

# 石羊河流域蒸发量变化特征及影响因素分析

刘蕊蕊, 陆宝宏, 许丹, 张杰, 翟梦恩, 常娜, 李莉会

(河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098)

**摘要:**利用 Mann-Kendall、小波分析和灰色关联度法, 分析了石羊河流域 6 个气象站 1959~2005 年蒸发量变化特征及主要影响因子。研究表明: 石羊河流域 47a 平均蒸发量呈下降趋势, 蒸发突变点大约发生在 20 世纪 60 年代、80 年代中后期和 2000 年左右, 夏季和春季蒸发量减少幅度较大是年蒸发量减少的主要原因; 蒸发量的空间分布与其减少趋势的空间分布均呈西南-东北的增加变化特征, 这与流域下垫面情况和气象因子密切相关; 蒸发量有 28a 和 20a 的周期变化, 其内还包含有 10~14a 的小周期变化; 影响蒸发量的主要气候因子中, 气温、日照时数和风速与蒸发量的关联度较大, 平均气温和日照时数呈显著上升趋势, 平均风速表现为显著下降趋势, 降水、相对湿度和水汽压变化较弱, 平均风速的明显减少可能补偿了气温和日照时数增加引起蒸发量的增加, 导致蒸发量的减少。

**关键词:**石羊河流域; 蒸发量变化特征; 小波分析; 灰色关联分析

**中图分类号:** P332.2

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0852(2013)01-0082-08

蒸发量既是水量平衡又是能量平衡的重要组成部分, 在全球水循环过程中起着举足轻重的作用。同时, 蒸发在估算陆面蒸发、确定农业灌溉定额中又极为重要。因此, 分析蒸发量的变化特征及其影响因素具有十分重要的意义。IPCC 第三次评估报告认为: 20 世纪全球平均地面气温升高了  $0.6(\pm 0.2)^\circ\text{C}$ <sup>[1]</sup>。在全球变暖的大背景下, 近 100a 中国地表年平均气温明显增加, 升温幅度约为  $0.5\sim 0.8^\circ\text{C}$ <sup>[2]</sup>。一般认为, 温度升高会使地球表面大气变干, 陆地水体蒸发量增大, 从而加速全球水循环。近年来, 国内外许多学者对不同地区蒸发量展开了分析和研究。1995 年, Peterson<sup>[3]</sup> 等人利用 1950~1990 年蒸发皿观测数据研究指出, 蒸发量呈持续下降趋势, 并认为这归因于云量的增加。丛振涛<sup>[4]</sup> 等利用国内 353 个气象站 1956~2005 年蒸发量资料分析表明, 过去 50a 间, 全国范围内气温增加显著蒸发量呈下降趋势。王艳君<sup>[5]</sup> 等对长江流域近 40a 蒸发量进行了分析, 得出长江流域年平均太阳净辐射和风速的显著下降是年平均蒸发量显著下降的主要原因。尽管国内外学者对蒸发量做了大量的研究, 但关于蒸发减少的原因目前尚无明确的结论。

本文以石羊河流域蒸发量观测资料为基础, 利用

线性倾向估计、Mann-Kendall 检验和小波分析法确定流域蒸发量的变化特征, 采用灰色关联度分析各气象因子(气温、日照时数、降水量、风速、相对湿度和水汽压)对蒸发量的影响程度。在此基础上分析了影响流域蒸发量变化的因素, 以期对流域水资源的合理配置以及农业灌溉制度的确定提供参考价值, 同时为实行最严格的水资源管理提供技术支撑。

## 1 研究区概况

石羊河流域(见图 1)属于西北内陆干旱区, 地理坐标大致介于  $101^\circ 41' \sim 104^\circ 16' \text{E}$ ,  $36^\circ 29' \sim 39^\circ 27' \text{N}$  之间, 东南与甘肃省白银、兰州两市相连, 西北与甘肃省张掖市毗邻, 西南部在祁连山分水岭与青海省相邻, 东北部在腾格里沙漠和巴丹吉林沙漠与内蒙古自治区相连, 南部、东南部在乌鞘岭和毛毛山的山脊与黄河流域交界, 西以大黄山与黑河流域为界, 总面积  $4.16 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。流域自南向北大致可以划分为 3 个气候区。南部祁连山北麓高寒半干旱半湿润区: 海拔为 2 000~5 000 m, 年降水量为 300~600 mm, 年蒸发量为 700~1 200 mm, 干旱指数为 1~4; 中部走廊平原的温凉干旱区: 海拔为 1 500~2 000 m, 年降水量为 150~300 mm, 年蒸发量为

收稿日期: 2012-01-10

基金项目: 国家自然科学基金(E50979023); 水利公益项目(2012010226; 200801003)

作者简介: 刘蕊蕊(1985-), 女, 陕西延安人, 硕士研究生, 主要研究方向为水文水资源。E-mail: liuruirui315000@yahoo.com.cn

1 300~2 000 mm,干旱指数为 4~15;北部温暖干旱区:海拔为 300~1 500 m,年降水量小于 150 mm,年蒸发量为 2 000~2 600 mm,干旱指数为 15~25。

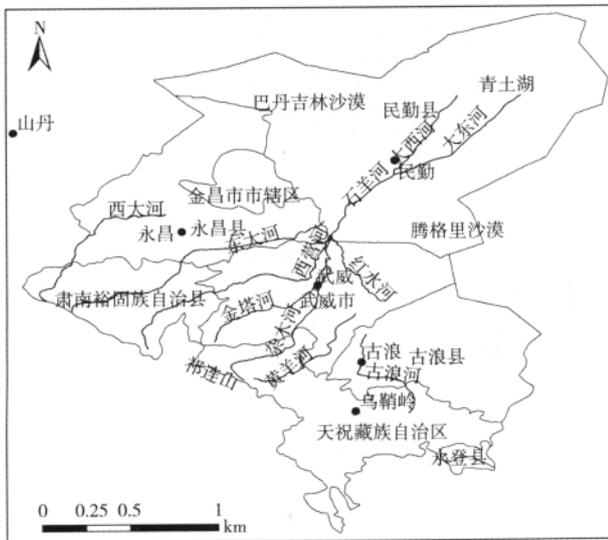


图 1 石羊河流域图  
Fig.1 The map of the Shiyang River basin

## 2 资料与研究方法

### 2.1 资料收集

本文基于石羊河流域 6 个气象站(武威、古浪、山丹、永昌、民勤和乌鞘岭站(见图 1))1959~2005 年的逐月蒸发量、气温、日照时数、降水量、风速、相对湿度和水汽压等气象资料,将资料系列按照上年 12 月~当年 2 月(冬季)、3~5 月(春季)、6~8 月(夏季)、9~11 月(秋季)划分季系列,采用 1971~2000 年平均值作为气候常年值。

### 2.2 研究方法

本文采用线性倾向估计法、Mann-Kendall<sup>[6]</sup>非参数统计检验法分析蒸发量的变化趋势、突变点;利用 Morlet 小波函数<sup>[7]</sup>分析蒸发量的变化周期;利用灰色关联度法<sup>[8]</sup>分析各气象因子(气温、日照时数、降水量、风速、相对湿度和水汽压)对蒸发量的影响程度。

## 3 蒸发量变化特征分析

### 3.1 蒸发量的时程变化

石羊河流域 20 世纪 70 年代蒸发量与 60 年代相比,减少约 5.1%;70~80 年代蒸发量变化稳定;90 年代蒸发量虽然比 80 年代蒸发量有所增加,但增加幅度很小;2000~2005 年,蒸发量急剧减少,与 60 年代相比,

大约减少 11.2%。采用 Mann-Kendall 检验对流域各气象站蒸发量进行分析(如图 2)。结果表明,古浪地区蒸发量略有增加趋势,但变化不显著;流域其他地区蒸发量均呈减少趋势。民勤站和乌鞘岭站蒸发量的 M-K 统计值的绝对值均大于 1.96,通过了 95%置信水平的统计检验,减少趋势显著;武威站 M-K 统计值的绝对值大于 2.58,通过了 99%置信水平的统计检验,减少趋势极显著。总之,流域大范围的蒸发量呈减少趋势,在中下游地区,减少趋势更明显。

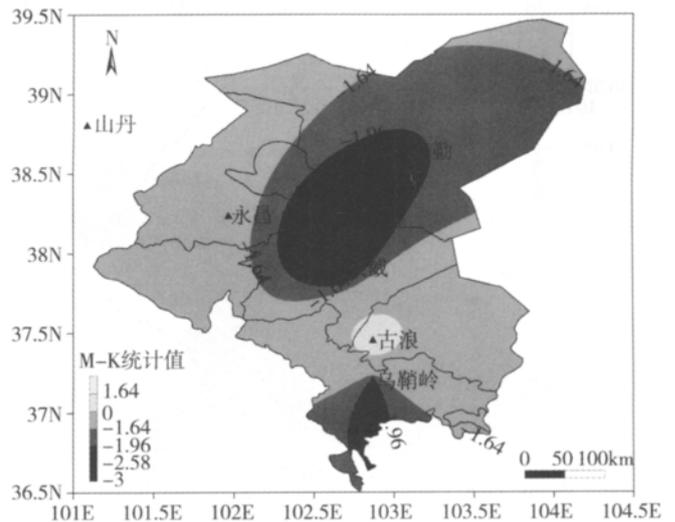


图 2 石羊河流域蒸发量 M-K 统计值变化趋势  
Fig.2 M-K change trend of the pan evaporation in the Shiyang River basin

流域季蒸发量分析结果见图 3。由图可知,夏季蒸发量的减少趋势较明显,春季次之,秋季变化不明显,但冬季呈增加趋势。武威站夏季和春季每 10 年分别减少约 51.6 mm、17.2 mm,通过 99%置信水平的显著性检验,减少趋势极显著;秋季和冬季虽有减少,但变化不大。民勤站夏季每 10 年减少约 68.7 mm, M-K 统计值为 -2.87,减少趋势极显著;春季每 10 年减少约 19.4 mm,减少趋势显著;秋季变化幅度不大;冬季则相反,呈增加趋势。乌鞘岭站夏季蒸发量每 10 年减少约 17.2 mm,通过 95%置信水平的显著性检验,减少趋势显著;春季减少趋势不显著。由上可知:春季和夏季蒸发量的减少对年蒸发量的减少贡献较大。

对流域气象站蒸发量数据进行统计,求出时间序列的  $UF_k$  和  $UB_k$  值。取显著水平  $\alpha=0.05$  情况下临界值为  $\pm 1.96$ ,结果如图 4。从图中看出,流域各站蒸发量  $UF_k$  曲线呈不规则的波动变化,除山丹站外,其余站均在 1960~1975 年呈波动下降趋势,1975~2000 年蒸发

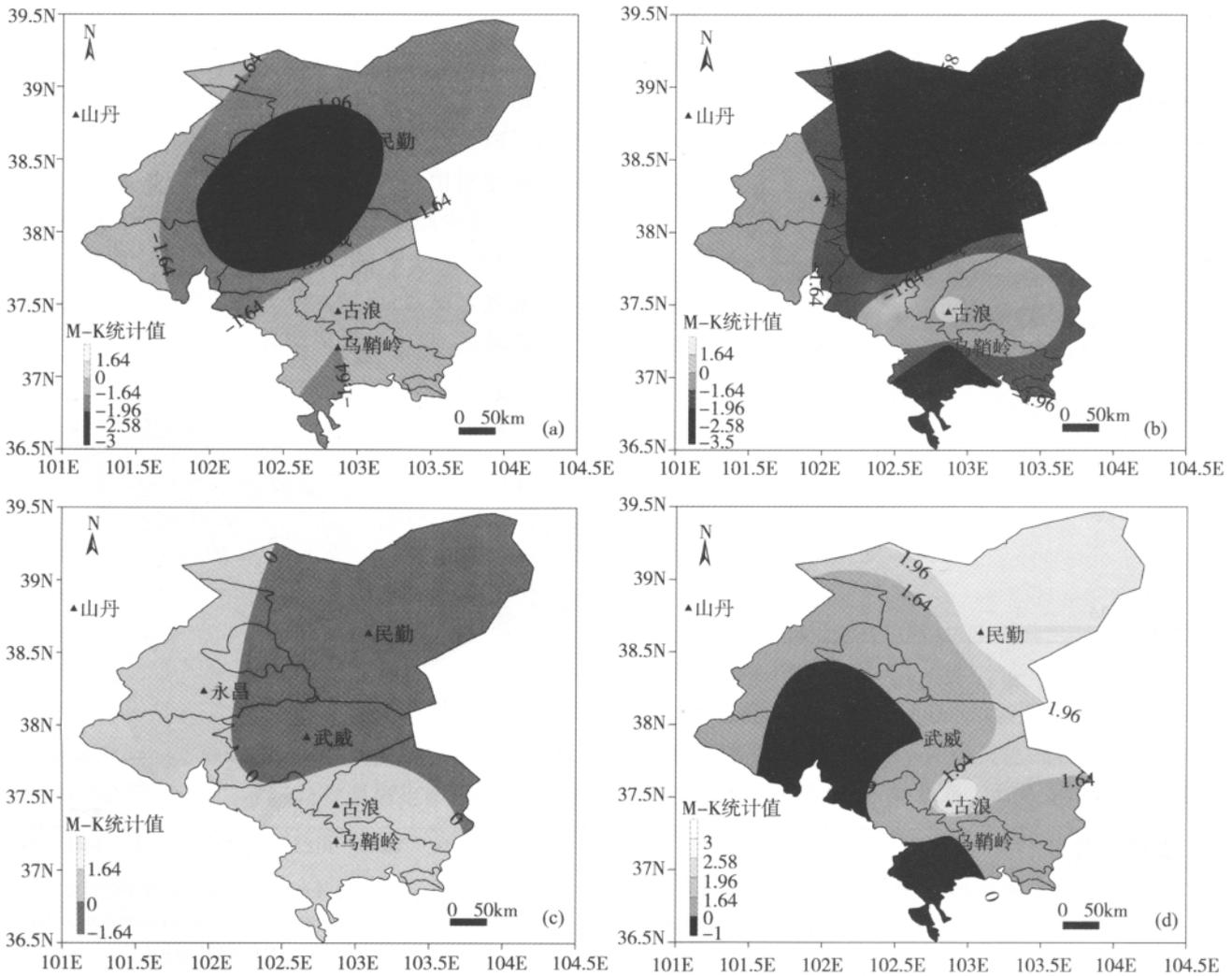


图3 石羊河流域各季蒸发量 M-K 变化趋势图(a)春季(b)夏季(c)秋季(d)冬季  
 Fig.3 M-K change trend of the pan evaporation in the Shiyang River basin in various seasons

量曲线波动上升,2000~2005 年蒸发量迅速波动下降。如果超过了  $\alpha=0.05$  的临界值,表明变化趋势显著。另外,  $UF_k$  和  $UB_k$  两条曲线交于显著性水平  $\alpha=0.05$  情况下临界值之间,说明蒸发量时间序列发生了突变。当 M-K 检验有几个突变点时,有的点可能不是真正的突变点,需要做滑动  $t$  检验来确定突变点。武威站蒸发量突变点为 1963 年、1966 年、1976 年和 1984 年,经滑动  $t$  检验,1966 年和 1984 年为突变点;古浪站蒸发突变发生在 1994 年;山丹发生在 1963 年;永昌 M-K 检验突变点发生在 1960 年、1987 年、1989 年和 2001 年,经滑动  $t$  检验,永昌蒸发突变时间为 1960 年、1989 年和 2001 年;民勤 M-K 检验突变时间为 1965 年、1980 年、1983 年、1985 年和 2000 年,经滑动  $t$  检验得出,1965 年和 2000 年是真正的突变点;乌鞘岭突变点只有一个,发生在 1976 年;全流域突变时间发生在 1965 年和

2001 年。总体看来,流域蒸发量减少突变时间主要发生在 60 年代和 80 年代中后期。前者主要与 60 年代祁连山地区森林面积减少、林带上移,森林覆盖率减少<sup>[9]</sup>密切相关,后者主要受气候变暖的影响,因为我国气候变暖主要发生在 80 年代中后期<sup>[2]</sup>。2000 年左右突变发生的原因目前还不清楚,还有待进一步分析研究。

### 3.2 蒸发量的空间变化

由石羊河流域蒸发量等值线图(如图 5(a))可以看出,蒸发量的空间分布具有西南—东北方向的梯度变化特征,年蒸发量从西南部的 1 600 mm 增加到东北部的 2 500 mm 以上,蒸发量相差约 900 mm,表明流域蒸发量的变化梯度较大。2000~2005 年蒸发量与气候常年值相比,减少变化趋势见图 5(b),由图可知,蒸发量减少幅度也具有由西南向东北增大的趋势,西南部减小距平小且梯度大,东北部则反之,主要原因为西南

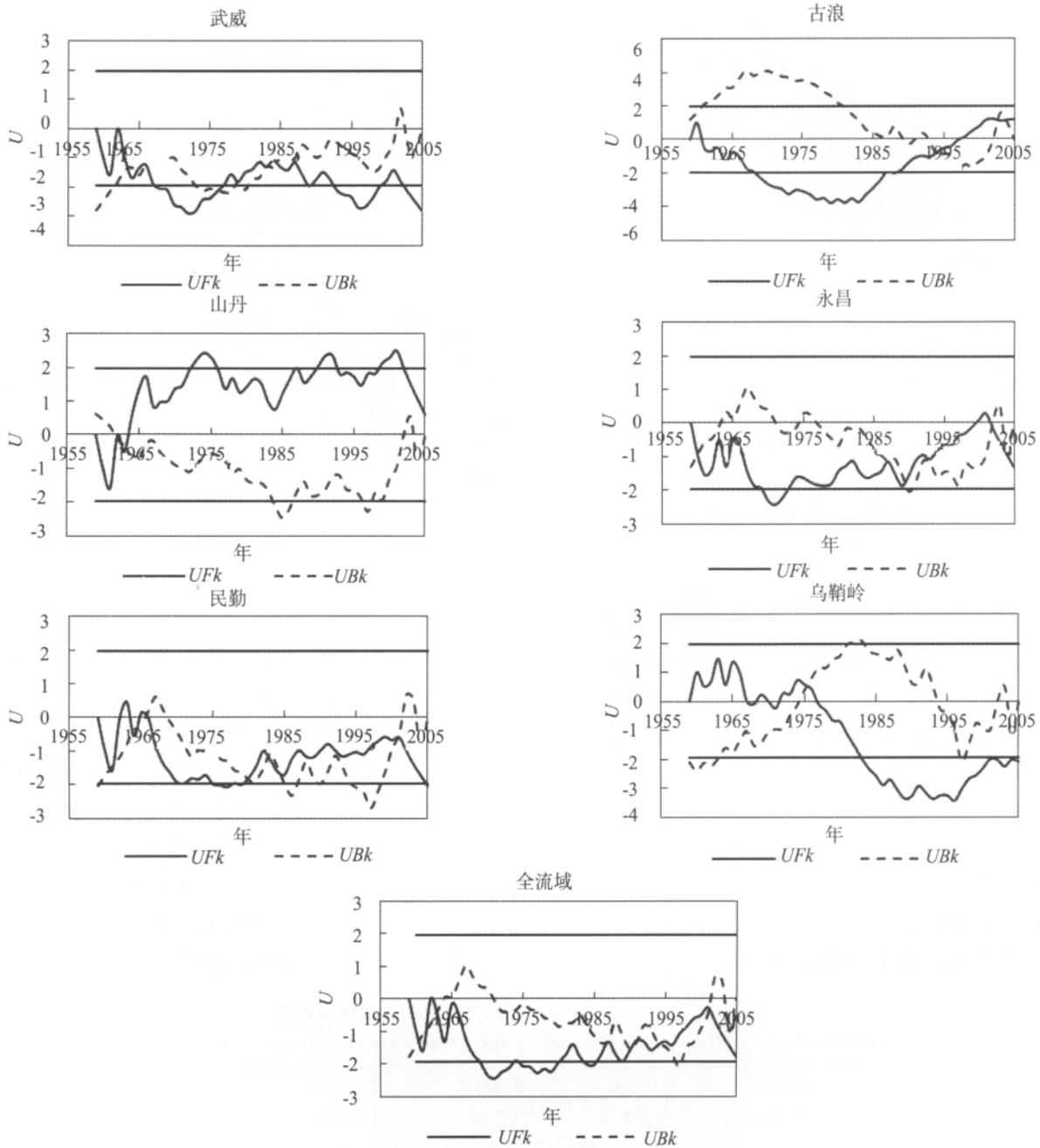


图4 石羊河流域蒸发量 M-K 突变检验  
 Fig.4 M-K test for abrupt change analysis of the pan evaporation in the Shiyang River basin

部海拔较高、植被覆盖较好,东北部海拔相对较低、且大部分地区为荒漠区。因此蒸发量的空间分布,一方面与流域的地形、下垫面因素密切相关,另一方面流域气象要素的变化也对其有重要影响。

### 3.3 蒸发量的周期变化

根据流域蒸发距平序列,计算 Morlet 小波的实部值,作出相应的时频分布图,见图 6。实线表示正位相,即实部值大于 0,虚线则反之。图中小波系数实部的波动表征了蒸发量随时间偏多和偏少交替变化的特征。武威站

12a 和 28a 左右尺度正负位相交替出现,蒸发量偏多、偏少波动变化较明显。古浪站 20a 左右尺度表现明显,在 1959~1964 年、1971~1977 年、1984~1990 年和 1997~2002 年小波实部为正位相,表明蒸发量偏多;1965~1970 年、1978~1983 年、1991~1996 年和 2003~2005 年为负位相,表明蒸发量偏少。永昌站和民勤站 28a 的时间尺度正负位交替较明显,呈现偏多—偏少—偏多循环交替的特征。乌鞘岭站 14~16a 时间尺度在 1959~1980 年、1990~2006 年正负交替较明显;在 32a 处也出现正负位

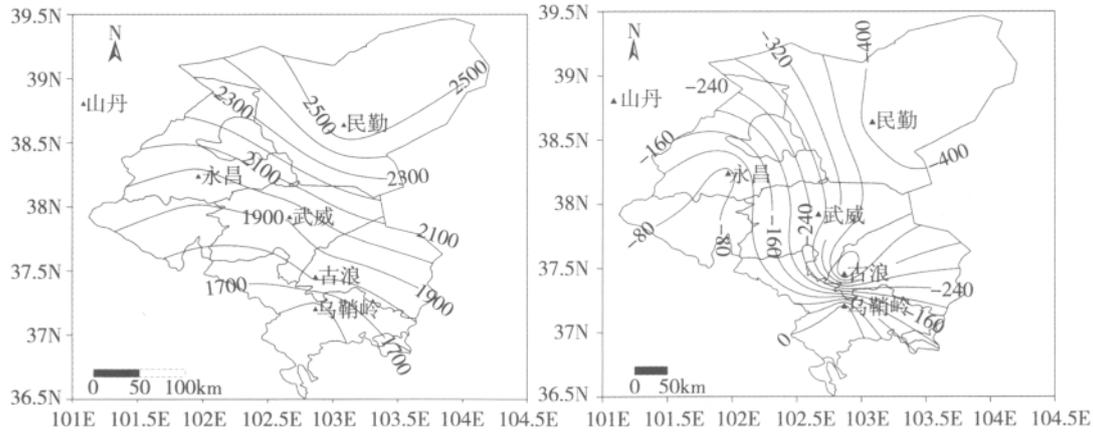


图5 (a)石羊河流域多年平均蒸发量空间分布;(b) 2000~2005年与气候常年值差的空间分布

Fig.5 (a)The space distribution of the annual pan evaporation in the Shiyang River basin; (b)The space distribution of the evaporation during 2000~2005 year minus climate year-round value

交替,但是图形没有封闭,需要更长序列的数据验证。全流域 28a 的时间尺度表现明显,蒸发偏多、偏少波动变化较明显;其次,20a 左右的尺度变化也较明显。

根据计算的小波方差,绘制小波方差图,见图 7。通过图可以确定蒸发量序列存在的主要时间尺度—主周期。由图 7 知,武威、永昌和民勤站小波方差的最大峰值均出现在 28a 处,说明 28a 左右的周期震荡最强,为第一主周期;古浪、山丹站最大峰值出现在 20a 处,说明其为第一主周期;民勤站在 20a 和 14a 处出现峰值,表明 20a、14a 为其第二、第三主周期;乌鞘岭站第一主周期为 16a,第二主周期为 6a;全流域第一主周期为 28a,第二主周期为 18~22a。总之,流域有 28a 的第一主周期,内还包含有 10~14a 的小周期。

#### 4 影响蒸发量变化的原因

##### 4.1 影响蒸发量的气象因子

研究表明,蒸发量与日照时数、气温、风速、相对湿度、水汽压、降水等气象因子密切相关。蒸发过程是一个吸热过程,其热量主要来源于太阳辐射,并通过气温和水温影响着水面蒸发。气温高时,水面上饱和水汽压大,饱和差大,易于蒸发。一般情况下,日照时数越长,水面蒸发就越大;反之则越小。风速是影响蒸发速率的重要动力因子,风速大时,湍流加强,干湿空气交换加快,水面蒸发加大<sup>[10]</sup>。为了进一步分析流域蒸发量变化的原因,对影响蒸发量变化的主要气象因子进行灰色关联度分析,结果见表 1,计算时取分辨系数为 0.5<sup>[8]</sup>。

表1 石羊河流域蒸发量与各气象要素的关联度及排序

Table1 The correlation degrees between pan evaporation and meteorological elements in the Shiyang River basin

影响因素		年降水量	平均气温	平均风速	相对湿度	平均水汽压	日照时数
武威	关联度	0.6786	0.7508	0.7453	0.7095	0.713	0.743
	位次	6	1	2	5	4	3
古浪	关联度	0.6339	0.7776	0.6753	0.6282	0.6728	0.6745
	位次	5	1	2	6	4	3
山丹	关联度	0.6956	0.7631	0.7271	0.6795	0.7047	0.7789
	位次	5	2	3	6	4	1
永昌	关联度	0.6748	0.7529	0.6941	0.6467	0.6624	0.7181
	位次	4	1	3	6	5	2
民勤	关联度	0.6412	0.7362	0.7463	0.6662	0.6808	0.6852
	位次	6	2	1	5	4	3
乌鞘岭	关联度	0.6531	0.7286	0.7122	0.6407	0.6545	0.7521
	位次	5	2	3	6	4	1
全流域	关联度	0.6233	0.7415	0.6821	0.6283	0.6361	0.7020
	位次	6	1	3	5	4	2

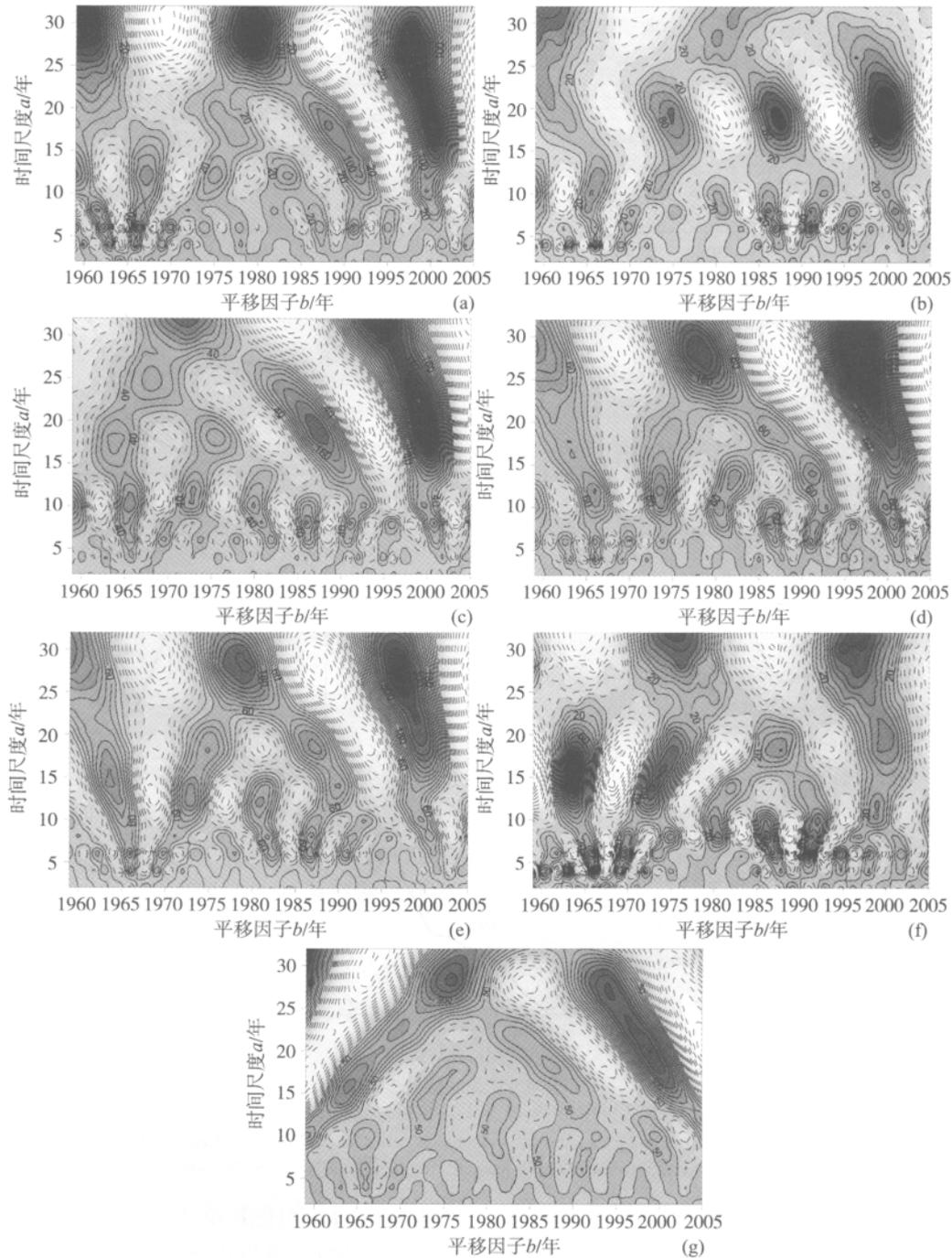


图 6 Morlet 小波变换系数实部时频分布

(a)武威(b)古浪(c)山丹(d)永昌(e)民勤(f)乌鞘岭(g)全流域

Fig.6 Real part time-frequently distribution from Morlet wavelet transform coefficients  
(a)Wuwei(b)Gulang(c)Shandan(d)Yongchang(e)Minqin(f)Wushaoling(g)The whole basin

由表 1 可知,与武威、古浪、永昌蒸发量关联度较大的 4 个气象因子为: 气温>风速>日照时数>平均水汽压>相对湿度, 与乌鞘岭站的关联顺序为: 日照时数>气温>风速>平均水汽压>年降水量>相对湿度, 与民勤站关联最大的气象因子是风速, 其次是气温和日照时数; 从流域角度分析, 与蒸发量关联度较大的气象要素依

次是气温、日照时数、风速、平均水汽压、相对湿度和降水量。由此可见,与流域蒸发量关联度较大的气象因子为气温、日照时数和风速,其余关联度相对较小。

#### 4.2 蒸发量变化的主要原因

采用线性倾向估计法分析影响石羊河流域蒸发量变化的因素,结果见表 2。由表知,流域 47a 平均风速

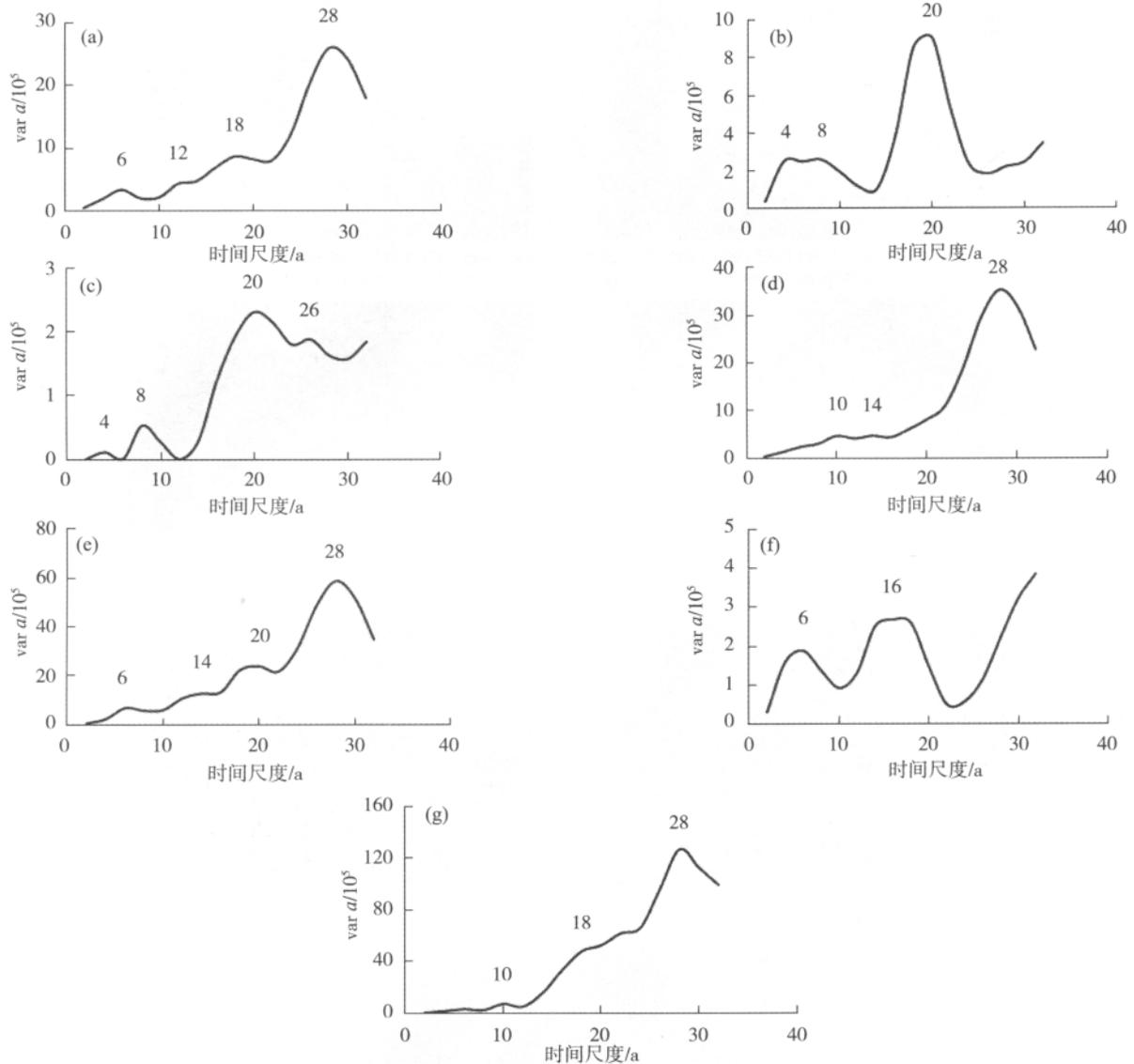


图7 石羊河流域年蒸发量序列小波变换方差  
(a)武威(b)古浪(c)山丹(d)永昌(e)民勤(f)乌鞘岭(g)全流域

Fig.7 The wavelet variance of annual evaporation series of The Shiyang River basin  
(a)Wuwei(b)Gulang(c)Shandan(d)Yongchang(e)Minqin(f)Wushaoling(g)The whole basin

减少趋势最明显,除古浪站和乌鞘岭站外,其余站减少趋势均通过了 99%的置信水平的统计检验;相对湿度只有古浪站和山丹站通过了 95%置信水平的统计检验呈减少趋势,其余站减少趋势不显著。流域 47a 平均温度增加趋势显著,均通过 99%置信水平的统计检验;永昌和民勤站日照时数增加趋势极为显著,通过 99%置信水平的统计检验;降水只有永昌站增加趋势通过 95%置信水平的统计检验,其余站增加不明显;平均水汽压增加趋势不显著;从全流域看,温度和日照时数的增加趋势较显著,风速减少趋势较显著,其他要素变化不显著。由此可见,石羊河流域动力因子—风速

的显著下降,可能影响了气温和日照时数升高引起的蒸发量的增加,导致流域最终蒸发量的减少。

### 5 结论

利用 Mann-Kendall 非参数检验法、小波分析和灰色关联度法,对石羊河流域 6 个气象站的蒸发量及其影响因素进行分析,结论如下:

- (1)石羊河流域 47a 蒸发量总体上呈减少趋势。其中,夏季和春季蒸发量的大幅减少对年蒸发量贡献较大。减少突变主要发生在 60 年代、80 年代中后期和 2000 年左右。
- (2)蒸发量的空间分布和蒸发量减少趋势的空间分

表2 石羊河流域各气象要素的特征值  
Table2 The characteristics of meteorological elements in the Shiyang River basin

相关要素		武威	古浪	山丹	永昌	民勤	乌鞘岭	全流域
温度	倾向率	0.0302	0.0312	0.0471	0.0219	0.0377	0.0236	0.0301
	U 统计量	2.4302	3.4022	5.4931	3.0354	4.5151	3.1286	3.6774
风速	倾向率	-0.0096	-0.0014	-0.015	-0.0155	-0.0108	0.0151	-0.008
	U 统计量	-3.2708	-1.8843	-5.3506	-4.5507	-5.2973	0.6399	-4.9062
日照时数	倾向率	-2.0423	1.1479	-2.2119	5.5468	6.6802	1.8977	3.8386
	U 统计量	-1.6532	0.48	-1.9731	3.6796	3.9996	1.4221	3.4206
降水	倾向率	0.6593	0.3685	0.0706	1.1131	0.3090	1.1171	0.6655
	U 统计量	1.2799	0.3200	1.0843	2.5420	0.5866	0.9955	1.3847
相对湿度	倾向率	-0.043	-0.0353	-0.0918	0.0076	-0.0262	0.0103	-0.0171
	U 统计量	-1.7243	-2.1509	-3.7152	-0.5155	-1.5465	-0.6755	-0.7978
水汽压	倾向率	0.0064	0.0055	0.0096	0.0064	0.01	0.0071	0.0074
	U 统计量	0.5155	0.7822	1.7421	0.9421	1.5465	1.8309	1.4581

布均有西南—东北方向的梯度变化特征,这与流域地形条件和气象因子密切相关。

(3)流域蒸发量变化的周期为 28a 和 20a,其中还包含有 10~14a 的小周期。

(4)影响流域蒸发量的气候因子中,气温、日照时数和风速与蒸发量的关联度较大,其余因子关联度较小。平均气温和日照时数呈显著上升趋势,多年平均风速呈显著下降趋势,其它因子变化趋势较小,因此,平均风速的明显减少可能补偿了气温和日照时数增加引起蒸发量的增加,导致蒸发量的减少。

蒸发量的时空变化实际上是对全球气候变化的一种响应。在全球气候变暖的大背景下,石羊河流域蒸发皿蒸发量呈下降趋势,这主要归因于风速的显著下降。蒸发皿蒸发量的减少,有效的降低水汽变干的速度。期望此研究结果对流域水资源变化及农业灌溉提供一定的理论依据。

本文对可能引起蒸发量减少的原因进行了初步分析,由于影响蒸发变化要素太多,物理机制较复杂,还有待进一步收集资料,做深入研究。

参考文献:

[1] Houghton J T, Ding Y H, Griggs D G, et al. Climate Change 2001: The Science Basis[M]. Cambridge:Cambridge University Press, 2001.  
 [2] 丁一汇,任国玉,石广玉,等.气候变化国家评估报告( ):中国气候变化的历史和未来趋势 [J]. 气候变化研究进展,2006,2 (1):3-8. (DING Yihui, REN Guoyu, SHI Guangyu, et al. National assessment report of climate change (I):Climate change in China and its future trend[J]. Advances in Climate Change Research, 2006,2 (1):3-8. (in Chinese))  
 [3] Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. Evaporation losing its strength [J]. Nature, 1995, 377:687-688.

[4] 丛振涛,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):147-150. (CONG Zhentao, NI Guangheng, YANG Dawen, et al. Evaporation paradox in China [J]. Advances in Water Science, 2008,19(2):147-150. (in Chinese))  
 [5] 王艳君,姜彤,许崇育.长江流域蒸发皿蒸发量及影响因素变化趋势 [J].自然资源学报,2005, 20(6):864-869. (WANG Yanjun, JIANG Tong, XU Chongyu. Observed tends of pan evaporation and its impact factors over the Yangze river basin[J]. Journal of Natural Resources, 2005,20(6):864-869. (in Chinese))  
 [6] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,1999. (WEI Fengying. Modern Climate Statistical Diagnosis and Prediction Technology [M]. Beijing:China Meteorological Press, 2007. (in Chinese))  
 [7] 王文圣,丁晶,李跃清.水文小波分析[M].北京:化学工业出版社, 2005. (WANG Wensheng, DING Jin, LI Yueqin. Hydrological Wavelet Analysis [M]. Beijing:Chemical Industry Press, 2005. (in Chinese))  
 [8] 邓聚龙.灰色预测与决策[M].武汉:华中工学院出版社,1986. (DENG Julong. Gray Prediction and Decision Making[M]. Wuhan:Huazhong University of Technology Press, 1986. (in Chinese))  
 [9] 林而达,许吟隆,蒋金荷,等.气候变化国家评估报告( ):气候变化的影响与适应[J].气候变化研究进展,2006,2(2):51-55. (LIN Erda, XU Yinlong, JIANG Jinhe, et al. National assessment report of climate change ( ):Climate change impacts and adaptation[J]. Advances in Climate Change Research, 2006,2 (2):51-55. (in Chinese))  
 [10] 曹伟,刘玉甫,赵春燕,等.气象要素对水面蒸发量影响程度的灰色关联分析[J].云南水力发电, 2008,24(2):7-9. (CAO Wei, LIU Yufu, ZHAO Chunyan, et al. Gray relation analysis of influence of meteorological factors on water surface evaporation [J]. Yunan Water Power, 2008,24(2):7-9. (in Chinese))

(下转第 93 页)

## Research on Characteristics of Water Resources in Nansihu Lake Basin

SUN Shuyun, ZHANG Guoyu

(Bureau of Comprehensive Development, MWR, Beijing 100053, China)

**Abstract:** According to the correlation between the runoff and landform characteristics, the Nansihu Lake basin has three types of runoff forming. This paper did a system investigation for all of them, and analyzed characteristics of the water resources balance. Special attention was paid to mechanisms of the natural runoff forming and impact of geographical and climatic factors on the river runoff. It also discussed the methods for estimation of the stream ecological runoff in the region.

**Key words:** water resources; natural runoff; geography; climate; ecological runoff

(上接第 20 页)

## A Varying-Step Algorithm for Numerical Integration of Pierson III Distribution

LIU Shiping, WANG Wenchuan

(Hydraulic Engineering Department, North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Zhengzhou 450011, China)

**Abstract:** The numerical integration of Pierson distribution was investigated, a new integration algorithm of Pierson distribution was proposed. Firstly, the generalized integral of Pearson distribution curve was transformed into a Gamma function and an ordinary integral. By using the recurrence formula and approximate formula of gamma function, the approximate value of the Gamma function was obtained. Based on the allowable relative error and the Gamma function value, the absolute error was determined. According to the relation between step length and truncation error, the basic step length used for numerical integration was obtained. Finally, step varying function was established, so that the step length of the numerical integration can automatically increase in accordance with the parabolic law. Meanwhile, the adaptability of the parameters had also been considered fully. As a result, the two problems were successfully resolved. One problem is the slow convergence if parameter is very small, and another is the data overflow if parameter is very large. The results of experiments show that the pre-determined error method can avoid the pre-calculation process of numerical integration. The step varying integral can significantly save computer run time. The program possesses a very wide parameter adaptability, which has a great application value in the hydraulic engineering design.

**Key words:** Pierson distribution curve; numerical integration; Gamma function; error estimation; step varying function

(上接第 89 页)

## Changes of Evaporation and Its Influencing Factors in Shiyang River Basin

LIU Ruirui, LU Baohong, XU Dan, ZHANG Jie, ZHAI Menggen, CHANG Na, LI Lihui

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** Mann-Kendall trend test, Wavelet analysis and Gray relation analysis were applied to determine the change characteristics and influencing factors of 6 stations over the Shiyang River Basin from 1959 to 2005. The results show that the average annual evaporation of 47 years has a decline trend over the basin. The time of abrupt change of the evaporation happened in the 1960s and late 1980s and around the year 2000. The evaporation of Summer and Spring declines clearly, which is the main contribution of annual evaporation decreasing. The spatial distribution of evaporation and change trend of evaporation both have increasing change from the westsouth to northeast, which is closely related to the terrain conditions and meteorological factors in the basin. The first order main periods of evaporation are 28 years and 20 years, which contain small periods from 10 years to 14 years. There is a close relation between air temperature, sunshine duration, wind speed of the main influencing factors and evaporation. The average temperature and sunshine hours have significant increasing trend, and average wind speed has remarkable decrease. The change of precipitation, relative humidity and vapour pressure are relatively weak. Remarkable decrease of average wind speed compensates the increased evaporation resulted from rise of air temperature and sunshine duration, which eventually reduce the evaporation.

**Key words:** Shiyang River Basin; characteristics of evaporation variation; wavelet analysis; gray relation analysis