

天山北坡潜在蒸发量时空分布特征

刘琳, 张正勇, 颜巧

(石河子大学 理学院, 新疆 石河子 832000)

摘要:利用研究区 10 个气象站 1960—2010 年的逐日气象资料,采用 FAO Penman-Monteith 模型计算研究区潜在蒸发量,运用气候倾向率和统计学原理分析了研究区潜在蒸发量的时间变化趋势,并在 ArcGIS 环境下通过 Spline 插值法分析了潜在蒸发量变化的空间分异,最后运用多元回归分析法对影响潜在蒸发量变化的主导因素进行了探讨,结果表明:近 50 年研究区年潜在蒸发量总体呈增加趋势,其年际变化倾向率为 1.291 mm/10 a;年潜在蒸发量自 20 世纪 60 年代逐渐减少,80 年代减少到最低,90 年代以后逐渐增加,且增加幅度较大;从季节来看,夏季的潜在蒸发量呈减小的趋势,其他季节呈增加的趋势,其中秋季的增加幅度最大(1.635 mm/10 a);空间分布来看,东、西部地区潜在蒸发量低于中部地区;最低气温和平均风速是影响研究区潜在蒸发量变化的主要因素。

关键词:潜在蒸发量;时空分异;天山北坡;Penman-Monteith 模型

中图分类号:P426.2

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)05-0306-06

Spatiotemporal Changes of Potential Evaporation of the Northern Slope in Tianshan Mountains

LIU Lin, ZHANG Zhengyong, YAN Qiao

(College of Geography Science, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

Abstract: Based on the daily data of 10 meteorological stations from 1960 to 2010, potential evapotranspiration was calculated using the Penman-Monteith Method recommended by FAO. The time changing trend of potential evaporation on the northern slope of Tianshan Mountains was analyzed. Using the method of spline under ArcGIS, the spatial distribution of potential evaporation was drawn in order to research regional difference. And the multivariate regression method was used to examine the dominant factor influencing potential evaporation. The results indicated that there was an increasing trend in general because the changing rate of annual potential evaporation varied at 1.291 mm/10 a; Annual potential evaporation declined since the 1960s, reached to the minimum in 1980s, gradually increased in later part of 1990s and the increase was significant; The potential evaporation decreased in summer, however, increased in other seasons especially in autumn (1.635 mm/10 a). The minimum temperature and average wind speed are the main factors affecting the potential evaporation on northern slope of Tianshan Mountains.

Keywords: potential evaporation; spatiotemporal pattern; the northern slope of the Tianshan Mountains; Penman-Monteith model

潜在蒸散(发)是指充分供水条件下的区域蒸散发能力,是实际蒸散量的理论上限,通常也是计算实际蒸散量的基础,广泛应用于气候干湿状况分析、水资源合理利用和评价、农业作物需水和生产管理、生态环境(如荒漠化)等研究中。在我国开展的全国水资源综合评价中,潜在蒸散量是水资源评价关注的主要内容之一^[1-4]。近 50 年来全球平均气温呈显著升

高趋势,但目前研究结果表明,自 20 世纪 50 年代至 21 世纪初全球潜在蒸发量普遍减少,这种预期值与观测值的相悖现象,Michael 等^[5]称之为“蒸发悖论”(pan evaporation paradox)。“蒸发悖论”在印度、委内瑞拉以及我国不少区域都得到了验证^[6-10]。近年,一些学者就新疆及天山山区的气候变化特征进行了许多研究,刘波^[11]、张明军^[12]、胡伟^[13]、霍文^[14]等也

曾对新疆及天山山区的潜在蒸发量进行了分析,其中张明军等^[12]认为近50年来该区域潜在蒸发量总体上呈减小趋势,除秋季外其他季节亦为减小趋势,风速是影响潜在蒸发量变化的主导因素。天山北坡经济带是新疆社会经济和农业发展的重点区域,但缺少对天山北坡潜在蒸发量的时空分异研究。

天山北坡系天山山脉中段博格达山、依连哈比尕山和婆罗克努山分水岭以北的区域,是一个大幅度、多层次而有规律的典型的“山盆系统”。其区域生态环境特点是立体型结构,山地、绿洲、荒漠共同构成了天山北坡相互依存和相互作用的完整生态系统,而维护这个生态系统的相对稳定,对于维护绿洲的生态平衡和实现社会经济的可持续发展具有不可估量的作用。所以,分析天山北坡潜在蒸发量的时空变化特征,是研究天山北坡气候、水文循环和人类活动之间相互作用规律的基础,可以为正确制定天山北坡区域发展战略,保护和治理天山北坡生态环境提供科学依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据基础

以天山北坡1960—2010年10个气象站的逐日气象资料(平均气温、最高气温、最低气温、日照时数、平均相对湿度、平均风速、气压)为基础数据,数据来源于中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.nmic.cn/>)。

1.2 研究方法

计算潜在蒸发量的模型包括:Penman模型、Thornthwaite模型、Selianinov模型等^[15-17]。本研究应用模拟效果比较精确的经世界粮农组织(FAO)1998年修正的Penman-Monteith模型计算研究区潜在蒸发量。分别计算出各气象站的日潜在蒸发量,计算公式如下^[11]:

$$ET_0 = \frac{0.48\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34U_2)} \quad (1)$$

式中: ET_0 ——潜在蒸发量(mm/d); R_n ——净辐射 $[\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]$; G ——土壤热通量 $[\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]$; γ ——干湿常数($\text{kPa}/^\circ\text{C}$); U_2 ——2 m 高处的风速(m/s); e_s ——平均饱和水汽压(kPa); e_a ——实际水汽压(kPa); T ——平均气温($^\circ\text{C}$)。

$$R_n = (1-a) \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a - Q \left(\frac{T_{\max,k}^4 - T_{\min,k}^4}{2} \right) \\ (0.56 - 0.08\sqrt{e_a}) \left(0.1 + 0.9 \frac{n}{N} \right) \quad (2)$$

式中: R_n ——大气顶层的太阳辐射 $[\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})]$; N ——最大日照时数(h); n ——实际日照时数(h); Q ——波尔兹曼常数($4.903 \times 10^{-9} \text{ MJ}/(\text{K}^4 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{d})$);

$T_{\max,k}$ ——最高绝对气温(K); $T_{\min,k}$ ——最低绝对气温(K); a_s ——云全部遮盖下($n=0$)大气外界辐射到达地面的分量; b_s ——晴天($n=N$)大气外界辐射到达地面的分量; a ——地表反射度,取值0.23。据侯光良等^[18]对中国多年实测辐射数据的经验回归系数,研究区的 a_s , b_s 分别取值0.207, 0.725。

$$G = 0.14(T_i - T_{i-1}) \quad (3)$$

式中: T_i ——第 i 月的平均气温; T_{i-1} ——第 $i-1$ 月的平均气温。

$$\gamma = \frac{C_p P}{\xi \lambda} = \frac{1.013 \times 10^{-3} P}{0.622 \lambda} \quad (4)$$

$$P = 101.0 \left(\frac{293 - 0.0065h}{293} \right)^{5.26} \quad (5)$$

$$\lambda = 2.501 - 0.002631T \quad (6)$$

式中: P ——大气压(kPa); C_p ——标准大气压下的特定热量值; λ ——蒸发的潜热系数; ξ ——水蒸气 and 干空气的分子重量比,取值0.622; h ——海拔高度(m); T ——平均气温($^\circ\text{C}$)。

$$\Delta = \frac{4096 \left[0.6108 \exp \left(\frac{17.27T}{T+237.3} \right) \right]}{(T+237.3)^2} \quad (7)$$

平均饱和水汽压(e_s)的计算公式如下:

$$e_s = \frac{e^0(T_{\max}) + e^0(T_{\min})}{2} \quad (8)$$

$$e^0(T_{\max}) = 0.6108 \exp \left(\frac{17.27T_{\max}}{T_{\max} + 237.3} \right) \quad (9)$$

$$e^0(T_{\min}) = 0.6108 \exp \left(\frac{17.27T_{\min}}{T_{\min} + 237.3} \right) \quad (10)$$

式中: $e^0(T_{\max})$ ——气温为 T_{\max} 时的饱和水汽压(kPa); $e^0(T_{\min})$ ——气温为 T_{\min} 时的饱和水汽压(kPa); T_{\max} ——最高绝对气温($^\circ\text{C}$); T_{\min} ——最低绝对气温($^\circ\text{C}$)。

实际水汽压的计算公式如下:

$$e_a = \frac{\text{Rh} \times e_s}{100} \quad (11)$$

式中: Rh ——相对湿度。

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (12)$$

式中: G_{sc} ——太阳常数,取值0.082 $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{min})$; d_r ——日地距离订正; ω_s ——日落时角(弧度); φ ——纬度(弧度); δ ——太阳高度角(弧度)。

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (13)$$

基于公式(1)–(13)计算逐日潜在蒸发量数据,进行月、季、年潜在蒸发量的统计,并进行气候倾向率的时空分布特征分析。季节的划分采用气象季节,即3—5月为春季,6—8月为夏季,9—11月为秋季,

12—2 月为冬季。接着基于 ArcGIS 的 spline 插值法进行空间分布特征分析;最后采用回归分析法进行研究区潜在蒸发量变化原因分析。

2 结果与分析

天山北坡多年平均年潜在蒸发量为 813~1 291 mm,温泉地区潜在蒸发量最低,为 813~983 mm;阿拉山口、克拉玛依、乌苏地区潜在蒸发量最高,为 1 095~1 288 mm;石河子、乌鲁木齐、达阪城、奇台地区的潜在蒸发量为 983~1 095 mm。总体上,潜在蒸发量与海拔呈负相关,研究区东部、西部潜在蒸发量低于中部地区,季潜在蒸发量与年潜在蒸发量的空间分布基本一致,春季多年平均潜在蒸发量为 193~303 mm,夏季为 397~575 mm,秋季为 175~270 mm,冬季为 39~73 mm,分别占年潜在蒸发量的 24%,50%,21%,5%。

2.1 时间变化特征

2.1.1 年代际变化 天山北坡年潜在蒸发量在各年代变化不同(表 1、图 1),1960s,1970s,1980s,1990s 和 2000—2010 年分别与多年平均年潜在蒸发量相差 7,3,-18,-13,18 mm,表明年潜在蒸发量自 1960s 逐渐减少,1980s 减少到最低,1990s 以后逐渐增加,且增加幅度较大。季潜在蒸发量变化与年潜在蒸发量变化略有不同,春季、夏季的潜在蒸发量变化与年潜在蒸发量的变化基本一致,秋季的潜在蒸发量自 1960s 以来一直偏低,1990s 以后才逐渐偏高。冬季的潜在蒸发量则呈现在多年年平均潜在蒸发量附近平稳波动的状态。

表 1 研究区年及季节潜在蒸发量的年代际变化

季节	mm					
	1960s	1970s	1980s	1990s	2000— 2010 年	1960— 2010 年
春季	263	257	252	255	269	259
夏季	544	545	532	530	540	538
秋季	224	226	222	224	232	226
冬季	46	47	48	49	48	48
全年	1078	1074	1053	1058	1089	1071

2.1.2 年际变化 近 51 年来研究区潜在蒸发量呈现略微上升的趋势(图 1),年际气候倾向率为 1.291 mm/10 a,51 a 共增加 6.584 1 mm,相对变化量为 1.2%。年潜在蒸发量在 1960—1962 年呈现上升趋势,1962—1982 年基本稳定,1982—1993 年波动下降,1993—1997 年波动上升,1993—2010 年基本稳定。从季节来看,春季、夏季、秋季、冬季潜在蒸发量的气候倾向率分别为 0.912,-1.881,1.635,0.625 mm/10 a。表明夏季的年均潜在蒸发量呈减小趋势,

且趋势较显著;春季、秋季、冬季的年均潜在蒸发量呈增加趋势,增加趋势不显著。

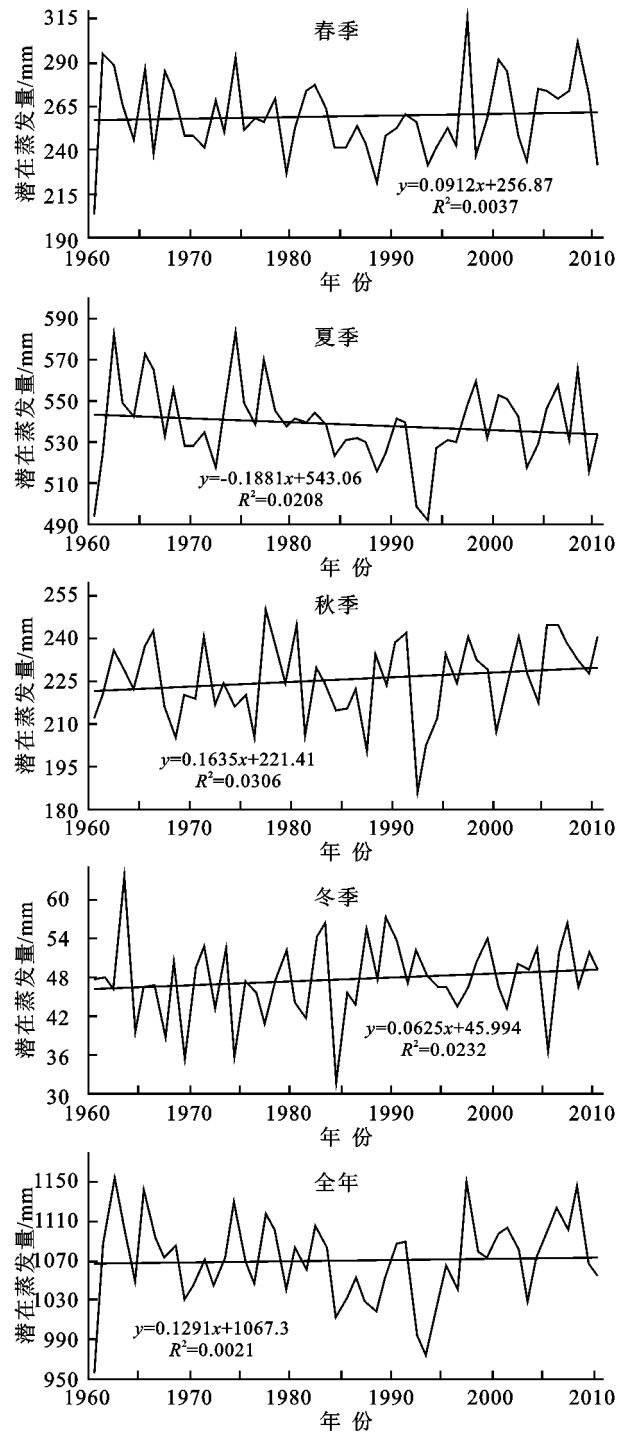


图 1 天山北坡 1960—2010 年年、季节潜在蒸发量的年际变化趋势

除春季与年潜在蒸发量的变化趋势一致外,其他季节与年变化趋势有所不同,夏季在 1960—1962 年上升,增幅达 50 mm/a,1962—1972 年波动下降,1972—1974 年又上升,增幅为 30 mm/a,1974—1993 年波动下降,且在 1993 年降到夏季年际变化最小值。1993—2010 年,略有增加,基本稳定。秋季呈波动增加,波动的最小值出现在 1992 年。冬季呈波动小幅

增加趋势,在 1963 年出现波动的最大值,在 1984 年出现波动的最小值。研究区四季和年潜在蒸发量气候倾向率均表现出较为明显的变化趋势,变化的强烈程度依次为夏季>秋季>春季>冬季,说明天山北坡在全球变暖背景下夏季和秋季潜在蒸发量变化更敏感。

2.2 空间变化特征

2.2.1 年代际空间变化 20 世纪 60 年代,研究区年潜在蒸发量空间变化具有明显差异性(图 2),温泉、达阪城、奇台、石河子的潜在蒸发量低于多年平均值,其中达阪城、温泉的减小幅度较大,减小幅度为 5~25 mm/a,而阿拉山口、精河、克拉玛依、乌鲁木齐、乌苏高于多年平均值,增加幅度为 1~20 mm/a;70 年代,达阪城、奇台、石河子、温泉地区低于多年平均值,减小幅度为 0~21 mm/a;80 年代,温泉、奇台、石河子、乌鲁木齐地区的年潜在蒸发量低于多年平均值,减少幅度为 4~27 mm/a,而阿拉山口、蔡家湖、精河、克拉玛依、乌苏地区的年潜在蒸发量高于多年平均值,增加幅度为 0~25 mm/a;90 年代,达阪城、精河、奇台、温泉、乌鲁木齐地区的年潜在蒸发量低于多年平均值,减少幅度为 4~29 mm/a,而阿拉山口、蔡家湖、克拉玛依、石河子、乌苏地区高于多年平均值,增加幅度为 0~26 mm/a;2000—2010 年,温泉、达阪城、奇台地区的年潜在蒸发量低于多年平均值,减少幅度为 2~28 mm/a,而阿拉山口、蔡家湖、精河、克拉玛依、乌苏地区的年潜在蒸发量高于多年平均值,增加幅度为 10~220 mm/a。总体来说,潜在蒸发量的年代际变化中,阿拉山口、乌苏年代际、年潜在蒸发量高于研究区的多年平均值,乌苏潜在蒸发量高出平均值约为 50~65 mm,阿拉山口约高出 190~260 mm;而温泉、达阪城、奇台地区低于多年平均值约 220~290 mm。

2.2.2 年际空间变化 研究区年潜在蒸发量的年际变化在绝大部分地区呈增加趋势(图 3),其中石河子、阿拉山口、达阪城、蔡家湖等地区的增加幅度较大,增幅在 0.07~0.32 mm/a。就季节而言,春季的年际变化呈增加趋势,其中阿拉山口以南部分地区、蔡家湖以北地区、克拉玛依、乌苏、石河子大部分地区增加幅度最大,增幅在 0.11~0.24 mm/a;温泉以东地区、乌鲁木齐及其周围地区呈减小趋势,减幅为 0.08~0.27 mm/a。夏季的年际变化在绝大部分区域呈减小趋势,减幅在 0.08~0.27 mm/a,其中乌鲁木齐的减小幅度最大。秋季的年际变化呈增加趋势,增加幅度为 0~0.19 mm/a,其中克拉玛依以北、石河子以东、蔡家湖以北、奇台大部地区增加幅度较大,增幅为 0.19~0.32 mm/a。冬季的年际变化在绝大部分地区呈增加趋势,但增加幅度不大,增幅

为 0~0.15 mm/a,而精河、蔡家湖呈减小趋势,减幅为 0~0.22 mm/a。总体来说,阿拉山口、达阪城、石河子地区季、年的潜在蒸发量年际变化趋势均表现为增加趋势;其他地区季、年的潜在蒸发量年际变化表现为增加或减少的趋势。

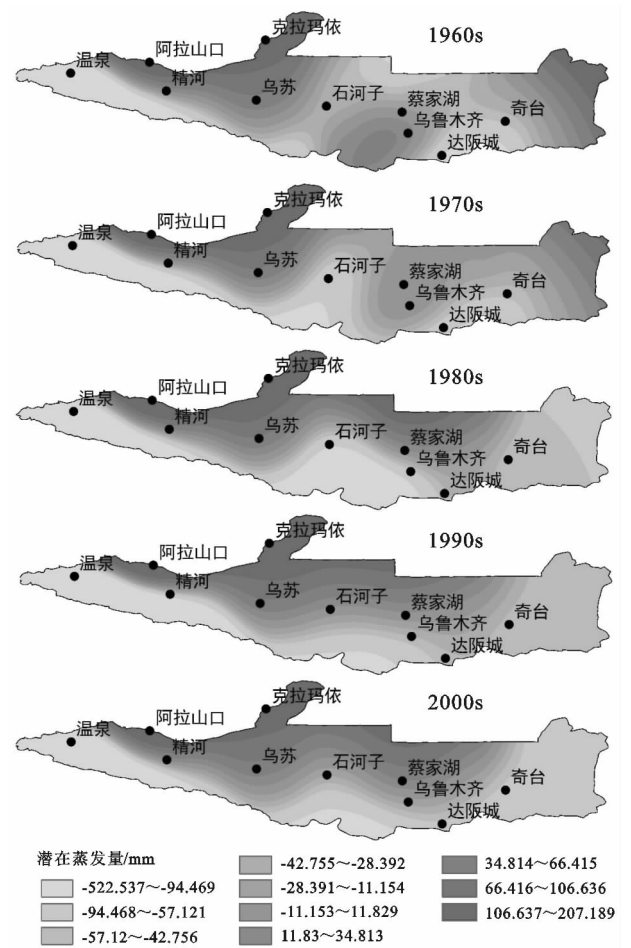


图 2 天山山区的年潜在蒸发量距平空间分布

2.3 变化成因分析

潜在蒸散过程主要受能量供给条件和水汽输送条件两方面物理因素的影响。蒸散的能量供给条件主要源于太阳净辐射,受日照时数及气温等影响;水汽输送条件取决于饱和差及风速的大小。

为了探讨研究区潜在蒸发量变化的原因,分别对 7 个常规气象因子(日照百分率、平均温度、最高气温、最低气温、平均风速、相对湿度、气压)进行了标准化处理,并采用多元回归分析法来研究潜在蒸发量与气象因子之间的相关性,进而确定影响其变化的主导因素。从潜在蒸发量与气候因子的偏回归系数看(表 2),日照百分率、最高气温、最低气温、均温、平均风速与潜在蒸发量正相关,而相对湿度、气压与潜在蒸发量负相关。不同气候因子对潜在蒸发量的影响程度不同,对春季潜在蒸发量影响较大的因素是日照百分率、最低气温和平均风速。夏季是相对湿度、气

压和平均风速。秋季是最低气温、日照百分率和平均风速。冬季是最低风速、平均风速和日照百分率。全年是最低气温、平均风速和相对湿度。

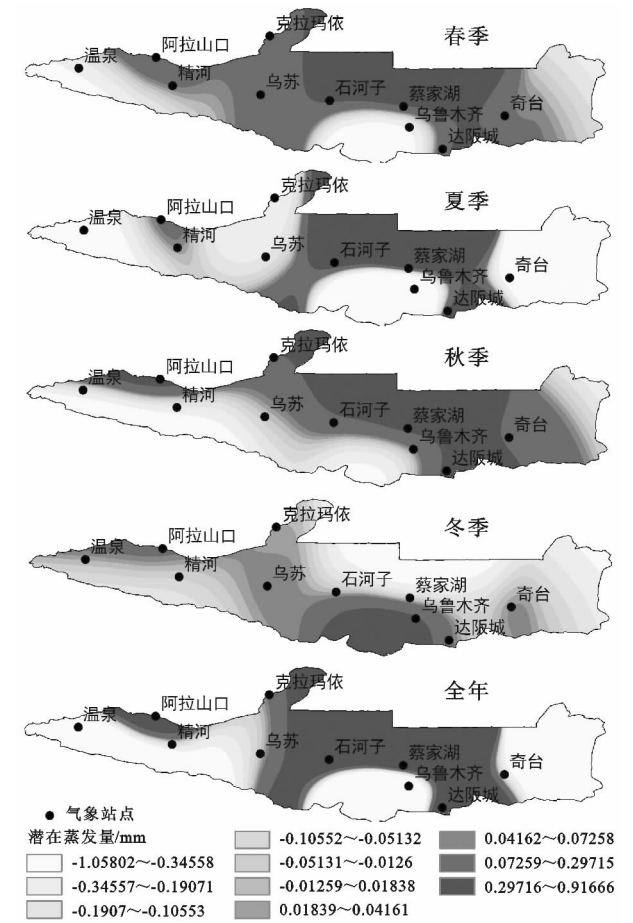


图 3 天山北坡 1960—2010 年潜在蒸发量倾向率空间分布

气候因子	日照百分率	最高气温	最低气温	均温	平均风速	相对湿度	气压	复相关系数
春季	0.349**	−0.006	0.344**	0.028	0.210**	−0.026	0.066**	0.975
夏季	0.285**	0.015	0.245**	0.002	0.344**	−0.735**	0.713**	0.950
秋季	0.301**	0.034	0.347**	0.009	0.266**	−0.162**	0.008	0.971
冬季	0.349**	0.078**	0.685**	−0.001	0.549**	−0.127**	−0.066**	0.941
全年	0.079**	0.023	0.219**	0.006	0.158**	−0.158**	−0.129**	0.953

注：*，** 分别表示通过 0.05,0.001 的置信度检验。

表 2 天山北坡潜在蒸发量与气候因子的多元回归系数

季节	日照百分率/%	最高气温/℃	最低气温/℃	均温/℃	平均风速/(m·s ^{−1})	相对湿度/%	气压/hPa
春季	0.028	0.303	0.327	0.296	2.345	−0.001	−15.196
夏季	−0.005	−0.165	0.205	0.034	2.753	0.004	−14.889
秋季	0.040	0.424	0.779	0.429	2.564	0.002	−18.128
冬季	0.031	1.085	0.619	0.779	2.096	0.001	−18.497
全年	−0.011	0.413	0.511	0.387	2.087	0.003	−16.719

Peterson 等^[19]研究,在北半球蒸发皿观测的蒸发量在过去几十年中的减少趋势具有普遍性,但也有些地区例外。李林等^[20]对黄河流域蒸散量进行了分析,结果表明黄河流域上游地区蒸散量以 31.25

从研究区近年各气候因子的变化趋势来看(表 3),不同气候因子的变化趋势及其显著程度有所不同,进而对潜在蒸发量的影响也不同。春季,日照百分率、最低气温和平均风速的增加趋势较显著,导致潜在蒸发量增大,表明日照百分率和最低气温是造成春季潜在蒸发量增加的主要原因;夏季,日照百分率和最高气温均为减小趋势,导致潜在蒸发量在夏季表现为递减趋势;秋季,最低气温、日照百分率和平均风速的增加趋势最显著,导致潜在蒸发量明显递增,表明最低气温和日照百分率是造成秋季潜在蒸发量增加的主要原因;冬季,最低气温、平均风速和日照百分率的增加趋势显著,导致潜在蒸发量增大,可见最低气温和平均风速是造成冬季潜在蒸发量增加的主要原因;全年,最低气温、平均风速和相对湿度是导致潜在蒸发量增加的主要原因。总体来看,最低气温和平均风速是影响天山北坡潜在蒸发量的主要因素,另外,日照百分率和相对湿度对其变化影响也较大。

3 讨论与结论

3.1 讨论

“蒸发悖论”在国外以及我国不少区域都得到了验证,即研究区潜在蒸发量在全球变暖的背景下总体呈现下降趋势。在国内外大部分研究区潜在蒸发量总体呈现下降趋势的背景下,也有学者发现在研究区的少数区域季、年潜在蒸发量的变化中出现上升或下降幅度减小的趋势。

mm/a 的速度上升;高歌等^[2]对 1956—2000 年中国潜在蒸发量变化趋势进行研究,在总体呈下降趋势的情况下,北方松花江流域四季潜在蒸散量均呈现增加的趋势,导致年潜在蒸散量也呈现增加趋势。张明军

等^[12]对中国天山山区的潜在蒸发量进行了分析,得出天山地区年潜在蒸发量的年际变化在绝大部分地区呈减小趋势,但在七角井地区除外。而本文关于天山北坡近 51 年潜在蒸发量总体呈上升趋势的结论与“蒸发悖论”相反,由于在对影响潜在蒸发量气候因子的分析中,各区域的气候因子在时空上的差异,且选取的动力因子、热力因子、湿度因子根据区域的气候特征而有所不同。所以,不同气候因子在区域间对潜在蒸发量的影响程度也有所差异。贺晋云等^[21]提出新疆近 50 年来气温呈上升趋势,平均增长率为 $0.27^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,最低气温上升明显。袁玉江等^[22]对天山山区近 40 年秋季气候变化特征中指出:秋季最低温度增温率在 3 大区域的大小对比而言,天山山区最大,北疆居中,南疆最小。而秋季平均温度的增温率,北疆和天山山区大致相近。从同一区域看,天山山区和北疆秋季最低温度的增温率均大于平均温度的增温率。所以,最低气温成为影响天山北坡潜在蒸发量的主导因素也是有据可循的。所以,天山北坡近年潜在蒸发量总体上呈增加趋势,该结论有其存在的合理性及现实意义,需对这一区域导致潜在蒸发量增加的原因进行更深入分析。

3.2 结论

(1) 研究区多年平均年潜在蒸发量为 $813\sim 1\,291\text{ mm}$,且东、西部地区低于中部地区;近 50 年研究区年潜在蒸发量总体呈增加趋势,其年际变化倾向率为 $1.291\text{ mm}/10\text{ a}$;在不同的季节,潜在蒸发量的年际变化在空间上存在区域差异。

(2) 近 50 年研究区的年代际潜在蒸发量的距平值分别为:7,3,-18,-13,18 mm,表明年潜在蒸发量自 1960s 逐渐减少,1980s 减少到最低,1990s 以后逐渐增加,且增加幅度较大。在不同年代,潜在蒸发量变化存在一定的空间分异。

(3) 最低气温和平均风速是影响天山北坡潜在蒸发量的主要因素,日照百分率和相对湿度对其变化影响也较大。

参考文献:

[1] 王遵娅,丁一汇,何金海,等.近 50 年来中国气候变化特征的再分析[J].气象学报,2004,62(2):228-236.
[2] 高歌,陈德亮,任国玉,等.1956—2000 年中国潜在蒸散量变化趋势[J].地理研究,2006,25(3):378-387.
[3] 贾莲莲,王小江.黄土高原水面蒸发量初步估算[J].水土保持研究,2013,20(3):143-145.

[4] 赵恒和,郭连云,刘运华,等.青海三江源同德地区 1961—2000 年蒸发量变化特征及原因分析[J].水土保持研究,2011,18(4):203-206,210.
[5] Roderick M L, Farquhar G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years[J]. Science, 2002,298(5597):1410-1411.
[6] Chattopadhyay N, Hulme M. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change[J]. Agricultural & Forest Meteorology,1997,87(97):55-73.
[7] 邱新法,刘昌明,曾燕,等.黄河流域近 40 a 蒸发皿蒸发量的气候变化特征[J].自然资源学报,2003,18(4):437-442.
[8] 王艳君,姜彤,许崇育.长江流域 20 cm 蒸发皿蒸发量的时空变化[J].水科学进展,2006,17(6):830-833.
[9] 杜军,胡军,刘依兰,等.近 25 a 雅鲁藏布江中游蒸发皿蒸发量及影响因素的变化[J].自然源学报,2008,23(1):120-126.
[10] 苏宏超,魏文寿,韩萍.新疆近 50 a 来的气温和蒸发变化[J].冰川冻土,2003,25(2):174-178.
[11] 刘波,马柱国,冯锦明,等.1960 年以来新疆地区蒸发皿蒸发与实际蒸发之间的关系[J].地理学报,2008,63(11):1132-1139.
[12] 张明军,李瑞雪,贾文雄,等.中国天山山区潜在蒸发量的时空变化[J].地理学报,2009,64(7):798-806.
[13] 胡伟,姚磊.新疆库车县近 40 a 来气温与蒸发量变化趋势分析[J].水土保持研究,2008,15(3):93-95.
[14] 霍文,杨青,李杨,等.阿克苏流域可能蒸发量的计算[J].水土保持研究,2011,18(1):137-140,145.
[15] 毛飞,张光智,徐祥德.参考作物蒸散量的多种计算方法及其结果的比较[J].应用气象学报,2000,11(S1):128-136.
[16] 张东,张万昌,徐全芝.汉江上游流域蒸散量计算方法的比较及改进[J].资源科学,2005,27(1):97-103.
[17] 刘绍民,孙中平,李小文,等.蒸散量测定与估算方法的对比研究[J].自然资源学报,2003,18(2):161-167.
[18] 侯光良,李继由,张谊光.中国农业气候资源[M].北京:中国人民大学出版社,1993.
[19] Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. Evaporation losing its strength[J]. Nature, 1995, 377(6551):687-688.
[20] 李林,张国胜,汪青春.黄河上游流域蒸散量及其影响因素研究[J].气象,2000,26(12):6-10.
[21] 贺晋云,张明军,王鹏,等.新疆气候变化研究进展[J].干旱区研究,2011,28(3):12-16.
[22] 袁玉江,魏文寿,穆桂金.天山山区近 40 a 秋季气候变化特征与南、北疆比较[J].地理科学,2004,24(6):674-679.