

延河流域潜在蒸散发的时空变化特征

罗宇^{1,2}, 穆兴民^{1,2,3}, 尹殿胜⁴, 高鹏^{1,2,3}, 赵广举^{1,2,3}, 邱德勋^{1,2}

(1.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2.中国科学院大学, 北京 100049; 3.西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 4.中水淮河规划设计研究院有限公司, 安徽 合肥 230601)

摘要: [目的] 研究气候变化下潜在蒸散发(ET_0)的时空特征, 为区域生态需水研究和水资源管理提供科学依据。[方法] 基于延河流域 1978—2017 年逐日气象资料, 利用 Penman-Monteith 方法对 ET_0 进行计算, 运用 Mann-Kendall 趋势检验法、Pettitt 检验对 ET_0 时空变化特征进行分析, 并通过 Pearson 相关性分析对 ET_0 变化的影响因子进行探讨。[结果] 延河流域年平均 ET_0 为 923.53 mm, 整体呈现上升趋势。月 ET_0 呈单峰分布, 高值月份出现于 5—7 月。季节上 ET_0 表现为: 夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季, 夏季、春季、冬季的 ET_0 呈上升趋势, 秋季呈下降趋势, 春季蒸散变化速率最大。空间上, ET_0 呈现由西部向南部增加再向东南部减少的趋势。延安站蒸散量最大, 志丹站蒸散量最小, 除甘泉站外其他站点的 ET_0 均呈上升趋势, 甘泉附近地区存在“蒸发悖论”现象, 主导因子是日照时数、2 m 高风速和降水量。 ET_0 变化率呈现东南高西北低的分布规律, 延安站变化率最大, 安塞站变化最小。平均温度、日照时数、相对湿度、气压、2 m 高风速、降水量等气象因子的变化趋势和变化速率时空差异显著, 同一气象因子对 ET_0 的影响程度具有时空差异, 相同因子不同变化趋势的组合对蒸散发的影响具有显著差异。[结论] 延河流域 ET_0 变化与平均温度、日照时数、2 m 高风速的变化为正相关关系, 与相对湿度、气压、降雨量的变化为负相关关系, 其中与日照时数相关最为密切。

关键词: 潜在蒸散发; 变化趋势; 时空特征; 主导因子

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2021)02-0306-08

中图分类号: P426.2

文献参数: 罗宇, 穆兴民, 尹殿胜, 等. 延河流域潜在蒸散发的时空变化特征[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2): 306-313. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20210309.001; Luo Yu, Mu Xingmin, Gao Peng, et al. Spatiotemporal variation characteristics of potential evapotranspiration in Yanhe River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2): 306-313.

Spatiotemporal Variation Characteristics of Potential Evapotranspiration in Yanhe River Basin

Luo Yu^{1,2}, Mu Xingmin^{1,2,3}, Yi Diansheng⁴, Gao Peng^{1,2,3}, Zhao Guangju^{1,2,3}, Qiu Dexun^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Agriculture on Loess Plateau,

Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water

Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049,

China; 3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Agriculture on Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. Zhongshui Huaihe Planning and Design Research Co. LTD, Hefei, Anhui 230601, China)

Abstract: [Objective] The spatiotemporal characteristics of potential evapotranspiration (ET_0) under climate change were studied in order to provide scientific basis for researching regional ecological water demand and water resource management. [Methods] Based on the daily meteorological data of Yanhe River basin from 1978 to 2017, ET_0 was calculated by Penman-Monteith method. The spatiotemporal variation characteristics of ET_0 were analyzed by Mann-Kendall trend test and Pettitt test. And the influencing factors of ET_0 change

收稿日期: 2021-01-11

修回日期: 2021-02-11

资助项目: 国家重点研发计划项目“黄土高原水土流失治理与生态产业协同发展技术集成与模式”(2016YFC0501707)

第一作者: 罗宇(1994—), 女(汉族), 贵州省遵义市人, 硕士研究生, 研究方向为生态水文。Email: luoyu18@mailsucas.ac.cn.

通讯作者: 高鹏(1976—), 男(汉族), 陕西省扶风县人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事水土保持和流域生态研究。Email: gaopeng@ms.iswc.ac.cn.

were analyzed by Pearson correlation analysis. [Results] The average annual ET_0 of Yanhe River basin was 923.53 mm, showing an overall upward trend. Monthly ET_0 showed unimodal distribution, and the highest value occurred from May to July. Seasonal ET_0 showed as follows: summer>spring>autumn>winter. ET_0 in summer, spring, and winter showed an upward trend, while it showed a downward trend in autumn. The spring evapotranspiration had the largest rate of change. Spatially, ET_0 increased from the west to the south and then decreased to the southeast. The evapotranspiration at Yan'an station was the highest, and that at Zhidan station was the lowest. ET_0 at other stations except Ganquan station was on the rise. There was an "evaporation paradox" phenomenon in the area around Ganquan station. The dominant factors were sunshine duration, 2 m high wind speed and precipitation. The change rate of ET_0 was higher in the southeast and lower in the northwest. The change rate of Yan'an station was the largest, while that of Ansai station was the least. The variation trend and rate of meteorological factors such as average temperature, sunshine duration, relative humidity, atmospheric pressure, 2 m high wind speed and precipitation were significantly different in time and space. The influence of the same meteorological factor on ET_0 was significantly different in time and space. The combination of different variation trends of the same factor had significant differences in the influence of ET_0 . [Conclusion] In general, the change of ET_0 in Yanhe River basin is positively correlated with the change of average temperature, sunshine duration and 2 m high wind speed and negatively correlated with the change of relative humidity, atmospheric pressure and precipitation. The change of ET_0 is the most correlated factor with sunshine duration.

Keywords: potential evapotranspiration; trend; spatiotemporal characteristics; dominant factors

水循环系统在气候变化的影响下发生了显著变化^[1]。蒸散发是水循环系统中的重要环节,联系着水量和能量的平衡,气候变化影响下蒸散发的变化成为了研究焦点。潜在蒸散发(potential evapotranspiration, ET_0)指下垫面供水条件不受限制时的蒸散量^[2],是决定流域干湿情况的重要因子之一。深入研究潜在蒸散发的时空特征,有助于理解水文过程对气候变化的响应机制,可为潜在蒸散发变化原因的研究奠定基础,为区域生态需水和水资源管理提供科学依据。

常用的潜在蒸散发估算方法有 Hargreaves^[3]、Priestley-Taylor^[4]、Hamon^[5]、Thomthwaite^[6]、Rohwer^[7]、Penman-Monteith 方法^[2]。其中世界粮农组织(FAO)推荐的 Penman-Monteith 方法是计算 ET_0 的常用公式,它综合考虑了能量平衡和空气动力学原理,具有较强的物理意义,在湿润和干旱地区的潜在蒸散发估算中均具有较高的精度,得到了广泛的应用^[8]。尹云鹤等^[1]基于 Penman-Monteith 方法对我国潜在蒸散发的时空演变规律及原因进行研究,我国潜在蒸散发整体呈现下降趋势,潜在蒸散发变化的主导因子是风速,但不同时间尺度上的潜在蒸散发变化趋势及主导因素均具有差异。目前蒸散互补、太阳辐射、风速减少等理论可作为解释大部分蒸散发变化的基础,但是不同时空蒸散发变化原因还需深入研究。童瑞等^[9]利用可变下渗能力模型 VIC(variable infiltration capacity)计算黄河流域潜在蒸散发,研究发现黄河流域潜在蒸散发整体呈现显著减少趋

势,但空间差异显著;黄河流域各河段蒸散发变化的主导因素不同,上游主要是能量的影响较大,中下游则是水量的供应。钟巧等^[10]利用 Penman-Monteith 公式计算博斯腾湖流域山区和平原的潜在蒸散发,并对山区和平原的潜在蒸散发的变化趋势和主导因子研究发现,山区潜在蒸散发呈上升趋势且主导因子是净辐射和风速,平原潜在蒸散发呈下降趋势且风速对潜在蒸散发变化的贡献最大。韩松俊等^[11]对塔里木河山区和绿洲潜在蒸散发研究发现,两者蒸散量均呈下降趋势,但导致蒸散量变化的因子不同,山区主要受辐射和风速的影响,绿洲受风速影响最为显著。赵捷等^[12]研究表明,黑河流域多年潜在蒸散发年值和季节值整体呈现下降的趋势,气温呈现显著上升趋势,说明黑河流域可能存在“蒸发悖论”现象。综合当前研究可知,不同区域潜在蒸散发的变化趋势以及导致蒸散量变化的主导因子具有时空差异,还需深入探究。此外全球长期变暖的背景下,潜在蒸散发却呈下降趋势的“蒸发悖论”现象^[13]普遍存在于我国大部分地区,该现象的主导因素引起了学者们的广泛研究。“蒸发悖论”现象的主导因素具有时空差异,且相同因素不同变化的组合也会导致潜在蒸散的变化^[12-11,14-15]。因此不同区域不同时间“蒸发悖论”现象的主导因子需深入研究。延河流域是黄土高原丘陵沟壑区的典型流域,20 世纪 90 年代以来气候变化和人类活动对其水文循环过程产生了剧烈影响,深入

了解 ET_0 的时空变化特征对延河流域水资源的合理配置有重要意义。为此,本文以延河流域为研究区,利用 Penman-Monteith 方法计算 ET_0 ,对延河流域潜在蒸散发的时空特征及其与气象因子的相关性进行研究,揭示不同时间、不同区域下气象因子对潜在蒸散发的影响,为研究气候变化对水文过程的影响提供科学参考,为延河流域乃至黄土高原水资源管理提供理论支持。

1 研究区概况

延河流域位于陕西省北部,是黄河中游区段的一级支流,发源于靖边县天赐湾乡周山,流经志丹、安塞、宝塔、延长等 4 个县(市)区,在延长县南河沟乡凉水岸附近汇入黄河,全长 286.9 km,流域总面积 7 725 km²。延河流域属于大陆性季风气候,春季干旱多风,夏季温热多雨,秋季温凉,冬季寒冷干燥^[16]。多年平均降水量为 520 mm 左右,平均蒸发量为 897.7~1 678 mm,平均温度为 8.8~10.2 °C,年均日照时数为 2 450 h^[17]。延河流域是黄土高原水土流失治理的重点区域,近年来随着生态治理工程的实施,区域水文循环过程发生着重要的变化。

2 数据与方法

2.1 数据

本文气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),包括逐日降水量(P)、日平均温度(T)、日最高温度(T -max)、日最低温度(T -mix),10 m 高风速(U_{10})、日照时数(n)、日平均相对湿度等(RH),其中 10 m 高风速需转换成 2 m 高风速(U_2)再带入 Penman-Monteith 公式,所有数据的时间序列均为 1978—2017 年。选取的控制水文站为甘谷驿站,气象站点为志丹、安塞、延安、子长、延川、延长、甘泉站。气象站和甘谷驿站的分布情况如图 1 所示,各站点气象因子基本情况详见表 1。本文由逐日气象数据计算出各气象站点的日潜在蒸散发量,再统计月、季节、年尺度的潜在蒸散发,并通过 ArcGIS 对各站点数据进行插值得到延河流域潜在蒸散发的空间分布特征。

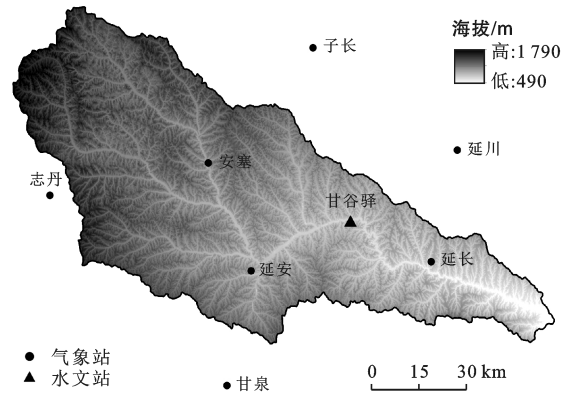


图 1 延河流域气象站、水文站分布

表 1 延河流域 1978—2017 年基本情况

站点	经度/ (°)	纬度/ (°)	海拔/ m	平均 温度/(°C)	日照时数/ (h · a ⁻¹)	相对湿度/ %	气压/ (kPa)	两米高风速/ (m · s ⁻¹)	降水量/ (mm · a ⁻¹)
子长	109.70	37.18	1 063.30	9.61±0.67 ^c	2 480.01±167.60 ^a	58.58±2.83 ^d	89.65±0.04 ^d	1.22±0.10 ^a	496.34±115.19 ^a
志丹	108.77	36.81	1 218.80	8.54±0.66 ^d	2 340.69±154.55 ^{cd}	62.31±2.97 ^c	87.98±0.05 ^c	0.93±0.18 ^c	490.18±99.93 ^a
安塞	109.32	36.88	1 068.30	9.26±0.57 ^c	2 374.85±146.47 ^{bcd}	61.02±2.93 ^c	89.59±0.05 ^d	1.27±0.14 ^a	517.38±108.19 ^a
延安	109.45	36.58	1 180.50	10.34±0.70 ^b	2 512.37±179.67	58.90±3.19 ^d	90.50±0.81 ^b	1.25±0.18 ^a	534.61±129.07 ^a
甘泉	109.35	36.27	1 005.50	9.31±0.68 ^c	2 300.21±149.85 ^d	64.82±2.80 ^b	90.28±0.05 ^c	1.08±0.16 ^b	540.46±108.04 ^a
延川	110.18	36.88	804.90	10.83±0.61 ^a	2 407.98±176.65 ^{abc}	59.29±3.22 ^d	92.54±0.05 ^a	0.89±0.19 ^c	489.22±112.65 ^a
延长	110.07	36.58	804.80	10.39±0.56 ^b	2 467.12±167.16 ^{ab}	62.12±3.06 ^c	92.46±0.05 ^a	0.95±0.17 ^c	505.73±123.55 ^a

注:不同小写字母表示不同站点间差异显著($p < 0.05$)。

2.2 研究方法

2.2.1 潜在蒸散发的计算方法 本文采用大多研究作为标准^[8,18-19]的 Penman-Monteith 方法计算潜在蒸散发,其计算公式为:

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{(T+273)} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)}$$

式中: ET_0 为潜在蒸散发量(mm); R_n 为地表净辐射

[MJ/(mm² · d)]; G 为土壤热通量[MJ/(mm² · d)]; γ 为干湿表常数(kPa/°C); λ 为汽化潜热(MJ/kg); T 为平均温度(°C); U_2 为 2 m 高风速(m/s); e_s 为饱和水气压(kPa); e_a 为实际水气压(kPa); Δ 为饱和水气压表示温度曲线斜率(kPa/°C)。各参数具体计算方法详见参考文献[2]。

2.2.2 数理统计分析方法 本文采用反距离加权法(inverse distance weighting, IDW)^[20]对延河流域

7个站点的潜在蒸散发值进行空间插值得到延河流域潜在蒸散发的空间特征,采用 Mann-Kendall 趋势检验法(M-K)^[21]、Pettitt 检验进行突变分析^[22]分析延河流域 1978—2017 年潜在蒸散发的时空变化特征,并运用 Pearson 相关性分析^[23]探讨不同时间尺度(年和季节)、不同区域引起潜在蒸散发变化的因子。

3 结果与分析

3.1 潜在蒸散发的时间特征

延河流域 1978—2017 年潜在蒸散发变化曲线如图 2 所示。延河流域多年平均潜在蒸散量为 923.53 mm,波动范围为 846.47~1 008.81 mm;潜在

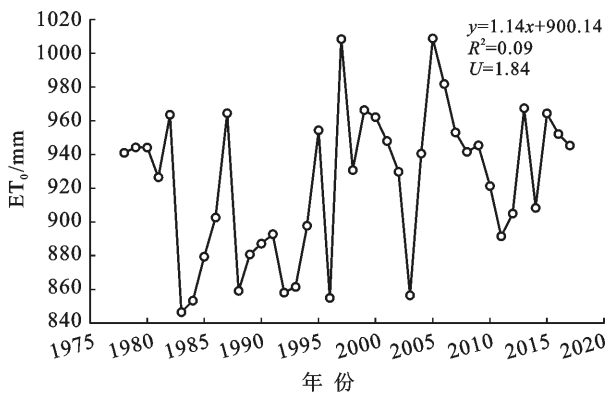


图 2 延河流域 1978—2017 年潜在蒸散发变化特征

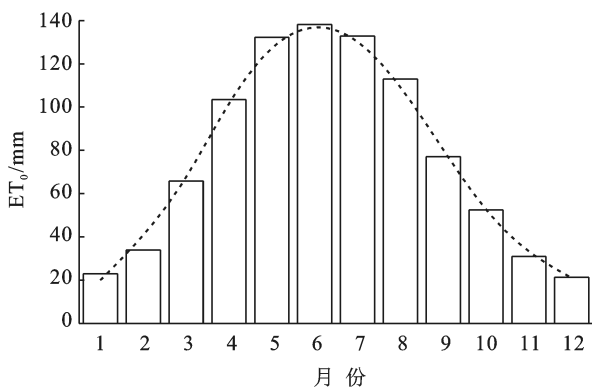


图 4 延河流域潜在蒸散发月变化特征

3.2 潜在蒸散发的空间特征

延河流域 1978—2017 年潜在蒸散发的空间分布规律如图 6 所示。由图 6 可知,流域潜在蒸散发呈现由西向南增加再向东南减少的趋势,最大蒸散量(978.00 mm)在延安站,最小蒸散量(861.55 mm)在志丹站。

延河流域各站点潜在蒸散发变化趋势及变化率

蒸散量随年序呈现上升趋势,上升速率为 1.14 mm/a,通过 M-K 趋势分析发现潜在蒸散发的上升趋势通过了 90%显著性检验。采用 Pettitt 方法分析潜在蒸散发变化的临界年份,结果如图 3 所示,1996 年以来延河流域潜在蒸散表现出逐年增加的趋势。对延河流域多年序列月尺度、季节尺度潜在蒸散量的变化趋势进行分析(图 4—5)。延河流域月潜在蒸散量呈单峰分布,高值月份出现于 5—7 月。季节上,潜在蒸散发表现为:夏季>春季>秋季>冬季,秋季呈下降趋势,下降速率为 0.03 mm/a;夏季、春季、冬季的潜在蒸散量呈上升趋势,上升速率分别为 0.35,0.59 和 0.24 mm/a,其中春季、冬季的变化趋势分别通过了 90%,95%显著性检验。

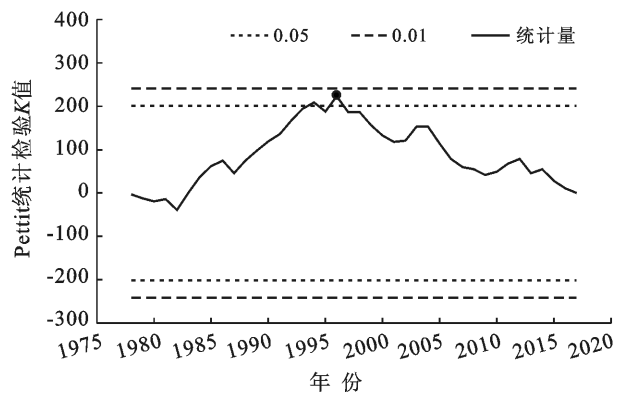


图 3 延河流域潜在蒸散发 Pettitt 检测

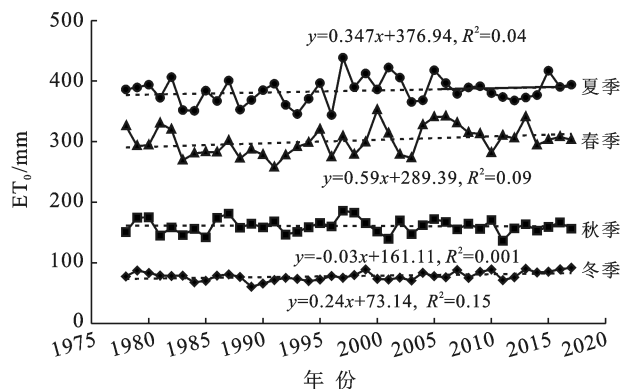


图 5 延河流域潜在蒸散发季节变化特征

如图 7 所示,甘泉站潜在蒸散发呈下降趋势,其他站点均呈现上升。其中子长站、志丹站、延安站、延川站的上升趋势均通过了 95%显著性检验,延长站潜在蒸散发的上升趋势通过了 90%显著性检验。延河流域潜在蒸散发变化率呈现东南高西北低的分布规律,延安站潜在蒸散发变化率最大,安塞站的变化率最低。可见,志丹站蒸散量小但是变化速率大。

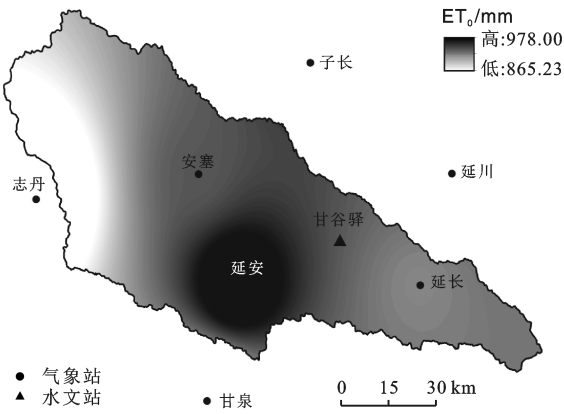


图 6 延河流域潜在蒸散发空间分布特征

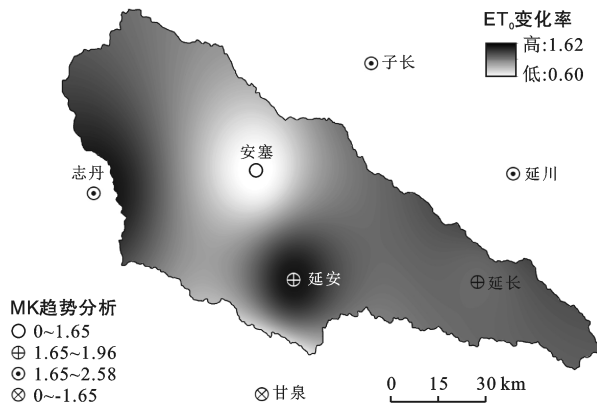


图 7 延河流域潜在蒸散发变化趋势及变化率空间分布特征

3.3 影响因素分析

通过分析气象因子各季节的变化趋势与变化率及其与 ET_0 的相关关系,对延河流域各季节潜在蒸散发变化的原因进行探究(表 2)。由表 2 可知,在年尺度上,平均温度、日照时数、降雨量呈上升趋势,其中平均温度的趋势通过了 99% 显著性检验,变化率最大的气象因子是降雨量;相对湿度、气压、2 m 高风速呈现下降趋势,其中气压的下降趋势通过了 99% 显著性检验,变化率最大的是相对湿度。从季节上看,延河流域四季的平均温度均呈通过了 90% 以上显著性检验的上升趋势,四季气压均呈通过了 99% 显著性检验的下降趋势。日照时数、相对湿度、2 m 高风速和降雨量的四季变化趋势和变化率具有显著差异,日照时数在春季和冬季呈上升趋势,在夏季和秋季呈现下降趋势,其中日照时数在春季和秋季的变化趋势分别通过了 90%, 95% 显著性检验且变化率较大;相对湿度在春季和夏季呈现下降趋势,在秋季和冬季呈现上升趋势,相对湿度在春季的变化率最大,冬季最小;2 m 高风速在春季呈下降趋势,其他 3 季均呈上升趋势,其中冬季的趋势通过了 95% 显著性检验,不同季节间 2 m 高风速的变化率差异较小;降雨量在夏季呈现下降趋势,其他 3 季均呈上升趋势,其中冬季的上升趋势通过了 90% 显著性检验,秋季降雨量的变化率最大。

表 2 延河流域气象因子季节变化 MK 趋势检验统计量与变化率

时间 段	平均温度		日照时数		相对湿度		气压		两米高风速		降水量	
	统计量	变化率	统计量	变化率	统计量	变化率	统计量	变化率	统计量	变化率	统计量	变化率
春季	3.17***	0.036 5	1.77*	1.990 8	-1.28	-0.120 7	-3.43***	-0.006 7	-1.12	-0.003 6	0.4	-0.230 0
夏季	2.31**	0.023 4	-0.02	-0.048 7	-1.4	-0.079 3	-3.73***	-0.006 7	0.26	0.000 5	-0.49	-0.048 9
秋季	2.80***	0.031 5	-2.00**	-1.860 5	0.68	0.038 2	-4.82***	-0.009 6	0.79	0.001 3	1.54	0.988 4
冬季	2.52**	0.033 3	0.19	0.366 6	0.58	0.031	-3.03***	-0.006 8	1.72*	0.003 5	1.93*	0.183 2
全年	3.40***	0.030 9	0.05	0.001 2	-0.82	-0.034	-4.87***	-0.007 4	-0.26	0.000 4	0.26	0.892 6

注:*, **, *** 分别表示通过了置信度 90%, 95%, 99% 的显著性检验。

表 3 是延河流域各季节潜在蒸散发与气象因子相关性分析的结果。从年尺度看,延河流域潜在蒸散发的增加与平均温度、日照时数、2 m 高风速呈现正相关关系,均通过了 0.01 显著性检验,相关系数最大的是日照时数(0.84);与相对湿度、气压、降雨量呈负相关关系,分别通过了 0.01, 0.05, 0.05 显著性检验,相关系数最大的是相对湿度(0.72)。从季节上看,春季平均温度、日照时数、2 m 高风速与潜在蒸散发的增加为正相关,均通过了 0.01 显著性检验,相关系数最大的日照时数(0.94);相对湿度、气压、降雨量与潜在蒸散发的增加为负相关,分别通过了 0.01, 0.05,

0.01 显著性检验,相关系数最大的是相对湿度(0.84);结合表 3 分析可知,延河流域春季蒸散量的增加是由平均温度、日照时数的上升以及相对湿度、气压、降水量的下降综合导致的,主导因子是日照时数。夏季潜在蒸散量的变化是由平均温度、2 m 高风速的上升以及相对湿度、气压、降水量的下降引起的,在该气象因子变化趋势组合下,日照时数仍是潜在蒸散发变化的主导因子。秋季,潜在蒸散发与平均温度、气压的相关关系未通过显著性检验;日照时数呈显著下降趋势,相对湿度呈上升趋势,均通过了 0.01 显著性检验;秋季潜在蒸散量的下降趋势主要是日照时数的下

降、相对湿度和降雨量的上升综合导致的,该气象因子变化趋势组合下主导因子是相对湿度。冬季潜在蒸散量的变化与平均温度、2 m 高风速的正相关关系分别通过了 0.05,0.01 显著性检验,与降雨量呈现不显著的负相关关系;冬季日照时数、相对湿度、降水量均呈上升趋势,该组合下与潜在蒸散发变化最为相关的因子是日照时数,且相对湿度、降水量的上升趋势

并未造成潜在蒸散量的显著减少。一年中春季平均温度、日照时数、相对湿度、2 m 高风速的变化率均是四季中较高的,这可能是春季潜在蒸散发增加速率最大的原因。综上,延河流域各季节潜在蒸散发与气象因子相关性具有显著差异,同一气象因子在不同的季节对潜在蒸散发的影响具有差异,气象因子不同变化趋势的组合对潜在蒸散发的影响不同。

表 3 延河流域潜在蒸散发季节变化与气象因子的相关系数

时间段	平均温度	日照时数	相对湿度	气压	两米高风速	降水量
春季	0.68**	0.94**	-0.84**	-0.32*	0.54**	-0.51**
夏季	0.69**	0.88**	-0.80**	-0.15	0.44**	-0.45**
秋季	0.20	0.80**	-0.82**	-0.04	0.32*	-0.65**
冬季	0.36*	0.67**	-0.64**	-0.54**	0.65**	-0.22
全年	0.68**	0.84**	-0.72**	-0.33*	0.46**	-0.33*

注: ** 表示通过了 0.01 显著性检验, * 表示通过了 0.05 显著性检验。

通过分析延河流域各站点气象因子的变化趋势与变化率及其与潜在蒸散发的相关关系,对延河流域潜在蒸散发空间变化的原因进行探究。如表 4 所示,子长站平均温度、相对湿度、2 m 高风速、降雨量呈现上升趋势,日照时数、气压呈现下降趋势,其中平均温度、气压的变化趋势通过了 99% 显著性检验,2 m 高风速的变化趋势通过了 95% 显著性检验,所有气象因子中变化率最大的是降雨量。志丹站平均温度、气压的变化趋势分别通过了 99%,95% 显著性检验,日照时数呈通过了 90% 显著性检验的上升趋势,相对湿度、2 m 高风速呈现下降趋势,变化率最大的因子是日照时数。

安塞站各气象因子变化趋势与志丹站相同,但安塞站日照时数的上升趋势没有通过显著性检验,2 m 高风速的下降趋势通过了 99% 的显著性检验,变化率最大的因子是日照时数。延安站平均温度、日照时数

呈现上升趋势,分别通过了 99%,90% 的显著性检验;相对湿度、气压、2 m 高风速、降雨量均呈现下降趋势,其中前三者的趋势分别通过了 95%,99%,90% 显著性检验,日照时数是变化率最大的因子。甘泉站平均温度、降雨量呈现上升趋势,日照时数、相对湿度、气压、2 m 高风速呈现下降趋势,其中气压、2 m 高风速的变化趋势分别通过了 95%,99% 显著性检验。延川站平均温度、2 m 高风速、降雨量呈现上升趋势,气压、日照时数、相对湿度呈现下降趋势。其中平均温度、气压的变化趋势通过了 99% 显著性检验,2 m 高风速的上升趋势通过了 95% 的显著性检验。延长站各气象因子的变化趋势和延川站一样,但显著性水平有不同,其中平均温度的上升趋势未通过显著检验,日照的下降趋势通过了 90% 显著性检验。可见,延河流域内各气象因子的变化趋势和变化率具有显著的空间异质性。

表 4 延河流域各站点气象因子变化 M-K 趋势检验统计量与变化率

站点	平均温度		日照时数		相对湿度		气压		两米高风速		降水量	
	变化趋势	变化率	变化趋势	变化率	变化趋势	变化率	变化趋势	变化率	变化趋势	变化率	变化趋势	变化率
子长	4.08***	0.038 9	-0.07	-0.234 0	0.42	0.010 8	-2.89***	-0.001 7	2.05**	0.003 2	0.61	0.867 4
志丹	4.75***	0.042 1	1.86*	4.299 2	-1.47	-0.071 0	-2.10**	-0.001 4	-0.44	-0.001 9	0.98	1.698 8
安塞	3.01***	0.025 7	0.98	2.287 6	-0.26	-0.022 2	-2.14**	-0.001 5	-3.38***	-0.005 9	0.16	0.687 1
延安	3.17***	0.033 4	1.75*	4.966 8	-2.19**	-0.111 5	-5.69***	-0.042 0	-1.65*	0.000 05	-0.12	0.495 0
甘泉	4.52***	0.041 9	-1.19	-2.454 4	-1.37	-0.048 5	-2.14**	-0.001 7	-5.01***	-0.009 6	0.35	0.225 6
延川	2.49***	0.022 4	-0.63	-1.645 8	-0.19	-0.007 5	-2.84***	-0.002 1	2.12**	0.008 9	0.19	1.233 5
延长	1.33	0.012 2	-1.79*	-4.082 0	0.40	0.011 5	-2.87***	-0.001 8	2.07**	0.008 2	0.05	1.041 2

注: *, **, *** 分别表示通过了置信度 90%,95%,99% 的显著性检验。

表 5 是延河流域各站点潜在蒸散发与气象因子的相关性分析结果。对潜在蒸散发增加有着正作用

的是平均温度、日照时数、2 m 高风速,有负作用的是相对湿度、气压、降雨量;在不同的站点,气象因子与

潜在蒸散发的相关关系的显著性检验结果具有差异。各站点潜在蒸散发与平均温度、日照时数呈正相关关系,通过了 0.01 显著性检验;与相对湿度均呈负相关关系,通过了 0.01 显著性检验。子长站、延安站、甘泉站的潜在蒸散发与气压的负相关关系未通过显著性检验,安塞站、延安站的潜在蒸散发与 2 m 高风速的正相关关系未通过显著性检验,降水量与潜在蒸散发的负相关关系仅有安塞站和甘泉站通过了显著性检验(显著性水平分别为 0.05, 0.01)。除延长站外,延河流域其他站点均与日照时数的相关系数最大。可见,气象因子对延河流域潜在蒸散发影响的程度具有空间异质性。结合各站气象因子的变化趋势、变化率综合分析可得,子长站潜在蒸散发在日照时数下降、相对湿度和降水量上升的变化组合下呈上升趋势,且主导因子是日照时数;志丹站温度和日照时数的上升趋势、相对湿度和气压的下降趋势抵消了风速和降水量对潜在蒸散发减少作用,因此该站点潜在蒸散发仍呈上升趋势;安塞站气象因子的变化趋势与志

丹类似,潜在蒸散发也呈现上升趋势,但安塞站的潜在蒸散发高于志丹站,这可能是该气象因子变化趋势组合中降水量的上升速率较小的缘故;延安站只有 2 m 高风速的下降对潜在蒸散发有减少作用,其他气象因子均对蒸散量有增加作用,在该变化趋势组合下,延安站成为延河流域潜在蒸散量最大的区域;甘泉站日照时数、2 m 高风速和降水量对潜在蒸散发减少作用大于温度、相对湿度、气压的增加作用,在该变化趋势组合下,甘泉站潜在蒸散发呈下降趋势;延川站与甘泉站不同的是,延川站 2 m 高风速呈现显著上升趋势,导致延川站在该变化组合下潜在蒸散发呈上升趋势;延长站潜在蒸散发也呈上升趋势,但与延川站不同的是,延长站相对湿度呈上升趋势,这可能是延长站蒸散量低于延川站的原因,且该变化趋势组合下平均温度成为蒸散变化的主导因子。综上可得,延河流域潜在蒸散发的变化与日照时数最为相关,同一气象因子对潜在蒸散发的影响程度具有空间差异,气象因子不同变化趋势的组合对蒸散发的影响具有显著差异。

表 5 延河流域潜在蒸散发与气象因子相关系数的空间特征

站点	平均温度	日照时数	相对湿度	气压	2 m 高处风速	降水量
子长	0.66**	0.74**	-0.64**	-0.25	0.59**	-0.29
志丹	0.66**	0.81**	-0.78**	-0.38*	0.62**	-0.17
安塞	0.57**	0.86**	-0.73**	-0.36*	0.29	-0.50**
延安	0.58**	0.87**	-0.74**	-0.29	0.31	-0.26
甘泉	0.40*	0.86**	-0.58**	-0.18	0.37*	-0.38*
延川	0.63**	0.74**	-0.56**	-0.62**	0.69**	-0.19
延长	0.62**	0.58**	-0.60**	-0.44**	0.44**	-0.31

注: ** 表示通过了 0.01 显著性检验, * 表示通过了 0.05 显著性检验。

4 讨论

气象因子对潜在蒸散发的影响程度在不同季节、不同区域具有显著差异^[1,9-10,12]。本研究发现延河流域 1978—2017 年潜在蒸散发呈现上升趋势,造成该趋势的主导因子是平均温度、日照时数、相对湿度。延河流域秋季的潜在蒸散发呈下降趋势,通过对同期气象因子的变化趋势及其与潜在蒸散发的相关性进行探究发现,秋季潜在蒸散发与平均温度的正相关关系不显著,与气压的负相关关系不显著,与日照时数、2 m 高风速的正相关关系显著,与相对湿度、降水量的负相关关系显著,且相对湿度的相关系数最大,可知延河流域平均温度和气压的显著变化趋势并未对秋季潜在蒸散发产生显著的影响,秋季潜在蒸散发的下降趋势由相对湿度、降水量的上升趋势以及日照时数的下降趋势导致,因此延河流域秋季潜在蒸散发对

水分较为敏感。这与童瑞等^[9]发现黄河中下游蒸散发主要受水量供应条件影响的研究结果类似。

延河流域潜在蒸散发空间差异显著,甘泉站潜在蒸散发在平均温度的上升趋势下呈现显著下降趋势,由此推断甘泉地区存在“蒸发悖论”现象。“蒸发悖论”现象是一个热点话题,该现象普遍存在于我国大部分地区^[24]。研究发现,黑河流域^[12]、青藏高原^[14]、长江流域^[15]的“蒸发悖论”现象分别由风速、辐射和风速、辐射和温度导致;塔里木河流域^[11]则主要由辐射和风向引起,但在不同区域受辐射和风向的影响程度不同;黄河流域上中下游各河段均存在“蒸发悖论”现象,且日照时数、相对湿度或风速等因子可能是黄河流域“蒸发悖论”现象的主导因子^[25]。总的看来,温度、日照时数、相对湿度、气压、风速、降水量等气象因子都可能成为“蒸发悖论”现象的主导因素,“蒸发悖论”现象的主导因素具有时空差异,而且相同因素不

同变化的组合也会导致潜在蒸散的变化^[1,12]。本研究中甘泉站潜在蒸散发的变化与日照时数、2 m 高风速、降水量的相关关系均通过了显著性检验,从简单的相关角度分析可得,甘泉地区的“蒸发悖论”现象主要由日照时数、2 m 高风速的下降和降水量的上升综合导致;且相对而言,甘泉站相对湿度和气压下降的变化率比其他站小,相对湿度和气压在某种意义上也对蒸散量的减少具有作用。因此,导致蒸发悖论现象的原因很复杂,有待进一步的定量研究。

5 结论

(1) 延河流域多年平均潜在蒸散量整体呈现上升趋势,但潜在蒸散发变化趋势、变化率具有时空差异。

(2) 延河流域气象因子的变化趋势、变化率具有显著的时空差异,同一气象因子与潜在蒸散发变化的相关性具有时空差异,气象因子不同变化趋势的组合对蒸散发的影响具有显著差异。总的来说,潜在蒸散发的变化与平均温度、日照时数与相对湿度显著相关,与日照时数最为相关。

(3) 延河流域局部存在蒸发悖论现象,主要由日照时数、2 m 高风速的下降和降水量的上升综合导致,但是气压、相对湿度等气象因子的影响也很重要。

[参 考 文 献]

- [1] 尹云鹤,吴绍洪,戴尔阜.1971—2008 年我国潜在蒸散时空演变的归因[J].科学通报,2010,55(22):2226-2234.
- [2] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Requirements [M]. Italy: Food & Agriculture Org., 1998.
- [3] Hargreaves G H. Moisture availability and crop production [J]. Transactions of the American Society of Agricultural Engineers (ASAE), 1975,18(5):980-984.
- [4] Priestley C H B. Taylor R J. On the assessment of the surface heat flux and evaporation using large-scale parameters [J]. Monthly Weather Review, 1972, 100(2):81-92.
- [5] Hamon W R. Estimating potential evapotranspiration [J]. Journal Irrig. Drain. Div. ASCE, 1963,128(1):324-338.
- [6] Thornthwaite C W. An approach toward a rational classification of climate [J]. Geographical Review, 1948, 38(1):55-94.
- [7] Rohwer Carl. Evaporation from free water surface [J]. U. S. department of Agriculture Technical Bulletin, 1931,28(6):345-349.
- [8] 赵娜,王治国,张复明,等.海河流域潜在蒸散发估算方法及其时空变化特征[J].南水北调与水利科技,2017,15(6):11-16,65.
- [9] 童瑞,杨肖丽,任立良,等.黄河流域 1961—2012 年蒸散发时空变化特征及影响因素分析[J].水资源保护,2015, 31(3):16-21.
- [10] 钟巧,焦黎,李稚,等.博斯腾湖流域潜在蒸散发时空演变及归因分析[J].干旱区地理,2019,42(1):103-112.
- [11] 韩松俊,胡和平,杨大文,等.塔里木河流域山区和绿洲潜在蒸散发的不同变化及影响因素[J].中国科学(E 辑):技术科学,2009,39(8):1375-1383.
- [12] 赵捷,徐宗学,左德鹏.黑河流域潜在蒸散发量时空变化特征分析[J].北京师范大学学报(自然科学版), 2013,49(S1):164-169.
- [13] Roderick Michael L, Farquhar Graham D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years [J]. Science, 2002,298(5597):1410-1411.
- [14] Zhang Yongqiang, Liu Changming, Tang Yanhong, et al. Trends in pan evaporation and reference and actual evapotranspiration across the Tibetan Plateau [J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2007,112(12): 1-12.
- [15] Xu Chongyu, Gong Lebing, Jiang Tong, et al. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration and pan evaporation in Changjiang (Yangtze River) catchment [J]. Journal of Hydrology, 2006, 327(1/2):81-93.
- [16] 杨晓楠.黄土高原多尺度景观格局对径流及输沙过程的影响[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [17] 焦菊英,王志杰,魏艳红,等.延河流域极端暴雨下侵蚀产沙特征野外观测分析[J].农业工程学报,2017, 33(13):159-167.
- [18] 张晓琳,熊立华,林琳,等.5 种潜在蒸散发公式在汉江流域的应用[J].干旱区地理,2012,35(2):229-237.
- [19] 赵玲玲,夏军,许崇育,等.水文循环模拟中蒸散发估算方法综述[J].地理学报,2013,68(1):127-136.
- [20] 何奕,傅德平,赵志敏,等.基于 GIS 的新疆降水空间插值方法分析[J].水土保持研究,2008,15(6):35-37.
- [21] 曹洁萍,迟道才,武立强,等. Mann-Kendall 检验方法在降水趋势分析中的应用研究[J].农业科技与装备,2008(5):35-37,40.
- [22] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem [J]. Applied Statistics, 1979, 28(2): 126-135.
- [23] 谢炯光,曾琮,纪忠萍.中国近 30 年来气象统计预报进展[J].气象科技,2003(2):67-79,83.
- [24] 泮苏莉.浙江省潜在蒸散发变化及水文过程研究[D].浙江 杭州:浙江大学,2017.
- [25] 马雪宁,张明军,王圣杰,等.“蒸发悖论”在黄河流域的探讨[J].地理学报,2012,67(5):645-656.