

河西地区潜在蒸散发量变化及其敏感性分析

张彩霞¹, 花婷¹, 郎丽丽²

(1. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所 沙漠与沙漠化重点实验室, 兰州 730000; 2. 中国科学院 地理科学与资源研究所 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101)

摘要:基于 Penman-Monteith 方程式计算了河西地区的潜在蒸散发量,应用气候倾斜率分析了主要气候因子的变化趋势,并基于湿润指数对河西地区地表干湿状况的时空变化特征进行了分析,基于情境假设法评估了潜在蒸散发量对各气象因子的敏感性。结果表明:1975—2012年河西地区最高温度和年均温度显著升高,而风速显著降低。随着海拔的升高,降水量和湿润指数均显著增加,潜在蒸散发量显著降低;平均风速和日照时间与潜在蒸散发量正相关,而相对湿度和平均气压为负相关。河西地区平均温度、平均风速、日照时间、相对湿度和气压变化能够引起潜在蒸散发量变化的百分比分别为41.1%,22.9%,19.1%,16.4%和0.5%。

关键词:潜在蒸散发; 干旱; 湿润指数; 河西地区

中图分类号:K903

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2016)04-0357-06

Analysis of Potential Evapotranspiration and Its Sensitivity in Hexi Region

ZHANG Caixia¹, HUA Ting¹, LANG Lili²

(1. Key Laboratory of Desert and Desertification, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 2. Key Laboratory of Water Cycle & Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: The potential evapotranspiration of Hexi regions was calculated based on the Penman-Monteith equation. Slope analysis was employed to assess the main meteorological factor trends from the year of 1975 to the year of 2012. The spatiotemporal patterns of surface humidity changes in the Hexi region were discussed using the humidity index. The results indicated that the maximum temperature and the mean annual temperature had increased significantly, while the wind velocity had decreased significantly in this region. With the increase of the elevation, the precipitation and the humid index increased significantly, while the potential evapotranspiration decreased significantly. In addition, sensitivity of ET_0 to climatic changes under different climate scenarios was also evaluated. The results indicated that the potential evapotranspiration was positively related to the average temperature, average wind velocity and the sunshine duration, while it was negatively related to the relatively humid and air press. The variation percentage in the potential evapotranspiration caused by the changes of the individual meteorological factors (average temperature, average wind velocity, the sunshine time, relatively humid, air press) was 41.1%, 22.9%, 19.1%, 16.4% and 0.5%, respectively.

Keywords: potential evapotranspiration; drought; humidity index; Hexi region

区域粉尘释放主要受到当地气候(大气环流、温度和降水等)、土壤条件(土壤质地、结构和表土含水量)和地面性质(地表可蚀性和植被情况)等因素的共同制约^[1],区域气候变化极大程度影响着区域粉尘释放的强度^[2]和过程^[3],因此研究区域气候背景变化及

其影响因素,对于准确诠释区域粉尘释放机制具有重要的现实意义。潜在蒸散发是衡量区域水分充足条件下蒸散发能力的参数。由于潜在蒸散发受太阳辐射、风速、相对湿度和气温等多因素的共同影响^[5-6],使其成为气候变化研究的热点参数。目前,基于多种

尺度的潜在蒸散发对气候变化响应的研究已广泛开展,如 Thomas A.^[7]指出 1954—1993 年中国的潜在蒸散发呈下降趋势,Huo 等^[8]指出中国西北地区的潜在蒸散发量以年均 3 mm 的速度显著降低。由于利用潜在蒸散发量和降水比值(即干燥度指数)或其倒数(即湿润指数)能够综合反映区域地表干湿状况,这两种指数被广泛应用于区域干旱趋势研究^[9-13]和气候区划^[14-16]相关的研究中。同时潜在蒸散发量的主要影响因素分析也广泛开展,如 Gong 等^[17]通过计算敏感系数指出影响长江流域潜在蒸散发的主要因素依次为相对湿度、太阳辐射、温度和风速。Fu and Feng^[18]通过计算湿润指数指出温度和相对湿度能各自引起全球陆地潜在蒸散发量 35% 的变化,风速变化可以引起 15%,而辐射能量变化可以引起 5%。刘昌明等^[19]通过潜在蒸散发量敏感系数的计算指出全国范围内,潜在蒸散发对气象因子的敏感性从大到小依次为水汽压、最高气温、太阳辐射、风速和最低气温。然而,目前对于影响河西地区潜在蒸散发的主要气象因子的定量评价尚未开展,各气象因子变化对此区潜在蒸散发量的变化产生的影响并未得到有效的评估。本文基于 Penman-Monteith 方程式计算河西地区潜在蒸散发量,并基于情境假设法定量评估潜在蒸散发量的敏感性。

1 研究区概况

河西地区系指今甘肃的武威、张掖、酒泉等地,因位于黄河以西,自古称为河西,又因其为夹在祁连山与合黎山之间的狭长地带,亦称河西走廊。此区位于青藏高原、腾格里沙漠和黄土高原的交汇地带,是中亚粉尘释放的主要源地之一。河西地区属于典型的干旱气候区,大部分地区多年平均降水量不足 200 mm。在气候变化和人类活动的持续影响下,此区持续性的干旱事件增多,如 1989—1990 年连续 2 a 干旱,1995—1997 年连续 3 a 干旱^[4]。研究地表干湿状况的时空变化有助于加深此区气候变化认识,掌握干旱发生发展规律,从而为防灾减灾和农业水资源管理提供依据,也为此区粉尘释放研究奠定气候背景的理论基础。

2 资料和方法

2.1 潜在蒸散发量的计算

潜在蒸散发的计算采用了 FAO-56 Penman-Monteith 方程式^[20]。由于该公式依据能量平衡原理和水汽紊流扩散原理,综合考虑温度、日照时数、相对湿度和风速等气象因子对蒸散发的影响,在不同区域尺度的潜在蒸散发估算中被广泛应用^[21-22]。

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \frac{900}{T + 273}\gamma u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中:ET₀ 为潜在蒸散发(mm/mon);Δ 为饱和蒸汽压表示温度曲线的梯度(kPa/°C);R_n 为冠层表面净辐射(MJ/m²/mon);G 为土壤热通量(MJ/m²/mon);T 为 2 m 高度处的平均气温(°C);u₂ 为 2 m 高度处的风速(m/s),由于所获得的气象站的风速为 10 m 高度处的,需要通过换算得到;e_s 为饱和水汽压(kPa);e_a 为实际水汽压(kPa);γ 是干湿表常数(kPa/°C)。公式所需的气象数据均从中国气象局获得,包括最高温度,最低温度,降水,风速,相对湿度,日照时间,气压等参数,覆盖了马鬃山、敦煌、安西、酒泉、鼎新、玉门镇、高台、张掖、山丹、永昌、武威、民勤、乌鞘岭和景泰等 14 个气象站点 1975—2012 年间各月的数据。基于 Mann-Kendall 检验方法对各气候要素的时间序列变化趋势的显著性进行了检验,该分析被广泛应用在时间序列数据的趋势分析中^[23]。

2.2 湿润指数的计算

定义湿润指数为:MI = P/ET₀,式中:MI 为湿润指数,P 为降水量,ET₀ 为潜在蒸散发量。据 UNCCD 分类,0.5 < MI < 0.65 为半湿润区、0.2 < MI < 0.5 为半干旱区、0.05 < MI < 0.2 为干旱区,MI < 0.05 为极端干旱区^[24]。张方敏等^[16]依据湿润指数对区域干湿状况进行划分标准为 0.5 < MI < 1.0 为半湿润区、0.2 < MI < 0.5 为半干旱区、0.03 < MI < 0.2 为干旱区、MI < 0.03 为极度干旱区。

2.3 潜在蒸散发量的敏感性分析

设置不同气候变化情景的方法是评价潜在蒸散发量敏感性的手段之一^[25],这种方法通过假定平均温度、风速、日照时间、相对湿度和气压等影响潜在蒸散发量的参数在观测所得的气象数据基础上有一定幅度(-5%, -10%, -20%, +5%, +10%, +20%)的变化,而且这种变化仅限于单个参数,其余参数保持不变,以比较不同条件下潜在蒸散发量的变化,从而定量评价特定参数变化对于潜在蒸散发量的影响。

3 结果与分析

3.1 1975—2012 年主要气候要素的变化

各站点 1975—2012 年的气候倾向率见表 1。可以看出,各站点气候要素变化情况特征各异。整个河西地区气候变化最明显的特征是最高温度和年均温度显著升高,而风速显著降低。此外,降水量、最低温、日照时数、大气压和蒸散发量相对增加,相对湿度相对减少,但均不显著。

表 1 主要气候因子的气候倾向率

10 a

地点	降水量/ mm	最低 温度/°C	最高 气温/°C	年均 温度/°C	日照 时数/h	相对 湿度/%	风速/ (m·s ⁻¹)	大气压/ hPa	蒸散 量/mm
马鬃山	-5.192	-0.710*	0.944*	0.400*	5.583*	0.926*	-0.115*	0.001	24.689*
敦煌	1.750	0.100	0.385*	0.464*	4.288*	-0.243	-0.061	-0.012	4.065
安西	-0.737	0.300	0.474*	0.396*	1.467	1.389*	-0.310*	-0.028*	-25.107
玉门镇	0.958	-0.143	0.706*	0.368*	-1.269	0.714*	-0.469*	-0.009	-41.630*
鼎新	4.296	-0.400	0.412*	0.367*	0.051	-0.792	-0.103	-0.007	7.529
酒泉	-0.290	-0.300	0.500*	0.310*	1.406	0.556	-0.117*	-0.018*	0.765
高台	6.038	-0.111	0.545*	0.417*	-1.187	-0.833	-0.256*	-0.023*	-5.130
张掖	0.250	0.296	0.500*	0.525*	1.250	-0.965*	0.042	-0.007	29.594*
山丹	5.875	0.821*	0.360*	0.495*	-4.479*	-0.179	-0.117*	-0.019*	-4.201
永昌	9.684	0.167	0.500*	0.378*	3.687*	0.990*	-0.156*	0.001	2.405
武威	8.607	0.474	0.462*	0.658*	3.148*	-1.970*	-0.039	-0.013	21.852*
民勤	5.750	0.286	0.190	0.466*	5.088*	-0.341	-0.067	-0.013	12.756
乌鞘岭	-1.000	0.286	0.536*	0.402*	3.744*	0.833	0.005	-0.002	12.107
景泰	-1.429	0.667*	0.500*	0.542*	-1.352	-0.194	-0.167*	-0.015*	-6.696
河西地区	3.145	0.183	0.421*	0.431*	0.183	-0.050	-0.129*	0.005	3.059

注: * 表示通过了 $\alpha=0.05$ 的 Mann-Kendall 趋势检验。

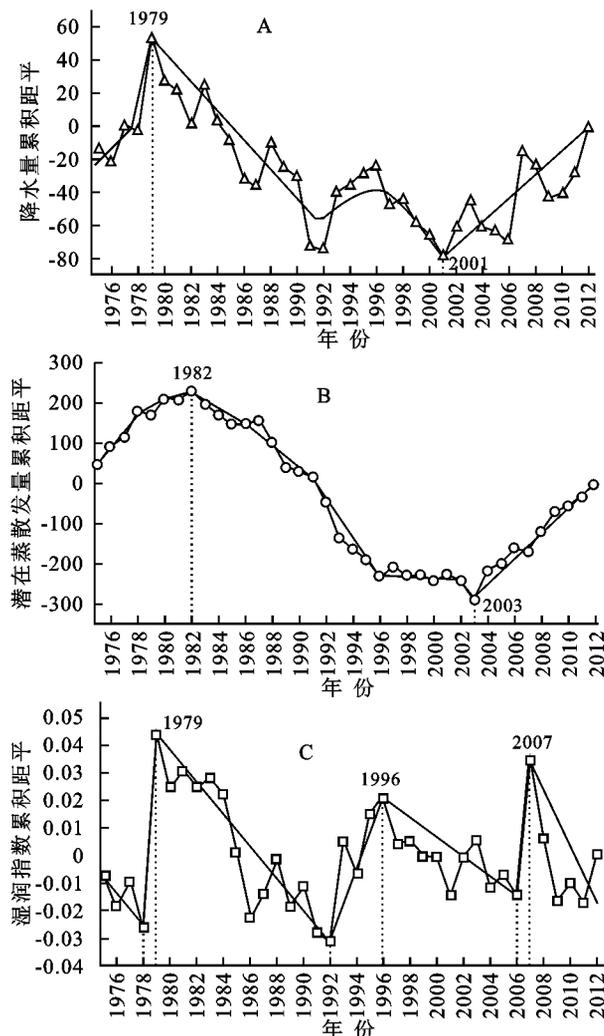


图 1 降水量、潜在蒸散发量和湿润指数累积距平曲线

3.2 湿润指数累积距平的变化趋势

1975—2012 年河西地区平均降水量约为 138 mm,1991 年出现最小值约 96 mm,1979 年出现最大值约 195 mm。1976—1979 年间降水量累积距平呈上升趋势,为多雨期,1979—2001 年累积距平线波动下降,为相对少雨期。2001—2012 年间累积距平线波动上升,区内降雨较前期相对增多(图 1A)。1975—2012 年河西地区的年潜在蒸散发量的平均值约为 1 176 mm,最小值为 1 087 mm,出现在 1993 年,最大值为 1 250 mm,出现在 2004 年。累积距平曲线变化表明 1975—2012 年累积距平呈现出增加—减少—增加的变化趋势,其中 1975—1982 年潜在蒸散发量累积距平趋于增加,而 1983—2003 年趋于减少,2003—2012 年趋于增加(图 1B)。湿润指数累积距平波动较大,正负交替明显,说明湿润指数的年代际变化并不稳定(图 1C)。由于湿润指数正距平表示区域处于相对湿润年份,负距平表示区域处于相对干旱年份,因此,湿润指数累积距平的变化趋势可以表征区域干湿变化趋势。据湿润指数累积距平曲线变化可以看出:1975—1978 年、1979—1992 年、1996—2006 年以及 2007—2012 年湿润指数累积距平呈下降趋势,期间河西地区湿润指数以负距平为主,表明区域处于相对较干旱时期,其余阶段则呈上升趋势。

3.3 湿润指数的空间分布特征

图 2 为河西地区多年平均湿润指数空间分布图,其中空间分布趋势是在 ArcGIS 中运用反距离加权法进行插值运算所得。可以看出,河西地区湿润指数介

于 0.028 到 0.458 之间,大部分地区属于干旱气候,敦煌附近地区属于极端干旱气候,而乌鞘岭附近地区为半干旱气候。从空间分布特征来看,从东南向西北湿润指数降低,表明气候干燥程度增加。从站点来看,乌鞘岭的湿润指数最大,而敦煌的湿润指数最小。

3.4 湿润指数的季节变化

图 3 为湿润指数的季节变化趋势。春季、秋季和冬季湿润指数均呈现线性增加趋势,但只有冬季湿润指数显著增加($\alpha=0.01, n=38$)。从数值上来看,春季湿润指数波动于 0.31~1.45,夏季湿润指数波动于 0.90~3.53,秋季湿润指数波动于 0.43~2.28,冬季湿润指数波

动于 0.12~2.36。四季多年平均湿润指数分别为:0.76, 1.89, 1.18, 0.57, 即夏季>秋季>春季>冬季。

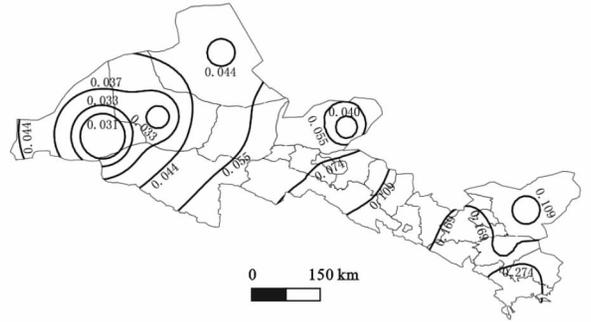


图 2 河西地区多年平均湿润指数空间分布

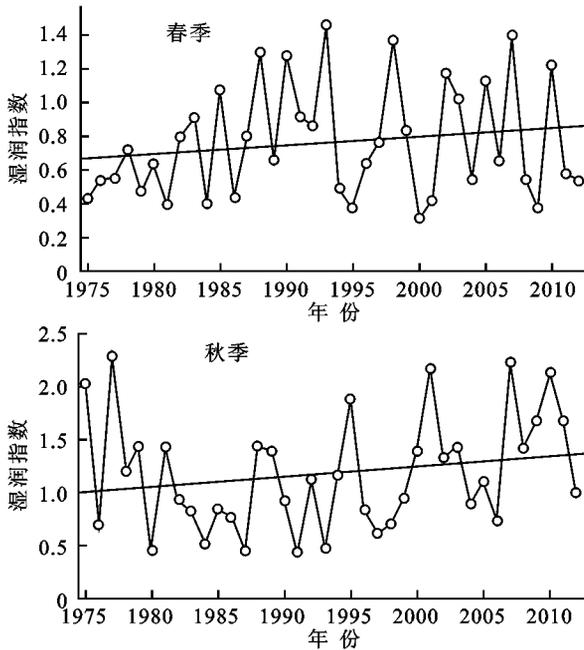


图 3 湿润指数的季节变化

3.5 湿润指数与高程的关系

图 4 为各气候要素与高程之间的关系,可以看出,随着海拔的升高,河西地区降水量和湿润指数均显著增加($p<0.01, n=14$),潜在蒸散发量显著降低($p<0.01, n=14$),说明海拔高度变化引起的水热组合变化是影响此区气候格局形成的主要因素之一。

3.6 潜在蒸散发量对局地气象要素的敏感性

湿润指数是反映区域地表干湿状况的重要指标,从其计算公式来看,影响区域湿润指数变化的主要因素为降水量和潜在蒸散发量。在降水量一定的前提下,对区域潜在蒸散发量产生主要影响的各气象因素就成为了影响湿润指数的主要因子。本文通过假定平均温度、风速、日照时间、相对湿度和气压等某一种参数在现有的观测值基础上有一定幅度(-5%, -10%, -20%, +5%, +10%, +20%)的变化,同时保持其余参数不变,并分别计算变化条件下的潜在蒸散发量,进而确定不同气象因子对于潜在蒸散发量变化的影响程度。表 2 为

不同气候因子的变化条件下潜在蒸散发量的变化率,结果表明,平均风速和日照时间与潜在蒸散发量正相关,而相对湿度和平均气压为负相关。温度通过影响空气容纳水蒸气的能力变化而影响潜在蒸散发量,在河西地区当平均温度增加 5%, 10% 和 20% 时,潜在蒸散发量分别增加 2.42%, 4.86%, 9.78%, 当平均温度减少 5%, 10% 和 20% 时,潜在蒸散发量分别减少 2.40%, 4.79% 和 9.47%。风速通过影响空气流动的速度而影响潜在蒸散发量,当平均风速增加 5%, 10% 和 20% 时,潜在蒸散发量分别增加 1.33%, 2.63% 和 5.16%, 当平均风速减少 5%, 10% 和 20% 时,潜在蒸散发量分别减少 1.35%, 2.73% 和 5.58%。日照时间主要通过影响空气温度而影响潜在蒸散发量,当日照时间增加(减少)5%, 10% 和 20% 时,潜在蒸散发量分别增加(减少)1.12%, 2.24% 和 4.48%。当相对湿度增加 5%, 10% 和 20% 时,潜在蒸散发量分别减少 0.97%, 1.95% 和 3.92%, 而当相对湿度减少 5%, 10% 和

20%时,潜在蒸散发量分别增加 0.96%,1.91%和 3.78%;当气压增加 5%,10%和 20%时,潜在蒸散发量分别减少 0.03%,0.05%和 0.10%,当气压减少 5%,10%和 20%时,潜在蒸散发量分别增加 0.03%,0.06%和 0.13%。平均温度、平均风速、日照时间、相对湿度和气压变化能够引起潜在蒸散发量变化的百分比分别为 41.1%,22.9%,19.1%,16.4%和 0.5%(表 2)。结果表明影响河西地区潜在蒸散发量的主要气候因子是平均温度和平均风速,这一结论与前文得出的河西地区气候变化最显著的特征是平均温度显著升高和风速显著降低相吻合。

4 讨论与结论

本文研究表明 1975—2012 年河西地区最高温度和年均温度显著升高,这与以往研究普遍认为河西地区气候变暖的结果相一致^[26]。河西地区的降水有增加趋势,但上升的趋势并不显著。研究表明河西地区 1975—1993 年潜在蒸散发量趋于减少,而 1994—2012 年趋于增加。这与王莺等^[10]认为的 1960—2011 年石羊河流域降水量和潜在蒸散发趋于增加的结论相一致。另外,由于区域干湿变化与地表水分收支(降水和蒸发)的变化息息相关,判断区域干旱化趋势要综合考虑降水和蒸发的变化,湿润指数分析表明河西地区的湿润指数变化具有微弱上升的线性趋势,但这种变化趋势并不显著。正是这种不显著的变化,导致了目前关于此区气候趋势“暖干”和“暖湿”的讨论。如刘明春等^[27]指出石羊河流域气候干旱指数呈逐年代增大趋

势,祁连山山口来水量呈逐年减少趋势,暖干化明显;贾文雄等^[28]通过计算湿润指数指出 20 世纪 60 年代以来祁连山及河西走廊气候趋于变湿。

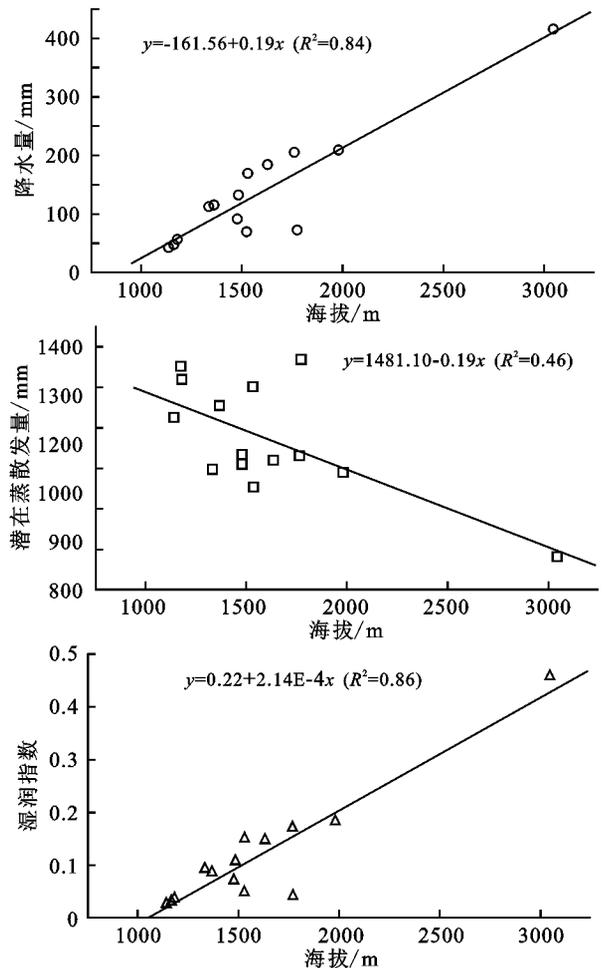


图 4 气候要素与高程的关系

表 2 不同气候情景下潜在蒸散发量的敏感性分析

参数	-20%	-10%	-5%	5%	10%	20%	平均影响/%
平均温度	-9.47	-4.79	-2.40	2.42	4.86	9.78	41.1
平均风速	-5.58	-2.73	-1.35	1.33	2.63	5.16	22.9
日照时间	-4.48	-2.24	-1.12	1.12	2.24	4.48	19.1
相对湿度	3.78	1.91	0.96	-0.97	-1.95	-3.92	16.4
气压	0.13	0.06	0.03	-0.03	-0.05	-0.10	0.5

研究结果表明河西地区气候要素变化最明显的特征是最高温度和年均温度显著升高,而风速显著降低。此外,河西地区 1975—2012 年降水量、最低温、日照时数、大气压和蒸散发量相对增加,相对湿度相对减少,但均不显著。1976—1979 年为区域多雨期,1979—2001 年为相对少雨期,2001—2012 年区内降雨较前期相对增多。1975—2012 年潜在蒸散发量累积距平呈现出增加—减少—增加的变化趋势。湿润指数累积距平波动较大,正负交替明显,说明湿润指数的年代际变化并不稳定。春季、秋季和冬季湿润指

数均呈现线性增加趋势,但只有冬季湿润指数显著增加。随着海拔的升高,河西地区降水量和湿润指数均显著增加,潜在蒸散发量显著降低。平均风速和日照时间与潜在蒸散发量正相关,而相对湿度和平均气压为负相关。平均温度、平均风速、日照时间、相对湿度和气压变化能够引起潜在蒸散发量变化的百分比分别为 41.1%,22.9%,19.1%,16.4%和 0.5%。此外,本文仅是基于有限站点的气象资料进行计算和分析,未能结合具体的试验展开对比研究^[29],因此分析结果具有一定的局限性。

参考文献:

- [1] Lu Hua, Shao Yaping. Toward quantitative prediction of dust storms: an integrated wind erosion modelling system and its applications [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2001, 16(3): 233-249.
- [2] Wang Xunming, Zhou Ziji, Dong Zhibao. Control of dust emissions by geomorphic conditions, wind environments and land use in northern China: An examination based on dust storm frequency from 1960 to 2003 [J]. *Geomorphology*, 2006, 81(3/4): 292-308.
- [3] Zhu C, Wang B, Qian W. Why do dust storms decrease in northern China concurrently with the recent global warming? [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(18).
- [4] 刘洪兰, 张强, 王胜, 等. 河西走廊春季降水的空间异常分布及年代际变化 [J]. *中国沙漠*, 2014, 34(5): 1386-1392.
- [5] 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*, 2009, 39(8): 1375-1383.
- [6] 赵玲玲, 夏军, 王中根, 等. 北京潜在蒸散发量年内一年际的气候变化特征及成因辨识 [J]. *自然资源学报*, 2013, 28(11): 1911-1921.
- [7] Thomas Axel. Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China [J]. *International Journal of Climatology*, 2000, 20(4): 381-396.
- [8] Huo Z, Dai X, Feng S, et al. Effect of climate change on reference evapotranspiration and aridity index in arid region of China [J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 492: 24-34.
- [9] 普宗朝, 张山清, 王胜兰, 等. 近 48 a 新疆干湿气候时空变化特征 [J]. *中国沙漠*, 2011, 31(6): 1563-1572.
- [10] 王莺, 李耀辉, 姚玉璧, 等. 石羊河流域地表干湿变化的时空分布特征 [J]. *资源科学*, 2013, 35(10): 2112-2120.
- [11] 苏秀程, 王磊, 李奇临, 等. 近 50 a 中国西南地区地表干湿状况研究 [J]. *自然资源学报*, 2014, 29(1): 104-116.
- [12] 王素萍, 李耀辉, 冯建英, 等. 1961—2012 年甘肃省干湿变化特征及其影响因子 [J]. *中国沙漠*, 2014, 34(6): 1624-1632.
- [13] 王允, 刘普幸, 曹立国, 等. 基于湿润指数的 1960—2011 年中国西南地区地表干湿变化特征 [J]. *自然资源学报*, 2014, 29(5): 830-838.
- [14] 杨建平, 丁永建, 陈仁升, 等. 近 50 年中国干湿气候界线波动及其成因初探 [J]. *气象学报*, 2003, 61(3): 364-373.
- [15] 吴绍洪, 尹云鹤, 郑度, 等. 近 30 年中国陆地表层干湿状况研究 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2005, 35(3): 276-283.
- [16] 张方敏, 申双和. 中国干湿状况和干湿气候界限变化研究 [J]. *南京气象学院学报*, 2008, 31(4): 574-579.
- [17] Gong Lebing, Xu Chongyu, Chen Deliang, et al. Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 329(3/4): 620-629.
- [18] Fu Qiang, Feng Song. Responses of terrestrial aridity to global warming [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(13): 7863-7875.
- [19] 刘昌明, 张丹. 中国地表潜在蒸散发敏感性的时空变化特征分析 [J]. *地理学报*, 2011, 66(5): 579-588.
- [20] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop evapotranspiration—Guidelines for computing crop water requirements—FAO Irrigation and drainage paper 56 [J]. FAO, Rome, 1998, 300(9): D05109.
- [21] Cai J B, Liu Y, Lei T W, et al. Estimating reference evapotranspiration with the FAO Penman - Monteith equation using daily weather forecast messages [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 145(1/2): 22-35.
- [22] Jabloun M, Sahli A. Evaluation of FAO-56 methodology for estimating reference evapotranspiration using limited climatic data: Application to Tunisia [J]. *Agricultural Water Management*, 2008, 95(6): 707-715.
- [23] 刘小莽, 郑红星, 刘昌明, 等. 海河流域潜在蒸散发的气候敏感性分析 [J]. *资源科学*, 2009, 31(9): 1470-1476.
- [24] Hulme Mike. Recent Climatic Change in the World's Drylands [J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, 23(1): 61-64.
- [25] Tabari H, Talaei P H. Sensitivity of evapotranspiration to climatic change in different climates [J]. *Global and Planetary Change*, 2014, 115: 16-23.
- [26] 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨 [J]. *冰川冻土*, 2002, 24(3): 219-226.
- [27] 刘明春, 张强, 邓振镛, 等. 气候变化对石羊河流域农业生产的影响 [J]. *地理科学*, 2009, 29(5): 727-732.
- [28] 贾文雄, 何元庆, 李宗省, 等. 祁连山及河西走廊地表干湿变化的时空分布 [J]. *地球科学: 中国地质大学学报*, 2010, 35(2): 268-276.
- [29] 张强, 张之贤, 问晓梅, 等. 陆面蒸散量观测方法比较分析及其影响因素研究 [J]. *地球科学进展*, 2011, 26(5): 538-547.