

# 都江堰气候变化特征分析

张舒姝<sup>1</sup>, 颜萍<sup>2</sup>, 匡凤雪<sup>1</sup>

(1. 都江堰市气象局, 四川 都江堰 611830; 2. 成都市气象局, 四川 成都 610072)

**摘要:**利用都江堰市国家基本气象站 1955–2013 年 59 年的气温和降水资料,采用线性趋势法、气候倾向率和 Mann-Kendall 突变检验法分析了都江堰近 59 年气候变化特征。结果表明:(1)都江堰年均气温大体上经历了冷暖两个时期,以 1995 年为界,前期为偏冷阶段,后期为偏暖阶段,其中最冷年为 1976 年,最暖年为 2013 年;季节气温在四季变化均呈显著上升趋势,上升趋势为秋季>春季>全年>夏季>冬季,对于 1995 年以来的增暖,秋季贡献最大,春季次之,冬季最小;同时,都江堰年均气温存在突变现象,由冷到暖,突变年份是 2001 年。(2)年降水量大体上经历了丰–丰枯交替–枯–丰枯交替的过程,在 1955–1968 年,1976–1981 年,1989–1992 年以及 2010–2013 年处于相对丰水期,在 1969–1975 年,1982–1988 年以及 1993–2009 年处于相对枯水期,但整体上呈显著减少趋势,趋势强度为  $-37.4\text{ mm}/10\text{a}$ ;季节降水变化不明显,降水最多的为夏季和秋季,共占全年的 77 %;从年降水量突变情况来看,近 59 年降水量存在有突变现象发生,由丰到枯,突变年份是 1971 年。

**关键词:**气候变化;都江堰;气温;降水

## 0 引言

气候变化问题已成为国内外学者的共识,也成为世界共同关注的重大科学问题<sup>[1]</sup>。气候变化对人类社会、经济发展带来了极其深远的影响,这是国际社会公认的环境问题<sup>[2–5]</sup>。沈永平等<sup>[6]</sup>针对第五次 IPCC 第一工作组的研究成果进行了讨论分析:认为当前趋势下,全球平均气温将继续增暖,相对于 1986–2005 年,到 2016–2035 年增暖幅度为  $0.3\text{ }^{\circ}\text{C} \sim 0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。针对气候变化,目前全球或大区域范围的研究较多,而局地的详细研究较少。

都江堰市地跨川西龙门山地带和成都平原岷江冲积扇顶部部位,作为世界文化遗产、国家 5A 级旅游景区,地势西北高,东南低,海拔 592 ~ 4582 m,相对高差 3990 m;具有气候温和,雨量充沛,日照较少,空气湿润,夏无酷暑,冬无严寒,无霜期长,四季分明的中亚热带湿润气候特征。在全球变暖的大背景下,都江堰的气候也发生着变化,特别是气温和降水这两个重要的气候要素。本文利用都江堰近 59 年的气候资料,对其变化特征及突变情况进行了分析,旨在探究都江堰近年来的气候变化特征,为本地气象防灾减灾、水资源合理高效利用及农业生产可持续发展提供参考依据,并且还可以给人们快速适应气候变化带来的诸多不便提供建议和指导。

## 1 资料与方法

选取都江堰市气象局 1955–2013 年逐日地面气

象观测值,主要包括:平均气温、最高气温、最低气温、降水量数据,计算其逐年、季平均值。春、夏、秋、冬季分别代表 3–5 月、6–8 月、9–11 月、12 月至次年 2 月。利用线性趋势法结合 5 年滑动平均距平分析、气候倾向率分析气温和降水的年、各季变化趋势特征,并用  $t$  检验方法检验结果是否显著。气候突变特征分析则采用 Mann-Kendall 突变检验法,对都江堰的年均气温和降水进行突变检验。

## 2 气温变化特征分析

### 2.1 年均气温变化特征

利用线性趋势法结合滑动平均分析都江堰地区气温年变化基本特征,结果如图 1 所示。计算得都江堰地区多年气温均值为  $14.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。从都江堰地区年均气温变化可看出,都江堰地区年均气温变化波动较大,在 20 世纪 90 年代中期之前,温度变化在均值上下波动,但基本低于多年均值,其中 1980–1986 年连续 7 年间温度均小于多年均值;90 年代中期之后,温度变化均在均值之上。

从都江堰地区年均气温的 5 年滑动平均值来看,都江堰地区近 59 年经历了冷暖两个时期,以 1995 年为界,前期偏冷,其中 1976 年最冷,后期偏暖,其中 2013 年最暖。从滑动平均趋势来看,在 1985 年以前呈现出小幅下降趋势而后上升趋势增强,线性趋势变化通过了 99% 置信度检验( $t=4.182$ , 99 % 置信度临界值为 2.663),气温增长趋势十分显著;平均每 10 年

升高0.2℃。年均气温变化线性回归方程为：  
 $y = 0.01665a - 17.603$  其中  $a$  表示年份(下同)。

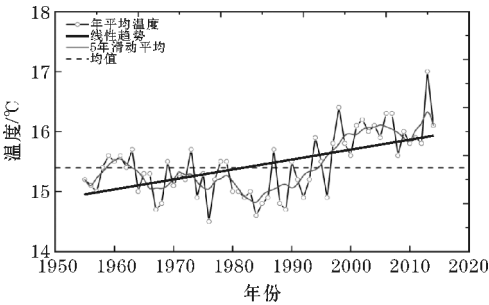


图1 都江堰地区年均气温年际变化趋势图

图2为都江堰地区年均气温距平/累积距平图,由图可看出,1996年(距平为-0.5℃)以前偏冷期的年均气温距平值基本为负值,计算得此阶段负距平出现的频率为69%,1993年年均累计距平值最小为-9.2℃,1976年均气温处于历年最低值14.5℃,1984年次之;自1997年开始年均气温距平值均为正值,累计距平值同时开始上升,温度变暖明显,在2013年达到近60年最大值17℃,1998年次之16.4℃。表明都江堰地区气温的突变点可能在1997年左右。

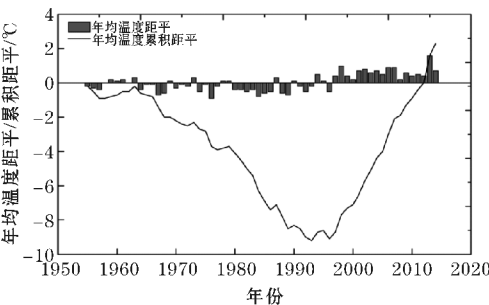


图2 都江堰地区年均气温距平/累积距平

2.2 季节气温变化特征

对于季节划分采用传统的气候划分法,每年3-5月为春季,6-8月为夏季,9-11月为秋季,12月-次年2月为冬季。对于四季平均气温的变化,利用线性倾向法结合滑动平均法进行分析,并用  $t$  检验方法检验结果是否显著(见表1),图3显示了都江堰地区四季气温变化趋势。从中可得,研究区近59年来四季气温变化波动较大,变化趋势基本一致但其增长幅度大小有别。四季气温均值的线性回归方程分别为:

春季  $y = 0.01903a - 22.16778$

夏季  $y = 0.01358a - 2.95643$

秋季  $y = 0.02162a - 26.94621$

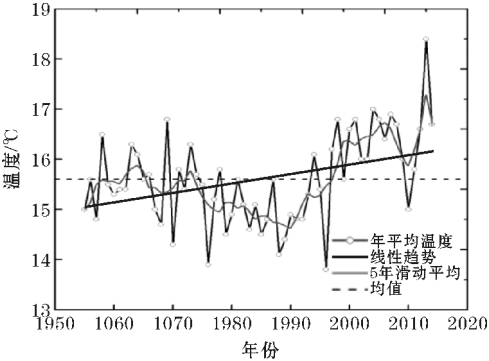
冬季  $y = 0.01279a - 19.372$

表1 四季气温变化统计值					
季节	春季	夏季	秋季	冬季	全年
气候倾向率/ (℃/10 a)	0.1903	0.1358	0.2162	0.1279	0.1665
$t$ 值	3.058**	3.414**	4.526**	2.186*	4.182**
平均气温/℃	14.6	24	14.9	6	14.4

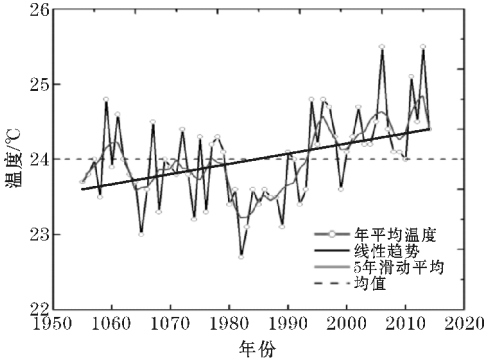
注: \* 表示通过95 % 置信度检验, \*\* 表示通过99 % 置信度检验

由图3可知,平均气温四季变化均为上升趋势,结合季节气温均值的5年滑动平均趋势分析,其中春夏季气温变化波动起伏变化较为一致,在20世纪80年代左右均存在气温分布的低值区间,秋冬季在1995年之前季节温度主要在多年均值以下波动,而1995年之后基本在多年均值以上波动,但秋季1996年(14.7℃)与2000年(14.6℃)除外。从四季气温变化趋势来讲,其气候倾向率秋季>春季>全年>夏季>冬季。由此可看出,秋季增温幅度最大,气候倾向率为0.22℃/10 a,春季次之为0.19℃/10 a,大于全年的气候倾向率0.17℃/10 a,夏季和冬季的气候倾向率小于全年水平分别为0.14℃/10 a、0.13℃/10 a。

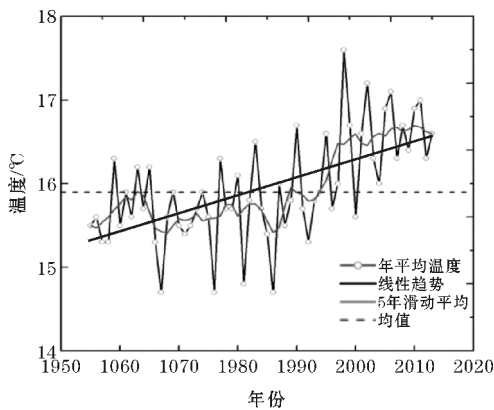
结合表1和图3中平均气温季节变化趋势可看出,春、夏、秋季气温线性倾向变化通过了99%置信度水平的  $t$  检验,表明其上升趋势十分显著;冬季气温线性倾向变化通过95%置信度水平的  $t$  检验,表明其升温趋势明显。表现在图中春夏季的升温趋势波动较为一致,秋季的升温趋势明显最陡,冬季的升温趋势小于其余3个季节。结合上文讨论结果,都江堰地区1995年来为增暖期,由此可见,整体上说增暖贡献最大的季节为秋季,其次是春季,冬季最小。



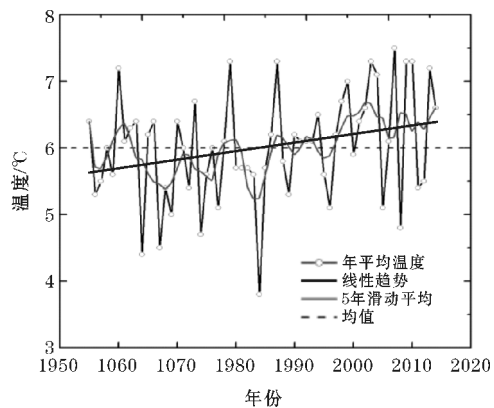
(a) 春季



(b) 夏季



(c) 秋季



(d) 冬季

图3 都江堰地区平均气温季节变化趋势图

### 2.3 年均气温变化的 MK 突变检验

MK 突变检验是世界气象组织推荐并已广泛使用的非参数检验方法,最初有 Mann 和 Kendall 提出,在此利用 MK 突变检验法对都江堰年均气温时间序列进行突变检验,得到都江堰年均气温 MK 突变检验图(图4)。图中粗线表示 UF,细线表示 UB。

从图4可知,UF 曲线主要经历了4个变化阶段:1955–1958 年负→1959–1966 年正→1967–1999 年负→2000–2013 年正,且在 1985–1986 年,1988–1993 年,2006–2013 年超过了信度线。说明近 59 年来都江堰地区年温度在 1955–1958 年呈下降趋势,1959–1966 年温度呈上升趋势,但其变化趋势均不显著;1967–1999 年温度呈下降趋势,其中 1985–1986 年,1988–1993 年上升趋势达到显著水平;2000–2013 年温度呈上升趋势,且 2006–2013 年上升趋势显著。UF 和 UB 在信度线之间存在 1 个交点,且在 2006 年 UF 曲线超过了信度线,说明都江堰地区年温度在 2000 年左右发生了由冷到暖的突变现象。突变分析结果与 5 a 滑动平均曲线以及气温距平/累积距平所得趋势转变结果较为一致。

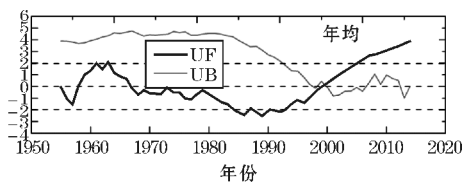


图4 都江堰地区年均气温 MK 突变检验

## 3 降水量变化特征分析

### 3.1 年降水量变化特征

利用线性趋势法结合滑动平均分析了都江堰地区降水量年变化时间序列,都江堰地区 59 年的年降水量变化趋势如图5所示。计算得都江堰地区多年降水量均值为1140.5 mm。由图5可看出,都江堰地区年降水量总体上为下降趋势,降水变化倾向率为 $-37.4\text{ mm}/10\text{ a}$ ,其减少趋势较为显著( $t=2.07$ ),通过了95 %置信度水平的  $t$  检验。年降水量变化线性回归方程为:

$$y = 8569.54139 - 3.74449 a$$

从图5可看出,都江堰地区历年降水量波动频率高,降水量年际间变化幅度大,说明降水量年际间变化较大,可能存在突降而至的旱涝等灾害。结合都江堰地区年降水量的 5 年滑动平均趋势来看,其年降水量在 2009 年之前呈周期性波动降低过程,如 1955–1970 年前期增加,后期减少,这种变化趋势同样发生在 1971–1987 年,1988–1998 年以及 1999–2009 年,且其波峰的最高值逐渐降低;2009 年以后,降水量呈显著上升趋势,到 2013 年上升到近 59 年来最大值1970.7 mm。

图5中年降水量的5 a滑动平均曲线经历了7个阶段:在 1955–1968 年,1976–1981 年,1989–1992 年以及 2010–2013 年其5 a滑动平均曲线高于多年平均水平,表明在此期间都江堰地区年降水水平高于59 a平均状态,处于相对丰水期;而在此 1969–1975 年,1982–1988 年以及 1993–2009 年处于相对枯水期。

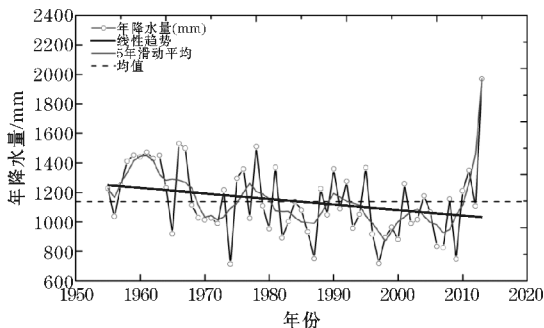


图5 都江堰地区年降水年变化特征

将都江堰地区 59 a 降水量时间序列进行距平处理,都江堰地区年降水量距平/累积距平图(图 6)。由图 6 可看出,近 59 a 的年降水量累积距平曲线在 1967 年以前表现为明显的上升趋势,在 1967 年达到 59 a 来的累积距平最大值 1574.5 mm;自 1968 年开始到 2009 年表现为明显的下降趋势,在 2005–2006 年累积距平穿过 0 线后继续下降,到 2009 年达到 59 a 来的累积距平的最小值 -854.8 mm;2009–2013 年又呈上升趋势。说明都江堰地区年降水量在近 59 a 大体上里经历了:丰–丰枯交替–枯–丰枯交替的过程。总体上都江堰地区 59 a 降水量负距平率为 56 %,正距平率为 44 %。年降水量正距平率小于负距平率说明丰水期年降水较为集中易出现重大洪涝灾害,枯水年中重大干旱灾害则相对不容易发生,但是干旱发生频率高于洪涝。

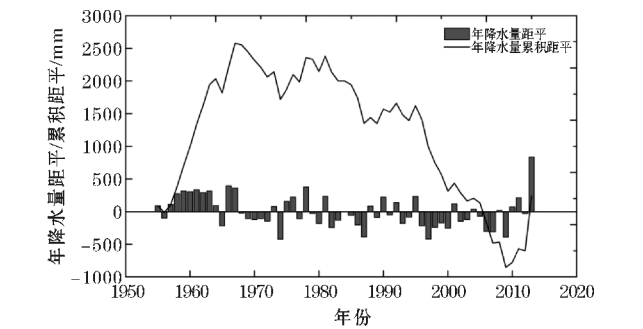


图 6 都江堰地区 1954–2013 年平均降水量距平/累积距平

3.2 季节降水量变化特征

都江堰地区降水最多的季节为夏季,占全年降水量的 53 %;其次是秋季,占全年降水量的 24 %;春冬季较少,分别为 19 %、4 %。由此可见,都江堰地区降水多发生在夏秋季节,夏秋季降水对区域水资源贡献起着重要作用。

通过统计分析,得出都江堰地区四季降水量的变化趋势均不显著(表 2),气候倾向率分别为春季 -8.3864 mm/10 a,夏季 -21.4314 mm/10 a,秋季 -8.1686 mm/10 a 和冬季 4.414 mm/10 a,其中仅冬季呈上升趋势,但趋势不显著( $t=0.423$ )。计算得都江堰地区平均年降水量 713.1 ~ 1970.7 mm,其中降水主要集中在夏季,夏季平均降水量为 257.6 ~ 1538.1 mm。尽管夏季降水气候倾向率最大,但由于夏季大气环流年际变化频繁,致使夏季降水变率大、枯丰交替频繁,因此降水量降低趋势不显著。

四季降水量均值的线性回归方程分别为:

春季  $y = 1869.28 - 0.83864 a$

夏季  $y = 4864.9106 - 2.14314 a$

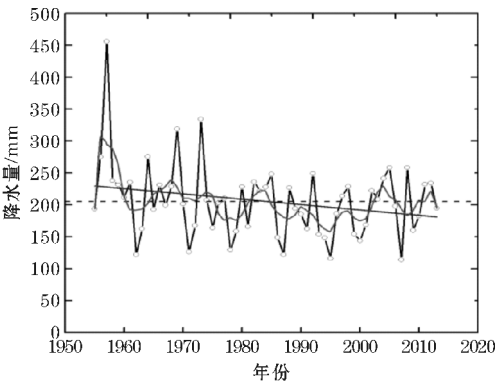
秋季  $y = 1893.68566 - 0.81686 a$

冬季  $y = 0.05414 a - 58.32491$

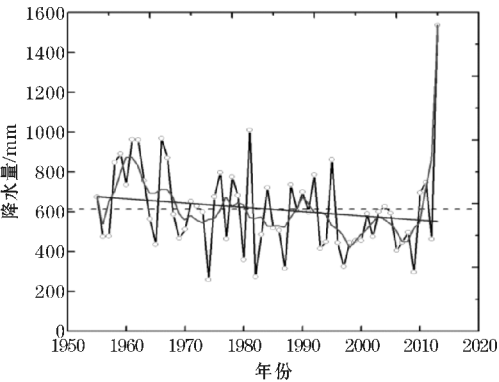
表 2 四季降水量变化统计值					
季节	春季	夏季	秋季	冬季	全年
气候倾向率/ (mm/10 a)	-8.3864	-21.4314	-8.1686	4.414	-37.4449
<i>t</i> 值	-1.947	-1.274	-1.141	0.423	-2.07 *
平均降水量/℃	204.4	612.9	273	49.1	1140.5

注: \* 表示通过 95 % 置信度检验

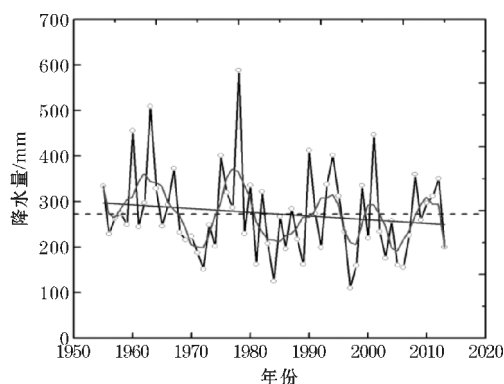
由都江堰地区年降水量四季变化趋势图(图 7)可看出,都江堰地区 59 a 来各季降水量变化趋势和幅度均不一致,其中,春夏秋季均为下降趋势,而冬季为上升趋势。春季降水量在 1955–1964 年波动较大,且在 1957 年存在异常高值也是近 59 a 最高值 45 6.3 mm,1965–2013 年变化波动较之前更为平缓,且 59 a 来降水最低值均为 130 mm 附近。夏季降水量波动十分大,如 1965 年为 434.5 mm,到 1966 年陡升至 969.8 mm,增大了 1 倍,这样的情况还发生在 1973–1975 年,1979–1982 年,1987–1988 年,2009–2010 年,2012–2013 年,其中 2013 年降水量更是 2012 年的 3 倍多。秋冬季节的降水量波动范围均较大,由 5 a 滑动平均趋势来看,秋季的滑动平均值一直在多年均值上下波动,而冬季的滑动平均值在 1985 年以前在多年均值上下波动,1985–2000 年其滑动平均值均在均值线上波动,2001–2013 年大部分在线下波动。



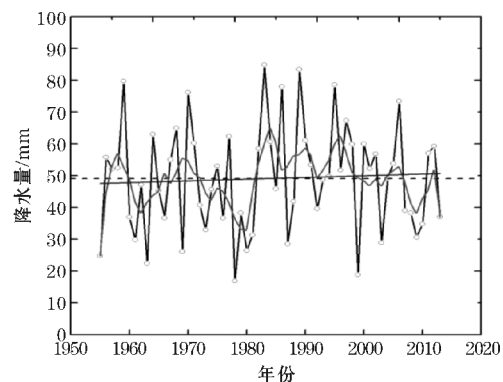
(a) 春季



(b) 夏季



(c) 秋季



(d) 冬季

图7 都江堰地区1954-2013年四季降水量变化趋势

### 3.3 年降水量变化的 MK 突变检验

从图8可知,UF曲线主要经历了3个变化阶段:1955-1956年负→1957-1969年正→1970-2013年负,且在1960-1963年,1986-2013年超过了信度线。说明近59年来都江堰地区年降水量在1955-1956年呈减少趋势,但趋势不显著;1957-1969年降水量呈增加趋势,其变化趋势在1960-1963年间达到显著水平;1970-2013年降水量呈减少趋势,且在1986-2013年减少趋势达到显著水平。UF和UB在信度线之间存在1个交点,且在1986年UF曲线超过了信度线,说明都江堰地区年降水量在1971年左右发生了由丰到枯的突变现象。突变分析结果与5 a滑动平均曲线所得趋势转变结果较为一致。

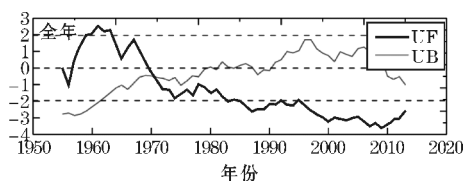


图8 都江堰地区降水量 MK 突变检验

## 4 结论

研究基于都江堰市1955-2013年共59年气象资

料,首先针对气温、降水等气象因子的时变特征进行了统计分析,得出都江堰地区近59 a气候演变规律和特征。主要结论有:

(1)年均气温大体上经历了冷暖两个时期,以1995年为界,前期为偏冷期,其中1976年最冷,后期为偏暖期,其中2013年最暖,其滑动平均趋势显示年均气温在1985年以前呈现出小幅下降趋势而后上升趋势增强,气温增长趋势十分显著。季节气温在四季变化均呈显著上升趋势,上升趋势为秋季>春季>全年>夏季>冬季,对于1995年以来的增暖,秋季贡献最大,春季次之,冬季最小。同时,都江堰年均气温存在突变现象,由冷到暖,全年气温突变年份是2001年左右。

(2)年降水量大体上里经历了丰-丰枯交替-枯-丰枯交替的过程,在1955-1968年,1976-1981年,1989-1992年以及2010-2013年处于相对丰水期,在1969-1975年,1982-1988年以及1993-2009年处于相对枯水期,但整体上呈显著减少趋势,趋势强度为 $-37.4 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。季节降水变化不明显,降水最多的为夏季和秋季,分别占全年的53%、24%;从年降水量突变情况来看,近59年降水量存在有突变现象发生,由丰到枯,突变年份是1971年。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Brunetti M, Buffoni L, Mangianti F, et al. Temperature, precipitation and extreme events during the last century in Italy[J]. Global and Planetary Change, 2004, 40(1): 141-149.
- [3] Schönwiese C D, Grieser J, Trömel S. Secular change of extreme monthly precipitation in Europe[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2003, 75(3): 245-250.
- [4] Davson J P, Racherla P N, Lynn B H, et al. Simulating present-day and future air quality as climate changes: Model evaluation[J]. Atmospheric Environment, 2008, 42(2): 4551-4566.
- [5] 丁一汇,任国玉. 中国气候变化科学概论[M]. 北京:气象出版社, 2008.
- [6] 沈永平,王国亚. IPCC第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. 冰川冻土, 2013, 35(5): 1068-1076.