

文章编号: 1008 - 2786 - ( 2012 ) 4 - 461 - 09

# 青藏高原江河源区近 40 年来气候变化特征及其 对区域环境的影响

姜永见<sup>1 2</sup> 李世杰<sup>\* 1 3</sup> 沈德福<sup>1 2</sup> 陈 炜<sup>1</sup>

( 1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 湖泊与环境国家重点实验室, 江苏 南京 210008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;  
3. 中国科学院地球化学研究所, 贵州 贵阳 550002 )

**摘 要:** 以江河源区 12 个气象站 1971—2008 年间的逐月气温、风速和降水资料为基础, 对该区气候变化特征进行了分析。结果表明: 近 40 年来, 江河源区气候持续变暖, 年均气温的增温率为  $0.37^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$ , 1987 年和 1998 年气温由低向高突变; 年均风速显著降低, 每 10 a 降幅为  $0.24\text{ m/s}$ , 1981 年和 1992 年风速由高向低突变, 年均风速与年均气温间呈负相关关系; 1980 年代降水偏多, 1970 和 1990 年代偏少, 21 世纪以来降水量有所回升, 增幅因区域而异; 年陆面蒸发量整体显著增加。结合前人研究, 探讨了气候变化对环境的影响: 持续升温导致江河源区内冰川退缩、多年冻土退化; 1980 年代气候相对暖湿, 水资源量较丰; 气候暖干化、水资源量减少、生态环境恶化是该区在 1990 年代和 21 世纪最初几年的显著特征; 2004 年左右以来, 江河源区气候转湿, 水资源量增加, 生态环境有所好转。

**关键词:** 江河源区; 青藏高原; 气候变化; 区域环境; REOF

**中图分类号:** P467

**文献标识码:** A

作为世界上海拔最高的巨型构造地貌单元, 青藏高原对大气环流的动力、热力作用不仅对东亚地区的气候产生了巨大影响<sup>[1]</sup>, 也被认为是全球气候变化的“驱动机”与“放大器”<sup>[2]</sup>。与我国东部地区相比, 青藏高原对全球气候变化的响应更为敏感<sup>[3]</sup>, 气候变化的位相提前<sup>[4]</sup>。因此, 对青藏高原现代气候变化的研究一直备受重视。大气环流和高原地势格局的制约使得青藏高原产生了自然地域分异, 形成了独特的水热状况、自然景观地域组合<sup>[5]</sup>, 其中位于青海省南部青藏高原腹地的江河源区是长江、黄河、澜沧江的发源地, 行政区域包括果洛藏族自治州的玛多、玛沁、达日、甘德、久治、班玛 6 个县, 玉树藏族自治州的称多、杂多、治多、曲麻莱、囊谦、玉树 6 个县, 海南藏族自治州的兴海、同德 2 个县,

黄南藏族自治州的泽库、河南 2 个县以及格尔木市代管的唐古拉乡, 总面积约  $31.8 \times 10^4\text{ km}^2$ 。区内河流、湖泊、沼泽、湿地广布, 水量资源丰富, 有“中华水塔”之称, 该区在青藏高原乃至全国都具有重要的生态地位, 西风气流、东亚季风和西南季风作用于此, 但该区生态系统结构相对简单, 生态环境相对脆弱, 受气候变化的直接影响较大。因此, 该区是在青藏高原地区进行气候变化和生态环境保护研究的重要对象。近年来, 研究者们运用各种气象、水文、生态资料, 对江河源区现代气候变化的特征、影响、原因等方面进行了研究<sup>[6~12]</sup>。整体来看, 前人研究多集中在江河源区气候变化的平均特征、个别气象要素的变化或单个子区域的气候变化等方面, 对整个源区不同气象要素的变化特征、气候变化的区域差

收稿日期( Received date ): 2011 - 12 - 12; 改回日期( Accepted ): 2012 - 04 - 02。

基金项目( Foundation item ): 科技部基础性工作专项( 2006FY110600 ) 资助。 [Supported by special basic research funds of the Ministry of Science and Technology ( 2006FY110600 ) . ]

作者简介( Biography ): 姜永见( 1985 - ), 男, 山东人, 博士研究生, 从事环境变化研究。 [Jiang Yongjian( 1985 - ), male, born in Shandong, doctor candidate, major in research on environmental change. ] E-mail: kelvin\_86@126.com

\* 通讯作者( Corresponding author ): 李世杰( 1954 - ), 男, 研究员, 博士生导师。 [Li Shijie( 1954 - ), male, professor, Ph D supervisor. ] E-mail: shjli@niglas.ac.cn; lishijie@vip.gyig.ac.cn

异等方面的研究仍相对较少,且该区气象资料时间序列的更新也为开展新的研究提供了基础。

本文利用江河源区典型气象台站的若干常规观测资料,对该区近 40 年来气候要素的多年变化趋势、年际、年代际变化以及气候要素变化的区域差异等特征进行统计分析,并结合前人研究就气候变化对该区生态环境的影响进行初步探讨,以期对日后在该区进一步开展气候及生态环境变化研究提供基础资料。

## 1 资料和方法

选取班玛、久治、达日、兴海、玛多、清水河、玉树、囊谦、杂多、曲麻莱、五道梁、托托河 12 个气象台站(图 1) 1971—2008 年间的逐月气温、风速和降水量资料作为数据基础对气候变化特征进行统计分析,数据资料由国家气象局提供。

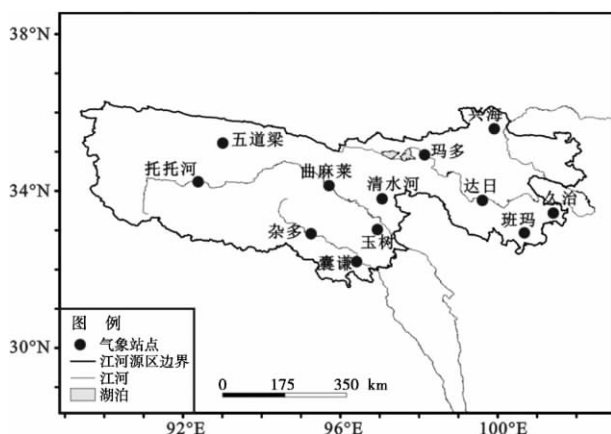


图 1 江河源区气象台站地理位置分布图

Fig. 1 Geographical locations of the selected 12 meteorological stations

对气候资料的标准正态均一性检验<sup>[13]</sup>显示,玉树站的年均风速序列存在非均一现象,间断年份为 1983 年,采用文献[14]中的方法对该序列资料进行了订正。利用高桥浩一郎提出的陆面蒸发经验公式<sup>[15]</sup>估算实际陆面蒸发量,该公式的估算结果具有较好的参考价值<sup>[16]</sup>,因此被广泛应用于气候以及陆面水资源变化等相关研究中<sup>[16~20]</sup>,公式为

$$E = \frac{3100P}{3100 + 1.8P^2 \exp\left(-\frac{34.4T}{235 + T}\right)}$$

式中  $E$  为月陆面蒸发量 (mm),  $P$  为月降水量 (mm),  $T$  为月平均气温 (°C)。

根据以上气候要素的逐月资料计算出年均气温、年均风速、年降水量和年陆面蒸发量。采用近年来常用于变量场分析的旋转经验正交函数 (REOF) 法对 4 种气候要素的时间序列资料进行分析, REOF 得到的旋转因子载荷向量中高载荷集中且分量符号相同的区域具有相对一致的气候要素变化特征<sup>[21]</sup>, 因此可用此方法对气候要素变量场进行区域划分。对同一区域内所有台站的气象要素资料进行主成分分析,以第一主成分中单个台站的因子得分系数与该区所有台站的因子得分之和的比值作为该台站的权重,用  $w$  表示,对各台站的气象要素值进行加权求和,得到气象要素的区域平均值时间序列,用  $x_i$  表示,则有

$$x_i = \sum_{j=1}^m w_j y_{ji}$$

其中  $m$  为台站数量,  $w_j$  为第  $j$  个台站的权重,  $i = 1, 2, \dots, n$  为时间序列的样本量,  $y_{ji}$  为  $i$  时刻第  $j$  个台站的气象要素值)。

气候要素的多年变化趋势用变化倾向率表示,以时间  $t_i$  为自变量,气候要素  $x_i$  为因变量对气候要素时间序列进行直线拟合,则得一元线性回归方程

$$x_i = a + bt_i \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

式中  $b$  为回归系数,  $b \times 10$  即变化倾向率,表示每 10 年气候要素的变化,  $b$  的符号的正负分别指示气候要素的上升(增加)和下降(减少)趋势,变化倾向率绝对值的大小用于衡量变化趋势的程度,通过对  $x_i$  与  $t_i$  之间的相关系数  $r$  进行显著性检验(本文取  $\alpha = 0.05$  进行检验)来判断变化趋势的显著程度,若  $|r| > r_\alpha$ , 表明变化趋势显著,反之亦然<sup>[21]</sup>。采用滑动  $t$  检验法<sup>[21]</sup>对气候要素的变化进行突变检测。

## 2 年均气温变化

全球变暖已是公认的事实,20 世纪后半叶以来增温尤其显著<sup>[22]</sup>。REOF 分析结果显示整个江河源区年均气温具有一致的变化特征,自 1971 年以来显著上升(图 2a),与青藏高原 20 世纪 70 年代以来整体暖化的趋势相一致<sup>[23]</sup>。图 2b 中拟合直线的方程为  $Y = 0.0368X - 73.625$ ,  $R^2 = 0.426$ ,也表明 1971—2008 年间该区气温持续上升,变化倾向率约为  $0.37^\circ\text{C}/(10 \text{ a})$ 。

江河源区年均气温自 20 世纪 70 年代以来可划分为三个变化阶段(图 2b): 1970 年代至 1980 年代中后期、1980 年代中后期至 1990 年代末期、1990 年

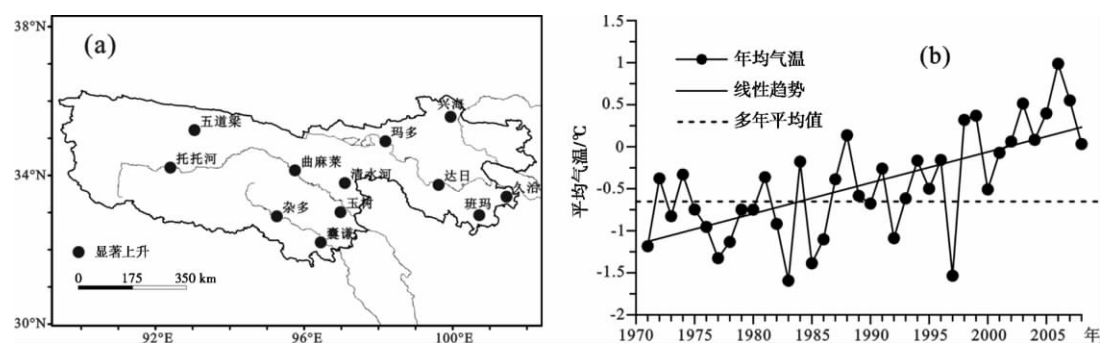


图 2 年均气温多年变化趋势 (a) 和年际变化曲线 (b)

Fig. 2 Spatial distribution of change trend ( a ) and interannual variation ( b ) of annual mean temperature during 1971—2008

代末期至 2008 年。这三个阶段的年均气温呈阶段递增的特点,第一阶段气温多低于多年平均值 (1971—2000 年 30 a 平均值,下同),后两个阶段气温多高于多年平均值。突变检测(10 a 步长)结果显示,年均气温在 1987 年和 1998 年存在由低向高的突变,显著性水平分别达到 0.05 和 0.01。1987—1997 年间年均气温较 1971—1986 年偏高 0.34℃,1998—2008 年间年均气温较 1987—1997 年偏高 0.78℃。1987 年的这次气温突变与在青藏高原中、东部乃至北半球副热带地区所检测到的 1980 年代中期之后的快速变暖具有可比性<sup>[24-25]</sup>,而且这次转变在我国西北大部分地区普遍存在<sup>[26]</sup>。

表 1 为江河源区的年代际平均气温,1980 年代气温较 1970 年代上升 0.13℃;进入 1990 年代,气温上升幅度加大,较 1970 年代和 1980 年代分别偏高 0.43℃和 0.3℃,较多年平均值偏高 0.24℃;21 世

纪以来,气温进一步大幅上升,2001—2008 年间气温较 1990 年代和多年平均值分别偏高 0.73℃和 0.97℃。

### 3 年均风速变化

REOF 分析结果显示,整个江河源区的年均风速变化趋势一致。所有站点年均风速自 1971 年以来显著降低(图 3a),对年均风速时间序列进行直线拟合(图 3b),结果显示 1971—2008 年间年均风速每 10 a 的降幅为 0.24 m/s ( $Y = -0.0235X + 49.242$ ,  $R^2 = 0.809$ )。

突变检测(10 a 步长)显示,江河源区年均风速在 1981 年和 1992 年均发生由高向低的突变(显著性水平 0.01)。从图 3b 可看出,风速自 20 世纪 70 年代以来随年代阶段式降低,至 2004 年有所回升。如表 2 所示,1970 年代风速较高,均值为 2.82 m/s,

表 1 江河源区不同年代的年均气温

Table 1 Interdecadal variation of annual mean temperature

参数	1971—1980 年	1981—1990 年	1991—2000 年	2001—2008 年	1971—2000 年
年均气温/℃	-0.84	-0.71	-0.41	0.32	-0.65

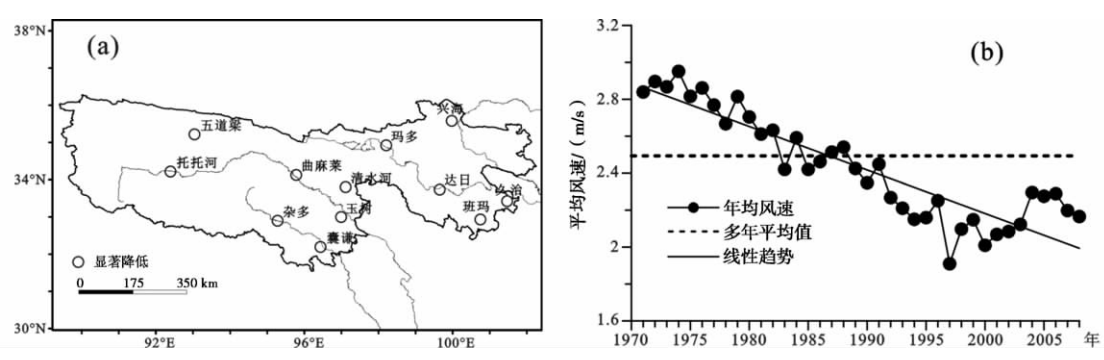


图 3 年均风速多年变化趋势 (a) 和年际变化曲线 (b)

Fig. 3 Spatial distribution of change trend ( a ) and interannual variation ( b ) of annual mean wind velocity during 1971—2008

较多年平均值偏高 0.33 m/s; 1980 年代风速较 1970 年代降低 0.32 m/s, 与多年平均值相近; 1990 年代风速继续大幅降低, 较 1970 和 1980 年代分别偏小 0.65 m/s 和 0.33 m/s; 2001—2008 年间风速均值为 2.19 m/s, 略高于 1990 年代。1971—2008 年间江河源区年均风速与年均气温的相关系数为 -0.378, 显著性水平达到 0.05, 表明风速在一定程度上随着气温的上升而降低。

#### 4 年降水量变化

根据年降水量的 REOF 分析结果将江河源区划分为三个区域: I 区为江河源区的西部和北部, 包括曲麻莱、托托河、五道梁、兴海、玛多; II 区为江河源区东部, 包括班玛、达日、久治、清水河; III 区为江河源区南部, 包括囊谦、玉树、杂多。

I 区所有站点的年降水量自 20 世纪 1970 年代以来均有增加趋势, 其中五道梁站增加趋势显著 (图 4a)。I 区年降水量变化倾向率为 8.7 mm/(10 a) ( $Y = 0.8651X - 1385.5$ ,  $R^2 = 0.0403$ ), 但增加趋势并未达到显著水平。1990 年代之前 I 区降水量整体无显著的增加或减少趋势, 波动幅度较大; 进入 1990 年代, 降水量开始减少, 至 1990 年代中后期开始波动增加 (图 4b)。从表 3 中可看出, I 区 1980 年代降水量较 1970 年代增加了 20.2 mm, 偏多 6.3%; 1990 年代降水量低于多年平均值, 较 1980 年代偏少 17.9 mm, 减少了 5.3%; 进入 21 世纪, 降水量明显回升, 2001—2008 年间降水量较 1990 年代增加了 41.3 mm, 偏多 12.8%。

II 区班玛、久治和清水河的年降水量自 1970 年

以来整体减少, 而达日则整体增加, 但变化趋势均不显著 (图 4a)。II 区年降水量变化倾向率为 -7.5 mm/(10 a) ( $Y = -0.7472X + 2102.2$ ,  $R^2 = 0.0171$ ), 减少趋势未达到显著水平。从表 3 可看出, II 区 1970 年代降水量整体偏少, 均值为 614.9 mm; 1980 年代降水量增加, 较 1970 年代增加 32.2 mm, 偏多 5.2%; 1990 年代降水量突然大幅减少, 较 1980 年代偏少 50.2 mm, 减少了 7.8%, 突变检测 (10 a 步长) 也证实该区年降水量在 1990 年存在由多向少的突变 (显著性水平 0.05); 21 世纪的前 2 a, 降水量持续下降, 2003 年之后, 降水量开始回升 (图 4c)。2001—2008 年间降水量较 1990 年代增加 3.9 mm, 但仍低于 1980 年代和多年平均值。

III 区杂多和囊谦的年降水量自 1970 年代以来整体增加, 而玉树则整体减少, 变化趋势均不显著 (图 4b)。III 区降水量变化趋势相对平稳, 变化倾向率为 3.4 mm/(10 a) ( $Y = 0.3403X - 158.86$ ,  $R^2 = 0.0033$ ), 降水量略有增加, 但未达到显著水平。该区降水量波动频率和幅度较大 (图 4d), 经历了少 (1970 年代) —多 (1980 年代) —少 (1990 年代) —多 (2001—2008 年) 的变化过程 (表 3)。1970 年代降水量为 512 mm, 低于多年平均值; 1980 年代降水量增加, 较 1970 年代增加了 17.5 mm, 偏多 3.4%; 1990 年代降水量减少, 较 1980 年代偏少 19.7 mm, 减少了 3.7%; 21 世纪以来, 降水量整体有所回升, 2001—2008 年间降水量较 1990 年代增加了 12.2 mm, 偏多 2.4%。

从整体变化趋势上看, 近 40 年来江河源区东部降水减少, 其它地区降水有所增加。1970 年代江河源区降水偏少; 1980 年代降水偏多; 1990 年代降水

表 2 江河源区不同年代的年均风速

Table 2 Interdecadal variation of annual mean wind velocity

参数	1971—1980 年	1981—1990 年	1991—2000 年	2001—2008 年	1971—2000 年
年均风速/(m/s)	2.82	2.50	2.17	2.19	2.49

表 3 江河源区不同年代的年降水量

Table 3 Interdecadal variation of annual precipitation

区域	年均降水量/mm				
	1971—1980 年	1981—1990 年	1991—2000 年	2001—2008 年	1971—2000 年
I 区	320.6	340.8	322.9	364.2	328.1
II 区	614.9	647.1	596.9	600.8	619.6
III 区	512.0	529.5	509.8	522.0	517.1

减少,以源区东部降幅最大,与西北地区东部1980年代中后期以来的降水偏少具有一定的可比性<sup>[27]</sup>;进入21世纪,降水有所回升,其中以源区西部和北部的回升最为显著。

## 5 年陆面蒸发量变化

根据年陆面蒸发量的REOF分析结果将江河源区划分为两个区域:I区为江河源区东部和南部,包括班玛、达日、久治、囊谦、清水河、玉树;II区为江河源区西部和北部,包括玛多、曲麻莱、托托河、五道梁、兴海、杂多。

20世纪1970年代以来,江河源区所有站点年陆面蒸发量呈现不同程度的增加趋势(图5a)。I区和II区的年陆面蒸发量整体增加(图5b),每10a的增幅分别为7.5 mm( $Y=0.7537X-1259.4$ ,  $R^2=0.3729$ )和5.5 mm( $Y=0.5485X-907.57$ ,  $R^2=0.2175$ ),增加趋势显著。I区陆面蒸发量自1980年代中后期开始波动增加(图5b),在1988年由少向多突变(10a步长,显著性水平0.01);II区陆面蒸发量自1990年代中期开始波动增加,在1995年由少向多突变(10a步长,显著性水平0.05)。如表4所示,江河源区陆面蒸发量的年代际变化呈递增趋势,但增幅整体偏小。

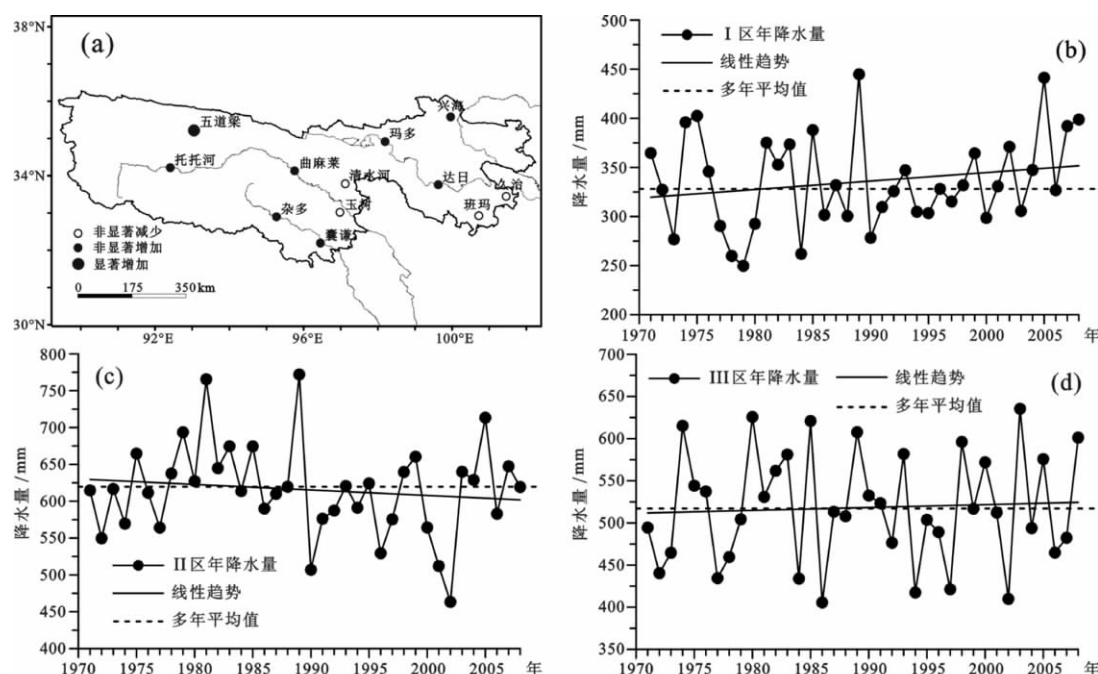


图4 年降水量多年变化趋势(a)和年际变化曲线(b、c、d)

Fig. 4 Spatial distribution of change trend (a) and interannual variation (b, c, d) of annual precipitation during 1971–2008

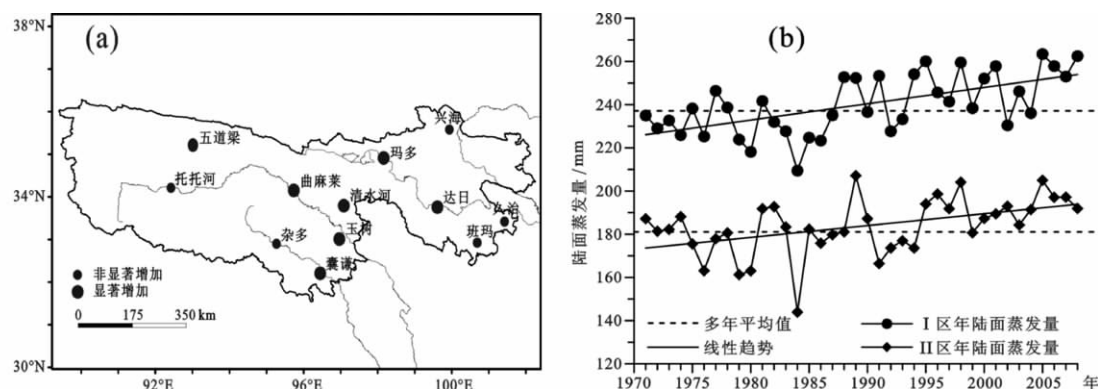


图5 年陆面蒸发量多年变化趋势(a)和年际变化曲线(b)

Fig. 5 Spatial distribution of change trend (a) and interannual variation (b) of annual evaporation from land surface during 1971–2008

表 4 江河源区不同年代的年陆面蒸发量  
Table 4 Interdecadal variation of annual evaporation from land surface

参数	年均陆面蒸发量/mm				
	1971—1980 年	1981—1990 年	1991—2000 年	2001—2008 年	1971—2000 年
I 区	231.3	233.6	246.5	250.9	237.1
II 区	176.0	182.5	184.7	193.7	181.1

## 6 气候变化对区域环境的影响

近 40 年来,江河源区四季气温均不同程度上升,气候明显变暖,区内主要冰川整体退缩,已有研究<sup>[28]</sup>表明阿尼玛卿山区 2000 年的冰川面积较 1966 年缩减了 21.7 km<sup>2</sup>,偏少 17.3%;各拉丹东冰川区 2000 年的冰川面积较 1969 年缩减了 15.59 km<sup>2</sup>,偏少 1.7%。1998—2008 年,江河源区的增温幅度更为显著,年均气温在 2006 年达到近 40 年来的最高值(图 2b)。据调查<sup>[29]</sup>,2002—2008 年间长江源区冰川总面积减少了 164 km<sup>2</sup>,冰川的消融和退缩明显加剧。江河源区是青藏高原多年冻土区的核心区域,分布有大片连续多年冻土、岛状多年冻土以及季节性冻土,受气候持续变暖的影响,江河源区多年冻土呈现退化趋势,冻土面积减少、冻土上限下降、冻土分布下界升高,其中以位于青藏高原大片连续多年冻土东部边缘的黄河源区的冻土退化较严重<sup>[30]</sup>。

文献[16]中的计算方法,将降水量( $P$ )与陆面蒸发量( $E$ )的差值作为可利用降水量( $P - E$ ),进而对 12 个站点 1971—2008 年间的可利用降水量进行因子分析,用因子综合得分来反映整个源区可利用降水的变化。从图 6 中可看出,1980 年代江河源区可利用降水量偏高,1989 年达到峰值,整个 1980 年代气候条件偏湿。长江源区多数湖泊 1980 年代面积较 1970 年代有所增加<sup>[31]</sup>,黄河源区总径流量 1980 年代较 1970 年代增加  $30.17 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,偏多 14.5%<sup>[32]</sup>,长江源区直门达水文站径流量自 1970 年代末以来增大,至 1989 年达有记录以来的最大值<sup>[33]</sup>。

与我国西北西中部地区 1980 年代后期的气候暖湿化趋势<sup>[27]</sup>有所不同,进入 1990 年代,江河源区可利用降水由多转少、气温显著上升(图 6),气候条件由暖湿向暖干转变,受其影响,江河源区水资源量减少。有调查显示<sup>[31]</sup>,2000 年黄河源区  $\geq 10 \text{ km}^2$  主要湖泊的总面积较 1990 年减少 22.6 km<sup>2</sup>;2000

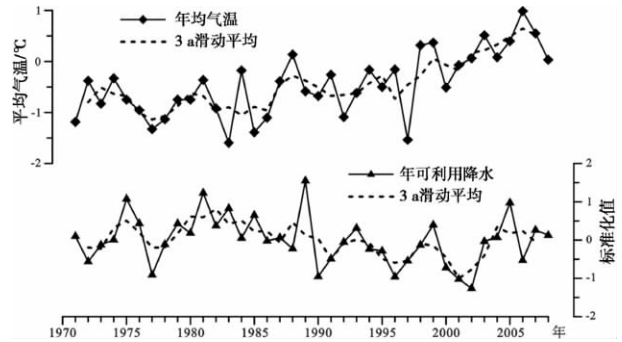


图 6 年均气温和年可利用降水量年际变化曲线

Fig. 6 Interannual variation of annual mean temperature and annual available precipitation during 1971—2008

年长江源区  $\geq 10 \text{ km}^2$  主要湖泊的总面积较 1990 年减少 117.6 km<sup>2</sup>。以长江源头地区的苟仁错为例,1990 年该湖面积为 23.5 km<sup>2</sup>,受暖干气候的影响,1998 年苟仁错已整体干涸。黄河源区 1990 年代总径流量较 1980 年代减少  $63.97 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,偏少 26.8%<sup>[32]</sup>,长江源区直门达水文站径流量在 1990 年代初至 1990 年代末期间持续减少<sup>[33]</sup>。同时这一时期伴随气候暖干和多年冻土环境的退化,加之人类活动、鼠虫灾害的影响,江河源区的生态环境也呈现明显的恶化趋势。有研究<sup>[34]</sup>表明,1990 年代初期至 2004 年江河源区的草地、水体与湿地生态系统面积分别减少了 1 250.3 km<sup>2</sup>、219.99 km<sup>2</sup>,荒漠生态系统面积则增加了 657.31 km<sup>2</sup>。

2003 年之后,江河源区气温持续升高、可利用降水开始增加(图 6),已有研究表明径流量随着降水的增加而增加,且降水对径流的影响随气温的升高而增大<sup>[32]</sup>,因此,近几年来可利用降水的回升对源区水资源量产生了直接的影响。2005 年以来黄河源区干流河段各水文断面径流呈现增加趋势<sup>[12]</sup>,青海省气候中心的资料分析显示,2003—2008 年长江源区直门达水文站平均流量较 20 世纪 1990 年代平均流量增加 92 m<sup>3</sup>/s,达到 447.5 m<sup>3</sup>/s。据监测<sup>[35]</sup>,黄河源头玛多县的湖泊面积和湖泊个数在 2004—2006 年期间均明显增加。2009-07-08 在

黄河源区的实地湖泊调查中也发现湖泊水位明显上升的现象。黄河源头鄂陵湖2009年夏季湖面较2005年夏季约上升1.2 m,位于玛多县城东北部的冬给错那2009-08湖面较2008-03约上升0.3 m。作为黄河源区湖泊面积分别 $>600\text{ km}^2$ 和 $200\text{ km}^2$ 的大型湖泊,鄂陵湖和冬给错那的水位上升指示了该区近几年来可观的水资源增量,降水量的增加是其主要原因,气候变暖条件下冰雪融水的间接补给也有一定贡献。2005—2008年,江河源区环境在一定程度上有所好转,草地退化趋势得到遏制,水体沼泽面积有所增加,沙地、戈壁、裸地面积有所减少<sup>[36]</sup>。究其原因,一方面,近几年来,该区降水增多、可利用降水增加,气候暖干趋势有所缓解;另一方面,2005年来该区生态保护和建设工作的开展也对生态环境的好转起到了一定作用。

## 7 结论与讨论

1. 近40年来江河源区年均气温显著上升,逐年代递增,增温率为 $0.37^\circ\text{C}/(10\text{ a})$ ,年均气温分别在1987年和1998年由低向高突变,其中1998年之后的增温尤为显著;

2. 近40年来江河源区年均风速显著降低,每10 a的降幅为 $0.24\text{ m/s}$ ,随年代阶段式降低;年均风速分别在1981年和1992年由高向低突变,2004年之后有所回升;年均风速与年均气温呈负相关关系。

3. 整体来看,近40年来江河源区西部、北部年降水量有所增加,增加速率为 $8.7\text{ mm}/(10\text{ a})$ ;南部也略有增加,增加速率为 $3.4\text{ mm}/(10\text{ a})$ ;东部则有所减少,减少速率为 $7.5\text{ mm}/(10\text{ a})$ ,在1990年由多向少突变。1980年代江河源区降水偏多;1970年代和1990年代偏少;21世纪以来,西部和北部降水大幅回升,南部降水亦有所增加,东部地区自2003年之后降水明显增加。

4. 江河源区年陆面蒸发量整体呈增加趋势,东部和南部地区增加速率为 $7.5\text{ mm}/(10\text{ a})$ ,1988年由少向多突变;西部和北部地区增加速率为 $5.5\text{ mm}/(10\text{ a})$ ,1995年由少向多突变。

5. 气候的持续变暖导致江河源区内冰川退缩、多年冻土退化;20世纪1980年代源区气候偏暖湿,水资源量有所增加;1990年代至21世纪最初几年,源区气候呈暖干化趋势,水资源量明显减少,生态环

境急剧恶化;2004年左右以来,气候条件呈现由干转湿的趋势,水资源量有所增加,生态环境有所好转。

## 参考文献(References)

- [1] Sun Honglie. Formation and evolution of Qinghai - Xizang Plateau [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1996: 152 - 158 [孙鸿烈. 青藏高原的形成演化[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1996: 152 - 158]
- [2] Pan Baotian, Li Jijun. Qinghai - Tibetan Plateau: a driver and amplifier of the global climatic change - III. The effects of the uplift of Qinghai - Tibetan Plateau on climatic changes [J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 1996, 32(1): 108 - 115 [潘保田, 李吉均. 青藏高原: 全球气候变化的驱动机与放大器 - III. 青藏高原隆起对气候变化的影响[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 1996, 32(1): 108 - 115]
- [3] Yao Tandong, Liu Xiaodong, Wang Ninglian, et al. Amplitude of climatic changes in Qinghai - Tibetan Plateau [J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(13): 1236 - 1243
- [4] Feng Song, Tang Maocang, Wang Dongmei. The new proof of Qinghai - Xizang Plateau as the startup area of climatic change in China [J]. Chinese Science Bulletin, 1998, 43(6): 633 - 636 [冯松, 汤懋苍, 王冬梅. 青藏高原是我国气候变化启动区的新证据[J]. 科学通报, 1998, 43(6): 633 - 636]
- [5] Zheng Du. The system of physico-geographical regions of the Qinghai - Xizang (Tibet) Plateau [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 1996, 39(4): 410 - 417
- [6] Wang Genxu, Li Qi, Cheng Guodong, et al. Climate change and its impact on the eco-environment in the Source Regions of the Yangtze and Yellow Rivers in recent 40 Years [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, 23(4): 346 - 352 [王根绪, 李琪, 程国栋, 等. 40a来江河源区的气候变化特征及其生态环境效应[J]. 冰川冻土, 2001, 23(4): 346 - 352]
- [7] Li Lin, Li Fengxia, Guo Anhong, et al. Study on the climate change trend and its catastrophe over "Sanjiangyuan" Region in recent 43 years [J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(1): 79 - 85 [李林, 李凤霞, 郭安红, 等. 近43年来“三江源”地区气候变化趋势及其突变研究[J]. 自然资源学报, 2006, 21(1): 79 - 85]
- [8] Zhang Guosheng, Shi Xinghe, Li Dongliang, et al. Climate change in Tuotuohe area at the headwaters of Yangtze River [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2006, 28(5): 678 - 685 [张国胜, 时兴合, 李栋梁, 等. 长江源沱沱河区45a来的气候变化特征[J]. 冰川冻土, 2006, 28(5): 678 - 685]
- [9] Tang Hongyu, Yang Xiaodan, Wang Xijuan, et al. Analyses of precipitation change in the Source Regions of Three Rivers during 1956 - 2004 [J]. Plateau Meteorology, 2007, 26(1): 47 - 54 [唐红玉, 杨小丹, 王希娟, 等. 三江源地区近50年降水变化分析[J]. 高原气象, 2007, 26(1): 47 - 54]
- [10] Hu Liangwen, Yang Gaihe, Feng Yongzhong, et al. Tendency research of climate warm-dry in source regions of the Yangtze River,

- the Yellow River and the Lantsang River [J]. Journal of Northwest A & F University: Nat. Sci. Ed. 2007, 35(7): 141–146 [胡良温, 杨改河, 冯永忠, 等. 江河源区气候暖干化趋势研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2007, 35(7): 141–146]
- [11] Wang Suping. Trend of potential evapotranspiration and its main impact factors in the source regions of Yangtze and Yellow Rivers [J]. Journal of Desert Research 2009, 29(5): 960–965 [王素萍. 近40a 江河源区潜在蒸散量变化特征及影响因子分析[J]. 中国沙漠, 2009, 29(5): 960–965]
- [12] Lan Yongchao, Zhao Guohui, Zhang Yaonan, et al. Response of runoff in the headwater region of the Yellow River to climate change and its sensitivity analysis [J]. J. Geogr. Sci. 2010, 20(6): 848–860
- [13] Alexandersson H. A homogeneity test applied to precipitation data [J]. Journal of Climatology, 1986, 6(6): 661–675
- [14] Zhu Xide, Li Lin, Li Qingxiang, et al. Homogenization of climate data of meteorological stations with transfer history in Qinghai. [J]. Journal of Qinghai Meteorology 2010, 4(2): 6–9 [朱西德, 李林, 李庆祥, 等. 青海省历史气候资料迁站资料的均一化处理[J]. 青海气象, 2010, 4(2): 6–9]
- [15] Takahashi Koichiro. Empirical equations for evaporation as calculated from monthly mean temperature and rainfall [J]. Weather (Japan), 1979, 26(12): 29–32 [高桥浩一郎. 用月平均气温、月降水量估算蒸发量的经验公式[J]. 天气(日本), 1979, 26(12): 29–32]
- [16] Song Zhengshan, Yang Hui, Zhang Qingyun. The characteristics of temporal and spatial variation of water resource components over North China [J]. Plateau Meteorology, 1999, 18(4): 552–566 [宋正山, 杨辉, 张庆云. 华北地区水资源各分量的时空变化特征[J]. 高原气象, 1999, 18(4): 552–566]
- [17] Ye Baisheng, Lai Zuming, Shi Yafeng. The effect of climate change on runoff in the Yili River in the Tianshan Mountains [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 1996, 18(1): 29–36 [叶佰生, 赖祖铭, 施雅风. 气候变化对天山伊犁河上游河川径流的影响[J]. 冰川冻土, 1996, 18(1): 29–36]
- [18] Ma Xiaobo. Climate characteristics of water resources in North China [J]. Plateau Meteorology, 1999, 18(4): 520–524 [马晓波. 华北地区水资源的气候特征[J]. 高原气象, 1999, 18(4): 520–524]
- [19] Li Lin, Wang Zhenyu, Qin Ningsheng, et al. Climate change and its impact on desertization around Qinghai Lake [J]. Plateau Meteorology, 2002, 21(1): 59–65 [李林, 王振宇, 秦宁生, 等. 环青海湖地区气候变化及其对荒漠化的影响[J]. 高原气象, 2002, 21(1): 59–65]
- [20] Guo Jie, Li Guoping. Climate change in Zoigê Plateau marsh wetland and its impact on wetland degradation [J]. Plateau Meteorology 2007, 26(2): 422–428 [郭洁, 李国平. 若尔盖气候变化及其对湿地退化的影响[J]. 高原气象, 2007, 26(2): 422–428]
- [21] Wei Fengying. Modern climatological statistical diagnosis and prediction method [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2007: 37–41, 57–60, 117–124 [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: 37–41, 57–60, 117–124]
- [22] IPCC. Climate Change 2007: the physical science basis: working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC (AR4) [R]. Cambridge University Press 2007
- [23] Hong Xie, Jiansheng Ye, Xiuming Liu, et al. Warming and drying trends on the Tibetan Plateau (1971–2005) [J]. Theor Appl Climatol 2010, 101(3–4): 241–253
- [24] Duan Anmin, Wu Guoxiong, Zhang Qiong, et al. New proofs of the recent climate warming over the Tibetan Plateau as a result of the increasing greenhouse gases emissions [J]. Chinese Science Bulletin 2006, 51(11): 1396–1400
- [25] Niu Tao, Chen Longxun, Zhou Zijiang. The characteristics of climate change over the Tibetan Plateau in the last 40 years and the detection of climatic jumps [J]. Advances in Atmospheric Sciences 2004, 21(2): 193–203
- [26] Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in Northwest China [J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(2): 152–164 [施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152–164]
- [27] Shi Yafeng. An assessment of the issues of climatic shift from warm-dry to warm-wet in Northwest China [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003: 17–25 [施雅风. 中国西北气候由暖干向暖湿转型问题评估[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 17–25]
- [28] Yang Jianping, Ding Yongjian, Liu Shiyin, et al. Glacier change and its effect on surface runoff in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers [J]. Journal of Natural Resources, 2003, 18(5): 595–602 [杨建平, 丁永健, 刘时银, 等. 长江黄河源区冰川变化及其对河川径流的影响[J]. 自然资源学报, 2003, 18(5): 595–602]
- [29] Wang Hui, Gan Yanhui, Ma Xinghua, et al. Climate change and its effect on ecological environment in the source regions of the Yangtze River [J]. Qinghai Science and Technology, 2010, 4(2): 11–16 [王辉, 甘艳辉, 马兴华, 等. 长江源区气候变化及其对生态环境的影响分析[J]. 青海科技, 2010, 4(2): 11–16]
- [30] Yang Jianping, Ding Yongjian, Chen Rensheng, et al. Permafrost change and its effect on eco-environment in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers [J]. Journal of Mountain Science, 2004, 22(3): 278–285 [杨建平, 丁永健, 陈仁升, 等. 长江黄河源区多年冻土变化及其生态环境效应[J]. 山地学报, 2004, 22(3): 278–285]
- [31] Qin Ningsheng, Shi Xinghe, Wang Qingchun, et al. Study on the features of climate and hydrologic changes and their impact in the Source Regions of Three Rivers [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2008: 151–155 [秦宁生, 时兴合, 汪青春, 等. 三江源地区气候水文变化特征及其影响研究[M]. 北京: 气象出版社, 2008: 151–155]
- [32] Chen Liqun, Liu Changming, Hao Fanghua, et al. Impact of climate on runoff in the source regions of the Yellow River [J]. Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing; Peking University) 2006, 13(5): 321–329 [陈利群, 刘昌明, 郝芳华, 等. 黄河源区气候对径流的影响分析[J]. 地学前缘(中国地质



- 大学(北京);北京大学) 2006,13(5):321-329]
- [33] Jin Liya, Qin Ningsheng, Mao Xiaoliang. Features of runoff in the upper reaches of the Tongtian River and its climatic probability forecast in recent 45 years [J]. Climatic and Environmental Research, 2005,10(2):220-228 [靳立亚,秦宁生,毛晓亮.近45年来长江上游通天河径流量演变特征及其气候概率预报[J].气候与环境研究,2005,10(2):220-228]
- [34] Xu Xinliang, Liu Jiuyan, Shao Quanqin, et al. The dynamic changes of ecosystem spatial pattern and structure in the Three-River Headwaters regions in Qinghai Province during recent 30 years [J]. Geographical Research, 2008,27(4):829-838 [徐新良,刘纪元,邵全琴,等.30年来青海三江源生态系统格局和空间结构动态变化[J].地理研究,2008,27(4):829-838]
- [35] Wu Suxia, Chang Guogang, Li Fengxia, et al. Recent lake changes in Maduo County, source region of the Yellow River [J]. Journal of Lake Sciences, 2008,20(3):364-368 [吴素霞,常国刚,李凤霞,等.近年来黄河源头地区玛多县湖泊变化[J].湖泊科学,2008,20(3):364-368]
- [36] Zhao Zhiping, Liu Jiuyan, Shao Quanqin. Characteristic analysis of land cover change in Nature Reserve of Three River's Source Regions [J]. Scientia Geographica Sinica, 2010,30(3):415-420 [赵志平,刘纪远,邵全琴.三江源自然保护区土地覆被变化特征分析[J].地理科学,2010,30(3):415-420]

## Climate Change and Its Impact on the Regional Environment in the Source Regions of the Yangtze, Yellow and Lantsang Rivers in Qinghai-Tibetan Plateau during 1971-2008

JIANG Yongjian<sup>1,2</sup>, LI Shijie<sup>1,3</sup>, SHEN Defu<sup>1,2</sup>, CHEN Wei<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China)

**Abstract:** Based on the monthly temperature, wind velocity and precipitation data from 12 meteorological stations in the source regions of Yangtze, Yellow and Lantsang Rivers during 1971-2008, the features of climate change in recent 40 years are analyzed, the main results are summarized as follows: the annual mean temperature in the source regions has risen at the rate of  $0.37^{\circ}\text{C}/(10\text{ a})$  and experienced two abrupt changes from low to high in 1987 and 1998 respectively; annual mean wind velocity has decreased notably at the rate of  $0.24\text{ m}/[\text{s} \cdot (10\text{ a})]$  and abruptly decreased in 1981 and 1992, significant negative correlation is found between annual mean temperature and wind velocity; the decadal mean annual precipitation of the source regions in the 1980s was higher than that in the 1970s and 1990s, precipitation has increased in varying degrees in different subregions since the 21st century; annual evaporation from land surface in the source regions has increased notably since 1971. The impact of climate change on the environment of the source regions has been discussed. Successive climate warming has led to deglaciation and permafrost degradation; water resource in the 1980s was rich because of the relatively warm-wet climate; after the whole 1980s, climate in the source regions changed from warm-wet to warm-dry, which resulted in the reduction of water resource and the deterioration of ecological environment; in recent few years, there is a general tendency that the climate changes from dry to wet, which causes the increase of water resource and yields positive effect on the ecological environment.

**Key words:** the source regions of the Yangtze, Yellow and Lantsang Rivers; Qinghai-Tibet Plateau; climate change; regional environment; REOF