

# 清流河流域水文气象要素历史演变特征

翟然<sup>1,2,3</sup>, 王国庆<sup>1</sup>, 刘翠善<sup>1</sup>, 鲍振鑫<sup>1</sup>, 刘艳丽<sup>1</sup>

(1. 南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210029;  
2. 中国科学院 地理科学与资源研究所, 北京 100101; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 利用清流河流域 1961-2012 年的降水、气温、蒸发和径流量资料, 采用数理统计方法系统诊断了不同尺度水文气象要素的历史演变特征。结果表明, 近 50 年, 清流河流域夏季气温呈非显著升高趋势, 年与其它季节气温呈显著性升高趋势, 在 2007 年之后, 年和季节气温均存在下降的态势。年降水量和夏、冬季降水量呈增加趋势, 春、秋季降水量呈非显著性减少趋势。年水面蒸发量和除春季之外的季节水面蒸发量呈减少趋势, 在清流河流域蒸发悖论现象突出。径流量的演变趋势与降水的演变特征总体一致, 年和季节径流量均呈增加趋势, 其中冬季径流量增加趋势显著; 年和季节降水径流量之间的相关系数均在 0.65 以上, 降水是径流量变化的主要驱动要素, 因此, 未来气候变化特别是降水变化对水资源的影响应引起足够的重视。

**关键词:** 水文气象要素; 演变特征; 年内分配; 清流河流域

中图分类号: TV21; P333 文献标识码: A 文章编号: 1672-643X(2015)05-0007-06

## Evolution characteristics of history of hydrological and meteorological elements in Qingliu river basin

ZHAI Ran<sup>1,2,3</sup>, WANG Guoqing<sup>1</sup>, LIU Cuishan<sup>1</sup>, BAO Zhenxin<sup>1</sup>, LIU Yanli<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Based on the observed data of precipitation, temperature, pan evaporation and runoff from 1961 to 2012, the paper used statistical analysis method to investigate the evolution characteristics of hydro-meteorological element at different temporal scales for the Qingliu River catchment. The results indicate that in recent 50 years from 1961 to 2010, the temperature in summer presented insignificant rising trend while annual and other seasonal temperature showed significant rising trend. However, temperature exhibited the declining trend after 2007. The precipitation in annual, summer and winter presented the increasing trend, but that in spring and autumn presented the insignificant decreasing trend. The water surface evaporation presented the decrease trend in annual and the other three seasons except spring. The evaporation paradox is obvious. The variation of runoff is generally in accordance with that of precipitation. Both annual and seasonal runoff presented increasing trend while runoff in winter presented significant increasing trend. The correlation coefficient between runoff and precipitation is higher than 0.65. Therefore, precipitation is a major driver of runoff variation. It is necessary to pay sufficient attention to the impact of climate change and especially precipitation change on water resources.

**Key words:** hydro-meteorological element; evolution feature; seasonal distribution; the Qingliu River catchment

收稿日期: 2015-04-08; 修回日期: 2015-06-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(41330854、41371063); “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAC19B03)

作者简介: 翟然(1992-), 女, 河南开封人, 博士研究生, 主要从事水文遥感及地理信息系统研究。

通讯作者: 王国庆(1971-), 男, 山东成武人, 博士, 教授, 主要从事水文水资源和气候变化影响评价等方面的研究。

## 1 研究背景

气候变暖是目前全球最重要的环境问题之一, IPCC 第五次评估结果表明, 全球平均气温在 1880 - 2012 年升高了  $0.85^{\circ}\text{C}$ , 21 世纪的第一个十年为工业革命以来最热的十年<sup>[1]</sup>。水资源是对气候变化响应最为敏感的领域, 气候变化将通过加剧水文循环、改变水资源时空分布, 进而对水资源管理带来严峻挑战<sup>[2]</sup>。河川径流是重要的水资源形式, 受气候和下垫面变化影响明显<sup>[3]</sup>, 分析全球变暖背景下区域水文、气象要素的演变规律是认识气候变化、实现水资源开发利用及管理的重要基础性工作。

目前, 国内外不乏全球变化背景下区域水文气象要素的历史演变特征分析方面的研究成果。例如, 唐国利等研究认为近 100 年来中国气温演变特征与全球变暖趋势总体一致, 中国的增温主要发生在冬季和春季<sup>[4]</sup>。王英等<sup>[5]</sup>的研究结果表明全球气候变化背景下全国平均年降水量从 20 世纪 60 年代到 90 年代呈下降趋势, 但在 90 年代后期出现回升。中国半个世纪以来夏季降水量变化趋势与纬度有关,  $31^{\circ}\text{N}$  以南地区降水量以增加为主<sup>[6]</sup>。东北老哈河流域年、季尺度的蒸发皿蒸发均呈现下降趋势<sup>[7]</sup>。从目前研究成果来看, 多采用数理统计方法来诊断水文气象系列的演变趋势, 另外大多研究成果集中在对气象或水文的某一要素进行分析。

长江下游洪水灾害频发, 水安全问题突出, 以长江下游的典型支流清流河流域为研究对象, 本文旨在系统分析了近 50 年降水、气温、蒸发和径流量四个要素在年、季节尺度上的历史演变规律和季节分配特征, 以为流域水资源的合理开发利用提供科学依据。

## 2 资料与方法

### 2.1 流域及资料概况

清流河是长江流域滁河左岸的一级支流, 发源于滁州市市区与定远县界的磨盘山东麓仙店子北仙居涧, 地跨滁州市市区、明光市和来安县, 流域面积  $1\,318\text{ km}^2$ 。流域水系呈树枝状, 左岸有盈福河、百道河和二道河纳入, 右岸有大沙河、小沙河汇进。地势北高南低, 低山高丘分布在上游, 山坡多为人工针叶林, 中下游地势相对平坦。流域内建有沙河集、城西、燕子湾、练子山、独山等 5 座大中型水库, 以灌溉、供水为主, 兼顾防洪、发电和旅游等功能。流域地处亚热带湿润季风气候区, 气候温暖湿润, 多年平均气温为  $15.2^{\circ}\text{C}$ , 多年平均年降水量  $1\,100\text{ mm}$ , 流

域内多年平均年径流量  $4.29\text{ 亿 m}^3$ <sup>[8]</sup>。

滁州站是清流河下游控制站, 控制流域面积  $1\,060\text{ km}^2$ ; 收集了滁州站 1961 - 2012 年的逐日流量资料。流域内布设有 7 个雨量站和 2 个气象站, 气象站对所有气象要素均进行观测, 而雨量站只观测降水, 收集整理了每个站点 1961 - 2012 年的逐日资料。

### 2.2 研究方法

采用线性回归法和 Mann - Kendall 趋势检验法进行区域水文变化趋势的判别。线性回归法的优势在于可以直观给出时间序列是否具有递增或递减的趋势, 线性方程的斜率表征时间序列的平均趋势变化率。Mann - Kendall 趋势检验法是一种非参数统计检验方法, 该方法的优点在于不需要样本遵从一定的分布, 诊断结果不受少数异常值的干扰, 计算简便, 能很好的揭示时间序列变化趋势的显著性, 是目前较为常用的趋势诊断方法<sup>[9]</sup>。Mann - Kendall 检验法的原理为:

对于具有  $n$  个样本量的时间序列  $x$ , 构造一秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k = 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

$$r_i = \begin{cases} +1, & \text{当 } x_i > x_j \\ 0, & \text{当 } x_i \leq x_j \end{cases} \quad (k = 1, 2, \dots, i) \quad (2)$$

秩序列  $S_k$  是第  $i$  时刻数值大于  $j$  时刻数值个数的累计数。

在时间序列随机独立的假定下, 定义统计量 (M - K 统计值):

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中:  $E(S_k)$ 、 $\text{Var}(S_k)$  是累计数  $S_k$  的均值和方差, 在  $x_1, x_2, \dots, x_n$  相互独立, 且具有相同连续分布时, 它们可由下式算出:

$$\left. \begin{aligned} E(S_k) &= \frac{n(n-1)}{4} \\ \text{Var}(S_k) &= \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$UF_i$  为标准正态分布, 它是按时间序列  $x$  顺序  $x_1, x_2, \dots, x_n$  计算出的统计量序列, 如果  $UF_i > 0$  时, 表明有上升的趋势; 如果  $UF_i < 0$ , 表明有下降的趋势。当  $|UF_i| > U_{0.05/2} = 1.96$  时, 表示序列趋势变化显著。

## 3 结果与讨论

### 3.1 年尺度水文气象要素的历史演变

统计给出了各水文气象要素年际变化特征值 (表

1),直观起见,图1给出了清流河流域1961–2012年的气温、降水、蒸发和径流量的年际变化过程。

表1 清流河流域水文气象要素年际变化特征值(1961–2012)

特征值	气温/ ℃	降水/ mm	水面蒸发/ mm	径流量/ mm
均值	15.59	982	911	261
最大值	17.15	1581	1097	1053
最小值	14.52	485	778	10
线性斜率 $\alpha$	0.026	1.63	-1.97	0.75
M-K统计值	3.96	0.60	-2.64	0.52

清流河流域多年平均气温为15.59℃,2007年是最热的年份,平均气温为17.15℃,1969年气温最低,约为14.52℃。1961–2012年期间,气温呈现显著的升高趋势(M-K值为3.961,远超过置信水平0.05的临界值1.96),平均线性升率为0.0259℃/a,高于全国平均升率(0.023℃/a)和全球平均升率(0.018℃/a)<sup>[1,9]</sup>,增温主要发生在20世纪80年代中期以来。然而,2007年之后,在全球普遍增温的背景下,清流河流域年均气温存在较为明显的降温趋势,这一现象形成的环流背景及可能的驱动原因值得深入研究。

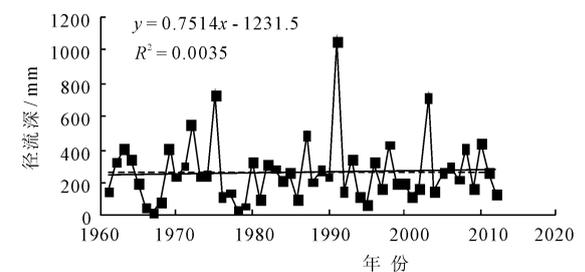
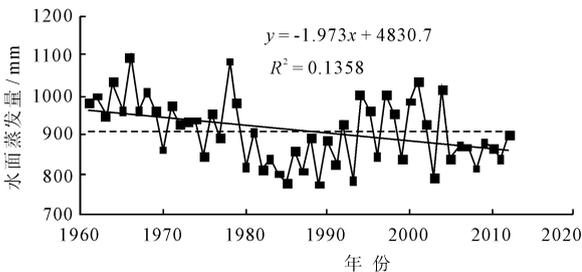
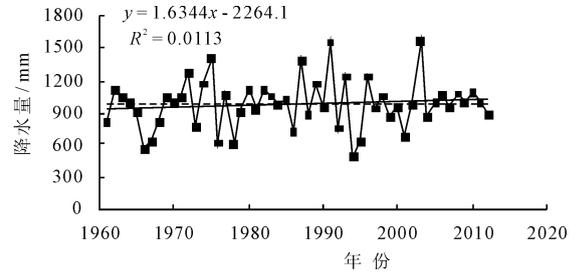
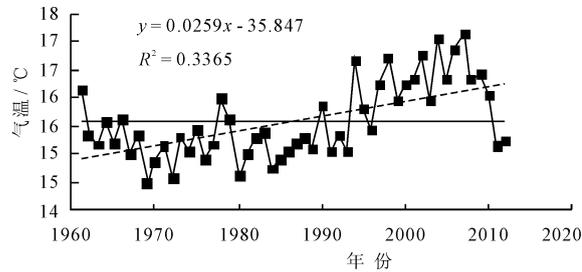


图1 清流河流域水文气象要素年际变化趋势

流域多年平均降水量约980 mm,年降水量具有丰、枯交替的特点,其中,2003年降水最多,约为1581 mm,1994年的降水最少,仅为485 mm;1961–2012年流域降水量总体呈弱增加趋势(M-K值为0.6),平均线性增率为1.63 mm/a。

流域年水面蒸发与年降水量基本相当,多年平均水面蒸发量为911 mm,在778~1097 mm之间变化;1961–2012年,水面蒸发量总体呈现显著减小趋势(M-K值为-2.636),平均线性变化率为-1.973 mm/a;年均蒸发量在20世纪80年代和90年代中期,以及2004年以后的近十年较多年均值偏低。

受降水变化影响,清流河流域径流量也具有年际变化大的特点,最大年径流深约为1053 mm(1991年),1967年径流深最小,仅为10 mm,二者相差100倍之多。尽管1991年降水量偏多,1967年降水量偏少,但径流量最大与最小的年份与降水量最大和最小的年份并不对应,由此说明,径流量受降

水量大小的制约,同时会受到如水利工程修建等人类活动的影响。

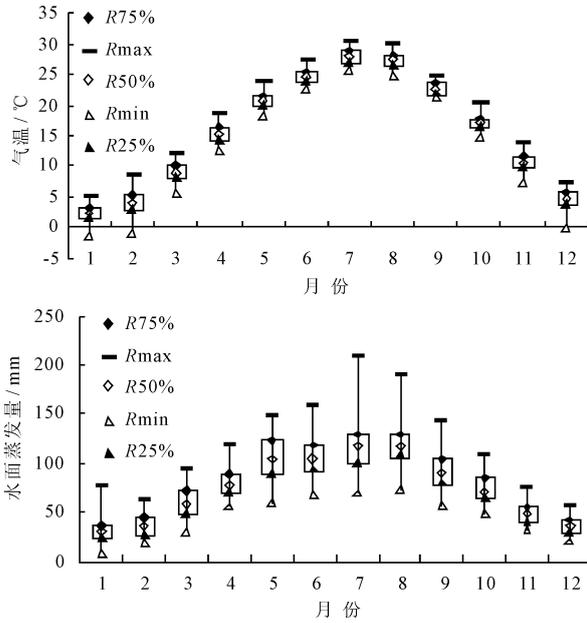
1961–2012年期间,径流量呈不显著增加趋势(M-K值为0.521),径流深的平均线性变化率为0.7514 mm/a,径流量的变化与降水量的变化趋势一致,这也说明了降水量变化在一定程度上影响着径流量的变化。

### 3.2 年内分配特征变化

受东亚季风气候的影响,清流河流域水文气象要素具有年内分配不均的特点,图2统计给出了1961–2012年期间流域不同年代的气温、降水、蒸发和径流量的年内分配变化的四分位图。

由图可以看出:①气温和水面蒸发的年内分配态势总体一致,12月份至次年2月份属于低值区间,自1月份到12月份,二者的年内分配呈现先升后降的平滑过程,其中6–8月份的气温和水面蒸发表明偏高;尽管1月份和12月份气温大多年份高于0℃,但个别年份也存在低于0℃的情况。②相比而

言,降水和径流量的年内分配特征较为类似,7月份出现峰值,7月的降水及径流量明显高于相邻的两个月份,统计结果表明,该月降水和径流量分别占年值得21%和30%,说明降水和径流的年内分配不均匀特征更为突出。③与气温相比,其他3个变量的年际变异特征更为明显,特别是6-8月份,例如,7月份最大径流量为460 mm,是多年均值(48.8 mm)的9.4倍,是最小值(2.97)的150倍之多。



$R_{max}$  为月份的最大值,  $R_{min}$  为月份最小值,  $R_{50\%}$  为中值,  $R_{75\%}$  为对应概率为 75% 统计值,  $R_{25\%}$  为对应概率为 25% 的统计值

图2 清流河流域各水气象要素年内分配变化的四分位图

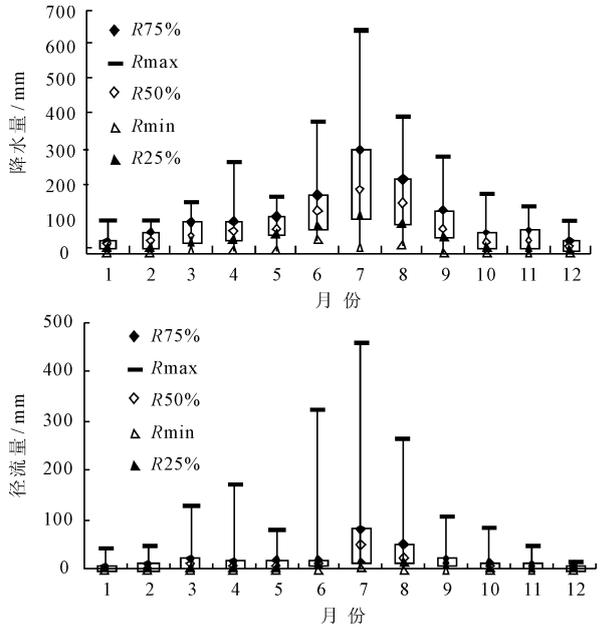
表2 1961-2012年期间各季节平均气温、降水、蒸发、径流深的逐年变化统计值

气象要素	项目	春	夏	秋	冬
气温	均值/ $^{\circ}\text{C}$	15.08	26.66	16.92	3.71
	倾向率 $\alpha / (^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1})$	0.0409	0.0078	0.0266	0.0283
	M-K 统计值	4.135	1.073	3.803	3.046
降水	均值/mm	213	501	175	93
	倾向率 $\alpha / (\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	-0.5748	1.6614	-0.5315	1.0793
	M-K 统计值	-0.473	0.915	-0.458	2.857
蒸发量	均值/mm	247	342	218	104
	倾向率 $\alpha / (\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	0.3572	-1.6438	-0.23	-0.4565
	M-K 统计值	0.6	-0.3756	-0.789	-2.083
径流深	均值/mm	47	154	43	18
	倾向率 $\alpha / (\text{mm} \cdot \text{a}^{-1})$	0.0759	0.1207	0.1375	0.4173
	M-K 统计值	0.805	0.694	1.562	3.519

统计结果表明,1961-2012年期间,清流河流域春、夏、秋、冬四季多年平均气温分别为15.08、26.66、16.92、3.71 $^{\circ}\text{C}$ 。由图3可以看出,春、秋、冬三季气温演变特征与年均气温相似,均呈显著增加

### 3.3 季节尺度水文气象要素变化

采用 Mann-Kendall 方法和线性回归方法分析气温、降水、蒸发、径流量的季节尺度的演变趋势,根据水文气象要素的年内分配特征(图2),四季分别定义为:春(3-5月)、夏(6-8月)、秋(9-11月)、冬(12月-次年2月)。表2给出了1961-2012年期间各季节气温、降水、蒸发、径流深的统计特征值。图3~6分别给出了四个要素的季节演变过程。



趋势, M-K 值分别为 4.135、3.803、3.046, 平均线性变化率分别为 0.0409、0.0266、0.0283 $^{\circ}\text{C}/\text{a}$ ; 夏季气温增加趋势不显著, M-K 值为 1.073, 平均线性变化率为 0.0078 $^{\circ}\text{C}/\text{a}$ 。在 1961-2012 年间, 四个季

节中,春季增温最为明显,升温幅度高达 2.13℃,夏季增温幅度最小,近 60 年仅升温 0.41℃,秋、冬季节升温幅度相若,分别为 1.38 和 1.47℃。由此可见,春季增温对年均升温的贡献最大,而夏季贡献最小。这一变化趋势与全球及北半球平均状况相似<sup>[1]</sup>。另外,与年气温变化特征类似,2007 年之后,季节气温也具有降低趋势,其中,秋冬季节气温降低现象尤为突出。

1961-2012 年期间,清河流域春、夏、秋、冬四季多年平均降水量分别为 213、501、175、93 mm。

Mann-Kendall 诊断结果表明,春、秋两季降水量呈弱减少趋势,其平均线性变化率分别为 -0.5748、-0.5315 mm/a。夏季降水量变化呈非显著增加趋势,多年平均线性增率为 1.661 mm/a,与年降水量变化趋势总体一致。冬季降水量变化呈显著性增加趋势,M-K 值为 2.857,平均线性变化率为 1.0793 mm/a。

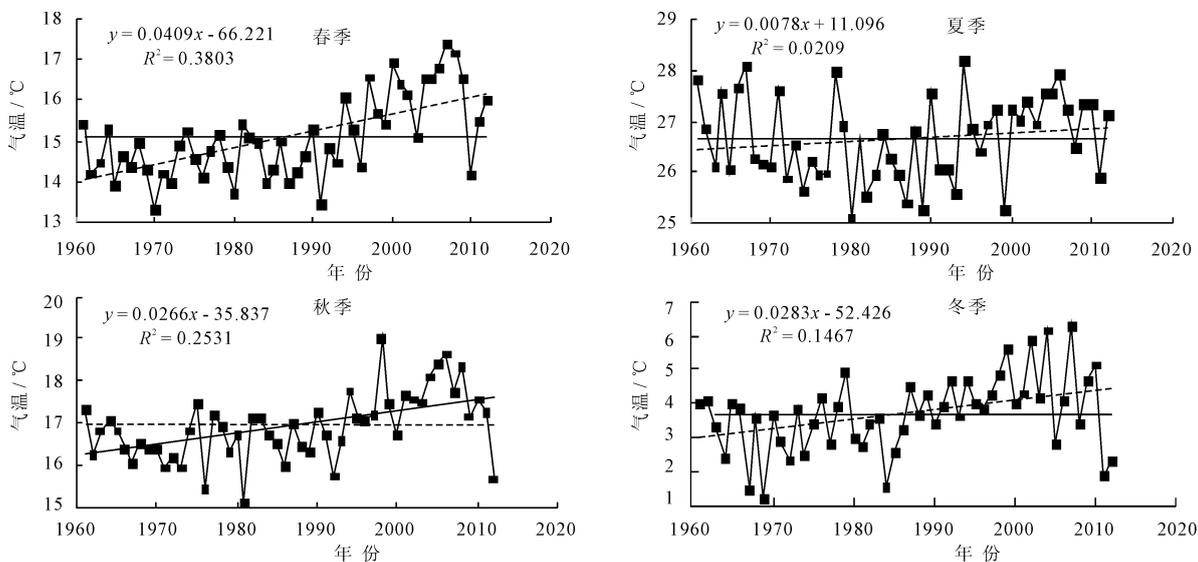


图 3 1961-2012 年季节气温的演变过程

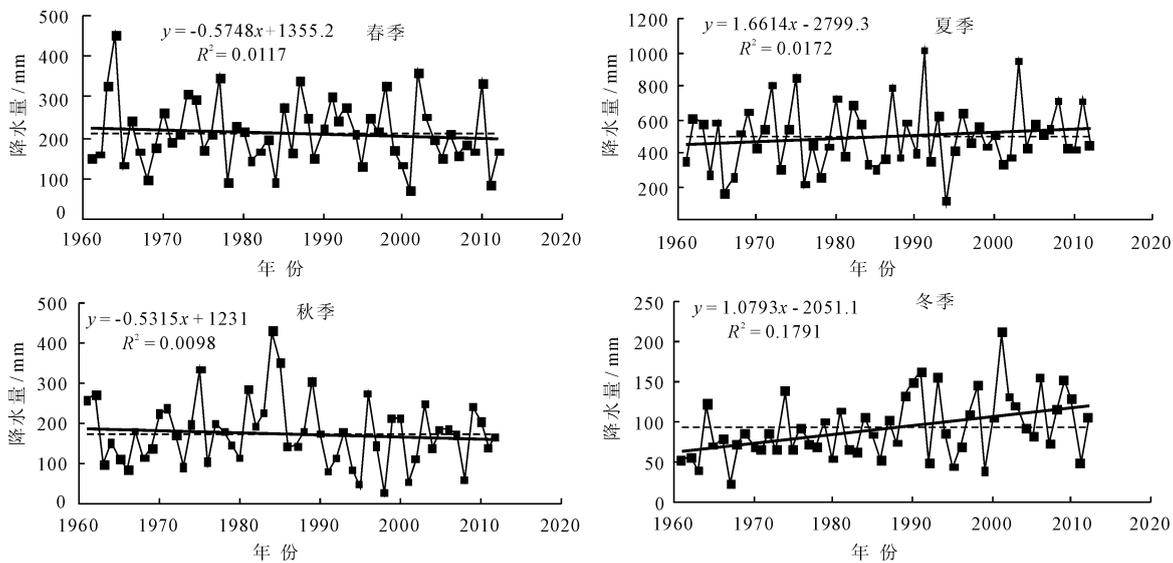


图 4 1961-2012 年季节降水量的演变过程

清河流域春、夏、秋、冬四季水面蒸发量多年均值分别为 247、342、218、104 mm。春季蒸发量呈非显著性增加趋势,其余三个季节蒸发量呈现减少趋势,其中,冬季蒸发量为减少趋势较为显著,四季多年平均线性变率分别为 0.3572、-1.6438、

-0.23 和 -0.4565 mm/a。

清河流域河川径流量来源于降水,同时,也受气温、蒸发能力的影响,相关分析结果表明(表 3),各季节径流量与降水的相关性最好,相关系数超过 0.65,其中,夏季径流量与降水量的相关性最高,相

关系数高达 0.9,说明降水是径流的主要驱动因子,降水的丰枯变化决定了径流量的多寡。径流量与气温和蒸发的相关性总体相当,与水面蒸发的相关系数稍高,且呈现负相关性,说明流域蒸发能力越大,河川径流量越小,蒸发是流域水量损失的重要因素之一。

表3 清流河流域径流量与气候驱动因子的相关系数统计

	春	夏	秋	冬	年
降水	0.74	0.90	0.74	0.68	0.85
气温	-0.10	-0.41	0.12	0.28	-0.16
水面蒸发	-0.44	-0.39	-0.60	-0.23	-0.46

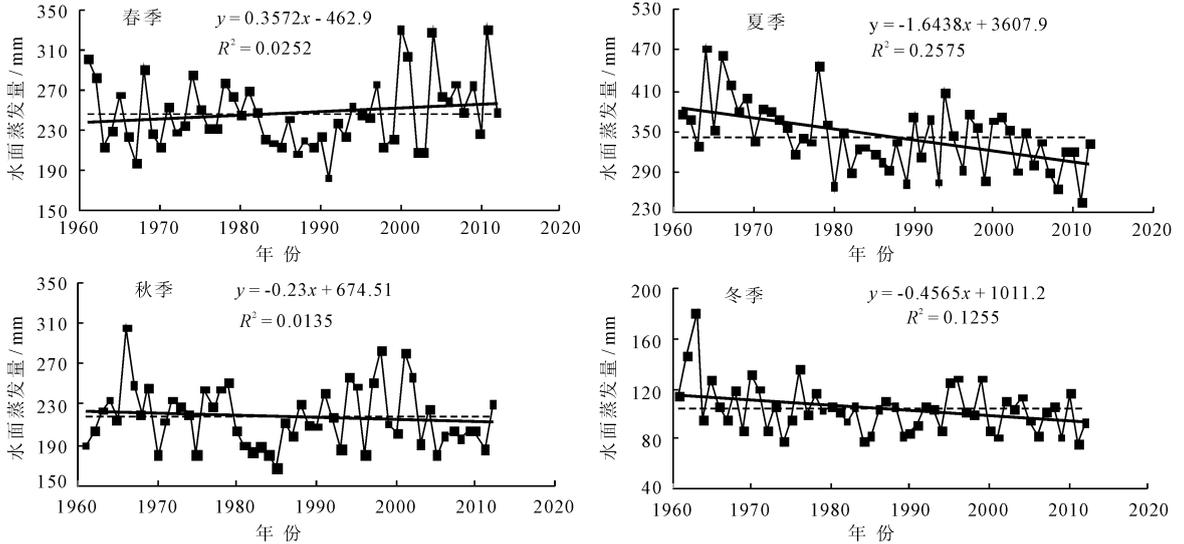


图5 1961 - 2012 年季节水面蒸发量的演变过程

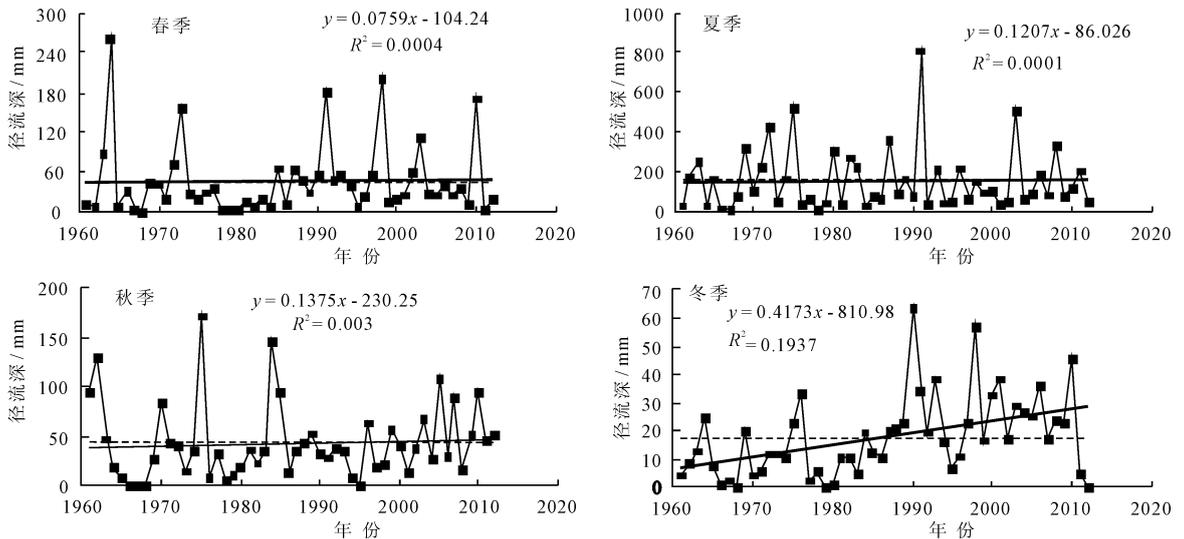


图6 清流河流域滁州站 1961 - 2012 年季节实测径流量演变过程

由图6可以看出,四季径流量均出现增加趋势,统计结果表明,冬季径流量增加趋势显著,其余季节径流量为非显著性增加;1961 - 2012 年春夏秋冬四季多年平均径流量分别为 47、154、43 和 18 mm;平均线性变化率分别为 0.0759、0.1207、0.1375 和 0.4173 mm/a。季节尺度径流量变化与降水量变化趋势一致。

## 4 结 语

(1)在年尺度上,近 50 年来,清流河流域降水和径流量呈现弱增加趋势,气温呈显著升高趋势,水面蒸发量呈显著减小趋势。

(2)在季节尺度上春、秋季节降水量呈非显著减小趋势,夏、冬季节降水量呈增加趋势,其中,冬季

(下转第 19 页)

- (12):2195-2202.
- [37] 盛琼,申双和,顾泽. 小型蒸发器的水面蒸发量折算系数[J]. 南京气象学院学报,2007,30(4):561-565.
- [38] 王永亮,张学知,乔光建. 河北省平原区 20m<sup>2</sup> 水面蒸发池与不同型号蒸发器折算系数分析[J]. 水文,2012,32(4):58-62.
- [39] 吴景峰,王永亮,徐佳. 20m<sup>2</sup> 蒸发池水面蒸发研究[J]. 南水北调与水利科技,2009,7(5):66-69.
- [40] 施成熙,牛克源,陈天珠,等. 水面蒸发器折算系数研究[J]. 地理科学,1986,6(4):305-313.
- [41] 邓国群. 海水淡化技术经济比较[J]. 广西电力技术,2001(2):53-55+64.
- [42] 陈坤. 解决华北水危机可选方案成本探讨[J]. 社会科学,2004(12):5-12.
- [43] 高波,郭菊娥,孟庆才. 海水淡化产业外部成本经济性分析及实证研究[J]. 中国海洋大学学报(社会科学版),2012(4):33-37.
- [44] 高玉屏. 我国现有技术条件下海水淡化成本构成分析[J]. 水利技术监督,2013(1):36-38.
- [45] 尹娜. 制约海水淡化产业的5个瓶颈[J]. 中国投资,2009(1):88-89.
- [46] 付兆堂,刘玉录,赵亭月. 地下苦咸水淡化技术在海岛的推广应用[J]. 地下水,2001,23(2):97+99.
- [47] 许树国. 地下咸水淡化-开源节流的新途径[J]. 天津经济,2001(8):21-24.
- [48] 杨涛. 沧化18000吨/日反渗透高浓度苦咸水淡化工程[J]. 水处理技术,2002,28(1):38-41.
- [49] 谢高地,甄霖,鲁春霞,等. 一个基于专家知识的生态系统服务价值化方法[J]. 自然资源学报,2008,23(5):911-919.
- [50] 南焱. 南水北调东线遭遇高水价难题[J]. 中国经济周刊,2014(2):30-33.

(上接第12页)

降水量增加趋势显著。四个季节气温均出现升高趋势,只有夏季气温为非显著性升高趋势。夏、冬季节水面蒸发呈显著性减少趋势,春季具有非显著增加,秋季水面蒸发为非显著性减少趋势。

(3)年径流量的演变趋势与降水量的演变特征一致,春、夏、秋三季径流量均呈非显著增加趋势,冬季径流量呈现显著增加趋势,降水是径流量变化的主要驱动因素。

#### 参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2013: the physical science basis [R]. Cambridge. Cambridge University Press,2013.
- [2] 张建云,王国庆. 气候变化对水文水资源影响研究[M]. 北京:科学出版社,2007.
- [3] 张建云,王国庆. 河川径流变化及归因定量识别[M]. 北京:科学出版社,2014.
- [4] 唐国利,任国玉. 近百年中国地表气温变化趋势的再分析[J]. 气候与环境研究,2005,10(4):791-798.
- [5] 王英,曹明奎,陶波,等. 全球气候变化背景下中国降水量空间格局的变化特征[J]. 地理研究,2006,25(6):1031-1041.
- [6] 卢爱刚,庞德谦,康世昌,等. 中国半个世纪以来夏季降水量变化总趋势[J]. 生态环境,2008,17(1):169-172.
- [7] 李琼芳,刘轶,王鸿杰,等. 气象变化趋势对蒸发皿蒸发的影响分析[J]. 水电能源科学,2008,26(5):1-3.
- [8] 张建云,王国庆,贺瑞敏,等. 黄河中游水文变化趋势及其对气候变化的响应[J]. 水科学进展,2009,20(2):153-158.
- [9] 《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会,第二次气候变化国家评估报告[R]. 北京:科学出版社,2011.