

# 泾河流域温度与器皿蒸发量时空 特征及变化趋势

王 佩, 邱国玉, 尹 婧, 熊育久, 谢 芳

(北京师范大学资源学院, 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

**摘 要:** 利用泾河流域周边 14 个气象站点 1957~2002 年逐日温度、器皿蒸发数据, 分析了近 45 a 来气温、器皿蒸发量的时空变化特征。Mann-Kendall 统计检验结果表明: 泾河流域气温变化趋势与同期我国气温变化趋势基本一致, 年均温存在显著变暖的总趋势, 增温率为  $0.29\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。流域北部气候变暖趋势高于流域南部, 变暖的季节主要是秋冬季节。年器皿蒸发量呈逐渐减少的趋势, 倾向率为  $-39.3\text{ mm}/10\text{ a}$ , 在空间上变率表现为流域南部、北部减少趋势明显, 中部变化趋势不明显。

**关键词:** 泾河流域; 气温; 器皿蒸发; 时空变化; 趋势分析

中图分类号: P468.0

文献标识码: A

## 引 言

IPCC 第 4 次评估报告明确指出, 近 100 a (1906~2005 年) 地球表面平均温度上升了  $0.74\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 全球变暖已经是不争的科学事实<sup>[1]</sup>。气候明显变暖, 已引起人们的普遍关注, 在关注全球气候变暖的同时, 担心气候变化和异常会对生产生活 and 经济发展造成越来越严重的影响<sup>[2]</sup>。泾河流域位于中国西北的边远山区, 处于温带半湿润向半干旱气候的过渡地带, 是气候敏感区, 降水波动较大, 干旱频发<sup>[3]</sup>。了解其流域尺度温度、蒸发等气候要素变化特征有助于对其干旱化趋势的研究。目前对于泾河流域的研究多集中于流域的降水变化、景观生态方面<sup>[4-7]</sup>, 而对于流域蒸发的研究较少<sup>[8]</sup>; 并且对于蒸发的研究大都以整个中国或较大尺度流域为研究范围<sup>[9-11]</sup>。本文利用泾河流域内部和周边 14 个国家基准气象站 1957~2002 年逐日温度、器皿蒸发观测数据, 分析其时空分布变化趋势, 以便了解泾河流域的气候变化。

## 1 研究区概况

泾河流域位于黄土高原中部,  $106^{\circ}20' \sim 108^{\circ}48'$

$E, 34^{\circ}24' \sim 37^{\circ}20' N$ , 处于六盘山和子午岭之间, 流域绝大部分属于陇东黄土高原。泾河发源于宁夏回族自治区泾源县关山东麓, 由西北向东南流经宁夏、甘肃、陕西 3 省区的固原、平凉、庆阳和咸阳等地市, 在陕西省高陵县注入渭河, 泾河全长 483 km, 流域面积  $45\,421\text{ km}^2$ , 为渭河的一级支流、黄河的二级支流。流域气候为典型的温带大陆性气候, 处于温带半湿润向半干旱气候的过渡地带。据流域各气象站点多年观测资料, 流域多年平均气温  $8\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 最冷月平均气温  $-8\text{ }^{\circ}\text{C} \sim -10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 最热月平均温度  $22\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 24\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 年降水量在  $350\text{ } \sim 600\text{ mm}$  之间, 夏季降水量一般占到年降水量的 50% 以上, 且降水强度大, 年际变化也大。最小、最大年降水量相差在 1.8~3.5 倍之间。降水量的地域分布由南向北递减, 南部的降水量可达北部的 1 倍。

## 2 研究资料与研究方法

### 2.1 研究资料

选取泾河流域内部和周边 14 个国家基准气象站点, 利用各站 1957~2002 年的逐日温度、 $20\text{ cm}$  口径器皿蒸发 (简称蒸发) 资料, 对于缺测日值分别采取时间差值、线性内插方法, 保证序列的统一性和

收稿日期: 2007 - 12 - 10; 改回日期: 2008 - 01 - 03

基金项目: 国家重点基础研究发展规划项目“干旱化及其阶段性转折对我国粮食、水和土地资源安全的影响及适应对策”(2006CB400505) 资助

作者简介: 王佩 (1979 - ), 男, 甘肃张掖人, 硕士生, 主要从事气候变化及生态水文方面研究。E-mail: wangpei@ires.cn

完整性,剔除连续缺测 3 a 以上的站点,保证长时间序列的可靠性;为便于说明流域气候要素变化的空间分布,根据流域多年平均年降水量,将流域初步划分为 3 个区域(图 1):流域北部、中部、南部,流域北部属于典型的半干旱区,南部属于半湿润区,中部二者过渡区。

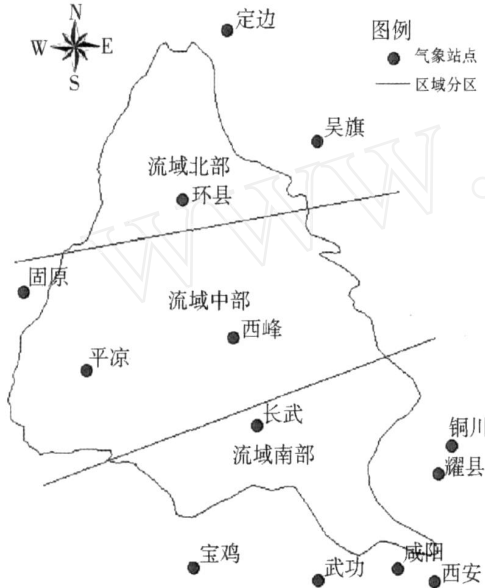


图 1 研究区域及站点

Fig 1 Study area and stations distribution

2.2 研究方法

采用线性回归方法计算气候趋势系数、气候倾向率定量描述各气候要素变化程度,以 Mann - kendall 秩次相关法检验显著程度,说明长期变化趋势。

2.2.1 气候趋势系数、气候倾向率

引入气候趋势系数和气候倾向率<sup>[12-14]</sup>来研究泾河流域气温和蒸发皿蒸发量的气候变化特征,气候趋势系数的算法为:设某站某气象要素时间序列为  $y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_n$ , 它可以用 1 个多项式来表示:

$$y_n(t) = a_0 + a_1 t_1 + a_2 t_2 \dots + a_m t_m (m < n)$$

式中  $t$  为时间,单位为 a。一般来讲,温度和降水的气候趋势用一次直线方程和二次曲线方程就能满足。本文用一次直线方程来定量描述,即  $y(t) = a_0 + a_1 t$ , 则趋势变化率方程为  $dy(t)/dt = a_1$ , 其中把  $a_1$  称作气候趋势系数。 $a_1 \times 10$  称作气候倾向率,其单位为 mm/10 a 或 mm/10 a, 方程中的系数可用最小二乘法或经验正交多项式来确定,文中使用最小二乘法来确定系数。

2.2.2 Mann - kendall 统计检验方法

Kendall 非参数秩次相关检验法已经广泛地用于检验气象水文时间序列的趋势成分,包括水质、流量、气温和降雨序列等。国际、国内上关于 M - K 方法应用研究的实例非常多<sup>[15-18]</sup>, 这里简单介绍一下。

对序列  $X_t = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 先确定所有对偶值  $(x_i, x_j, j > i)$  中  $x_i$  与  $x_j$  的大小关系(设为  $s_{ij}$ )。趋势检验的统计量为:

$$U_{MK} = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n s_{ij}}{[Var(s_{ij})]^{1/2}}$$

式中:

$$s_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{if } x_j > x_i \\ 0 & \text{if } x_j = x_i \\ -1 & \text{if } x_j < x_i \end{cases}$$

$$Var(s_{ij}) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i i(i-1)(2i+5)}{18}$$

当  $n > 10$  时,  $U_{MK}$  收敛于标准正态分布。

原假设为该序列无趋势,采用双边趋势检验,在给定显著性水平  $\alpha$  下,在正态分布表中查得临界值  $U_{\alpha/2}$ , 当  $|U_{MK}| < U_{\alpha/2}$  时,接受原假设,即趋势不显著;若  $|U_{MK}| > U_{\alpha/2}$ , 则拒绝原假设,即认为趋势显著。

3 气温变化特征

3.1 气温存在变暖的总趋势

Mann - kendall 统计检验结果见表 1, 流域的多年平均气温及多年平均蒸发拒绝零假设,即在整個流域存在统计意义上的单调趋势。

图 2 是泾河流域近 45 a 来年平均气温距平及

表 1 多年平均温度和蒸发量趋势检验

Tab 1 Trend test of long - term mean temperature and pan evaporation

序列	M - K 检验				
	$U_{MK}$	$U_{\alpha/2}$	$H_0$	趋势	
多年平均温度	1957 ~ 2002	3.7561	1.96	R	显著上升
多年平均蒸发	1957 ~ 2002	-2.0386	1.96	R	显著下降

$H_0$ , 无趋势; R 拒绝;  $\alpha = 5\%$  显著水平

累积距平时间序列。年平均气温呈明显上升趋势,其增温率达  $0.29 / 10 a$ , 高于全国平均水平  $0.22 / 10 a^{[2]}$ ; 45 a 间平均气温上升  $1.31$ 。增温主要是从 20 世纪 80 年代中期开始, 且有加快趋势。对于年均温距平而言, 1998 年最高 ( $1.055$ ), 1967 年最低 ( $0.788$ ), 最大年较差  $0.267$ 。在过去的 45 a 中, 1967、1976、1984 年先后出现 3 个气温低谷。从温度的累积距平图中可以看出, 从 20 世纪 60 年代至 1985 年, 其温度累积距平值减小, 表示这一阶段温度偏低, 1985 年之后, 其累积距平值增加, 温度不断升高。1985 年可能是泾河流域气温发生转折的关键年份。泾河流域年平均气温距平为  $-0.054$ , 各年代年平均气温距平, 20 世纪 60 年代为  $-0.414$ , 70 年代为  $-0.194$ , 80 年代为  $-0.126$ , 90 年代为  $0.517$ , 90 年代比 60 年代偏高了  $0.931$ , 变化幅度  $10.7\%$  (表 2)。2000~2002 年平均气温距平高达  $1.01$ 。

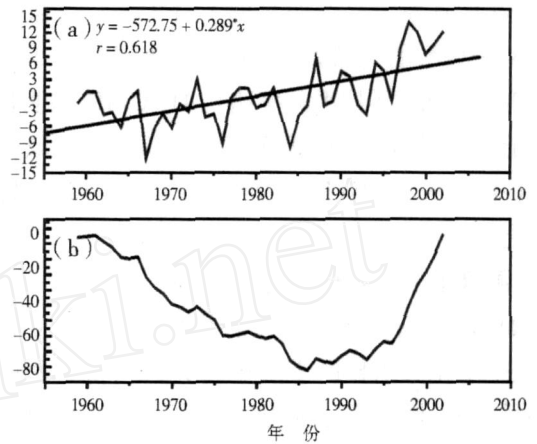


图 2 泾河流域年平均气温距平时间序列 (a) 及年均温累积距平时间序列 (b)  
Fig 2 Time series of mean annual temperature anomaly (a) and mean annual temperature accumulative anomaly (b)

表 2 流域年代际温度、器皿蒸发变幅统计

Tab 2 The decadal amplitude statistics of mean temperature and pan evaporation

	1960s	1970s	1980s	1990s	1990s与 1960s变幅
平均温度 /	8.7	8.9	9.0	9.6	10.7%
平均蒸发量 /mm	1544.7	1532.6	1422.9	1506.8	-2.5%

3.2 流域北部气候明显变暖

从图 3a 看出泾河流域多年平均温度固原为最低值 (可能受地形因素影响)。图 3b 可以看出, 在

分析的 14 站当中, 全部站点均呈增温趋势, 各区间变暖趋势不尽一致, 气温变化存在明显的地域性差异, 总的分布形式为从流域北部向南部逐渐倾斜,

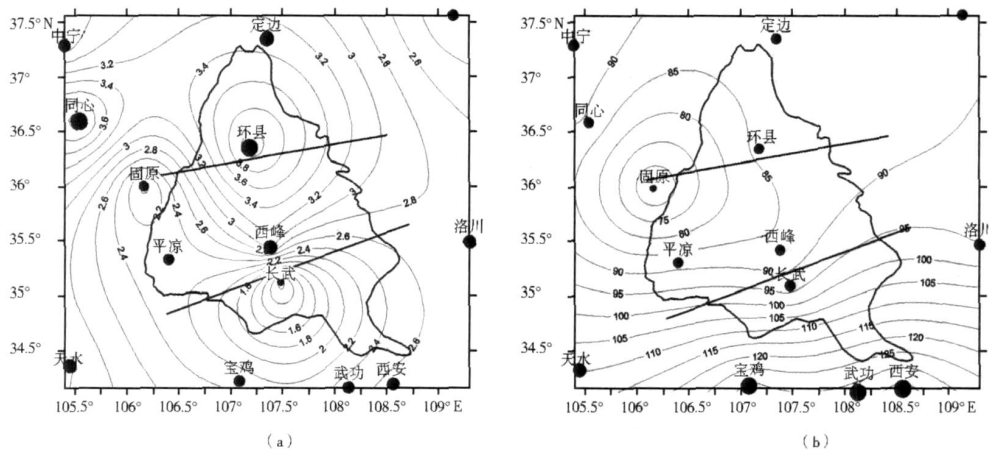


图 3 泾河流域年平均温度倾向率 (单位:  $/10 a$ ) (a) 及流域多年平均气温 (1957~2002) (单位:  $0.1$ ) (b) (代表上升趋势, 大小与上升幅度成正比)

Fig 3 Mean annual temperature tendency ratio during 1957 - 2002 (Unit  $/10a$ ) (a) and mean annual temperature during 1957 - 2002 (Unit  $0.1$ ) (b)

南北部增温差异较大,明显变暖的区域主要在流域北部,在环县周边存在明显的上升中心。选取流域内部 4 个典型的气象站点,大体以流域北部年平均气温变化增温(环县增温率达 0.41 /10 a)明显远高于流域南部区域(长武 0.09 /10 a);流域中部变化(平凉 0.23 /10 a、西峰 0.30 /10 a)处于二者之间。

### 3.3 温度季节及年代际变化

如图 4 所示:泾河四季年平均气温均呈上升趋势,温度变化有明显的季节性差异,冬、秋 2 季增温趋势最明显,增温率分别为 0.35 /10 a,0.26 /10 a,春夏 2 季上升趋势较小,春季为 0.23 /10 a,夏季最小为 0.15 /10 a。温度年代际变化也存在季节性差异(图 5),20 世纪 80 年代的增温出现在秋季和冬季,进入 90 年代以后各季明显增温变暖,而以夏季、冬季增温最为明显,与 80 年代相比,夏季平均气温升高了 0.72 ,冬季升高 0.69 。而春季比 80 年代升高 0.57 ,秋季只比 80 年代升高 0.47 。从总体来看,近 45 a 间冬、秋 2 季变暖明显,但各年代间其变化趋势和变化幅度也不尽一致。进入 20 世纪 90 年代以后,秋季增温势头趋缓,而春、夏 2 季增温加剧。

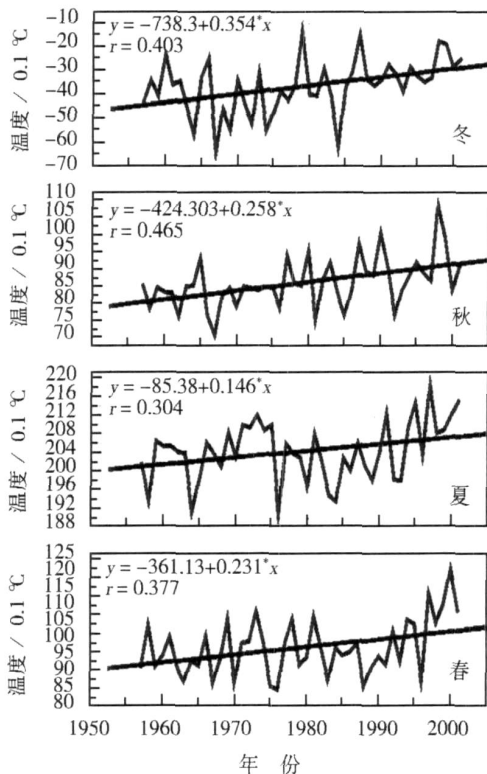


图 4 四季平均温度及其线性变化趋势

Fig 4 Seasonal mean temperature change during 1957 - 2002

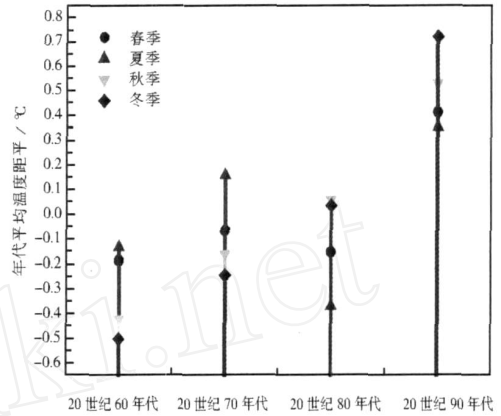


图 5 年代际季均温及其变化

Fig 5 Decadal seasonal mean temperature departure change

## 4 蒸发量变化特征

### 4.1 蒸发量变化

泾河流域 1957 ~ 2002 年年平均蒸发量距平及累积距平时间序列见图 6。可以看出,与年平均气温曲线走势相反,流域蒸发量整体上都在下降,并通过了 95% 的信度检验水平(表 1)。流域多年平均蒸发量倾向率为 -39.3 mm/10 a,对年平均蒸发量而言,以 1964 年蒸发量最低(1360.3 mm),1960 年最高(1869.28 mm),两者相差 508.98 mm;从表 2 可以看出,泾河流域各年代蒸发量随时间也呈下降趋势,20 世纪 60 ~ 70 年代蒸发量相当,80 年代最少,90 年代有所回升,但 80 ~ 90 年代较 60 ~ 70 年代下

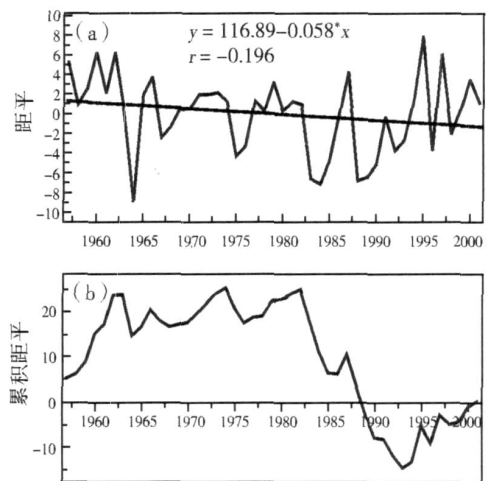


图 6 泾河流域平均蒸发量距平时间序列 (a) 及累积距平时间序列 (b)

Fig 6 Time series of annual mean pan evaporation anomaly (a) and accumulative anomaly of annual mean pan evaporation (b)

降了 74 mm (约 4.8%), 90年代较 60年代减少了 38 mm (约 2.5%)。距平是 1957~2002 年蒸发量与平均值的差。从距平图中可以看出,负距平共有 17 a,自 1983 年以来负距平明显增多,60~70 年代大多数年份均为正距平,80 年代下降到平均值以下,自 1983~1994 年累积蒸发下降明显,表明这一段时间蒸发量偏少,蒸发在 1983 可能存在由升到降的转折,自 1994 年来,有逐渐回升趋势,是否存在转折有待进一步观测与分析。

#### 4.2 蒸发量的空间变化

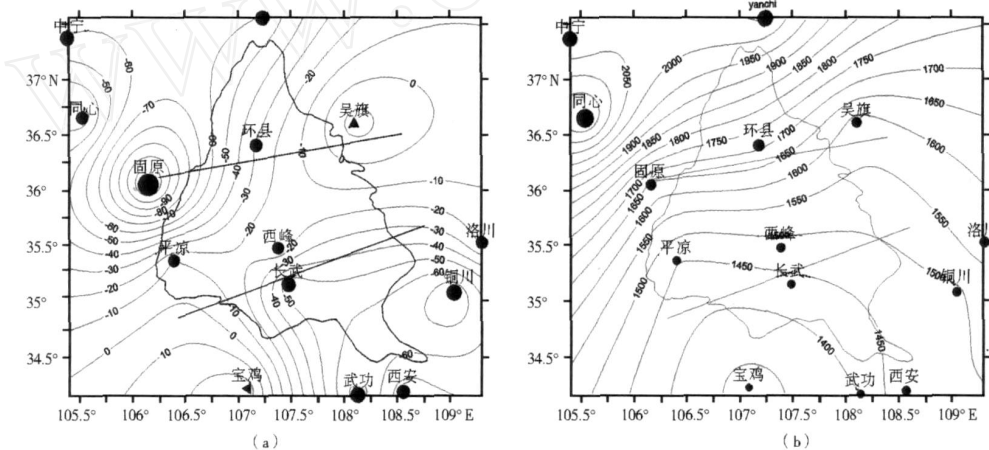


图 7 泾河流域多年 (1957~2002) 蒸发倾向率 (a) (单位: mm/10 a)

及多年平均蒸发量 (1957~2002) (b) (单位: mm)

( $\ominus$  代表下降趋势,  $\oplus$  代表上升趋势, 符号大小与升降幅度成正比)

Fig 7 Tendency ratio of annual pan evaporation (1957 - 2002) (Unit mm/10 a) (a) and mean annual pan evaporation during 1957 - 2002 (Unit mm)

## 5 蒸发与气温相关关系初探

全球变暖可能会使近地面层变干,使地表水体蒸发量上升。但目前分析蒸发皿蒸发量时,发现有些区域平均的蒸发皿蒸发量存在稳定的下降趋势,这种与人们的预期相矛盾的现象被称之为“蒸发悖论”<sup>[19]</sup>。对于这个问题,国际上普遍认为,蒸发皿蒸发量的下降主要是由太阳总辐射的下降引起的<sup>[19]</sup>。研究表明:中国在 1951~2001 年,51 a 间平均气温升高了 1.1<sup>[2]</sup>,在气温上升的同时蒸发量是逐渐减少的<sup>[10]</sup>。任国玉等指出,1956~2000 年期间,我国水面蒸发量呈显著下降趋势,东部、南部和西北地区下降更多<sup>[11]</sup>。左洪超等<sup>[20]</sup>结合我国的蒸发皿观测实际情况分析指出:蒸发皿蒸发量是多环境因子共同非线性相互作用的结果,只利用单个环境因子的变化来解释蒸发皿蒸发量的气候变化会产生偏颇,如将蒸发皿蒸发量的逐年减少归因于地表接收的太阳辐射减少的解释在中国东部比在中国西

部较合理。泾河流域也存在同样变化趋势,对比图 3b 和图 7a,发现流域西北部、东南部多年平均温度较低的区域,蒸发皿变率反而较大(如固原),二者关系是随机现象还是具有内在联系?温度作为影响蒸发的因素,是否是流域器皿蒸发变化的主要原因?这些问题还需结合其他影响蒸发因素进行进一步分析和探讨。

## 6 结论和分析

(1) 在过去的 45 a 中,泾河流域年平均温度整体上呈上升趋势,增温率为 0.29<sup>°C</sup>/10 a,气温变化存在明显的季节性和地区性差异,冬季变暖趋势最明显。20 世纪 80 年代的增温主要出现在秋、冬 2 季,进入 90 年代以后,秋、冬 2 季增温势头趋缓,而春、夏 2 季增温加剧。泾河流域北部增温率大于南部,北部年平均气温变化增温率大于南部 2~3 倍。泾河流域 20 世纪 60、70、80 年代之间温度相差不

大,但到 90年代平均气温迅速上升,较 60年代上升 0.931。在 1967、1976、1984年先后出现 3个气温低谷,1985为年均温发生转折的可能年份。

(2)泾河流域近 45 a来,年蒸发量呈逐渐减少的趋势,蒸发倾向率为 - 21.5 mm/10 a。20世纪 60与 70年代蒸发量相当,80年代最少,90年代有所回升,较 60年代下降 37.83 mm,降幅 2.5%。较 80年代上升 83.97 mm,升幅 5.9%。蒸发量在空间上变率表现为:流域南部减少趋势最为显著,北部减少趋势明显,中部变化不大,蒸发在 1983年可能存在由升到降的转折,1994年有逐渐回升趋势,是否存在转折有待进一步观测分析。

上述气温和蒸发表现出来的变化趋势是随机现象,还是受流域气候变化的影响,还需要结合其他的影响蒸发的因素进一步探讨。

#### 参考文献:

- [1] IPCC Summary for Policymakers of Climate Change 2007: The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 气候变化国家评估报告编写委员会. 气候变化国家评估报告 [M]. 北京: 科学出版社, 2007. 8 - 39.
- [3] 马鹏里, 王若升, 李晓娟. 甘肃省河东地区主秋期降水量时空分布特征 [J]. 干旱地区农业研究, 2003, 21 (21): 156 - 159.
- [4] 谢高地, 甄霖, 陈操操, 等. 流域宏观尺度降雨 - 景观 - 径流变化的相互作用 [J]. 资源科学, 2007, 29 (2): 156 - 163.
- [5] 董彦雄, 马鹏里, 白虎志, 等. 泾河流域近 60年降水演变规律 [J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22 (3): 154 - 159.
- [6] 王兮之, 索安宁, 洪军, 等. 黄土高原泾河流域水沙特征分析 [J]. 水土保持学报, 2006, 20 (2): 22 - 93.
- [7] 索安宁, 熊颖, 熊友才, 等. 黄土高原典型区植被亏亏 [J]. 生态学报, 2007, 27 (3): 989 - 998.
- [8] 张强, 王胜. 关于干旱和半干旱区陆面水分过程的研究 [J]. 干旱气象, 2007, 25 (2): 1 - 4.
- [9] Roderick M L, Farquhar G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years [J]. Science, 2002, 298 (15): 1410 - 1411.
- [10] Binhui liu, Ming xu, Mark Henderson A spatial analysis of pan evaporation trends in china, 1955 - 2000 [J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109 (2): 2660 - 2668.
- [11] 任国玉, 郭军. 中国水面蒸发量的变化 [J]. 自然资源学报, 2006, 21 (1): 31 - 44.
- [12] 施能, 陈家其, 屠其璞. 中国近 100年来 4个年代际的气候变化特征 [J]. 气象学报, 1995, 53 (4): 431 - 439.
- [13] 孙永亮, 李小雁, 许何也. 近 40 a青海湖流域逐日降水和气温变化特征 [J]. 干旱气象, 2007, 25 (1): 8 - 13.
- [14] 唐晶, 张文煜, 赵光平, 等. 宁夏近 44 a霜冻的气候变化特征 [J]. 干旱气象, 2007, (3): 39 - 43.
- [15] Hirsch R M, Slack J R. Non - parametric trend test for seasonal data with serial dependence [J]. Water Resource Research, 1984, 20 (6): 727 - 732.
- [16] Gan T Y. Hydro climatic trends and possible climatic warming in the Canadian Prairies [J]. Water Resource Research, 1998, 34 (11): 3009 - 3015.
- [17] Douglas E M, Vogel R M, Kroll C N. Trends in floods and low flows in the United States: impact of spatial correlation [J]. Journal of Hydrology, 2000 (240): 90 - 105.
- [18] 和宛琳, 徐宗学. 渭河流域气温与蒸发量时空分布及其变化趋势分析 [J]. 北京师范大学学报 (自然科学版), 2006, 42 (1): 102 - 106.
- [19] Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. Evaporation losing it's strength [J]. Nature, 1995 (377): 687 - 691.
- [20] 左洪超, 鲍艳, 张存杰, 等. 蒸发皿蒸发量的物理意义、近 40年变化趋势的分析和数值试验研究 [J]. 地球物理学报, 2006, 49 (3): 680 - 688.

## Spatial Distribution and Temporal Trend of Temperature and Pan Evaporation in Jinghe River Basin

WANG Pei, QIU Guoyu, YIN jing, XING Yujiu, XIE Fang

(College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University; National Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Using the monthly temperature and pan evaporation record from 14 meteorological stations in the Jinghe River basin from 1957 to 2002, the basic spatial distribution and temporal trend of temperature and pan evaporation were analyzed with the methods of climate tendency ratio and Mann - Kendall statistic test. The results show that the temperature in the studied area increases and accords basically with that all over the country in the past 45 years, and the temperature tendency ratio is 0.29 /10 a. The temperature increase is most significant in winter, then in autumn, and the temperature increases gradually from the northwest to the southeast part of the basin and obvious especially in north part of the area. In contrast, the pan evaporation decreases in the temporal dimension and the tendency ratio is - 39.3 mm/10 a. The spatial distribution of long - term trend shows a decrease tendency in the south and the north part of the basin, but it isn't obvious in the middle part. The evaporation change in the basin needs to take some other factors into consideration and the main cause for the change of evaporation will be further investigated in the further study.

**Key words:** Jinghe River basin; temperature; pan evaporation; temporal and spatial features; trend analysis