

DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2014.03.008

四川盆地蒸发皿蒸发量变化趋势及影响因子分析

杨甫乐¹, 荣艳淑¹, 杨甫光²

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 2. 四川省煤监局安全技术中心, 四川 成都 610000)

摘要: 利用四川盆地蒸发皿蒸发量、气温、风速、日照时数、气压和水汽压资料, 分析了1980—2010年四川盆地蒸发皿蒸发量的变化及其原因。结果表明, 四川盆地蒸发皿蒸发量存在明显的时空变化特征, 空间上川中丘陵区的蒸发皿蒸发量最大, 川西平原次之, 川东平行岭谷区域最小; 时间上年蒸发皿蒸发量存在明显的波动上升趋势, 季节序列中, 秋季和冬季蒸发皿蒸发量增加趋势明显, 春季和夏季没有明显趋势。对蒸发皿蒸发量变化有显著影响的气象因子依次为日照时数、平均风速、水汽压和气温, 其中日照时数对蒸发皿蒸发量的增大作用是风速的1.71倍, 是水汽压的2.48倍, 而气温具有减少蒸发皿蒸发量的作用, 其减弱蒸发皿蒸发量的平均强度是日照时数的1/4。

关键词: 蒸发皿蒸发量; 因子分析; 影响因子; 四川盆地

中图分类号: TV14 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2014)03-0038-07

Analysis of pan evaporation change trend and its influencing factors in Sichuan Basin

YANG Fule¹, RONG Yanshu¹, YANG Fuguang²

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Safety and Technology Center of Sichuan Coal Mine Safety Bureau, Chengdu 610000, China)

Abstract: Based on the data of daily pan evaporation, air temperature, wind speed, sunshine duration, air pressure, and vapor pressure of the Sichuan Basin, the pan evaporation variation and its causes in the basin from 1980 to 2010 were analyzed. The results show that the pan evaporation in the Sichuan Basin had obvious spatial and temporal variation characteristics. The largest pan evaporation was found in midland Sichuan Basin with hilly areas, followed by that in the western Sichuan Plain, and the smallest pan evaporation was found in the parallel valley area in eastern Sichuan Basin. A significant upward trend was found in the annual pan evaporation. The pan evaporation had a significant increasing trend in the autumn and winter, while no significant trend was found in the spring and summer. The main meteorological factors influencing the pan evaporation included the sunshine duration, the average wind speed, vapor pressure, and air temperature, and the impact of sunshine duration on the pan evaporation increase was 1.71 times that of the wind speed, and 2.48 times that of the vapor pressure. However, the air temperature could reduce the pan evaporation, and the pan evaporation reduced by the air temperature was one fourth of that reduced by the sunshine duration on average.

Key words: pan evaporation; dimensional analysis; impact factor; Sichuan Basin

地球气候系统正经历显著的气候变化, 这种变化导致全球大小水文循环发生改变^[1-2]。地表蒸发是水文循环的重要组成部分, 全球陆地多年平均蒸

发量占陆面降水量的2/3, 是地表径流量的2倍^[3], 因此, 研究蒸发量变化有重要价值。

近几十年来有大量的研究致力于区域蒸发量的

基金项目: 国家自然科学基金(41371050)

作者简介: 杨甫乐(1985—), 男, 硕士研究生, 研究方向为流域水生态环境演变规律。E-mail: 824631449@qq.com

通信作者: 荣艳淑, 教授。E-mail: ysron@hhu.edu.cn

变化与估计。研究^[4-5]发现世界许多地区存在“蒸发悖论”现象,即区域气温升高而蒸发皿蒸发量减少。这些地区包括西伯利亚大草原,中亚地区^[6],美国大部分地区^[7],中国的黄河流域上下游^[8]和长江流域^[9]。还有一些地区不存在“蒸发悖论”现象,即区域气温升高的同时蒸发皿蒸发量也增加,如美国东南部,墨西哥湾,西伯利亚森林地区^[10],中国的东北地区^[11-12]和黄河流域中游^[13]等。整个中国大约有66%的地区蒸发皿蒸发量存在下降现象,34%的地区存在增加现象^[14]。因此,全球各地蒸发皿蒸发量既有增加现象,也有减少现象,变化并不一致。这种变化对环境系统、生态系统等,特别是对区域水循环系统产生了重大影响。

本文的研究区域是具有独特气候特征的四川盆地,该盆地是中国相对湿度最大和日照时数最少的几个地区之一^[15-16];在全球气候变暖背景下,该盆地又是一个气温下降的地区^[17-18]。在这种独特的气候背景下,该盆地蒸发皿蒸发量的变化特征尚不清楚。

笔者利用气象站的观测资料分析四川盆地1980—2010年蒸发皿蒸发量变化特征,并探讨影响其变化的主要气候因子的变化规律,以期对四川省和重庆市大部分地区水资源的开发利用、评价和规划提供一定的科学依据。

1 研究区域概况、数据来源及分析方法

四川盆地(图1)又称巴蜀盆地,由连接的山脉环绕而成。位于亚洲大陆中南部,西依青藏高原和横断山脉,北近秦岭,南缘大凉山,西缘龙门山和大巴山,包括四川省中东部和重庆市大部,总面积约26万km²。四川盆地地形闭塞,气温高于同纬度其他地区,由于冷空气受到北方秦岭、大巴山阻挡,四川盆地平均温度比长江中下游地区高许多。东南部山区地势相对较低,有利于水汽进入;西北部山区地势相对较高,不利于水汽散失,导致空气湿度高,天气阴雨多雾,成为我国日照时间最少的地区之一。四川盆地因封闭的地形常年风速偏低,成为我国年

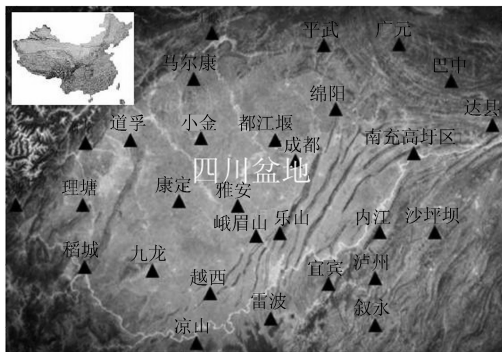


图1 四川盆地气象站点分布

平均风速最小的地区之一。

1.1 数据来源

数据来源于四川盆地30个观测站1980—2010年逐日20cm口径小型蒸发皿蒸发量、日照时数、温度、风速和相对湿度等观测资料,采用30个观测站的平均值。季节的划分采用气候季节,即3—5月为春季,6—8月为夏季,9—11月为秋季,12月至翌年2月为冬季。

1.2 分析方法

1.2.1 时间序列分析

时间序列分析包括时间变化分析和趋势变化分析。

数据的时间变化分析主要利用距平和累积距平完成。距平是指相对于该数据的某个长期平均值(如30年平均值,本文以1980—2010年的平均值为气候均值)是大还是小,可以获得分析数据在不同时期相对于均值的变化程度。累积距平即距平值的累加,它反映时间序列不同阶段的上升与下降趋势。

M-K方法是一种非参数统计检验方法^[19],其优点是不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值干扰,适用于类型变量和顺序变量,计算也较方便。

M-K方法可以检测时间序列的趋势是否达到某种显著性水平,但是,无法获得趋势的具体数值。因此,本文利用一元线性回归方法,通过回归系数,获得时间序列的线性趋势数值。通常将线性趋势值放大10倍,得到的便是气象要素每10年的变化率。如果经M-K检验确定某个趋势是显著的,那么,该线性趋势值也可以认为是显著的。

利用距平、累积距平分析蒸发皿蒸发量的变化特征,运用线性回归方程估计蒸发皿蒸发量以及影响蒸发皿蒸发量变化的气候因子的变化趋势。

1.2.2 偏相关系数

讨论气象要素的关系时,一般做法是假定气象要素之间的关系是线性的,这样可以用简单相关系数计算它们之间的相关程度,以此为依据,讨论每两个气象要素之间的相关程度。但是,这种假设过于简便,以至于难于反映气象要素之间的本质联系。因此,本文采用偏相关系数讨论蒸发皿蒸发量与各气象要素之间的关系。

偏相关系数是在控制其他变量情况下,两个变量之间的线性相关程度,通常称控制变量的个数为阶,一个变量为一阶,两个变量为二阶,以此类推。偏相关计算公式为:

一阶偏相关公式:

$$r_{12,3} = \frac{r_{12} - r_{13}r_{23}}{\sqrt{1 - r_{13}^2} \sqrt{1 - r_{23}^2}} \quad (1)$$

式中: r_{12} 为变量 x_1, x_2 的简单相关系数; r_{13} 为变量 x_1, x_3 的简单相关系数; r_{23} 为变量 x_2, x_3 的简单相关系数, $r_{12,3}$ 为在控制变量 x_3 的情况下(消除变量 x_3 的影响), x_1 和 x_2 的偏相关系数。

二阶偏相关公式:

$$r_{12,34} = \frac{r_{12,3} - r_{14,3}r_{24,3}}{\sqrt{1 - r_{14,3}^2} \sqrt{1 - r_{24,3}^2}} \quad (2)$$

k 阶偏相关公式:

$$r_{12,34 \dots k} = \frac{r_{12,34 \dots k-1} - r_{1k,34 \dots k-1}r_{2k,34 \dots k-1}}{\sqrt{1 - r_{1k,34 \dots k-1}^2} \sqrt{1 - r_{2k,34 \dots k-1}^2}} \quad (3)$$

式中: $r_{12,34}$ 为变量 x_1 和 x_2 在消除变量 x_3 和 x_4 影响后的偏相关系数; 其余以此类推。

偏相关系数的取值与简单相关系数一样, 相关系数绝对值愈大(愈接近 1), 表明变量之间的线性相关程度愈高; 相关系数绝对值愈小, 表明变量之间的线性相关程度愈低。

1.2.3 因次分析法

蒸发量的变化受多种因素的影响, 评估影响因素的强弱是估算蒸发量变化的重要一环。本文利用相似理论中的因次分析法^[20], 分析影响蒸发量的主要气候因子。因次分析法的基础是因次一致性原则, 即凡是根据基本物理规律导出的物理量方程, 其中各项的因次必然相等。

从彭曼公式中可以得到, 影响蒸发量(E)的主要气候要素包括日平均气温(t)、气温日较差(t_R)、水汽压(V_p)、日照时数(S_d)、风速(W)、相对湿度(R)、和气压(P)等多种气象要素。根据道尔顿经典蒸发公式本文仅选用平均风速、气温、水汽压、日照时数和气压作为基本影响因素, 其中, 气温日较差属于气温数据的变形, 因此, 此处忽略气温日较差, 仅考虑气温的影响。

蒸发量与其他几种气象要素的函数关系为

$$f(E, W, t, V_p, S_d, P) = 0 \quad (4)$$

选定风速、日照时数和气温作为基本因次, 各气象要素的量纲按式(5)表达:

$$\begin{cases} (E) = L \\ (W) = LT^{-1} \\ (V_p) = ML^{-1}T^{-2} \\ (P) = ML^{-1}T^{-2} \\ (t) = ML^2T^{-2} \\ (S_d) = T \end{cases} \quad (5)$$

此处考虑的气候要素个数为 $n=6$, 取基本因次数 $m=3$, 由此可得到 $n-3=3$ 个无量纲综合量 π 。建立方程, 则:

$$\pi_1 = W^a S_d^b t^c E = (LT^{-1})^a (T)^b (ML^2T^{-2})^c L = M^0 T^0 L^0 \quad (6)$$

根据因次一致性原则, 式(6)中, $a=b=-1, c=0$, 因此

$$\pi_1 = W^{-1} S_d^{-1} E \quad (7)$$

同理:

$$\pi_2 = W^3 S_d^3 t^{-1} P \quad (8)$$

$$\pi_3 = W^3 S_d^3 t^{-1} V_p \quad (9)$$

$$\text{由于 } f(\pi_1, \pi_2, \pi_3) = 0 \quad (10)$$

可以得出:

$$E = f(PW^3 S_d^3 t^{-1}) V_p W^4 S_d^4 t^{-1} \quad (11)$$

其中 $f(PW^3 S_d^3 t^{-1})$ 为无量纲系数, 可以用实际数据率定出来。

从式(11)可见, 四川盆地的蒸发量跟风速、日照时数的 4 次方及水汽压的 1 次方呈正相关, 跟温度的 1 次方呈负相关, 表明日照时数和风速对四川盆地的蒸发皿蒸发影响最大, 其次是温度和水汽压。

2 蒸发皿蒸发量的变化特征

2.1 蒸发皿蒸发量的季节变化

表 1 是 1980—2010 年四川盆地蒸发皿蒸发量变化的统计数据。由表 1 可见, 1980—2010 年四川盆地年平均蒸发皿蒸发量为 1412.3 mm, 其中, 春季为 451.8 mm, 约占全年的 32.0%, 夏季为 467.0 mm, 约占全年的 33.0%, 秋季为 284.5 mm, 约占全年的 20.0%, 冬季为 209.0 mm, 约占全年的 15.0%。因此, 四川盆地春、夏季蒸发皿蒸发量数值接近, 是蒸发皿蒸发量最大的季节, 其次是秋季, 冬季最小。

表 1 1980—2010 年四川盆地蒸发皿蒸发量变化统计数据

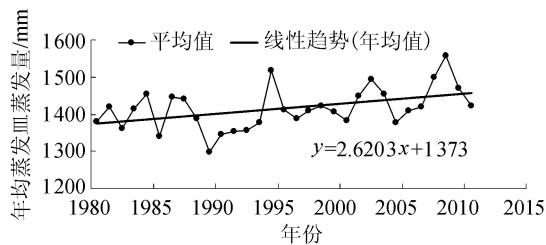
时段	蒸发皿蒸发量均值/mm	季节占年总量的比例/%	线性趋势/(mm·a ⁻¹)	M-K 统计量	显著性水平/%
春季	451.8	32.0	-0.38	-0.54	
夏季	467.0	33.0	0.41	0.47	
秋季	284.5	20.0	1.87	3.06	99
冬季	209.0	15.0	0.67	1.74	90
全年	1412.3		2.62	2.04	95

四川盆地相对于中国其他地区, 年蒸发皿蒸发量比黄河流域小约 300 mm^[21], 比珠江流域小约 120 mm^[22], 比淮河流域大约 400 mm^[11]。四川盆地一年四季湿度较大, 但是, 蒸发皿蒸发量并不是最小的。

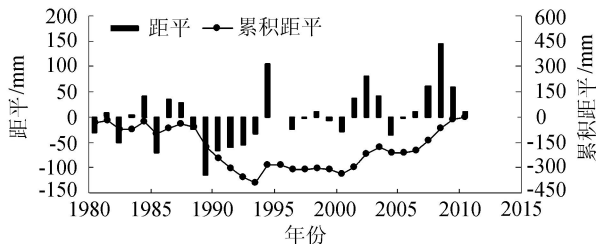
2.2 蒸发皿蒸发量的年际变化特征

图 2 是四川盆地年蒸发皿蒸发量和距平、累积距平的时间变化曲线。从图 2(a) 中可见, 1980—2010 年四川盆地蒸发皿蒸发量呈波动增加趋势, 年最大蒸发皿蒸发量出现在 2007 年, 为 1556.9 mm, 年最小蒸发皿蒸发量为 1298.1 mm, 出现在 1989 年。从线性趋势线可见, 蒸发皿蒸发量的增加趋势很显著, 达到了 2.62 mm/a 的程度, 通过了 $\alpha=0.05$

的统计显著性检验。



(a) 年蒸发量时间序列



(b) 距平和累积距平时间序列

图2 四川盆地蒸发皿年蒸发量和距平、累积距平的时间变化曲线

由图2(b)可见,年蒸发皿蒸发量在1994年之前以负距平为主,大多数年份的蒸发皿蒸发量小于平均值,1994年之后以正距平为主,大多数年份的蒸发皿蒸发量大于平均值。1980—1990年,累积距平曲线呈波动式下降趋势,年蒸发皿蒸发量多为负距平,为蒸发皿蒸发量相对偏小的阶段;1990年前后累积距平曲线呈一致的下降趋势,1995年以后累积距平曲线呈波动增加趋势;进入21世纪累积距平曲线呈明显的上升趋势,为蒸发皿蒸发量相对偏大阶段。这种特征具有明显的年代际变化特征。

图3是季蒸发皿蒸发量累积距平的时间变化曲线,秋、冬季蒸发皿蒸发量累积距平曲线与年累积距平曲线变化相似,总的趋势都是先下降后上升,表明1980—1990年,蒸发皿蒸发量下降趋势明显,1990年以后蒸发量增加明显,具有明显的年代际变化特征。然而,春、夏季累积距平曲线与秋、冬季节有显著差别,其累积距平曲线呈现围绕0值波动变化,即变化周期较短,波动性较大。对比表1中的趋势数值及趋势显著性可以发现,秋、冬季序列和年序列具有显著的变化趋势(显著性水平超过90%),而春、

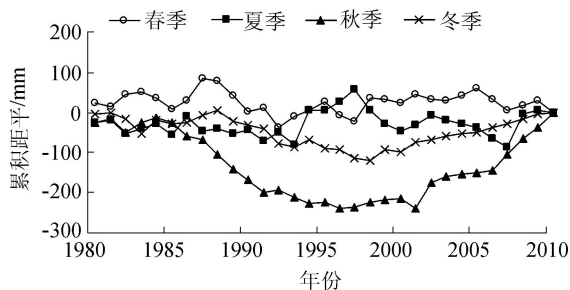


图3 季节蒸发皿蒸发量累积距平的时间变化

夏两个季节序列则不具有明显趋势,与图3的结果是一致的。

2.3 蒸发皿蒸发量的空间分布特征

图4为年和四季蒸发皿蒸发量的空间分布图,由图4可见,整个四川盆地,年和季蒸发皿蒸发量都具有由东向西逐渐增大的空间分布特征。在年蒸发皿蒸发量的分布(图4(a))中,最大与最小蒸发皿蒸发量相差190mm左右,其中盆地东部的川东平行岭谷区域基本在1300mm以下,盆地西部的川西平原区年蒸发皿蒸发量在1440mm以上,中部的川中丘陵地带在1400~1430mm之间。在季蒸发皿蒸发量的分布中,区域差异较小,例如,在图4(b)中,春季蒸发皿蒸发量东部、中部和西部相差60mm左右;夏季、秋季和冬季的差异偏小,在50mm左右(图4(c)~图4(e))。

鉴于四川盆地蒸发皿蒸发量存在明显的空间差异,根据文献[23]的划分,分别计算川西平原、川中丘陵和川东平行岭谷3部分的蒸发皿蒸发量的变化(表2)。由表2可知,川中丘陵区的蒸发皿蒸发量最大,川西平原次之,川东平行岭谷区域最小,但是,前两个地区蒸发皿蒸发量数值接近,它们与川东平行岭谷区域的数值差异明显。分析表明,3个区域的蒸发皿蒸发量均存在上升趋势,且都通过了90%的显著性水平检验,其中,川东岭谷的平均蒸发皿蒸发量最小,其线性增加的程度最大,通过了99%显著性水平检验,表明川东岭谷的蒸发皿蒸发量变化最明显。

表2 四川盆地不同区域的平均蒸发皿蒸发量、趋势及M-K统计量

区域	蒸发皿蒸发量 均值/mm	线性趋势/ (mm · a ⁻¹)	M-K 统计量	显著性 水平/%
川西平原	1467.92	1.050	1.5627	90
川中丘陵	1474.23	1.470	1.6623	90
川东岭谷	1274.25	5.724	4.3407	99

3 影响蒸发皿蒸发量变化的因素分析

前面分析表明,对蒸发皿蒸发量影响最大的气象要素分别是日照时数、风速、水汽压和气温。下面就这几个气象要素的变化及其对四川盆地蒸发皿蒸发量变化的影响逐一分析。

由式(11)可以看出,风速和日照时数与蒸发皿蒸发量呈指数关系,是影响该地区蒸发皿蒸发量变化最大的影响因素;水汽压和气温与蒸发皿蒸发量的关系分别呈正比和反比关系。因此,风速和日照时数的微小变化可引起蒸发皿蒸发量显著变化,而气温和水汽压的作用略小,且作用相反。这种特征与其他地区有所不同,大多数地区气温对蒸发皿蒸

发量有正影响,而水汽压为负影响^[24-25]。这种现象与四川盆地独特的地理特征有密切关系。

为了验证气象要素与四川盆地蒸发皿蒸发量的关系,本文计算了气象要素与蒸发皿蒸发量的偏相关系数(表3)。由表3可见,年和季节日照时数均与蒸发皿蒸发量的关系呈显著正相关,其统计显著性水平基本在0.05以上。风速与蒸发皿蒸发量也具有正相关关系,显著性水平接近或超过0.05。气温和水汽压与蒸发皿蒸发量分别为负相关和正相关,但是,它们都没有通过统计显著性检验。这个结果与式(11)所反映的结果基本一致。

表3 蒸发皿蒸发量与气象要素的偏相关系数

气象要素	偏相关系数				
	年	春	夏	秋	冬
日照时数	0.5759	0.4012	0.5938	0.6263	0.3916
风速	0.3361	0.2507	0.3812	0.4056	0.2739
气温	-0.1411	-0.0827	-0.1652	-0.1728	-0.1136
水汽压	0.2322	0.1205	0.2834	0.2617	0.1038

为了从更长的时间尺度讨论气象要素的变化,图5选择的时间序列从1960年开始到2010年终止,同时,为了与蒸发皿蒸发量的时间尺度相对应,将气象要素的时间尺度划分为2个时段,前一时段为1960—1979年,后一时段为1980—2010年。

由图5(a)可见,日照时数在前后2个时段有明显变化,前一时段呈微弱下降趋势,没有通过统计显著性检验,后一时段呈明显上升趋势,达到了0.01显著性水平。

由图5(b)可见,年平均风速的变化也存在前后两个时段的差异,在1980年以前,平均风速下降趋势明显,而后一时段上升趋势明显,且都达到了0.01显著性水平。

在图5(c)中,年平均气温的变化同样存在2个时段的差异,前一时段气温明显下降,与前人的分析^[17-18]一致,后一时段上升趋势非常明显,其中下降和上升趋势都达到了0.01显著性水平。

在图5(d)中存在与图5(a)~(c)完全不同的变化特征,对于水汽压而言,并不存在前后2个时段的差异,水汽压表现为整个时间尺度具有一致的变化特征,且存在一个微弱的上升趋势,但是,没有达到统计显著性水平,因此,水汽压无明显趋势。

由相似理论 π 定理及偏相关系数分析得出,日照时数和风速是影响四川盆地蒸发皿蒸发量变化的最主要的因子,气温和水汽压是次要因子。显然,四川盆地日照时数和风速的上升趋势对蒸发皿蒸发量的增大有正效应,叠加上水汽压微弱的上升趋势,都会导致蒸发皿蒸发量增大;而四川盆地的气温也有

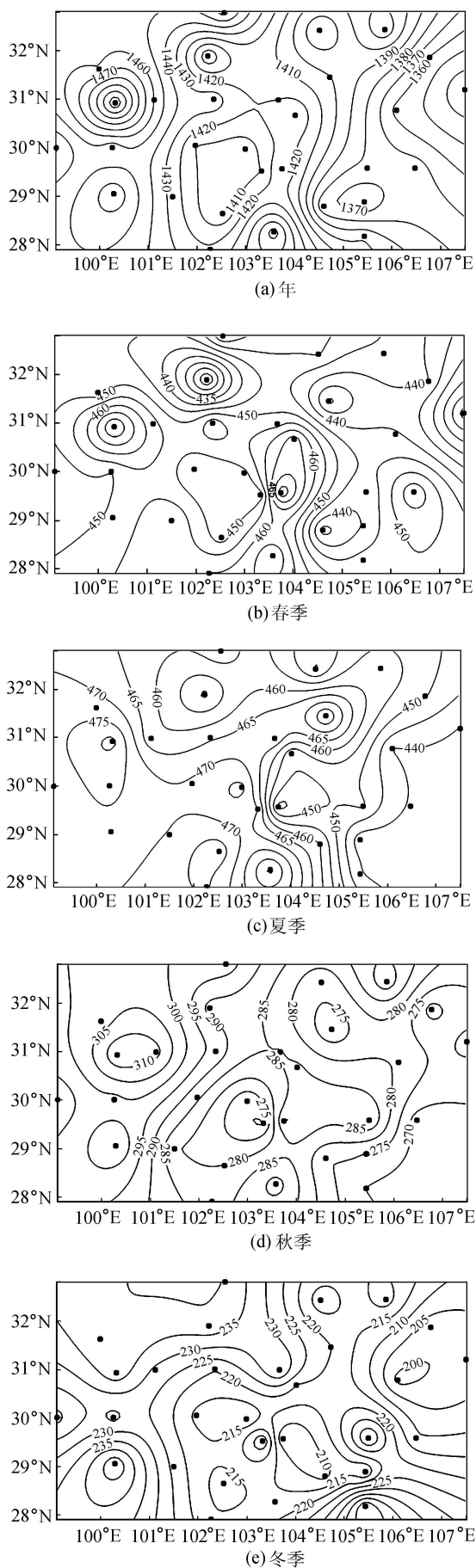


图4 年和季节蒸发皿蒸发量的空间分布(单位:mm)

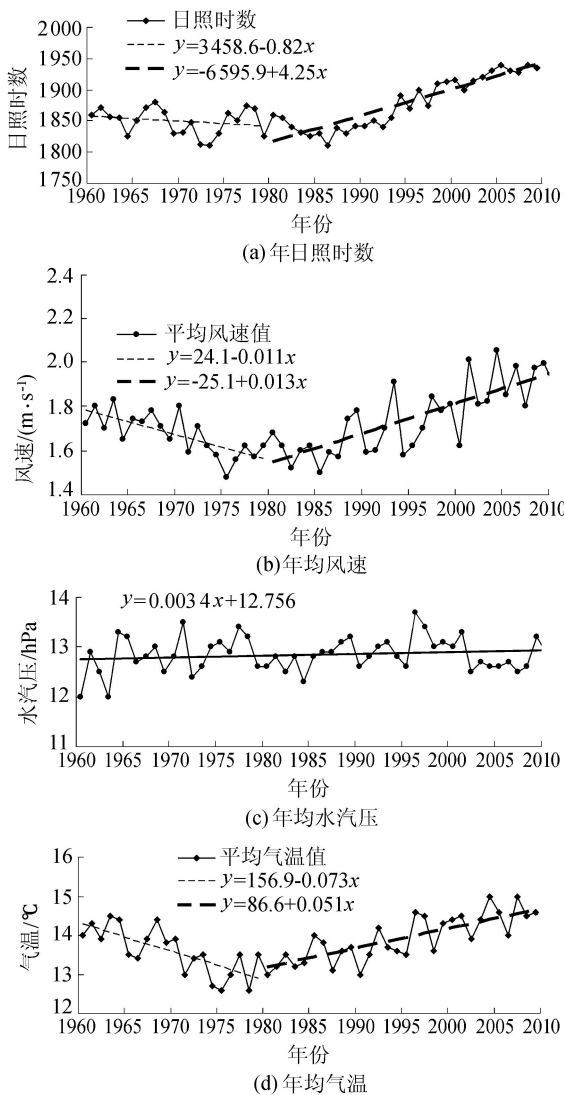


图5 气象要素的时间序列变化曲线

明显的上升趋势,但是由于气温上升对蒸发皿蒸发量有负效应,因此,它的增大会削弱蒸发皿蒸发量增大的趋势。

如果将偏相关系数的作用理解为气象因子对蒸发皿蒸发量的贡献力,可以发现,在表3的年序列中,日照时数的贡献力分别是风速和水汽压贡献力的1.71和2.48倍;在春、夏、秋和冬四季序列中,日照时数分别是风速作用的1.60、1.56、1.54和1.43倍,是水汽压的3.33、2.10、2.39和3.77倍。尽管因次分析中日照时数和风速对蒸发皿蒸发量的作用相当,但是,在四川盆地的实际情况中,日照时数的作用比风速大1倍以上,比水汽压大2~3倍。将气温的偏相关系数取绝对值,可以发现,气温的作用仅仅是日照时数的1/4、1/5、1/3、1/3和1/3(年和春夏秋冬)。这就表明气温的作用仅相当于将日照时数的贡献力削弱了1/5~1/3,不会使蒸发皿蒸发量下降。

因此,四川盆地辐射对蒸发皿蒸发量的作用相当重要,一旦该地区辐射受到影响,日照时数下降,

蒸发过程便会受到抑制,蒸发皿蒸发量减小。

4 结论

a. 四川盆地蒸发皿蒸发量在1400 mm/a左右,自东向西呈逐渐增多的空间分布特征,川中丘陵区的蒸发皿蒸发量最大,川西平原次之,川东平行岭谷区域最小,最大空间差异达190 mm左右;季节蒸发皿蒸发量与年值的空间分布相似,只是空间差异减小50~60 mm。年和季节蒸发皿蒸发量都存在增大趋势,其中,蒸发皿蒸发量增大趋势达到2.62 mm/a,通过了0.05的显著性检验;季节蒸发皿蒸发量中,只有冬季和秋季存在显著性增加趋势,夏季有微弱的上升趋势,春季有微弱的下降趋势,但是,春季和夏季的趋势都没有通过显著性检验,可认为无明显趋势。

b. 影响四川盆地蒸发皿蒸发量变化的主要气象要素依次为日照时数、风速、水汽压和气温,其他气象要素的作用可以用这4个气象要素替代。但是这4个气象要素对蒸发皿蒸发量的作用明显不同,日照时数和风速对蒸发皿蒸发量有显著的正效应,水汽压有微弱的正效应,而气温有减弱蒸发皿蒸发量的效应,其中,日照时数的正效应分别是平均风速和水汽压的1.71和2.48倍,而气温的负效应可以使日照时数的效应平均下降1/4,不同季节它们之间的倍数关系略有不同。这是四川盆地与其他地方显著的不同之处。

参考文献:

- [1] BRUTSAERT W, PARLANGE M B. Hydrologic cycle explains the evaporation paradox [J]. *Nature*, 1998, 396 (24): 30.
- [2] 丁一汇. 人类活动与全球气候变化及其对水资源的影响 [J]. *中国水利*, 2008, 2 (8): 20-27. (DING Yihui. Human activities and global climate change and its impact on water resources [J]. *China Water Resources*, 2008, 2 (8): 20-27. (in Chinese))
- [3] 左金清,任宏利,李维京,等. 我国南方夏季低频雨型的季节内水汽输送特征 [J]. *地球物理学报*, 2009, 52 (9): 2210-2221. (ZUO Jinqing, REN Hongli, LI Weijing, et al. Intraseasonal characteristics of the water vapor transport associated with the low-frequency rainfall regimes over Southern China in summer [J]. *Journal of Geophysics*, 2009, 52 (9): 2210-2221. (in Chinese))
- [4] 宋萌勃,陈吉琴. 长江流域1951—2000年蒸发皿蒸发量变化趋势 [J]. *水资源保护*, 2011, 27 (1): 23-17. (SONG Mengbo, CHEN Jiqin. Pan evaporation trend in Yangtze River Basin from 1951 to 2000 [J]. *Water Resources Protection*, 2011, 27 (1): 23-17. (in Chinese))

- Chinese))
- [5] 荣艳淑,张行南,姜海燕,等. 长江上游区域蒸发皿蒸发量变化及其对水循环的影响[J]. 地球物理学报, 2012, 55 (9): 2889-2897. (RONG Yanshu, ZHANG Xingnan, JIANG Haiyan, et al. Pan evaporation change and its impact on water cycle over the upper reach of the Yangtze River[J]. Journal of Geophysics, 2012, 55 (9): 2889-2897. (in Chinese))
- [6] HOUGHTON J, DING Y, GRIGGS D J. Climate change: scientific basis, IPCC TAR Working Group 1 [J]. The Press Syndicate of Cambridge University, 2001, 22 (3): 12-16.
- [7] WALTER M T, WILK D S. Increasing evapotranspiration from the conterminous United States [J]. Journal of Hydrometeorology, 2004, 5 (3): 405-408.
- [8] 白路遥,荣艳淑. 气候变化对长江、黄河源区水资源的影响[J]. 水资源保护, 2012, 28 (1): 46-50. (BAI Luyao, RONG Yanshu. Impact of climate change on water resources in source regions of Yangtze River and Yellow River[J]. Water Resources Protection, 2012, 28 (1): 46-50. (in Chinese))
- [9] 魏光辉,马亮. 基于灰色关联与 RBF 神经网络的水面蒸发量预测[J]. 干旱气象, 2009, 27 (1): 73-77. (WEI Guanghui, MA Liang. Prediction of water surface evaporation based on grey-relation analysis and RBF neural network [J]. Journal of Meteorological Drought, 2009, 27 (1): 73-77. (in Chinese))
- [10] RAMANATHAN V, CRUTSEN P J, KIEHL T, et al. Aerosols, climate, and the hydrological cycle[J]. Science, 2001, 294 (5549): 2119-2124.
- [11] 荣艳淑,周云,王文,等. 淮河流域蒸发皿蒸发量变化分析[J]. 水科学进展, 2011, 22 (1): 15-22. (RONG Yanshu, ZHOU Yun, WANG Wen, et al. Analysis of pan evaporation changes in the Huaihe River basin [J]. Advances in Water Science, 2011, 22 (1): 15-22. (in Chinese))
- [12] 从振涛,倪广恒,杨大文,等. “蒸发悖论”在中国的规律分析[J]. 水科学进展, 2008, 19 (2): 147-152. (CONG Zhentao, NI Guangheng, YANG Dawen, et al. Evaporation paradox in China [J]. Advances in Water Science, 2008, 12 (2): 147-152. (in Chinese))
- [13] 谢平,陈晓宏. 东江流域蒸发皿蒸发量及其影响因子特征分析[J]. 热带地理, 2008, 28 (4): 306-310. (XIE Ping, CHEN Xiaohong. The changes of the pan evaporation and their influencing climate factors over the Dongjiang basin [J]. Journal of Tropical Geography, 2008, 28 (4): 306-310. (in Chinese))
- [14] CONG Z T, YANG D W, NI G H. Does evaporation paradox exist in China? [J]. Hydrology & Earth System Sciences, 2009, 13 (3): 357-366.
- [15] 刘劲龙,徐刚,杨娟,等. 近 55 年来四川盆地气候干湿变化趋势分析[J]. 西南大学学报, 2013, 35 (1): 138-142. (LIU Jinlong, XU Gang, YANG Juan, et al. Climatic variation of dryness and wetness in Sichuan basin during 1955-2009 [J]. Journal of Southwest University, 2013, 35 (1): 138-142. (in Chinese))
- [16] 杨小梅,安文玲,王亚敏,等. 中国西南地区日照时数变化及影响因素[J]. 兰州大学学报, 2012, 48 (5): 52-59. (YANG Xiaomei, AN Wenling, WANG Yamin, et al. Variation of sunshine hours and related driving forces in southwestern China [J]. Journal of Lanzhou University, 2012, 48 (5): 52-59. (in Chinese))
- [17] 魏凤英,曹鸿兴,王丽萍. 20 世纪 80 ~ 90 年代我国气候增暖进程的统计事实[J]. 应用气象学报, 2003, 14 (1): 79-86. (WEI Fengying, CAO Hongxing, WANG Liping. Climatic warming process during 1980S-1990S in China [J]. Journal of Applied Meteorology, 2003, 14 (1): 79-86. (in Chinese))
- [18] 王遵娅,丁一汇,何金海. 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. (WANG Zunya, DING Yihui, HE Jinhai. An updating analysis of the climate change in china in recent 50 years [J]. Journal of Meteorological, 2004, 62 (2): 228-236. (in Chinese))
- [19] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 123-127.
- [20] 黄慧. 相似原理及因次分析法[J]. 丹东师专学报, 2012, 81 (5): 49-52. (HUANG Hui. Principle of similitude and method of dimensional analysis [J]. Journal of Dandong Teachers College, 2012, 81 (5): 49-52. (in Chinese))
- [21] 邱新法,刘昌明,曾燕. 黄河流域近 40 年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. (QIU Xinfa, LIU Changming, ZENG Yan. Changes of pan evaporation in the recent 40 years over the Yellow River Basin [J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18 (4): 437-442. (in Chinese))
- [22] 王兆礼,覃杰香,陈晓宏. 珠江流域蒸发皿蒸发量的变化特征及其原因分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26 (11): 73-77. (WANG Zhaoli, QIN Jiexiang, CHEN Xiaohong. Variation characteristics and impact factors of pan evaporation in Pearl River basin, China [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2010, 26 (11): 73-77. (in Chinese))
- [23] 罗威,石和,陈洪德,等. 四川盆地西缘中生代地层区划及盆地演化[J]. 海相油气地质, 2009, 14 (4): 49-54. (RUO Wei, SHI He, CHEN Hongde, et al. Regionalization of mesozoic-cenozoic strata and basin-range evolution along the west margin of Sichuan basin [J]. Journal of Marine Oil and Gas Geology, 2009, 14 (4): 49-54. (in Chinese))

(下转第 60 页)

- on grey relational analysis method for water quality assessment [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2010, 21(5): 117-119. (in Chinese))
- [3] 兰文辉, 安海燕. 环境水质评价方法的分析与探讨[J]. *干旱环境监测*, 2002, 16(3): 167-169. (LAN Wenhui, AN Haiyan. Discussion on methods of water quality assessment [J]. *Arid Environmental Monitoring*, 2002, 16(3): 167-169. (in Chinese))
- [4] 王维, 纪枚, 苏亚楠. 水质评价研究进展及水质评价方法综述[J]. *科技情报开发与经济*, 2012, 22(13): 129-130. (WANG Wei, JI Mei, SU Yanan. Reviews of the progress in the research of water quality evaluation and the methods for water quality evaluation [J]. *Sci-Tech Information Development & Economy*, 2012, 22(13): 129-130. (in Chinese))
- [5] 程万里, 李亦芳, 郝伏勤, 等. 黄河三门峡段基于马尔科夫模型的水质预测[J]. *电力环境保护*, 2008, 24(3): 7-9. (CHENG Wanli, LI Yifang, HAO Fuqin, et al. The water quality forecast of Sanmenxia reach based on Markov model [J]. *Electric Power Environmental Protection*, 2008, 24(3): 7-9. (in Chinese))
- [6] 陈启明, 陈华友. 基于 Markov 链的最优化模型在长江水质预测中的应用[J]. *安徽工业大学学报: 自然科学版*, 2011, 28(1): 78-82. (CHEN Qihua, CHEN Huayou. Optimal model and its application in forecasting water resource of Yangtze River based on Markov chain [J]. *Journal of Anhui University of Technology: Natural Science*, 2011, 28(1): 78-82. (in Chinese))
- [7] 张又, 刘凌. “引江济太”调水中望虞河水水质变化的规律[J]. *水资源保护*, 2013, 29(2): 53-55. (ZHANG You, LIU Ling. Variation of water quality of Wangyu River during water diversion from Yangtze River to Taihu Lake [J]. *Water Resources Protection*, 2013, 29(2): 53-55. (in Chinese))
- [8] 李学法, 王守峰. 基于马尔科夫模型的区域水环境安全评价[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(28): 13902-13905. (LI Xuefa, WANG Shoufeng. Water environment assessment based on Markov model [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(28): 13902-13905. (in Chinese))
- [9] 陈华友. 多属性决策中基于离差最大化的组合赋权方法[J]. *系统工程与电子技术*, 2004, 26(2): 194-197. (CHEN Huayou. Combination determining weights method for multiple attribute decision making based on maximizing deviations [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronics*, 2004, 26(2): 194-197. (in Chinese))
- [10] 何斌, 陈灿. 水质动态评价的马尔科夫方法[J]. *环境工程*, 2003, 21(2): 60-63. (HE Bin, CHEN Chan. Markov method of dynamic assessment on water quality [J]. *Environment Engineering*, 2003, 21(2): 60-63. (in Chinese))
- [11] 邱林. 基于模糊权马尔可夫模型的综合水质预测[J]. *人民长江*, 2007, 38(1): 75-78. (QIU Lin. Prediction of comprehensive water quality Markov model based on fuzzy right [J]. *Yangtze River*, 2007, 38(1): 75-78. (in Chinese))
- [12] 冯江浪. 改进灰色马尔科夫模型及其在水资源预测中的利用[J]. *物探化探计算技术*, 2010, 32(1): 9-13. (FENG Jianglang. Improvement of gray Markov model and its application to water resources forecasting [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 2010, 32(1): 9-13. (in Chinese))
- (收稿日期: 2013-09-18 编辑: 彭桃英)

(上接第 37 页)

- [30] 周婕成, 陈振楼, 毕春娟, 等. 上海崇明农田土壤中有有机磷农药的残留特征[J]. *土壤通报*, 2010(6): 1456-1459. (ZHOU Jiecheng, CHEN Zhenlou, BI Chunjuan, et al. Residues of organophosphorus pesticides in agricultural fields of Chongming Island in Shanghai [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010(6): 1456-1459. (in Chinese))
- [31] BLACKWELL P A, KAY P, ASHAUER R, et al. Effects of agricultural conditions on the leaching behaviour of veterinary antibiotics in soils [J]. *Chemosphere*, 2009, 75(1): 13-19.
- [32] 伍婷婷, 张瑞杰, 王英辉, 等. 邕江南宁市区段表层沉积物典型抗生素污染特征[J]. *中国环境科学*, 2013(2): 336-344. (WU Tingting, ZHANG Ruijie, WANG Yinghui, et al. Investigation of the typical antibiotics in the sediments of the Yongjiang River, Nanning City, South China [J]. *China Environmental Science*, 2013(2): 336-344. (in Chinese))
- (收稿日期: 2013-11-04 编辑: 高渭文)

(上接第 44 页)

- [24] 班显秀, 张运福. 海拔高度及饱和水汽压的线性变化对彭曼蒸发力计算的影响[J]. *南京气象学校学报*, 2007, 20(1): 114-118. (BAN Xianxiu, ZHANG Yunfu. Effects of altitude and linearized saturation vapor pressure on Penman evaporation estimates [J]. *Journal of Nanjing Meteorological School*, 2007, 20(1): 114-118. (in Chinese))
- [25] 荣艳淑, 余锦华, 屠其璞. 华北地区各区域动力和热力蒸发量特征的研究[J]. *河海大学学报: 自然科学版*, 2006, 34(6): 614-617. (RONG Yanshu, YU Jinhua, TU Qipu. Characteristics of dynamic evaporation and thermal evaporation in north China [J]. *Journal of Hohai University: Natural Science*, 2006, 34(6): 614-617. (in Chinese))
- (收稿日期: 2013-11-23 编辑: 徐娟)