

doi: 10.3724/SP.J.1201.2013.03001

近50年来额济纳三角洲气象要素变化 对蒸发皿蒸发量的影响

王志勇^{1,2}, 于静洁¹, 敖登花³

(1. 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;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 内蒙古自治区巴彦浩特水文水资源勘测局, 内蒙古 巴彦浩特 750306)

摘要: 识别蒸发皿蒸发量与气象要素的关系是认识气候变化对水循环影响的重要基础。根据额济纳旗气象站 1961 年-2001 年的常规气象数据, 建立了额济纳三角洲地区蒸发皿蒸发量与相关气象要素关系的 Penpan 模型, 并据此估算了 2002 年-2011 年的蒸发皿蒸发量, 延展了蒸发皿蒸发量的时间序列, 进而分析了 1961 年-2011 年研究区蒸发皿蒸发量和相关气象要素的变化趋势及其相互关系。研究结果表明: (1) 1961 年-2011 年期间, 额济纳三角洲蒸发皿蒸发量呈下降趋势(气候倾向率为年-215.5 mm/10a), 而平均气温呈上升趋势, 风速、总辐射、相对湿度则均呈下降趋势; (2) 总体上, 蒸发皿蒸发量对各气象因子的敏感程度从大到小依次为风速、相对湿度、太阳总辐射、平均气温; 1961 年-2011 年, 蒸发皿蒸发量对风速、相对湿度的敏感性呈下降趋势, 对太阳总辐射、平均气温的敏感性呈上升趋势; (3) 风速变化对蒸发皿蒸发量变化的贡献度最大, 其次是相对湿度、平均气温、总辐射。

关键词: 气候变化; 蒸发皿蒸发量; Penpan 模型; 敏感性分析; 额济纳三角洲

中图分类号: X171.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)03-0001-05

Effects of Climatic Variables on Pan Evaporation in Ejina Delta in the Recent 50 years

WANG Zhi yong^{1,2}, YU Jing jie¹, AO Deng hua³

(1. Key Laboratory of Water Cycle & Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Bureau of Hydrology and Water Resources Survey of Bayanhaote in Inner Mongolia, Bayanhaote 750306, China)

Abstract: The relationship between the pan evaporation and climatic factors is the important basis to characterize of the effects of climate change on hydrological cycle. Based on the measured meteorological data in the Ejina meteorological station from 1961 to 2001, a Penpan model was developed to reflect the relationship between the pan evaporation and four climatic variables in the Ejina Delta and to estimate the pan evaporation from 2002 to 2011. Therefore, the variations of four related climatic variables and their effects on the pan evaporation were analyzed during the period from 1961 to 2011 in the Ejina Delta. The results showed that: (1) pan evaporation presented a significant decreasing trend with a rate of 215.5 mm • 10 a⁻¹, while mean temperature presented an increasing trend. In addition, wind speed, total radiation, and relative humidity presented decreasing trends; (2) Generally, pan evaporation was most sensitive to wind speed, followed by relative humidity, total radiation, and mean temperature. The sensitivities of pan evaporation to wind speed and relative humidity decreased while the sensitivities to total radiation and mean temperature increased during the period from 1961 to 2011; and (3) the variation of wind speed had the most contribution to the variation of pan evaporation, followed by relative humidity, mean temperature, and total radiation.

Key words: climate change; pan evaporation; Penpan model; sensitivity analysis; Ejina Delta

在水循环过程中, 受气候变化影响最直接的一个环节是蒸发, 而实际蒸发量的测定却非常困难^[1]。利用蒸发皿测定

的蒸发量虽然不能直接代表实际蒸发量, 但两者之间存在很密切的相关关系^[2-9], 因此蒸发皿蒸发量的变化趋势是认识

收稿日期: 2012-12-02 修回日期: 2013-04-30 网络出版时间: 2013-05-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20130518.1016.022.html>

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2009CB421305); 国家自然科学基金重大研究计划培育项目(91025023)

作者简介: 王志勇(1988-), 男, 山东济南人, 硕士生, 主要从事变化环境下的水循环研究。E-mail: wangzy8809@gmail.com

通讯作者: 于静洁(1964-), 女, 吉林四平人, 研究员, 主要从事水文水资源研究。E-mail: yujj@igsnr.ac.cn

实际蒸发量变化方向的重要线索^[3]。蒸发皿蒸发量是包括太阳辐射、气温、风速、空气湿度在内的多种因素共同作用的结果,识别这些因素变化对蒸发皿蒸发量变化的影响,不仅有助于揭示蒸发皿蒸发量变化的原因,而且在定量研究气候变化对区域水循环的影响、深入理解水热转换及农业灌溉管理有重要意义^[5]。

在我国,由于^a20 蒸发皿应用广泛且其观测资料累积序列长,因此^a20 蒸发皿蒸发量是研究气候变化对区域水循环影响的重要基础数据。一些学者采用相关分析、逐步回归等方法分析了我国不同地区^a20 蒸发皿蒸发量的变化趋势及原因^[6-8]。不过,统计分析方法只能定性地说说明蒸发皿蒸发量变化与气象要素变化的关系密不可分^[9],而不能定量分析气象要素变化对蒸发皿蒸发量变化的影响。有学者提出了不同形式的基于物理机制的蒸发皿蒸发量估算模型,如 Thom 模型^[10]、Pereira 模型^[11]、Rotstayn 的 Penpan 模型^[12-13],但这些模型只适用于 A 级蒸发器(class A pan)。^a20 蒸发皿的结构不同于 A 级蒸发器,所以 Rotstayn 的 Penpan 模型不能直接用来估算^a20 蒸发皿的蒸发量。为此,Yang 等人^[14]将 Rotstayn 的 Penpan 模型进行了改进,取得很好的应用效果。由此可见,基于物理机制模型的敏感性分析是定量研究气象要素变化对蒸发皿蒸发量影响的有效方式^[15]。常用的敏感性分析方法是假定其他参数不变来确定蒸发皿蒸发量对单个参数的敏感系数,并据此分析单个参数的变化对蒸发皿蒸发量的影响。但是,由于蒸发皿蒸发量的变化不仅受其气候敏感性影响,同时还与各气象要素的变化程度有关^[16],所以此时得出的敏感系数只能反映某气象要素发生变化时蒸发皿蒸发量的相应变化程度,只有将敏感性分析与该要素的实际变化情况结合起来,得出该要素发生变化所带来的蒸发皿蒸发量的实际变化量^[17]。

额济纳三角洲位于我国西北极端干旱区,冬季干冷,夏季酷热,多年平均降水量仅 35 mm(1961 年-2011 年),水资源短缺,生态环境脆弱,对气候变化非常敏感。本文选择额济纳三角洲作为研究区,利用^a20 蒸发皿蒸发量数据率定 Penpan 模型参数,并运用该模型定量分析研究区气象要素对蒸发皿蒸发量的影响。研究结果有助于深入理解气候变化对我国西北极端干旱区水循环的影响,并能够为额济纳三角洲水资源优化配置及农业灌溉管理提供基础参考。

1 数据与方法

1.1 数据

本文的研究数据来自额济纳旗气象站 1961 年-2011 年的月平均气温、月日照时数、距地面 10 m 处月平均风速、月平均相对湿度。由于额济纳旗气象站从 2002 年开始在 4 月-10 月份使用 E 601 型蒸发皿进行观测,因此本文采用 1961 年-2001 年^a20 蒸发皿蒸发量的实测数据,2002 年-2011 年的蒸发皿蒸发量数据是通过相关气象要素估算而获得的。另外,额济纳旗气象站从 1993 年开始进行太阳辐射观测,因此,本文在率定 Penpan 模型时采用 1993 年-2011 年间的月总辐射及月直接辐射。

1.2 方法

1.2.1 PenPan 模型

Rotstayn 等人^[12]提出的 Penpan 模型是用来估算 A 级蒸发器的蒸发量的,但经过修改后该模型同样可以用来估算^a20 蒸发皿的蒸发量。PenPan 模型的基本形式如下:

$$E_{Pan} = \frac{\Delta}{\Delta + a\gamma} \frac{R_n}{\lambda} + \frac{a\gamma}{\Delta + a\gamma} f_q(U) \frac{D}{\lambda} \quad (1)$$

式中: E_{Pan} 为蒸发皿蒸发量(mm); Δ 为饱和水汽压斜率(kPa/°C); γ 为干湿表常数(kPa/°C); λ 为汽化潜热(MJ/kg); D 为水汽压差(kPa); a 为热量传输与水汽传输的有效面积之比,根据 Yang 等人^[14]取 5。

R_n 为蒸发皿净辐射(MJ/d),根据下式求得:

$$R_n = (1 - a_p)R_{sp} - F \quad (2)$$

式中: F 为蒸发皿有效辐射(MJ/d),因为与蒸发皿总辐射相比,其值较小,本文采用估算水面有效辐射的邓根云式^[18]求得; a_p 为蒸发皿反射率,根据 Yang 等人^[14]取 0.14; R_{sp} 为蒸发皿总辐射(MJ/d),根据下式求得:

$$R_{sp} = [P_{rad}f_{dir} + 2(1 - f_{dir}) + 2\alpha]R_s \quad (3)$$

式中: R_s 为地表总辐射,根据童宏良式^[19]求得; P_{rad} 为蒸发皿辐射系数,根据 Yang 等人^[14]式求得; f_{dir} 为直接辐射占总辐射的比; α 为气象站地面发射率,根据 Yang 等人^[14]取 0.23。

$f_q(U)$ 为风速函数,其形式如下:

$$f_q(U) = a + bU \quad (4)$$

式中: U 为距地面 1.5 m 处风速(m/s),由距地面 10 m 处风速转换得到, a 、 b 为常数。

1.2.2 敏感系数与贡献度

本文的敏感系数为 E_{Pan} 相对变化量与单个气象要素相对变化量之比,见下式:

$$S_{V_i} = \lim_{\Delta V_i \rightarrow 0} \left[\frac{\Delta E_{Pan}/E_{Pan}}{\Delta V_i/V_i} \right] = \frac{\partial E_{Pan}}{\partial V_i} \cdot \frac{V_i}{E_{Pan}} \quad (5)$$

式中: S_{V_i} 为 E_{Pan} 关于气象要素 V_i 的敏感系数,无量纲,为正表示 E_{Pan} 随 V_i 的增加而增加,为负表示 E_{Pan} 随 V_i 的减少而减少;其绝对值的大小表明 E_{Pan} 的变化对 V_i 变化的敏感程度,值越大敏感程度越高。

贡献度指气象要素实际变化所引起的 E_{Pan} 的实际变化,为正表明引起 E_{Pan} 增加,为负表明引起 E_{Pan} 减少。将单个气象要素的敏感系数与该要素的多年相对变化相乘可得到该要素对 E_{Pan} 的贡献度^[16],如下:

$$Con_{V_i} = S_{V_i} \cdot RC_{V_i} \quad (6)$$

$$RC_{V_i} = \frac{51 \cdot Trend}{|av|} \cdot 100\% \quad (7)$$

式中: Con_{V_i} 为气象要素 V_i 对 E_{Pan} 变化的贡献度(%); RC_{V_i} 为 V_i 的多年相对变化(%); av 为 V_i 51 年的平均值; $Trend$ 为 V_i 的逐年变化率(%)。

2 结果分析

2.1 Penpan 模型参数率定及验证

在应用 Penpan 模型之前,需对模型参数进行率定。考虑到直接辐射比率 f_{dir} 的时间变异性,采用额济纳旗气象站 1993 年-2011 年的月总辐射及月直接辐射数据,求得各月月总辐射及月直接辐射的多年平均值,进而得到 f_{dir} 在各月的值,见表 1。

表1 额济纳三角洲各月直接辐射比率

Table 1 Monthly direct radiance ratios in the Ejina Delta

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
f_{dr}	0.69	0.66	0.64	0.61	0.66	0.67	0.66	0.70	0.72	0.75	0.72	0.69

在此基础上,采用1961年-1990年间的蒸发皿蒸发量及相关气象要素实测数据,根据式(1),求得 $f_q(U)$,并以最小二乘法将 $f_q(U)$ 与 U 进行拟合,来率定 a 和 b 。考虑到风速较小和较大时出现频率较低,中等风速的出现频率较高,依据风速大小将 $f_q(U)$ 与 U 进行分组(每隔0.1 m/s一组),取两者在各组的平均值后拟合。结果(见图1)表明最优拟合线为 $f_q(U) = 6.52 + 6.58U$,因此, a, b 取值分别为6.52、6.58。

为验证参数率定后模型的合理性,采用1991年-2001年间的气象要素实测数据,计算月蒸发皿蒸发量,并与实测蒸发皿蒸发量进行对比。结果(见图2)显示计算值与实测值的一致性很好(决定系数 $R^2 = 0.9637$,均方根误差 $RMSE = 10.9 \text{ mm/月}$),表明率定后的Penpan模型能有效地表达额济纳三角洲蒸发皿蒸发量与相关气象要素的关系。

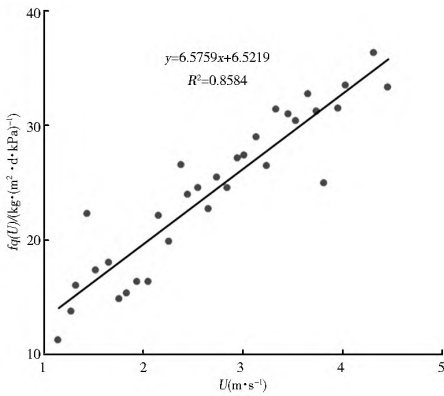


图1 $f_q(U)$ 与 U 的拟合关系

Fig. 1 Fitting line between $f_q(U)$ and U

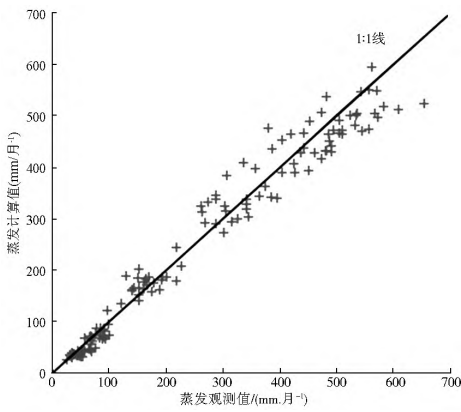


图2 蒸发皿蒸发量计算值与实测值比较

Fig. 2 Comparison between observed and calculated values of pan evaporation

2.2 蒸发皿蒸发量及相关气象要素的变化

由于缺少2002年-2011年的 $\alpha = 0.05$ 蒸发皿蒸发量实测数据,本文根据公式(1)估算该时段的蒸发皿蒸发量,以形成1961年-2011年的蒸发皿蒸发量序列,见图3,可以看出1961年-2011年,额济纳三角洲蒸发皿蒸发量呈下降趋势(通过了 $\alpha = 0.05$ 的Mann-Kendall显著性检验),其气候倾向率为 -215.5 mm/10a 。蒸发皿蒸发量变化并不是单调的,在20世纪

60年代前期急剧下降,后期缓慢上升,70年代前期较平稳,70年代后期开始下降至2002年达最低值后抬升并趋于稳定。

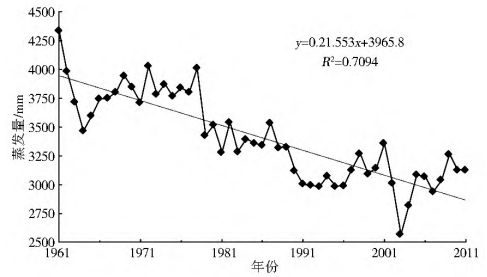
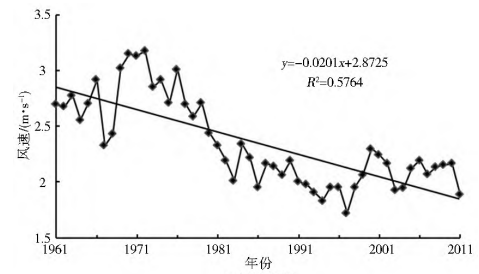


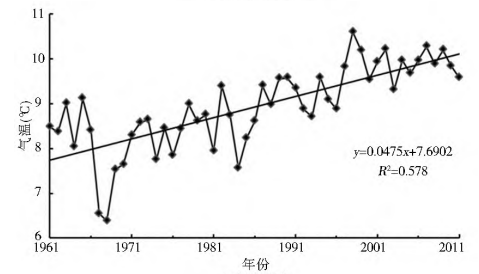
图3 额济纳三角洲蒸发皿蒸发量的变化

Fig. 3 Variation of pan evaporation in the Ejina Delta

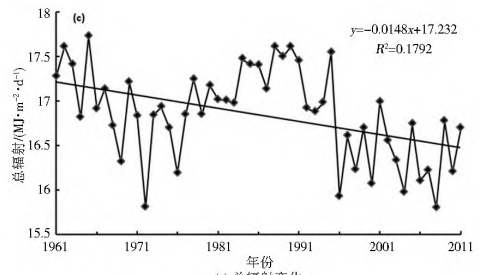
研究时段内,额济纳三角洲地区风速、平均气温、总辐射、相对湿度等要素的变化趋势见图4。可以看出,1961年-2011年,风速呈下降趋势,其气候倾向率为 $-0.2 \text{ m/(s} \cdot 10\text{a)}$ 。平均气温呈上升趋势,其气候倾向率为 $0.48 \text{ }^\circ\text{C/10a}$ 。总辐射呈下降趋势,其气候倾向率为 $-0.15 \text{ MJ/(m}^2 \cdot \text{d} \cdot 10\text{a)}$ 。相



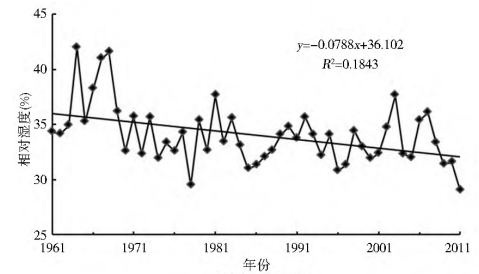
(a) 风速变化



(b) 气温变化



(c) 总辐射变化



(d) 相对湿度变化

图4 额济纳三角洲风速、平均气温、总辐射、相对湿度的变化

Fig. 4 Variations of wind speed, mean air temperature, total radiation, and relative humidity in the Ejina Delta

对湿度呈下降趋势,其气候倾向率为 $2.3\%/10a$ 。除总辐射外,风速、平均气温、相对湿度的变化趋势均通过了 $\alpha=0.05$ 的 Mann-Kendall 显著性检验。

通过图 4 还可以发现风速、平均气温、总辐射、相对湿度在 1961 年-2011 年间也呈现不同的变化特征。风速在 20 世纪 60 年代后期有较大幅度增加,此后持续下降,到 20 世纪 90 年代后期有小幅增加后保持平稳。平均气温在 60 年代后期有较大幅度下降后迅速回升,从 70 年代至今持续上升。总辐射在 60 年代呈下降趋势,70 年代及 80 年代呈上升趋势,90 年代中期开始有所下降,此后有小幅增加并保持平稳。相对湿度在 60 年代有小幅增加,此后持续下降但趋势不明显。

2.3 蒸发皿蒸发量对相关气象要素的敏感性分析

2.3.1 蒸发皿蒸发量对相关气象要素的敏感系数

根据式(5)及率定后的 Penpan 模型,计算得出额济纳三角洲蒸发皿蒸发量对相关气象要素的敏感系数,结果见图 5。

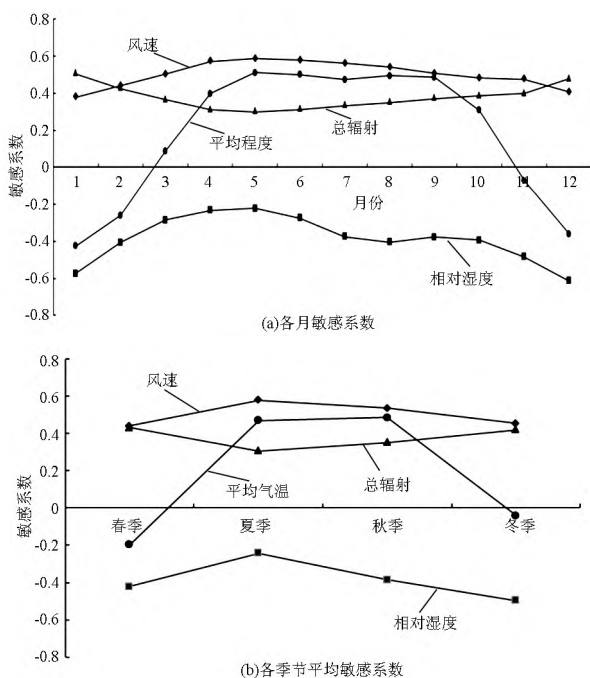


图 5 额济纳三角洲蒸发皿蒸发量对气象要素敏感系数的年内变化

Fig. 5 Intra-annual variations of sensitivities of pan evaporation to climatic variables in the Ejina Delta (Note: Fig. a shows monthly values and Fig. b shows seasonal values)

从各月的蒸发皿蒸发量对相关气象要素的敏感系数(图 5(a))可以看出:蒸发皿蒸发量对风速和总辐射的敏感系数均为正值,表明蒸发皿蒸发量随风速和总辐射的增大而增大;对相对湿度的敏感系数均为负值,表明蒸发皿蒸发量随相对湿度的增大而减小;对平均气温的敏感系数在 3 月-10 月为正值,在 11 月-2 月为负值,表明气温大于零时蒸发皿蒸发量随气温的增加而增加,气温小于零时,气温越低对蒸发皿蒸发的抑制作用越明显。从蒸发皿蒸发量对气象要素的敏感系数的绝对值大小可以看出:总体上,蒸发皿蒸发量对风速最敏感,其次是相对湿度、总辐射,对平均温

度最不敏感;在较冷季节(12 月-1 月)蒸发皿蒸发量对相对湿度最敏感;在 2 月-10 月对风速最敏感;在 1 月对风速最不敏感,在 2 月、3 月及 10 月-12 月份对平均气温最不敏感,在 4 月-6 月份对相对湿度最不敏感,7 月-8 月对总辐射最不敏感。

从蒸发皿蒸发量对气象要素的敏感系数的季节差异(见图 5(b))可以看出,一年四季中蒸发皿蒸发量均对风速最敏感,而不同季节其最不敏感的气象要素却不相同:在春季和冬季对平均气温最不敏感,在夏季对相对湿度最不敏感,在秋季对总辐射最不敏感。

2.3.2 蒸发皿蒸发量对相关气象要素敏感性的变化趋势

从 1961 年-2011 年额济纳三角洲蒸发皿蒸发对气象要素的敏感系数的年际变化情况(见图 6)来看:蒸发皿蒸发量对风速的敏感系数呈下降趋势,其气候倾向率为 $-0.02/10a$,表明蒸发皿蒸发量对风速的敏感性在下降;蒸发皿蒸发量对平均气温的敏感系数呈上升趋势,其气候倾向率为 $0.008/10a$ 。表明蒸发皿蒸发量对平均气温的敏感性在上升;蒸发皿蒸发量对总辐射的敏感系数呈上升趋势,其气候倾向率为 $0.009/10a$,表明蒸发皿蒸发量对总辐射的敏感性在上升;蒸发皿蒸发量对相对湿度的敏感系数呈上升趋势,其气候倾向率为 $0.02/10a$,表明蒸发皿蒸发量对相对湿度的敏感性在下降。以上变化趋势均通过了 $\alpha=0.05$ 的 Mann-Kendall 显著性检验。

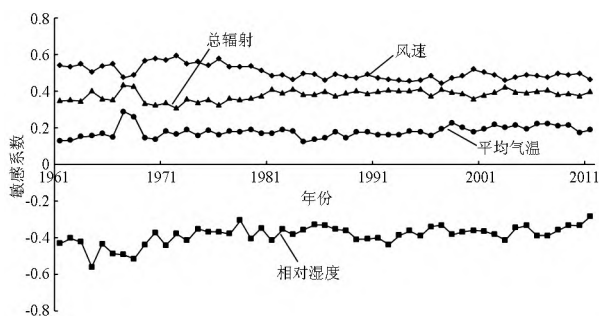


图 6 额济纳三角洲蒸发皿蒸发量对气象要素敏感系数的年际变化

Fig. 6 Inter-annual variations of sensitivities of pan evaporation to climatic variables in the Ejina Delta

2.3.3 相关气象要素对蒸发皿蒸发量变化的贡献度

从表 2 可以看出,51 年间,风速 43.7% 的减小量导致了蒸发皿蒸发量 21.9% 的减少量;平均气温 27.2% 的增加量导致了蒸发皿蒸发量 4.9% 的增加量;总辐射 4.5% 的增加导致了蒸发皿蒸发量 1.7% 的增加;相对湿度 27.5% 的增加量导致了蒸发皿蒸发量 10.7% 的减少量。可见,四项气象要素中风速是蒸发皿蒸发量变化最敏感的因素,其多年相对变化最大,因此对蒸发皿蒸发量变化的贡献度最大;平均气温是蒸发皿蒸发量变化最不敏感的因素,但其多年相对变化较大,使得其对蒸发皿蒸发量变化的贡献度也较大;蒸发皿蒸发量对总辐射的敏感性比对平均气温的敏感性高,但其多年相对变化小,使得其对蒸发皿蒸发量变化的实际贡献很小;四项气象要素中,相对湿度的多年相对变化、蒸发皿蒸发对其的敏感性及其对蒸发皿蒸发的贡献度

都处于中等水平。

表 2 额济纳三角洲气象要素对蒸发皿蒸发量的敏感系数、多年相对变化、贡献度

Table 2 Sensitivity, long term relative change, and contribution of climatic variables to pan evaporation in the Ejina Delta

气象要素	敏感系数	多年相对变化(%)	贡献度(%)
风速	0.5	-43.7	-21.9
平均温度	0.18	27.2	4.9
总辐射	0.38	4.5	1.7
相对湿度	-0.39	27.5	-10.7

3 结论

本文根据额济纳旗气象站 1961 年-1990 年的常规气象观测数据率定了 Penpan 模型中的参数,采用 1991 年-2001 年的观测数据进行了验证,从而建立了额济纳三角洲蒸发皿蒸发量与相关气象要素的关系模型。据此,通过利用额济纳三角洲 2002 年-2011 年常规气象观测数据估算,形成了 1961 年-2011 年完整时间序列的蒸发皿蒸发量。最后按照敏感性分析方法,定量分析了相关气象要素对蒸发皿蒸发量的影响。得出了以下主要结论。

(1) 1961 年-2011 年,额济纳三角洲^a 20 蒸发皿蒸发量呈下降趋势,其气候倾向率为-215.5 mm/10a。平均气温呈上升趋势,风速、总辐射、相对湿度均呈下降趋势。

(2) 总体上,蒸发皿蒸发量对风速变化最敏感,对相对湿度、总辐射变化较敏感,而对平均气温最不敏感。1961 年-2011 年,蒸发皿蒸发量对风速、相对湿度的敏感性呈下降趋势,对总辐射、平均气温的敏感性呈上升趋势。

(3) 1961 年-2011 年对蒸发皿蒸发量变化的贡献度最大的是风速变化,其次是相对湿度、平均气温,总辐射的变化对蒸发皿蒸发量变化的贡献度最小。

参考文献(References):

[1] Huntington T. G. Evidence for Intensification of the Global Water Cycle: Review and Synthesis[J]. Journal of Hydrology, 2006, 319(1-4): 83-95.

[2] Brutsaert W., Parlange M. B. Hydrologic Cycle Explains the Evaporation Paradox[J]. Nature, 1998, 396(6706): 30-30.

[3] Ohmura A., Wild M. Is the Hydrological Cycle Accelerating[J]. Science, 2002, 298(5597): 1345-1346.

[4] 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[J]. 水科学进展, 2007, 18(03): 311-318. (ZENG Yan, QIU Xinfa, LIU Changming, et al. Changes of Pan Evaporation in China in 1960-2000[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(03): 311-318. (in Chinese))

[5] 刘昌明,张丹. 中国地表潜在蒸散对敏感性的时空变化特征分析[J]. 地理学报, 2011, 66(05): 579-588. (LIU Changming, ZHANG Dan. Temporal and Spatial Change Analysis of the Sensitivity of Potential Evapotranspiration to Meteorological

Influencing Factors in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(05): 579-588. (in Chinese))

[6] LIU B., XU M., Henderson M., et al. A Spatial Analysis of Pan Evaporation Trends in China, 1955-2000[J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109(D15): D5102.

[7] SHEN Y., LIU C., LIU M., et al. Change in Pan Evaporation over the Past 50 years in the Arid Region of China[J]. Hydrological Processes, 2010, 24(2): 225-231.

[8] ZHENG H., LIU X., LIU C., et al. Assessing Contributions to Pan Evaporation Trends in Haihe River Basin, China[J]. Journal of Geophysical Research, 2009, 114(D24): D24105.

[9] 侯兰功,肖洪浪,邹松兵,等. 额济纳绿洲生长季参考作物蒸散发敏感性分析[J]. 中国沙漠, 2011, 31(05): 1255-1259. (HOU Lan Gong, XIAO Hong-lang, ZOU Song-bing, et al. Sensitivity of Reference Evapotranspiration During Growing Season to Major Climatic Variables in the Ejina Oasis[J]. Journal of Desert Research, 2011, 31(05): 1255-1259. (in Chinese))

[10] Thom A. S., Thony J. L., Vauclin M. On the Proper Employment of Evaporation Pans and Atmometers in Estimating Potential Transpiration[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1981, 107(453): 711-736.

[11] Pereira A. R., Villa Nova N. A., Pereira A. S., et al. A Model For the Class A Pan Coefficient[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1995, 76(2): 75-82.

[12] Leon D. Rotstajn, Michael L. Roderick, Farquhar G. D. A Simple Pan evaporation Model for Analysis of Climate Simulations: Evaluation over Australia[J]. Geophysical Research Letters, 2006, 33(17): 5.

[13] Linacre E. T. Estimating U. S. Class A Pan Evaporation from Few Climate Data[J]. Water International, 1994, 19(1): 5-14.

[14] YANG H., YANG D. Climatic Factors Influencing Changing Pan Evaporation Across China from 1961 to 2001[J]. Journal of Hydrology, 2012, 414 - 415(0): 184-193.

[15] Roderick M. L., Rotstajn L. D., Farquhar G. D., et al. On the Attribution of Changing Pan Evaporation[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34(17): L17403.

[16] 曹雯,申双和,段春锋. 西北地区生长季参考作物蒸散变化成因的定量分析[J]. 地理学报, 2011, 66(03): 407-415. (CAO Wen, SHEN Shuang-he, DUAN Chunfeng. Quantification of the Causes for Reference Crop Evapotranspiration Changes in Growing Season in Northwest China[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(03): 407-415. (in Chinese))

[17] YIN Y., WU S., CHEN G., et al. Attribution Analyses of Potential Evapotranspiration Changes in China Since the 1960s[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2010, 101(1): 19-28.

[18] 邓根云. 水面蒸发量的一种气候学计算方法[J]. 气象学报, 1979, 37(03): 87-96. (DENG Genyun. A Climatic Calculative Method of Evaporation from Open Water[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1979, 37(03): 87-96. (in Chinese))

[19] 童宏良. 我国蒸发力计算的气候学方法[J]. 南京气象学院学报, 1989, 12(01): 19-33. (TONG Hongliang. A Climatic Calculation Method for the Evaporation Power in China[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 1989, 12(01): 19-33. (in Chinese))