用线性回归方法和非参数 Mann-Kendall^[28] 检验方法分析 1960—2019 年西北干旱区实际蒸散发及各气象因子的变化趋势,采用 ArcGIS 中的样条插值方法^[29] 进行空间插值分析 60 a 来 ET_a 的空间分布特征,进一步运用 SPSS 软件对 ET_a 和气象因子进行显著性检验和相关性判定。

3 结果与分析

3.1 西北干旱区实际蒸散发的时空变化特征

3.1.1 实际蒸散发的空间分布特征 1960—2019 年,西北干旱区实际蒸散发的年平均值为 482.93~720.25 mm,多年平均值为 586.90 mm,其中夏季(6—8月)的值最大,为 272.24 mm,约占全年的 46%;春季(3—5月)为 184.93 mm,约占全年的 32%;秋季(9—11月)为 93.64 mm,约占全年的 16%;冬季(12—翌年2月)最小,为 36.14 mm,约占全年的 6%。

从西北干旱区多年平均蒸散发分布图可以看出,平均实际蒸散发存在明显的空间差异(图 2A),西南部和东部的 ET_a 较高,西北部和中部的较低。实际蒸散发的空间分布会受到气温、风速、太阳辐射、相对湿度和地形等要素的分布特征影响。昆仑山—阿尔金山地区、天山地区以及祁连山地区的年 ET_a 均在 600 mm 以上,是研究区年实际蒸散发的高值区。这些地

区靠近山脉,其相对湿度较大,且光能资源丰富,日照时数较长,因此其 ET_a 较高。新疆北疆地区及研究区中部的 ET_a 在 600 mm 以下,是研究区实际蒸散发的低值区,其原因可能是这些地区的海拔较低,相对湿度较小且日照时数较短。

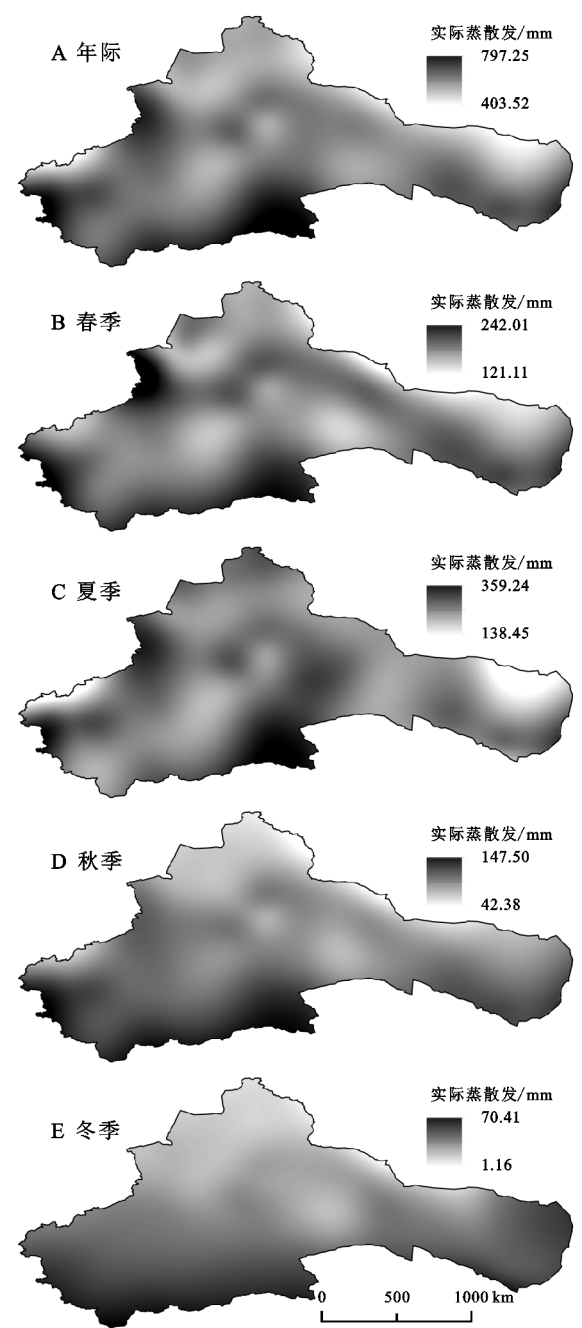


图 2 西北干旱区实际蒸散发年际和季节分布

春季、秋季和冬季的实际蒸散发在空间分布上较一致,天山地区、昆仑山—阿尔金山地区及祁连山地区的 ET_a 较大,分别达到了 200 mm, 100 mm 和 50 mm 以上;北部地区及中部地区的 ET_a 较小,分别在 180 mm, 80 mm 和 40 mm 以下。夏季略有不同,主要表现为北部地区的 ET_a 较高,其值超过 250 mm,这可能和该地区较大的相对湿度和较长的日照时数有关。

3.1.2 实际蒸散发的时间变化特征 1960—2019 年,西北干旱区多年平均实际蒸散的变化速率为 0.24 mm/10 a,整体呈现出小幅上升的趋势(图 3)。M-K 检验结果表明,西北干旱区在 1962—1972 年和 1992—2015 年期间的增加趋势最为显著,其 UF 曲线均超过了显著性水平 $\alpha=0.05$ 的置信线 1.96。四季中,春季和冬季的 ET_a 分别以 0.73,0.08 mm/10 a 的速率上升,夏季和秋季的 ET_a 分别以 -0.44,-0.14 mm/10 a 的速率下降。

在空间上,实际蒸散发存在明显的区域差异,各站点年均 ET_a 的变化率在 -7.44~8.58 mm/10 a(图 4)。新疆地区的 ET_a 变化趋势以上升为主,有 60% 的站点表现为增加趋势,其中增幅较大的站点主要分布在新疆西北部、西南部和东部地区,达到了 0.3 mm/10 a,而呈下降趋势的站点主要集中在新疆的中部地区。西北干旱区东部地区的 ET_a 变化趋势以下降为主,有 70% 的站点呈下降趋势,其下降速率小于 -0.3 mm/10 a。

春、冬两季 ET_a 变化趋势的空间分布与年平均 ET_a 的较为一致,新疆地区以上升为主,分别有 72.5%,80% 的站点呈增加趋势;西北干旱区的东中部地区有 80% 的站点在春季呈增加趋势,有 80% 的站点在冬季呈下降趋势。而在夏季和秋季,整个西北干旱区的 ET_a 的变化趋势均以下降为主,分别占总站点的 58%,60%,其中研究区东部地区的下降趋势更为明显。

3.2 西北干旱区实际蒸散发的影响因素分析

3.2.1 气象因子的变化特征 利用 GG 模型估算 ET_a 时所用的气象数据主要有平均气温、相对湿度、日照时数、风速,因此本文选用这 4 个气象因子分析其变化特征及其对实际蒸散发的影响。1960—2019 年,西北干旱区的平均气温、相对湿度、日照时数、风速均发生了较大的变化(图 5)。

从图 5 可以看出,在过去的 60 a 中,西北干旱区的平均气温随着时间的增长呈现上升趋势,其增长速率为 0.33℃/10 a;相对湿度、日照时数和风速均呈现下降趋势,其 10 a 变化速率分别为 -0.15%, -0.03 h 和 -0.13 m/s。在季节尺度上,4 个气象因子的变化趋势与其年变化趋势相似。平均气温在四季中均呈上升趋势,其变化速率分别为:0.37,0.27,0.32,0.35℃/10 a;相对湿度在春、夏、秋三季呈下降趋势,其变化速率分别为 -0.54,-0.11,-0.04%/10 a,在冬季则表现为增加趋势,其变化速率为 0.09℃/10 a;日照时数在夏、秋、冬三季均呈减少趋势,其变化速率分别为 -0.06,-0.05,-0.09 h/10 a,在春季则以 0.06 h/10 a 的速率增加;风速在四季中均呈降低趋势,其 10 a 变化速率分别为 -0.16,-0.14,-0.12 和 -0.08 m/s。

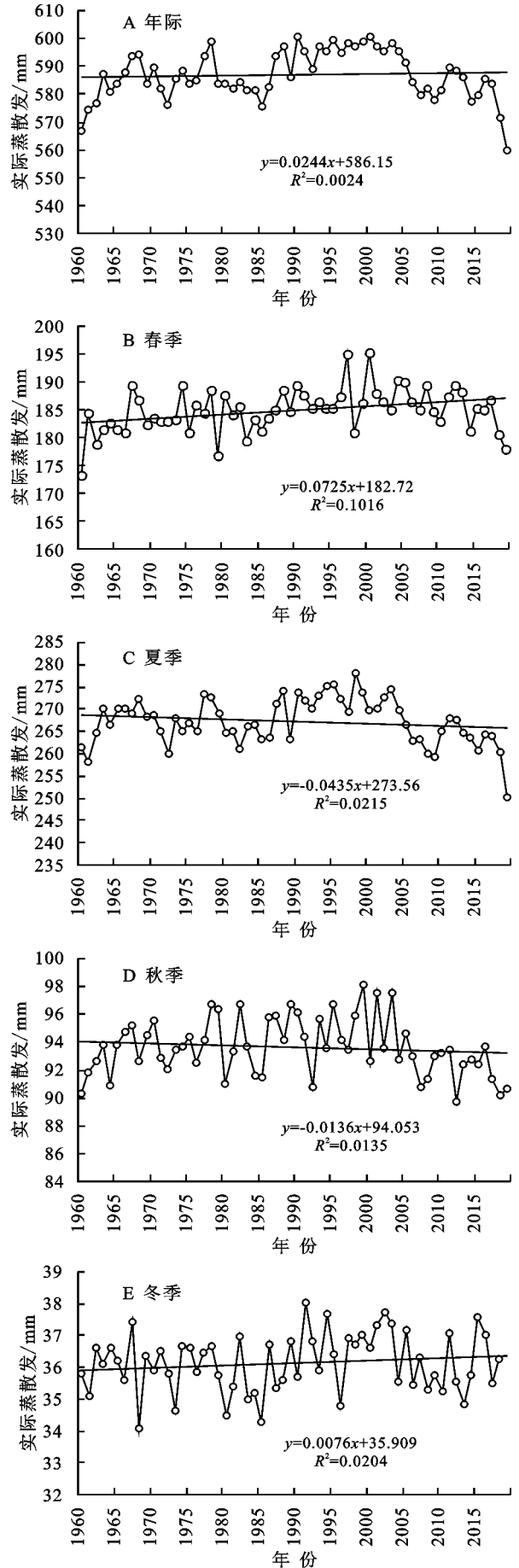


图 3 西北干旱区实际蒸散发年际和季节变化趋势

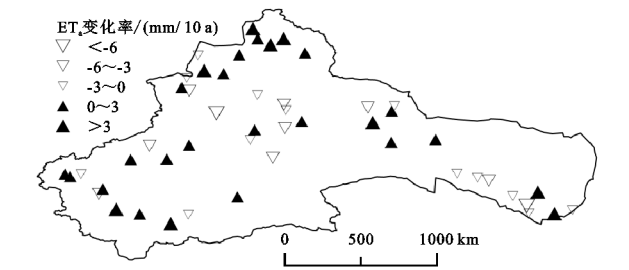
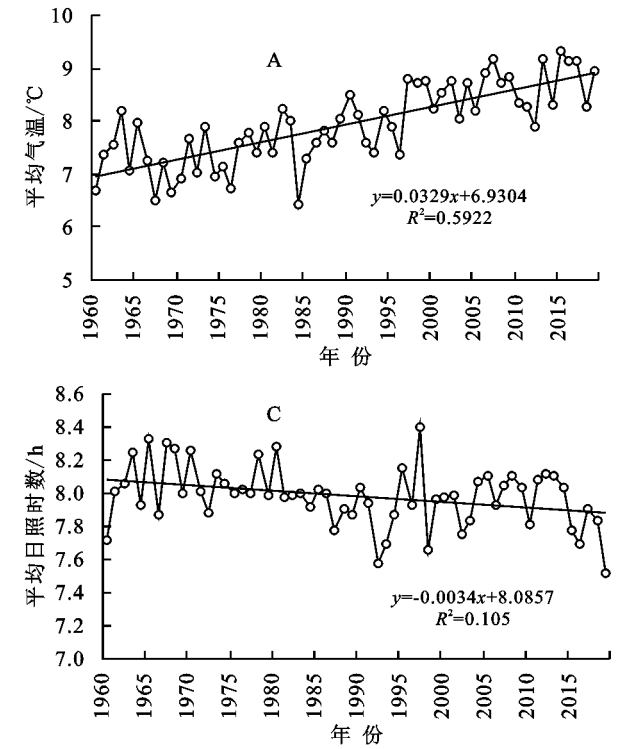


图4 西北干旱区实际蒸散发多年变化的空间分布

3.2.2 气象因子对实际蒸散发的影响 1960—2019



年西北干旱区的实际蒸散发在总体上呈现上升趋势,这种变化趋势是由多种气象因子的共同作用导致的。因此对年际和4个季节的实际蒸散发、平均气温、相对湿度、日照时数和风速进行了相关分析,分析结果见表1。从表中可以看出,西北干旱区年际实际蒸散发在年际尺度上与平均气温和相对湿度呈正相关关系,与风速呈负相关关系,60 a来西北干旱区实际蒸散发的增加可能是由平均气温和相对湿度的增加所引起的。

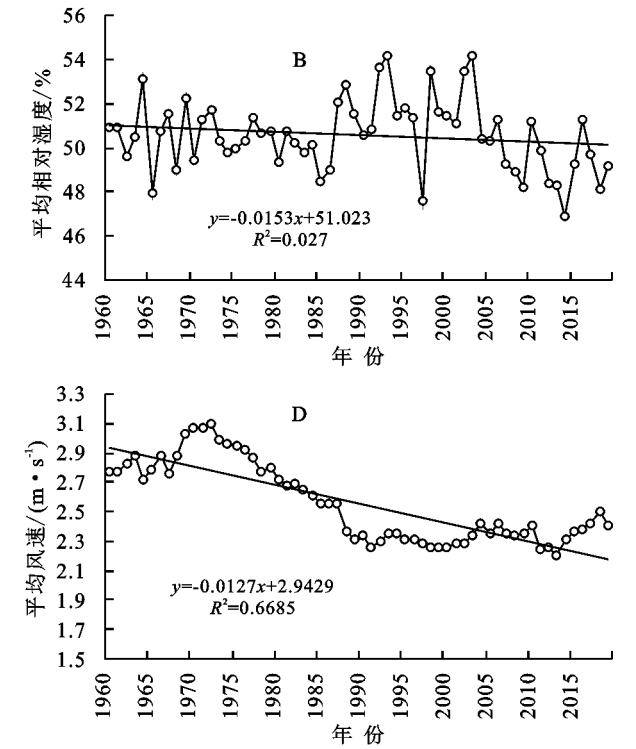


图5 西北干旱区主要气象因子年际变化特征

表1 西北干旱区气象因子与实际蒸散的相关性

项目	时间尺度	平均气温	相对湿度	日照时数	风速
实际蒸散发	年际	0.276 *	0.304 *	0.206	-0.455 **
	春季	0.538 **	-0.126	0.703 **	-0.503 **
	夏季	0.033	0.460 **	0.257 *	-0.352 **
	秋季	0.297 *	0.380 **	0.113	-0.279 *
	冬季	0.630 **	0.153	-0.125	-0.176

注: *表示在0.05水平(双侧)上显著相关,**表示在0.01水平(双侧)上显著相关。

不同季节的实际蒸散发与气象因子的相关性不同,春季的 ET_a 与平均气温和日照时数呈极显著相关关系,与风速呈极显著负相关关系;夏季的 ET_a 与相对湿度和日照时数呈显著的正相关关系,与风速呈极显著负相关关系;秋季的 ET_a 与平均气温和相对湿度呈显著的正相关关系,与风速呈显著的负相关关系;冬季的 ET_a 与平均气温呈极显著正相关关系,其他3种因子与 ET_a 的相关性均不显著。由此表明春季 ET_a 增加的主要原因可能是气温的上升和日照时

数的增加;夏季随着相对湿度的降低和日照时数的减少,太阳辐射能量的下降引起了 ET_a 的减少,使得夏季 ET_a 呈下降趋势;秋季相对湿度的降低可能是引起 ET_a 减少的主要原因;冬季 ET_a 的增加主要是由平均气温的升高引起的。

4 结论

- (1) 1960—2019年西北干旱区年实际蒸散发约为586.9 mm,其中夏季的值最大,冬季值最小。在空间上,西北干旱区西南部和东部的 ET_a 较高,西北部和中部的较低。
- (2) 近60 a西北干旱区 ET_a 呈现微弱的上升趋势,其速率为0.24 mm/10 a。 ET_a 在春季和冬季呈上升趋势,在夏季和秋季呈下降趋势。
- (3) 60 a来,西北干旱区的年平均气温呈上升趋势,而相对湿度、日照时数和风速均呈下降趋势,其中平均温度、相对湿度和日照时数均与 ET_a 呈正相关

关系,而风速与 ET_a 呈负相关关系。平均气温、相对湿度、日照时数和风速均对实际蒸散发有影响。

限于西北干旱区的气象站点数量较少,使得本研究中所做的空间插值存在一定的误差,但依然能表现出实际蒸散发在研究区内时空分布的总体特征。本文仅选取了用于估算实际蒸散发的 4 种气象因子分析其对 ET_a 的影响,然而实际蒸散发的变化是由多种因素共同作用导致的,如下垫面状况、供水情况、地表植被特征^[30]、土地利用类型^[31]、人类活动^[32]等,仅用少量的影响因子难以阐释实际蒸散发变化的原因。除 GG 模型外,基于互补相关原理的 AA 模型和 CRAE 模型也具有较好的估算效果,未来拟采用多个模型对西北干旱区的 ET_a 进行估算和对比分析。

参考文献:

- [1] Ning L K, Zhan C S, Luo Y, et al. A review of fully coupled atmosphere-hydrology simulations[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, 29(3): 465-479.
- [2] Zhou B T, Chao Q C, Huang L. The core conclusions and interpretation of working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[J]. *Chinese Journal of Urban and Environmental Studies*, 2015, 3(1). DOI: 10.1142/S2345748115500037.
- [3] 封珊,徐长乐.全球气候变化及其对人类社会影响研究综述[J].*中国人口·资源与环境*, 2014, 24(S2): 6-10.
- [4] Lee C H, Yeh H F. Impact of climate change and human activities on streamflow variations based on the Budyko Framework[J]. *Water*, 2019, 11(10). DOI: 10.3390/w11102001.
- [5] 胡珊珊,张涛.白洋淀流域潜在蒸散量与实际蒸散发变化分析[J].*南水北调与水利科技*, 2016, 14(1): 67-71.
- [6] Li T S, Xia J, She D X, et al. Quantifying the impacts of climate change and vegetation variation on actual evapotranspiration based on the Budyko Hypothesis in North and South Panjiang Basin, China[J]. *Water*, 2020, 12(2). DOI: 10.3390/w12020508.
- [7] 郭小娇,石建省.水分蒸散发研究国内外进展与趋势[J].*地质论评*, 2019, 65(6): 1473-1486.
- [8] Anayah F M, Kaluarachchi J J. Improving the complementary methods to estimate evapotranspiration under diverse climatic and physical conditions[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(6): 2049-2064.
- [9] Wang S, Lian J J, Peng Y Z, et al. Generalized reference evapotranspiration models with limited climatic data based on random forest and gene expression programming in Guangxi, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 221: 220-230.
- [10] 黄葵,卢毅敏,魏征,等.土地利用和气候变化对海河流域蒸散发时空变化的影响[J].*地球信息科学学报*, 2019, 21(12): 1888-1902.
- [11] 朱非林,王卫光,孙一萌,等.汉江流域实际蒸散发的时空演变规律及成因分析[J].*河海大学学报:自然科学版*, 2013, 41(4): 300-306.
- [12] 李修仓.中国典型流域实际蒸散发的时空变异研究[D].南京:南京信息工程大学, 2013.
- [13] 李晓媛,于德永.蒸散发估算方法及其驱动力研究进展[J].*干旱区研究*, 2020, 37(1): 26-36.
- [14] 王桐,唐荣林,李召良,等.遥感反演蒸散发的日尺度扩展方法研究进展[J].*遥感学报*, 2019, 23(5): 813-830.
- [15] 尹剑,欧照凡,付强,等.区域尺度蒸散发遥感估算:反演与数据同化研究进展[J].*地理科学*, 2018, 38(3): 448-456.
- [16] Bouchet R J. Evapotranspiration réelle et potentielle, signification climatique[J]. *Int. assoc. sic. hyrol. publ.*, 1963, 62: 134-142.
- [17] Morton F I. Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology[J]. *Journal of Hydrology*, 1983, 66(1/4): 1-76.
- [18] Burutsaert W. An advection aridity approach to estimate actual regional evapotranspiration [J]. *Water Resources Research*, 1979, 15(2): 443-450.
- [19] Granger R J, Gray D M. Evaporation from natural nonsaturated surfaces[J]. *Journal of Hydrology*, 1989, 111(1/4): 21-29.
- [20] 朱非林,王卫光,孙一萌,等.基于互补相关原理的实际蒸散发模型估算能力评价[J].*水电能源科学*, 2013, 31(6): 33-35.
- [21] 韩松俊,胡和平,田富强.3种通过常规气象变量估算实际蒸散发模型的适用性比较[J].*水利学报*, 2009, 40(1): 75-81.
- [22] 陈亚宁,王怀军,王志成,等.西北干旱区极端气候水文事件特征分析[J].*干旱区地理*, 2017, 40(1): 1-9.
- [23] 姚俊强,杨青,刘志辉,等.中国西北干旱区降水时空分布特征[J].*生态学报*, 2015, 35(17): 5846-5855.
- [24] 韩雪云,赵丽,张倩,等.西北干旱区极端高温时空变化特征分析[J].*沙漠与绿洲气象*, 2019, 13(4): 17-23.
- [25] 姚俊强,杨青,毛伟峰,等.西北干旱区大气水分循环要素变化研究进展[J].*干旱区研究*, 2018, 35(2): 269-276.
- [26] Banimahd S A, Khalili D, Kamgar-Haghighi A A, et al. Evapotranspiration model selection for estimation of actual evaporation from bare soil, as required in annual potential groundwater recharge studies of a semi-arid foothill region[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2015, 61(10): 1455-1472.