

中国天山山区潜在蒸发量的时空变化

张明军^{1,2}, 李瑞雪¹, 贾文雄^{1,2}, 王旭峰²

(1. 西北师范大学 地理与环境科学学院, 兰州 730070;

2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 兰州 730000)

摘要: 利用 24 个气象站 1960-2006 年的逐日气象资料, 应用 FAO Penman-Monteith 模型, 分析了天山山区潜在蒸发量的变化趋势, 并在 ArcGIS 环境下通过 IDW 插值法分析了潜在蒸发量变化的空间分异, 此外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: 年潜在蒸发量自 60 年代以来呈波状减小趋势, 1986 年之后减小趋势更加明显, 2000 年以后呈增加趋势。年潜在蒸发量的年际变化倾向率为 -2.48 mm/a , 表明潜在蒸发量总体上呈减小趋势; 从季节来看, 秋季的潜在蒸发量呈增加趋势, 其它季节呈减小趋势, 其中春季的减小幅度最大; 风速是影响潜在蒸发量变化的主导因素, 影响秋季潜在蒸发量变化的主导因素是气温。

关键词: 潜在蒸发量; 变化趋势; 天山地区

1 引言

天山是影响新疆乃至我国中、西部地区天气气候和生态环境的重要天然屏障, 天山山区气候变化对我国中、西部地区的生态环境产生广泛而深刻的影响。研究天山山区的气候变化, 对保护和改善我国西部地区的生态环境具有重要意义。我国近百年来气温上升 $0.4\sim 0.8 \text{ }^\circ\text{C}$, 近 50 年来增温尤其明显, 而降水量近 50 年来呈减少趋势, 不过西部降水量增加趋势明显, 其中西北地区最明显^[1-3]。一般认为, 气温升高会引起地表和水体蒸发加强, 但对近几十年来蒸发皿蒸发的研究表明, 全球一些地方的蒸发皿蒸发量呈显著下降趋势^[4-7]。有关蒸发皿蒸发量减少的原因有不同观点, Peterson 等人^[4]将其归因于云量减少, Brutsaert 等人^[8]认为是地面蒸发增强的结果, Roderick 等人^[9]、Cohen 等人^[7]认为是太阳辐射减少造成的, 云量和气溶胶的增加是造成太阳辐射减少的原因。已有研究表明, 我国蒸发量整体上呈减小趋势^[10-14], 其中西北、青藏和西南地区减小趋势显著^[15, 16], 而且蒸发量的减小与太阳辐射、相对湿度或风速有关。近年, 一些学者对天山山区近几十年气候变化的趋势和特征进行过许多研究, 但研究区域基本均限于北天山山区, 研究的气候要素也主要限于温度、降水等气候要素, 普宗朝^[17]等人也仅是对天山山区气候暖湿变化的最大可能蒸散量进行了分析。本文探讨该区气候变化背景下潜在蒸发量的时空变化特征, 为水资源的合理开发与利用提供科学依据并为生态环境保护措施提供参考依据。

收稿日期: 2009-03-20; 修订日期: 2009-06-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (40701035, 40631001, 40571033); 霍英东教育基金 (101019); 陇原青年创新人才扶持计划; 西北师范大学知识与科技创新工程科研骨干培育项目 (NWNNU-KJCXGC-03-45); 西北师范大学自然地理学省级重点学科资助 [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.40701035; No. 40631001; No.40571033; The Fok Ying Tung Education Foundation, No.101019; The Foundation for Young Innovative Scientists in Gansu Province; The Project for Knowledge and Technological Innovation of Northwest Normal University for Scientific Backbone Training Foundation, No.NWNNU-KJCXGC-03-45; Provincial Key Subject Foundation of Northwest Normal University for Physical Geography]

作者简介: 张明军 (1975-), 男, 甘肃宁县人, 博士, 教授, 主要从事气候变化与冰川方面的研究。

(C)1994-2018 China Academic Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

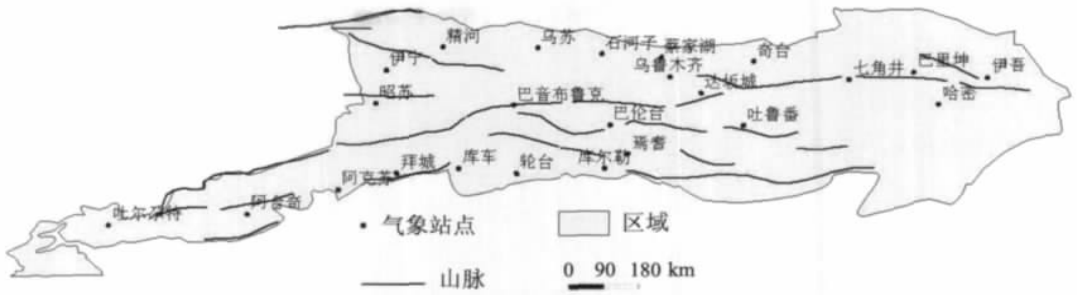


图 1 天山山区气象站点的分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in the Tianshan Mountains

2 数据与方法

2.1 数据处理

利用天山山区 24 个气象站 (图 1), 1960-2006 年的日平均气温、日最高气温、日最低气温、日照时数、日平均相对湿度、日平均风速等气象观测资料, 分别计算出各气象站的日潜在蒸发量, 然后进行月、季、年潜在蒸发量的统计。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。

2.2 研究方法

潜在蒸发量是指在一定气象条件下水分供应不受限制时, 下垫面可能达到的最大蒸发量^[12]。估算潜在蒸发量的模型有很多种, 其中最常用的有 Penman 模型、Thornthwaite 模型和 Selianinov 模型^[16]。本文采用世界粮农组织 (FAO) 1998 年修正的 Penman-Monteith 模型, 已有研究成果表明该模型的模拟效果是比较精确的^[18-20]。计算公式如下^[12, 21]:

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

式中: ET_0 为潜在蒸发量 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); R_n 为净辐射 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G 为土壤热通量 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); γ 为干湿常数 ($\text{k Pa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); Δ 为饱和水汽压曲线斜率 ($\text{k Pa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); U_2 为 2 米高处的风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); e_s 为平均饱和水汽压 (k Pa); e_a 为实际水汽压 (k Pa); T 为平均气温 ($^\circ\text{C}$)。

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

式中: R_a 为大气顶层的太阳辐射 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); N 为最大日照时数 (h); n 为实际日照时数 (h); σ 为波尔兹曼常数 ($4.903 \times 10^{-9} \text{ MJ} \cdot \text{K}^{-4} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); $T_{\max, k}$ 为最高绝对气温 (K); $T_{\min, k}$ 为最低绝对气温 (K); a_s 为云全部遮盖下 ($n = 0$) 大气外界辐射到达地面的分量; b_s 为晴天 ($n = N$) 大气外界辐射到达地面的分量; α 为地表反射度, 取值 0.23。据侯光良等人^[22]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 为第 i 月的平均气温, T_{i-1} 为第 $i-1$ 月的平均气温。

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

式中, $P = 101.0 \left(\frac{293 - 0.0065h}{293} \right)^{5.26}$, 为大气压 (kPa); $\lambda = 2.501 - 0.002361T$, 为蒸发的潜热系数, 其中 T 为平均气温 ($^\circ\text{C}$); c_p 在标准大气压下的特定热量值; $\varepsilon = 0.622$, 水蒸气和干空气的分子量比; h 海拔高度。

$$\Delta = \frac{4096 \left[0.6108 \exp \left(\frac{17.27T}{T + 237.3} \right) \right]}{(T + 237.3)^2} \quad (5)$$

式中, T 为平均气温 ($^{\circ}\text{C}$)。

平均饱和水汽压的计算我们使用公式:

$$e_s = \frac{e^0(T_{\max}) + e^0(T_{\min})}{2} \quad (6)$$

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

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

其中, T_{\max} 为最高绝对气温 ($^{\circ}\text{C}$); T_{\min} 为最低绝对气温 ($^{\circ}\text{C}$)。

实际水汽压的计算:
$$e_a = \frac{Rh * e_s}{100} \quad (7)$$

式中, Rh 代表相对湿度。

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r (\omega_s \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)) \quad (8)$$

式中, $G_{sc} = 0.0820(\text{MJm}^{-2}\text{min}^{-1})$; d_r 表示日地距离订正; ω_s 表示日落时角 (弧度); ϕ 表示纬度 (弧度); δ 代表太阳高度角 (弧度)。

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (9)$$

式中, ω_s 表示日落时角 (弧度)。

反距离加权 (Inverse Distance Weighted, 简称 IDW) 插值法是一种常见而简便的空间插值方法, 属于精确性插值, 是基于相近相似的原理: 即两个物体离得近, 它们的性质就越相似, 反之, 离得越远则相似性越小。它以插值点与样本点间的距离为权重进行加权平均, 离插值点越近的样本点赋予的权重越大。

在数据处理之后, 利用一元回归分析法进行潜在蒸发量变化的趋势分析, 并且在 ArcGIS 环境下通过 IDW 插值法绘制出潜在蒸发量变化的空间分布图, 进行年代际和年际变化的空间差异分析, 然后运用多元回归分析法对影响潜在蒸发量的主导因素进行探讨。

3 多年平均潜在蒸发量的空间分布

天山山区多年平均的年潜在蒸发量在 523~1528 mm 之间 (图 2), 表现为东西差异明显, 东部山区潜在蒸发量在 696~1528 mm 之间, 其中七角井地区潜在蒸发量最大, 中部地区从东到西潜在蒸发量逐渐减小, 潜在蒸发量在 500~900 mm 之间, 其中南坡库勒和北坡达坂城在 900~1100 mm 之间, 南天山也表现为东西差异, 潜在蒸发量从东到西呈先增大后减小趋势, 蒸发量在 500~900 mm 之间。总体上, 山区的潜在蒸发量低于南北坡平原区, 整个区域从东到西潜在蒸发量呈减小趋势。季节的潜在蒸发量与年潜在蒸发量的空间分布基本一致, 春季在 66~400 mm 之间, 夏季在 266~762 mm 之间, 秋季在 126~319 mm 之间, 冬季在 5~60 mm 之间, 平均分别占年潜在蒸发量的 24%、50%、22%、3%, 一年中潜在蒸发量夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季。山区春季、夏季、秋季、冬季的潜在蒸发量分别为 199、388、182、29 mm, 平原分别为 173、434、186、20 mm, 夏季、秋季的潜在蒸发量是山区低于平原区, 春季是山区高于平原区, 而冬季相差不大。

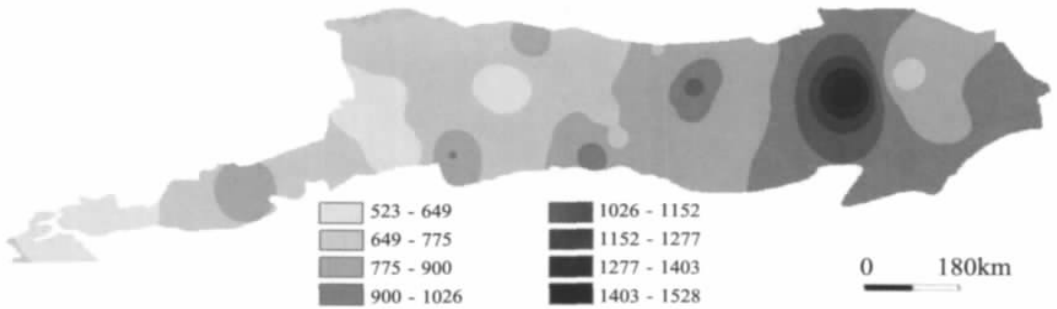


图 2 天山山区多年平均年潜在蒸发量(mm)的空间分布(1960-2006 年)

Fig. 2 Spatial distribution of the average potential evaporation in the Tianshan Mountains from 1960 to 2006

4 潜在蒸发量的年代际变化

表 1 天山山区年及季节潜在蒸发量的年代际变化

Tab.1 Interdecadal change of the annual and seasonal potential evaporation in the Tianshan Mountains from 1960 to 2006

季节	1960s	1970s	1980s	1990s	2000-2006	1960-2006
春季	240	221	190	152	147	193
夏季	418	411	397	371	391	398
秋季	150	167	176	189	212	176
冬季	24	21	17	17	20	20
全年	839	827	785	734	775	793

4.1 年代际变化

天山山区的年潜在蒸发量在各年代变化不同(表 1), 20 世纪 60、70、80、90 年代及 2000-2006 年分别与多年平均年潜在蒸发量相差 46、34、-8、-59、-18 mm, 表明在 80 年代之前潜在蒸发量偏高, 之后偏低。年潜在蒸发量自 60 年代逐渐减少, 80 年代以后持续减小, 2000 年以来减小幅度略有下降。季节的潜在蒸发量变化与年潜在蒸发量变化略有不同, 夏季、冬季的潜在蒸发量变化与年潜在蒸发量变化基本一致, 春季的潜在蒸发量自 60 年代以来持续减小, 而秋季的潜在蒸发量自 60 年代以来一直持续增加, 且在 80 年代之前潜在蒸发量偏低, 之后偏高。

4.2 年代际变化的空间分布

20 世纪 60 年代, 天山山区的年潜在蒸发量变化明显不同(图 3), 山区的潜在蒸发量低于多年平均, 其中东部七角井地区减小幅度最大, 减少了 147 mm, 而平原高于多年平均, 增加幅度在 36~52 mm 之间, 其中达坂城的潜在蒸发量高于多年平均 46 mm, 天山南坡和天山北坡的山麓地区的潜在蒸发量也高于多年平均。70 年代, 绝大部分地区的年潜在蒸发量高于多年平均, 山区的增加幅度在 5~109 mm 之间, 而平原的增加幅度在 52~83 mm 之间, 增幅大于山区, 此外, 七角井和北部的石河子地区潜在蒸发量低于多年平均 10~111 mm 之间。80 年代, 山区和吐哈盆地的年潜在蒸发量高于多年平均, 其它大部分地区低于多年平均, 平原地区减小幅度最大, 减小幅度在 8~59 mm 之间, 天山南坡地区减幅在 4~38 mm 之间, 天山北坡山麓地区的潜在蒸发量也低于多年平均 4~60 mm 之间。20 世纪 90 年代, 绝大部分地区的年潜在蒸发量低于多年平均, 天山南坡的减小幅度最大, 其次为天山北坡山麓地区, 再次为山区和平原地区, 其中山区的减小幅度在 10~100 mm 之间, 但巴音布鲁克地区的年潜在蒸发量高于多年平均。

2000-2006 年, 除七角井地区外, 大部分地区的年潜在蒸发量低于多年平均, 其中山区的减小幅度最大, 在 10~100 mm 之间; 其次, 天山南坡的减小幅度在 50~150 mm 之间, 此外, 阿克苏和巴里坤地区增加幅度在 10~40 mm 之间。

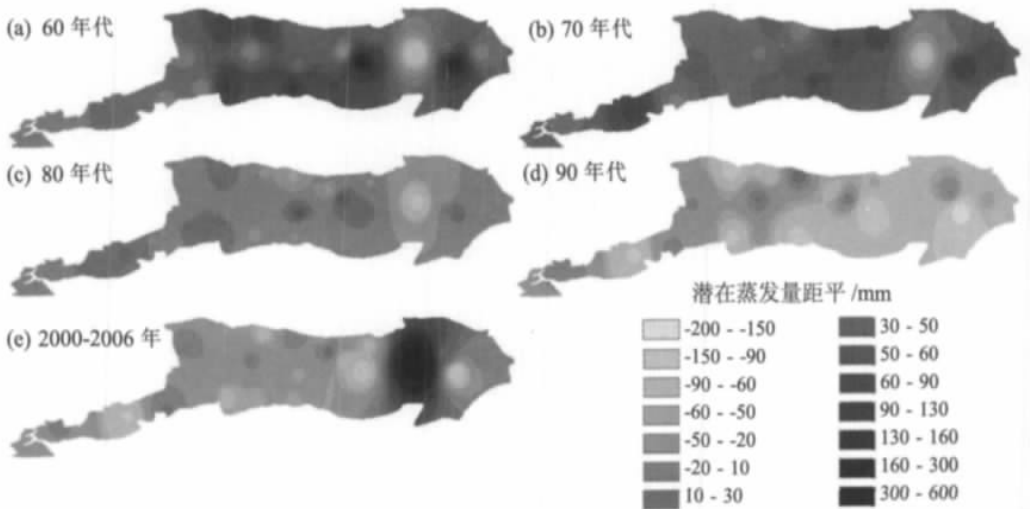


图 3 天山山区的年潜在蒸发量距平空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of the potential evaporation departure of the Tianshan Mountains from 1960 to 2006

5 潜在蒸发量的年际变化

5.1 年际变化

天山山区的年潜在蒸发量的年际变化倾向率为 -2.48 mm/a (图 4), 与年份的相关系数为 -0.741 , 且通过了 0.01 的置信度检验, 表明在全球变暖背景下, 该区的潜在蒸发量总体上呈明显减小趋势。年潜在蒸发量自 60 年代以来呈波状减小趋势, 1986 年之后减小趋势更加明显, 2000 年以后呈增加趋势。从季节来看, 春、夏、秋、冬四季的潜在蒸发量的年际变化倾向率分别为 -2.70 、 -1.05 、 1.47 、 -0.14 mm/a , 与年份的相关系数分别为 -0.951 、 -0.691 、 0.939 、 -0.519 , 都通过了 0.01 的置信度检验, 表明秋季的潜在蒸发量呈增加趋势, 其它季节呈减小趋势, 其中春季的减小幅度最大, 而且季节的潜在蒸发量变化趋势都明显, 其中春季减小的趋势和秋季增加的趋势显著。除夏季的潜在蒸发量与年潜在蒸发量的变化趋势一致外, 其它季节的变化趋势与年潜在蒸发量的变化趋势有所不同。春季的潜在蒸发量在 1960 年之后一直呈减小趋势, 2003 年之后略有增加趋势; 秋季自 1960 年以来一直呈波状增加趋势; 冬季在 1969 年之前呈波动增加趋势, 之后至 1999 年呈减小趋势, 之后略呈增加趋势。

5.2 年际变化的空间分布

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 (图 5), 但七角井地区除外, 其中吐哈盆地的减小幅度较大, 减幅在 $9\sim 10 \text{ mm/a}$ 之间, 其它地区的减小幅度在 $0.3\sim 6 \text{ mm/a}$ 之间, 而山区的巴音布鲁克地区和天山南坡的阿克苏地区呈增加趋势, 增加幅度在 $0.08\sim 0.4 \text{ mm/a}$ 之间。就季节而言, 春季潜在蒸发量的年际变化呈减小趋势, 其中仍是吐哈盆地的减小幅度较大, 减幅在 $5.4\sim 5.8 \text{ mm/a}$ 之间, 其它地区的减小幅度在 $0.9\sim 4 \text{ mm/a}$ 之间, 而仅有七角井地区呈增加趋势, 增加幅度是 1.35 mm/a ; 夏季潜在蒸发量的年际变化在绝大部分地区呈减小趋势, 减小幅度在 $0\sim 4 \text{ mm/a}$ 之间, 而天山南坡的巴里坤、山区的巴音布鲁克和天山北坡的石河子地区呈增加趋势, 增加幅度在 $0\sim 0.5 \text{ mm/a}$ 之间, 东部的七角井地区增加幅度较大, 增幅是 6.44 mm/a ; 秋季潜在蒸发量的年际变化呈增加趋势, 增加幅度在 $0\sim 5 \text{ mm/a}$ 之间, 仅哈密地区呈微弱的减小趋势, 减小幅度是 0.073 mm/a ; 冬季潜在蒸发量的年际变化在绝大部分地区呈减小趋势, 但减小幅度不大, <http://www.cnki.net>

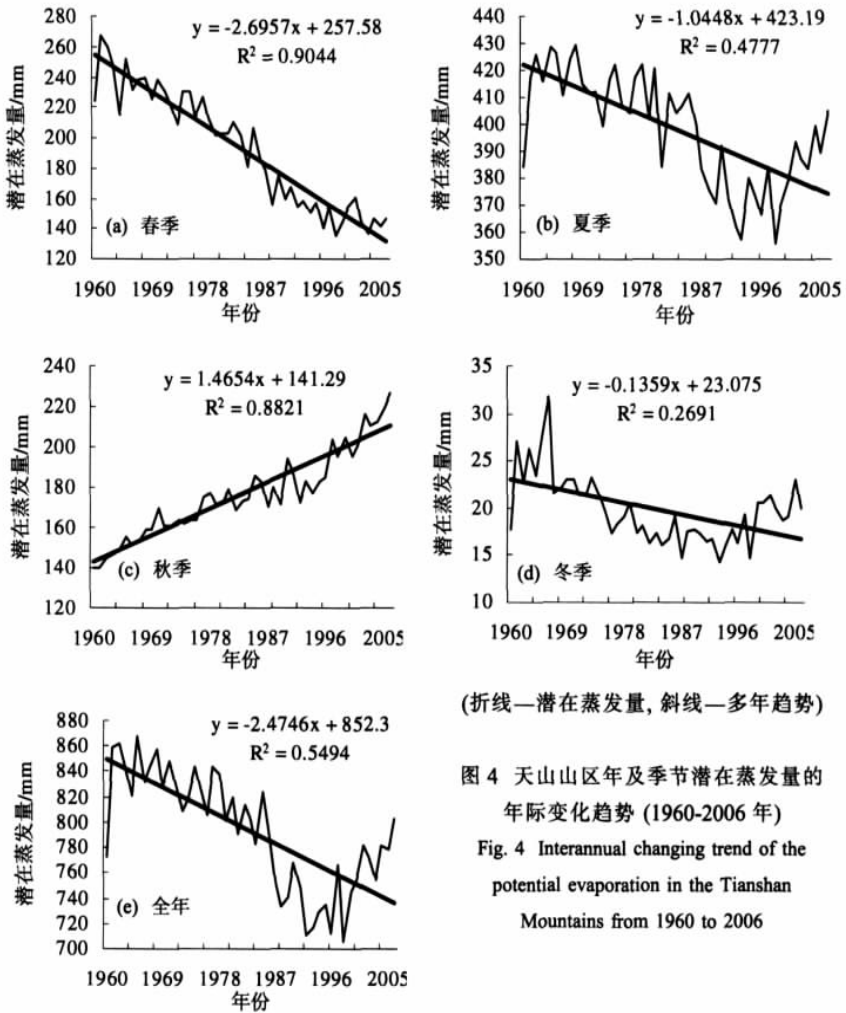


图 4 天山山区年及季节潜在蒸发量的年际变化趋势 (1960-2006 年)

Fig. 4 Interannual changing trend of the potential evaporation in the Tianshan Mountains from 1960 to 2006

减幅在 0~0.76 mm/a 之间, 而山区的中西部、平原的北部和天山北坡的阿克苏地区呈微弱的增加趋势, 增加幅度在 0~0.5 mm/a 之间。通过分析四季及年潜在蒸发量倾向率的空间分布, 发现位于山口的七角井地区的潜在蒸发量终年呈上升趋势。

6 潜在蒸发量变化的成因分析

蒸发量受各种因素综合影响, 主要有气温、风速、日照时数、相对湿度、饱和水汽压差、云量等气象要素。由于影响潜在蒸发量变化的因素众多, 不同因素之间也相互影响, 所以潜在蒸发量的变化成因十分复杂。为了探讨天山山区潜在蒸发量变化的成因, 选取 7 个气象因子 (风速代表动力因子, 平均气温、日较差、日照时数代表热力因子, 相对湿度、云量、降水代表湿度因子), 采用多元回归分析方法来研究潜在蒸发量与影响因子之间的相关性, 以及影响其变化的主导因素。从潜在蒸发量与气候因子的偏相关系数看 (表 2), 风速、气温、日较差、日照时数与潜在蒸发量正相关, 这些气候因素的增加会导致潜在蒸发量增加, 反之减小, 而相对湿度、云量、降水与潜在蒸发量负相关, 这些气候因素的增加会导致潜在蒸发量减小, 反之增加。不同气候因子对潜在蒸发量的影响

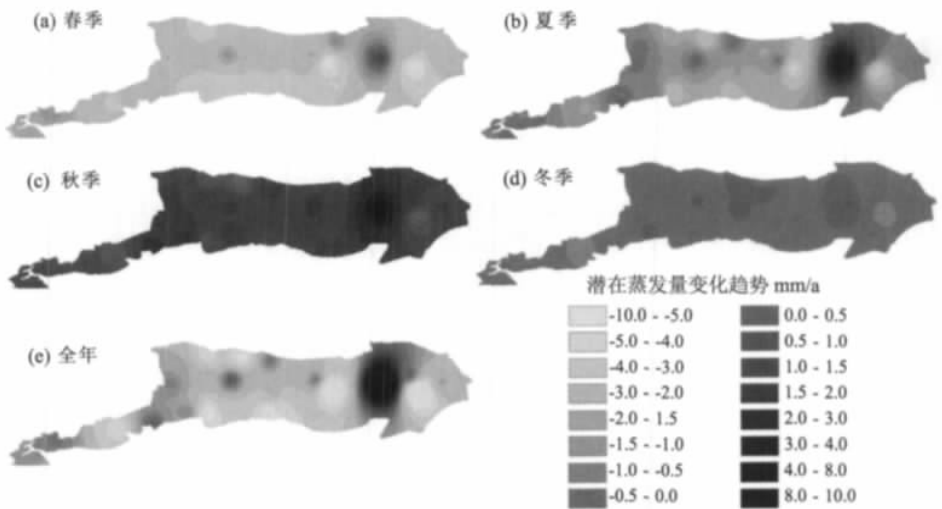


图 5 天山山区 1960-2006 年潜在蒸发量的倾向率空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of the changing rates of potential evaporation in the Tianshan Mountains from 1960 to 2006

表 2 天山山区年及季节潜在蒸发量与气候因子的多元回归系数

Tab. 2 Multivariate regression coefficients between climate factors and the annual and seasonal potential evaporation in the Tianshan Mountains

气候因子	平均风速	平均气温	日较差	日照时数	相对湿度	云量	降水	复相关系数
春季	0.870**	-0.136	0.704**	0.392**	-0.336*	0.049	-0.427**	0.967
夏季	0.866**	0.121	0.697**	0.393**	-0.801**	-0.271	-0.698**	0.974
秋季	-0.680**	0.641**	-0.311*	-0.435**	0.123	-0.186	0.186	0.895
冬季	0.730**	-0.094	0.418**	0.397**	-0.451**	-0.038	-0.253	0.809
全年	0.865**	-0.008	0.726**	0.475**	-0.707	-0.033	-0.710**	0.958

注：*、**分别表示通过 0.05、0.01 的置信度检验。

程度不同，对春季潜在蒸发量影响较大的因素是风速、日较差和日照时数；夏季是风速、日较差、日照时数、相对湿度和降水；秋季是气温和日照时数；冬季是风速、日较差和日照时数；全年是风速、日较差、日照时数、降水和相对湿度。

从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，进而对潜在蒸发量变化的影响也不同。春季，风速和日较差的减小趋势显著，导致潜在蒸发量也减小，表明风速和日较差减小是造成春季潜在蒸发量减小的主要原因；夏季，风速和日照时数减小趋势显著，降水和相对湿度增加趋势显著，风速减小 1 个单位，潜在蒸发量减小 0.73 mm，可见风速减小也是造成夏季潜在蒸发量减小的主要原因；秋季，气温增加趋势显著，气温升高导致潜在蒸发量增加，所以气温升高是秋季潜在蒸发量增加的主要原因；冬季，风速、日照时数和日较差减小趋势都显著，相对湿度的减小趋势也明显，风速和日较差减小 1 个单位，潜在蒸发量分别减小 0.68、0.37 mm，所以风速仍是冬季潜在蒸发量减小的主要因素；全年，风速和日较差减小趋势显著，气温升高趋势显著，云量和降水的变化趋势不显著，风速和日较差

表 3 天山山区气候因子的年及季节变化倾向率

Tab. 3 Annual and seasonal changing rate of climate factors in the Tianshan Mountains

气候因子	平均风速 (m·s ⁻¹ /10a)	平均气温 (°C/10a)	日较差 (°C/10a)	日照时数 (h/10a)	相对湿度 (%/10a)	云量 (%/10a)	降水 (mm/10a)
春季	-0.17	0.22	-0.25	6.89	0.25	-0.90	0.65
夏季	-0.18	0.20	-0.20	-10.10	0.66	0.16	1.62
秋季	-0.15	0.41	-0.20	-9.30	0.60	-0.47	0.71
冬季	0.10	0.46	-0.47	12.38	0.86	0.24	0.74
全年	-0.15	0.32	-0.28	-9.67	0.60	-0.24	0.92

减小 1 个单位，潜在蒸发量分别减小 0.84、0.15 mm，而气温升高 1 个单位，潜在蒸发量增加 0.22 mm，可见风速减小也是年潜在蒸发量减小的主要原因。

7 结论

(1) 天山山区 1960-2006 年多年平均的年潜在蒸发量在 523~1528 mm 之间，山区的潜在蒸发量低于南北坡的平原区，整个区域从东到西潜在蒸发量呈减小趋势。春季、夏季、秋季、冬季的潜在蒸发量分别占年潜在蒸发量的 24%、50%、22%、3%。

(2) 20 世纪 60、70、80、90 年代及 2000-2006 年的年潜在蒸发量与多年平均年潜在蒸发量相差 46、34、-8、-59、-18 mm，表明在 80 年代之前潜在蒸发量偏高，之后偏低。在不同年代，潜在蒸发量变化存在一定的空间分异。

(3) 年潜在蒸发量在 60 年代初呈减小趋势，之后年呈波状增加趋势，1986 年之后又呈减小趋势。年、春季、夏季、秋季、冬季的潜在蒸发量的年际变化倾向率分别为 -2.48、-2.70、-1.05、1.47、-0.14mm/a，表明除秋季的潜在蒸发量呈增加趋势外，其它季节及年的潜在蒸发量呈减小趋势，其中春季的减小幅度最大。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。

(4) 影响潜在蒸发量的气候因素很多，不同因素的变化趋势和变化幅度在不同时段和季节有所差异。风速是潜在蒸发量变化的主导因素，其它因素对潜在蒸发量的变化起增强或减弱作用，不过影响秋季潜在蒸发量变化的主导因素是气温。

参考文献 (References)

- [1] Wang Zunya, Ding Yihui, He Jinhai et al. An updating analysis of the climate change in China in recent 50 years. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 62(2): 228-236. [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. *气象学报*, 2004, 62(2): 228-236.]
- [2] Ye Baisheng, Li Chong, Yang Daqing et al. Variation trend of precipitation and its impact on water resources in China during last 50 years (I): Annual variation. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(5): 587-594. [叶柏生, 李翀, 杨大庆等. 我国过去 50a 来降水变化趋势及其对水资源的影响(I): 年系列. *冰川冻土*, 2004, 26(5): 587-594.]
- [3] Jin Liya, Fu Jiaolan, Chen Fahu. Spatial differences of precipitation over Northwest China during the last 44 years and its response to global warming. *Scientia Geographica Sinica*, 2005, 25(5): 567-572. [靳利亚, 符娇兰, 陈发虎. 近 44 年来中国西北降水量变化的区域差异以及对全球变暖的响应. *地理科学*, 2005, 25(5): 567-572.]
- [4] Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. Evaporation losing its strength. *Nature*, 1995, 377: 687-688.
- [5] Burn D H, Hesch N M. Trends in evaporation for the Canadian prairies. *Journal of Hydrology*, 2007, 336: 61-73.
- [6] Chattopadhyay N, Hulme M. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 87: 55-72.
- [7] Cohen S, Ianetz A, Stanhill G. Evaporative climate changes at Bet Dagan, Israel, 1964-1998. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 111: 83-91.
- [8] Brutsaert W, Parlange M B. Hydrological cycle explain the evaporation paradox. *Nature*, 1998, 396: 30-31.
- [9] Roderick M L. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years. *Science*, 2002, 298: 1410-1411.
- [10] Gao Ge, Chen Deliang, Ren Guoyu et al. Trend of potential evapotranspiration over China during 1956 to 2000. *Geographical Research*, 2006, 25(3): 378-387. [高歌, 陈德亮, 任国玉等. 1956-2000 年中国潜在蒸散量变化趋势. *地理研究*, 2006, 25(3): 378-387.]
- [11] Zeng Yan, Qiu Xinfa, Liu Changming et al. Changes of pan evaporation in China in 1960-2000. *Advances in Water Science*, 2007, 18(3): 311-318. [曾燕, 邱新法, 刘昌明等. 1960-2000 年中国蒸发皿蒸发量的气候变化特征. *水科学进展*, 2007, 18(3): 311-318.]
- [12] Yin Yunhe, Wu Shaohong, Zheng Du et al. The regional differences of dry-wet change in China in recent 30 years. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(15): 1636-1642. [尹云鹤, 吴绍洪, 郑度等. 近 30 年我国干湿状况变化的区域差异. *科学通报*, 2005, 50(15): 1636-1642.]
- [13] Guo Jun, Ren Guoyu. Recent change of pan evaporation and possible climate over the Huang-Huai-Hai watershed, China. *Advances in Water Science*, 2005, 16(5): 666-672. [郭军, 任国玉. 黄淮海流域蒸发量的变化及其原因分析. *1994-2019 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net*

水科学进展, 2005, 16(5): 666-672.]

- [14] Wang Yanjun, Jiang Tong, Xu Chongyu. Spatial-temporal change of 20cm pan evaporation over the Yangtze River basin. *Advances in Water Science*, 2006, 17(6): 830-833. [王艳君, 姜彤, 许崇育. 长江流域 20cm 蒸发皿蒸发量的时空变化. *水科学进展*, 2006, 17(6): 830-833.]
- [15] Jin Liya, Li Jing, Wang Xin et al. The temporal and spatial distribution of surface dry-wet conditions over northwestern China in recent 50 years. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(6): 847-854. [靳利亚, 李静, 王新等. 近 50 年来中国西北地区干湿状况时空分布. *地理学报*, 2004, 59(6): 847-854.]
- [16] Wu Shaohong, Yin Yunhe, Zheng Du et al. Climate changes in the Tibetan Plateau during the three decades. *Acta Geographica Sinica*, 2005, 60(1): 3-11. [吴绍洪, 尹云鹤, 郑度等. 青藏高原近 30 年气候变化趋势. *地理学报*, 2005, 60(1): 3-11.]
- [17] Pu Zongchao, Zhang Shanqing, Li Jinglin et al. Facts and features of climate change into warmth and damp in the Tianshan Mountain area in the recent 36 years. *Arid Land Geography*, 2008, 31(3): 409-415. [普宗朝, 张山清, 李景林等. 近 36 年新疆天山山区气候暖湿变化及其特征分析. *干旱区地理*, 2008, 31(3): 409-415.]
- [18] Mao Fei, Zhang Guangzhi, Xu Xiangde. Several methods of calculating the reference evapotranspiration and comparison of their results. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 2000, 11(suppl.): 128-136. [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. *应用气象学报*, 2000, 11(增刊): 128-136.]
- [19] Zhang Dong, Zhang Wanchang, Xu Quanzhi. Comparison and modification of evapotranspiration estimation method in upper Hanjiang Basin. *Resources Science*, 2005, 27(1): 97-103. [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. *资源科学*, 2005, 27(1): 97-103.]
- [20] Liu Shaomin, Sun Zhongping, Li Xiaowen et al. A comparative study on models for estimating evapotranspiration. *Journal of Natural Resources*, 2003, 18(2): 161-167. [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. *自然资源学报*, 2003, 18(2): 161-167.]
- [21] Wu Shaohong, Yin Yunhe, Zheng Du et al. Study on dry-wet conditions of land surface in China in recent 30 years. *Science in China (Series D)*, 2005, 35(3): 276-283. [吴绍洪, 尹云鹤, 郑度等. 近 30 年中国陆地表层干湿状况研究. *中国科学(D 辑)*, 2005, 35(3): 276-283.]
- [22] Hou Guangliang, Li Jiyou, Zhang Yiguang. *Meteorological Resources of Chinese Agriculture*. Beijing: China Renmin University Press, 1993. [侯光良, 李继由, 张谊光. 中国农业气候资源. 北京: 中国人民大学出版社, 1993.]

Temporal and Spatial Changes of Potential Evaporation in Tianshan Mountains from 1960 to 2006

ZHANG Mingjun^{1,2}, LI Ruixue¹, JIA Wenxiong^{1,2}, WANG Xufeng²

(1. *Geography and Environment College of Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China;*

2. *Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Lanzhou 730000, China)*

Abstract: Based on the daily data of 24 meteorological stations from 1960 to 2006 and combined with the Penman-Monteith model, the changing trend of potential evaporation in the Tianshan Mountains was analyzed in this study. By the method of IDW under ArcGIS the spatial distribution of potential evaporation was drawn in order to research regional difference. And the multivariate regression method was used to discuss the dominant factor influencing potential evaporation. The results indicated that since the 1960s the annual potential evaporation has presented an undulated decreasing trend, and the decreasing trend was more evident since 1986. It began to increase since 2000. There was a decreasing trend in general because the changing rate of annual potential evaporation varied at -2.48 mm/a. The potential evaporation increased in autumn, however, decreased in other seasons especially in spring. The wind speed was a dominant factor influencing potential evaporation, while temperature was the key factor in autumn.

Key words: potential evaporation; changing trend; Tianshan Mountains