

全球变暖背景下松花江流域气温最新变化特征

孙文, 范昊明

(沈阳农业大学 水利学院, 沈阳 110866)

摘要:利用 1979—2015 年松花江流域 47 个气象站平均气温资料,采用线性倾向估计、滑动平均、Mann-Kendal 检验、空间插值等方法对年及四季气温变化特征进行了分析。结果表明:(1) 1979—2015 年,松花江及 3 个子流域年、四季平均气温呈不同程度升温变化,松花江及松花江干流流域升温速率为 $0.29^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,嫩江及第二松花江流域为 $0.31^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,各地平均气温从 20 世纪 80 年代末增温显著,进入 21 世纪后气温均有所回落,其中冬季降温最为显著。(2) 近 37 年,松花江及 3 个子流域气候变化趋势具有较高同步性。各地年、四季平均气温均发生突变,年突变发生在 1989 年,春、秋季发生在 20 世纪 80 年代末期,夏季发生在 90 年代中后期,冬季发生在 1986 年。(3) 松花江流域各地气温变化速率分布不均,小二沟、哈尔滨和第二松花江南部地区变化速率较大,富锦、泰来、佳木斯等地变化速率偏低。

关键词:气温; 变化速率; M-K 检验; 松花江流域

中图分类号: S157.1; P467

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)03-0097-08

The Latest Change of Temperature in Songhua River Basin Under the Background of Global Warming

SUN Wen, FAN Haoming

(College of Water Conservancy, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: Based on the mean temperature data of 47 meteorological stations in Songhua River Basin from 1979 to 2015, the temperature characteristics of annual and four seasons are analyzed by linear inclination estimation, moving average, Mann-Kendal test and spatial interpolation. The results show that: (1) during the period from 1979 to 2015, the average temperature of the Songhua River and the three sub-basins varied at different degrees in the year and the temperature rise rate of the Songhua River was $0.29^{\circ}\text{C}/\text{decade}$, and were $0.31^{\circ}\text{C}/\text{decade}$ for the Nenjiang River and the second Songhua River Basin; the average temperature around the 20th century from the late 80s significantly increased, in the 21st century, the temperature had dropped, which was the most significant in the winter; (2) in the past 37 years, the trend of climate change in Songhua River and three sub-basins had high synchronization, the abrupt change in Songhua River and the three sub-basins occurred in 1989, the abrupt change in spring and autumn mainly occurred in the late 1980s, the abrupt change in summer mainly occurred in the late 90s, and the abrupt change in the winter mainly occurred in the 1986; (3) the variation rate of air temperature in the Songhua River basin unevenly distributed, the change rates of air temperature in the Xiaogou, Harbin and the southern part of the second Songhua River were greater, the average temperature change tendency rates of Fujin, Tailai and Jiamusi were low.

Keywords: temperature; rate of change; M-K test; Songhua River Basin

气候变化与人类及其他物种生存发展息息相关。气候变化影响涉及陆地、海洋、冰盖等所有地区^[1]。诸多研究成果及观测数据显示,全球气候系统正在经

历一个变暖过程^[2-4]。全球气候变暖主要出现在 20 世纪 20 年代到 40 年代之间,以及 80 年代中期以后,其中后者变化更为显著^[5]。在全球变暖大背景下,中

国气候变化与全球及北半球表现出趋势上的一致性^[6-8]。大尺度范围研究发现,近 100 年来中国年平均地表气温升温幅度约为 0.5~0.8℃^[9],略高于全球同期水平(0.6℃±0.2℃),主要发生在冬季和春季,夏季气温变化不明显^[10-12]。但因区域环境特征、地理因素、气候背景、气候驱动力等诸多条件影响,局地气候对于全球变暖响应的时、尺度和幅度等都会表现出一定的时空差异,变化特征不尽相同,另外研究时段长度也会影响研究结果^[13]。王澄海等^[14]研究发现我国气候生长期已明显增长,北方和青藏高原增温比其他地区显著,而中国西南地区出现降温现象,春季和夏季降温尤为突出,长江中下游地区夏季平均气温也呈降低趋势^[15]。李小燕等^[16]研究发现,1981—2010 年陕南地区气温总体呈波动上升趋势,李双双等^[17]研究发现 1961—2009 年秦岭南北表现出同步增温趋势,但突变年份有所不同。

松花江流域位于东北地区腹地,是我国林业、农业等基础产业主要生产区,气候变化对当地发展具有重要影响。孟悦^[18],曾小凡等^[19]指出松花江流域 20 世纪后半叶气温主要以暖干变化为主,俞方元等^[20]研究认为过去 50 a 松花江流域气温上升 2°,冬季升温最为明显。以往成果多集中于长序列大尺度研究,忽略了短期,尤其是 80 年代后期气候显著变化过程,且数据资料相对陈旧,对近期松花江流域气候研究相对较少,无法客观反映最新事实。本文以松花江流域及其包含 3 个三级子流域为研究对象,选取变化最为显著的 20 世纪 80 年代以后为研究时段,分析在全球气候变暖大背景下,松花江流域在最近过去 37 a 间气候变化响应情况,了解流域尺度内,受小气候影响的区域气候变化特点。另外,松花江流域内大规模城市较少,森林绿地覆盖度较高^[21],以此为研究区可减少城市热岛效应对局地气温影响,避免人为等因素对自然状态下气候变化过程的过多干扰。研究以期对松花江流域局地气候变化有更深入认识,为东北地区气候研究,农林牧业生产发展,水利规划等工作提供重要参考,同时为积雪分布、融雪径流等生态气候学研究提供依据。

1 数据与研究方法

1.1 研究区概况

松花江流域位于北纬 41°42′—51°38′,东经 119°52′—132°21′,东西长 920 km,南北宽 1 070 km,面积 55.68×10⁴ km²,占东北三省总面积 69.3%,地跨内蒙古、黑龙江、吉林和辽宁四省。其中嫩江流域 29.7×10⁴ km²,第二松花江流域 7.34×10⁴ km²,松花江干流流域 18.64×10⁴

km²。流域地势跨度较大,四周高,中间低,西、北、东三面环山,仅西南部和辽河流域分水岭较低,其余海拔均在 500 m 以上^[22-24]。流域地处北温带季风气候区,四季分明,春季干燥多风,夏季炎热多雨,冬季寒冷少水,大部分地区冬季持续半年之久,年内温差较大。年内降雨变化十分显著,积雪融水为春季河流主要水量来源,流域内有多年冻土存在。

1.2 数据来源

选取 1979—2015 年松花江流域内 47 个平均分布、资料序列相对完整的气象站点年、月平均气温资料建立气候序列,气温资料均来自中国气象数据网(<http://data.cma.cn>)。

将 47 个气象站气温资料按年、月进行整理,对于撤销、迁移台站等原因导致数据缺失的站点按照线性回归法进行插补,经过订正处理后的 47 个台站的气温资料通过了数据一致性检验,应用于本次研究。根据 3 个子流域界限对气象站进行区域划分,见图 1。根据北半球温带地区气温周期性变化,以气候统计法为标准,划分四季:春季为 3—5 月、夏季为 6—8 月、秋季为 9—11 月、冬季为 12 月—翌年 2 月。流域内各站点气温平均序列代表该流域气温序列,分别计算松花江流域、嫩江流域、第二松花江流域和松花江干流流域年及四季平均气温序列。

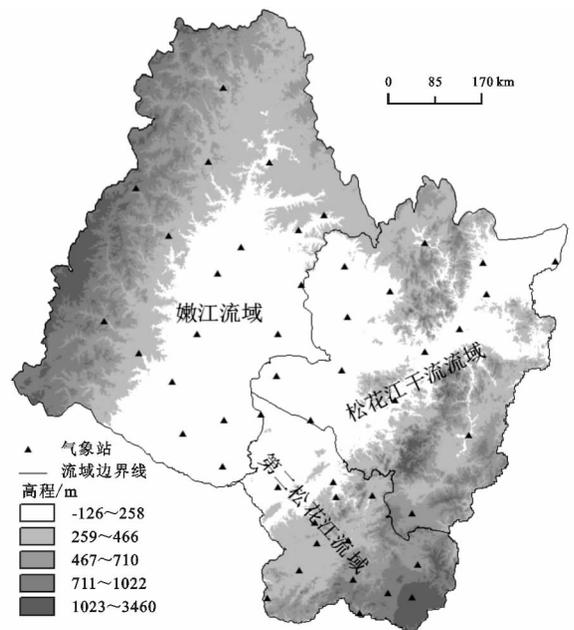


图 1 松花江流域气象站点分布

1.3 研究方法

利用一次线性倾向估计、5 a 滑动平均法分析消除高频变化后的气温年际变化,趋势变化及气候变化定量程度采用气候趋势系数和气候倾向率进行分析,采用 M-K 检验,滑动 T 检验对气温序列进行气候趋势分析和突变年份检验,利用 ArcGIS 空间插值

(RBF 插值法)分析气候变化区域特征,绘制气温倾向率变化图,分析气温变化空间差异。利用 M-K 非参数统计检验法对松花江及 3 个子流域年、四季平均气温进行突变检验,分析其变化趋势和突变时间。为增加结果准确性,对检验结果中可能的突变点运用滑动 T 检验法进行验证,确定准确突变时间。

2 结果与分析

2.1 气温特征分析

由线性倾向趋势线(图 2)可看出,37 a 间,除嫩江流域冬季外,松花江流域及 3 个子流域年、四季平均气温呈不同程度增温变化。各流域时间上呈现较高同步性,气候变化基本一致,但变化速率上存在一定区域差异。

从 5 a 滑动平均来看,松花江流域及 3 个子流域年、春季平均气温在 1979—1988 年呈下降变化,80 年代末期至 21 世纪初期波动上升,2009—2013 年小幅下降,2014—2015 年呈上升趋势;夏季各地变化略有差异,松花江及嫩江流域表现为 1979—1993 年小幅下降,1994—2015 年波动升温的变化过程,第二松花江流域在夏季表现为波动下降—上升—下降的变化过程,松花江干流流域夏季整体呈缓慢升温趋势;各地秋季升温明显,表现出上升(1979—1995 年)—下降(1979—1995 年)—上升(2001—2005 年)—下降(2006—2015 年)的一致变化,冬季各区气温波动幅度较大,总体呈现出一次较大的波动变化,1979—1997 年为升温阶段,1998—2015 年为降温阶段,但 2006—2008 年有短暂升温过程,且 2006 年松花江及 3 个子流域均出现冬季气温最高值。

从松花江流域年平均气温时间序列(图 2)分析得出,松花江流域多年平均气温 3.67℃,变异系数 0.19,最低值出现在 1980 年为 2.37℃,最高值是 2007 年 5.12℃。年平均气温倾向率 0.29℃/10 a,相关系数 0.46,通过 $r=0.05$ 显著性检验,气温上升程度高于同期全国其他地区。这与韩翠华^[25]、张晶晶等^[26]对东北地区气候研究结果接近,但低于陆志华等^[27]的研究结果。从表 1 可以看出,松花江流域秋季升温速率最大,其次是夏季和春

季,冬季最小。对于冬季需要特别指出,1979—1999 年松花江流域冬季平均气温升温速率为 1.13℃/10 a,相关系数 0.53,通过 0.01($r_{0.01}=0.41$)显著性水平检验,说明升温趋势明显,温度上升较快,2000 年为冬季最冷年份,温度 -19.63℃,2001—2015 年气温呈明显下降趋势,降温速率为 1.45℃/10 a,大于前 20 a 增温速率。21 世纪前后气温出现明显转折性变化,使得松花江流域冬季气温整体变化速率较小,变化不显著。Medhaug I 等^[28]研究认为 1997 年超级厄尔尼诺现象,使得全球大部分地区从 1998 年温度明显升高,并伴有 3 a 升温期,进入 21 世纪后气温逐渐降低;刘实等^[29]研究证实受东亚冬季风加强影响,我国东北地区冬季气温于 2004 年已转入低温阶段;翟献帅等^[30]对东北地区研究也证实了这一转折性变化;范兰等^[31]对中国近 15 a 气温研究得出我国近期气温呈现波动下降趋势,以上研究均证实了松花江流域冬季气温转折性变化。

嫩江、第二松花江、松花江干流流域多年平均气温为 3.41℃,4.15℃,3.56℃,年气候倾向率 0.31℃/10 a,0.31℃/10 a,0.29℃/10 a,说明流域内部年气温变化差异不大。分析 3 个子流域四季气温变化速率(表 1),增温速率为秋季>夏季>春季>冬季,与松花江流域变化情况相同。子流域中,第二松花江流域的夏季、秋季、冬季增温幅度最大,春季增温幅度最小;嫩江流域春季最大,冬季最小;松花江干流流域与松花江流域四季气温变化速率最为接近,第二松花江流域相较其他地区气温偏高。夏季及秋季对松花江流域升温变化贡献率较大,容易造成初雪日延后,夏季干旱等区域气候变化。

综上所述,1979—2015 年,松花江流域及 3 个子流域年、四季平均气温出现多次冷暖波动过程,总体呈增温趋势,秋季和夏季增温幅度大于春季和冬季;3 个子流域中,嫩江流域与第二松花江流域年增温速率相同,松花江干流流域略小。松花江流域及 3 个子流域气候变化趋势呈较高同步性,季节变化特征总体一致,20 世纪 70 年代末至 80 年代中期气温波动下降,80 年代末至 90 年代中期气温显著增加,21 世纪后呈现下降趋势。

表 1 松花江及 3 个子流域平均气温变化速率及相关系数

季节 地区	平均气温气候倾向率/(℃/10 a)				相关系数($r_{0.05}=0.32$)			
	松花江 流域	嫩江 流域	第二松花 江流域	松花江 干流流域	松花江 流域	嫩江 流域	第二松花 江流域	松花江 干流流域
全年	0.29	0.31	0.31	0.29	0.46	0.46	0.45	0.46
春季	0.26	0.31	0.21	0.25	0.24	0.27	0.21	0.22
夏季	0.32	0.37	0.38	0.33	0.47	0.49	0.44	0.46
秋季	0.47	0.50	0.57	0.49	0.52	0.51	0.54	0.53
冬季	0.08	0.02	0.19	0.08	0.05	0.00	0.13	0.06

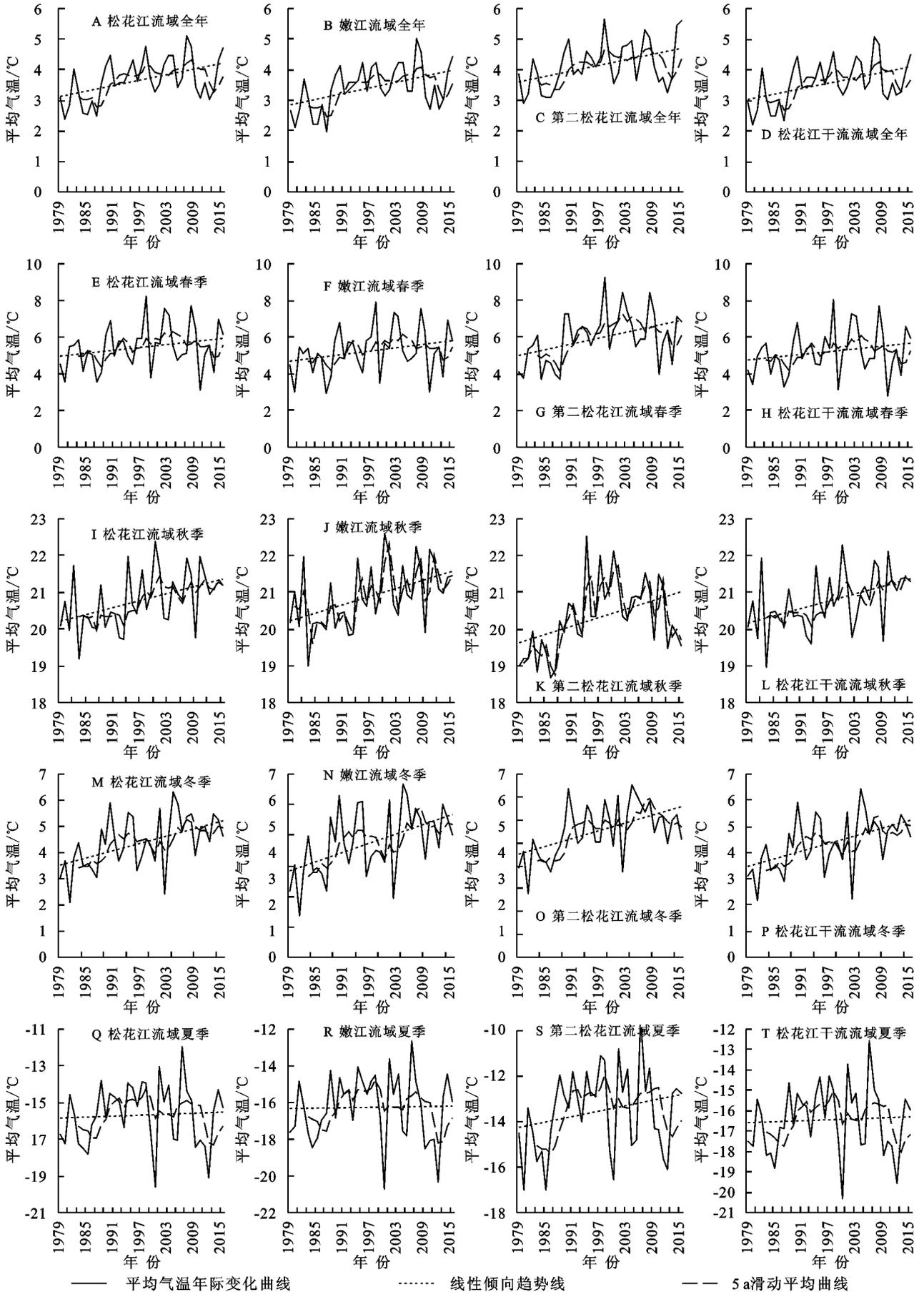


图 2 松花江及 3 个子流域平均气温变化序列

2.2 气温变化突变分析

图3为各流域年、四季平均气温M-K突变检验,由图3A,B,C,D可见,各流域年平均气温经历两次明显升温波动,1979—1983年为短暂增暖趋势,1984—1987年出现下降趋势,1988—2008年为明显增暖期,1993年超过95%信度线,2009—2015年表现为下降趋势。根据正序列曲线UF和反序列曲线UB交点位置,确定年平均气温存在增暖突变点。2条曲线交点位于临界线之间,经检验,1988年为增暖突变点。从1988年开始,松花江及3个子流域年及四季气温明显增暖。自90年代后期开始,增暖趋势均超过 $\alpha=0.001$ 显著性水平($u_{0.001}=2.56$)。可以确定,松花江流域全年气候在20世纪80年代末期经历了一个相对偏暖的气候变化。

由图3E,F,G,H可见,春季与全年变化趋势相似。1980—1983年表现出短暂增暖趋势,1984—1988年为下降趋势;1989—2003年呈增温趋势,其中松花江和嫩江流域在2003年超过95%信度检验,第二松花江流域1997年超过 $\alpha=0.05$ 显著性水平,1998年增温趋势超过 $\alpha=0.001$ 显著性水平,表明第二松花江流域在20世纪90年代末期春季升温趋势十分显著;松花江干流流域两次增温变化均没有通过95%信度检验,之后各地均呈现降温趋势。春季信度线内存在多个交点,经检验,各流域均在1989年发生增温性突变,嫩江、第二松花江流域2010年发生降温突变。研究确定松花江流域20世纪90年代春季增温现象是一个突变现象,这一变化自1989年开始。

由图3I,J,K,L可以看出,夏季松花江、嫩江及松花江干流流域在1979—1993年为不显著降温趋势,1994—2015年呈明显增温趋势,超过 $\alpha=0.001$ 显著性水平;第二松花江流域在1979—1982年增温,1983—1987年下降,1988—2008年显著增温,2008—2015年气温有所回落。松花江、嫩江流域1996年在信度区间出现增温突变点;经检验,第二松花江流域在1987年、松花江干流流域在2001年存在增温突变点,说明全区在夏季升温明显,但突变时间有所不同。

由图3M,N,O,P可见,1979—1987年各流域秋季气温变化趋势平缓,1987年之后表现为明显增温趋势,均超过 $\alpha=0.001$ 显著性水平,全区1988—1989年出现增温突变点,说明全区在20世纪90年代后秋季增温显著。

图3Q,R,S,T正序列曲线表明,1979—1985年松花江及3个子流域经历一个小幅升温—降温趋势变化,嫩江及第二松花江流域拐点在1981年,松花江及松花江干流流域拐点在1982年。1985—1998年

呈明显增暖趋势,此次增温变化3个子流域均超过 $\alpha=0.001$ 显著性水平。1998年之后,松花江、嫩江、松花江干流流域出现大幅度快速降温趋势,第二松花江流域也呈下降趋势,但速度趋缓。除第二松花江流域在信度区间内存在一个交点外,其他流域均存在多个交点。经检测,松花江及3个子流域在1986年发生显著增暖突变,松花江、嫩江及松花江干流流域在2008—2009年存在降温突变点。这与宋燕等^[32]对于全球80年代之后突变时间研究结果相似。

综上,松花江及3个子流域的年、春季、冬季变化趋势相似度较高,但四季突变时间存在一定差异。各流域年平均气温在1988年发生增温性突变,四季平均气温在80年代末期以后均出现统计意义上的增温突变;除第二松花江流域外,其他流域21世纪初期冬季均发生降温突变。这进一步证实了前文在年际变化分析中夏季、秋季在90年代以后增温明显,冬季在21世纪以后降温显著的论述。

3 气候变化区域差异分析

图4为1979—2015年松花江及3个子流域年、四季气温变化速率空间分布图。从变化区域差异来看,整个松花江流域年平均气温上升幅度在 $0.07\sim 0.51^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,存在3个高值区,分别是嫩江流域小二沟地区,哈尔滨、绥化、尚志等地,以及第二松花江流域上游的松江、敦化等地。以上地区升温速率均通过 $r=0.01$ 显著性检验,达到显著升温水平。富锦、泰来以及第二松花江流域西南部部分地区速率偏低,增温变化不显著,均未通过 $r=0.05$ 显著性检验。

松花江流域春季升温速率在 $0.01\sim 0.46^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,高值区主要位于嫩江流域小二沟及西部索伦、乌兰浩特一带。第二松花江流域南部地区及松花江干流富锦、明水、铁力等地变化较小,升温不显著。

夏季松花江流域大部分地区平均气温升温幅度在 $0.20^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 以上,北部和西部一带以及中部哈尔滨地区是升温高值区,升温幅度在 $0.40^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 以上,其中小二沟地区最大。伊春、富锦及第二松花江流域清原、临江等南部大部分地区,升温速率偏低,增幅在 $0.11\sim 0.30^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,变化不显著。

秋季升温速率在 $0.20\sim 0.70^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,大部分地区升温幅度在 $0.30^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 以上。与其他季节相比,秋季升温趋势最为明显,其中小二沟、嫩江、绥化、哈尔滨、松江等地升温速率较大且超过 $r=0.01$ 显著性检验。第二松花江南部、松干流域北部及嫩江的博克图、泰来等地增温较小,增温幅度在 $0.20\sim 0.34^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。

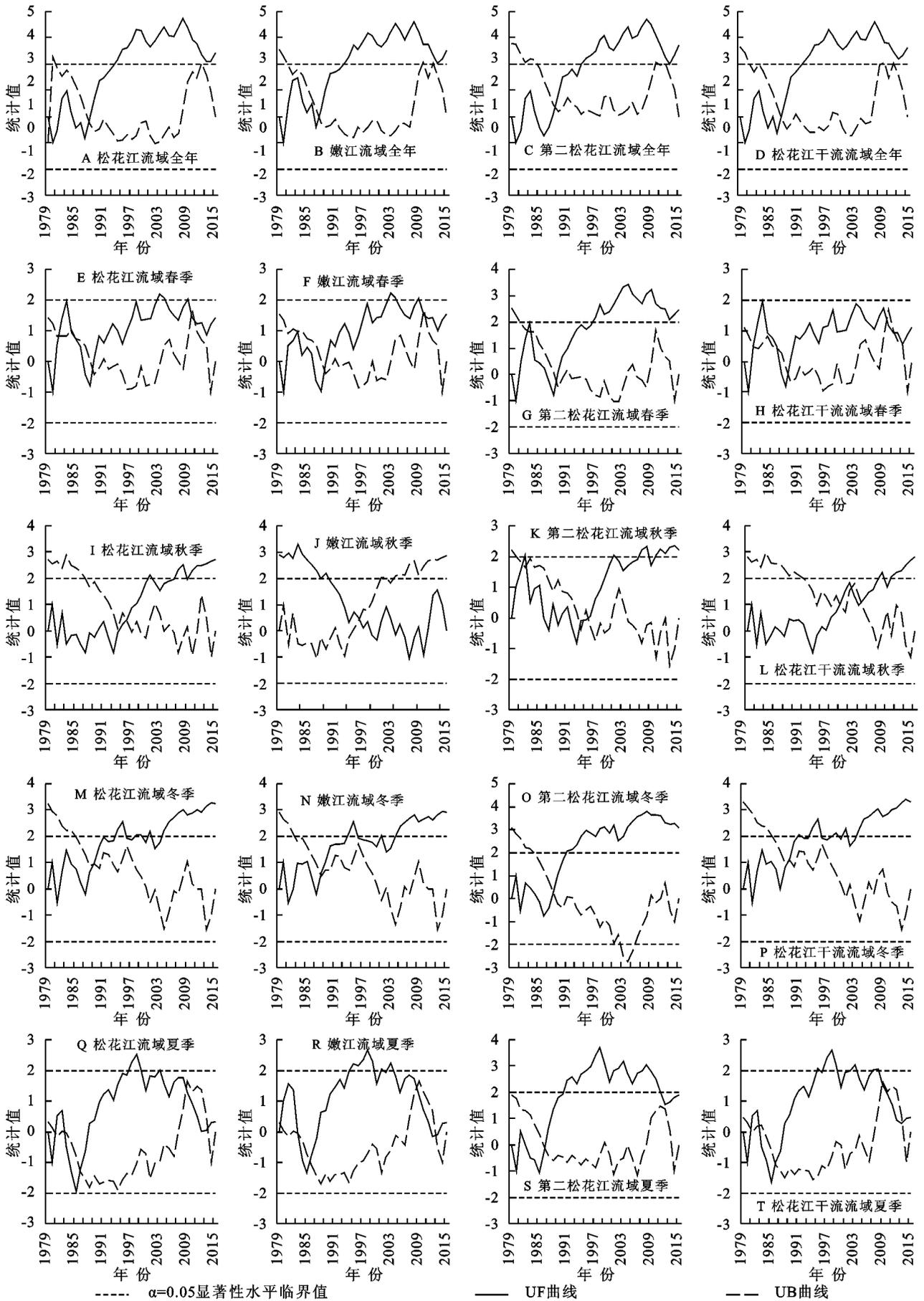


图 3 松花江及 3 个子流域年、四季平均气温 MK 统计量

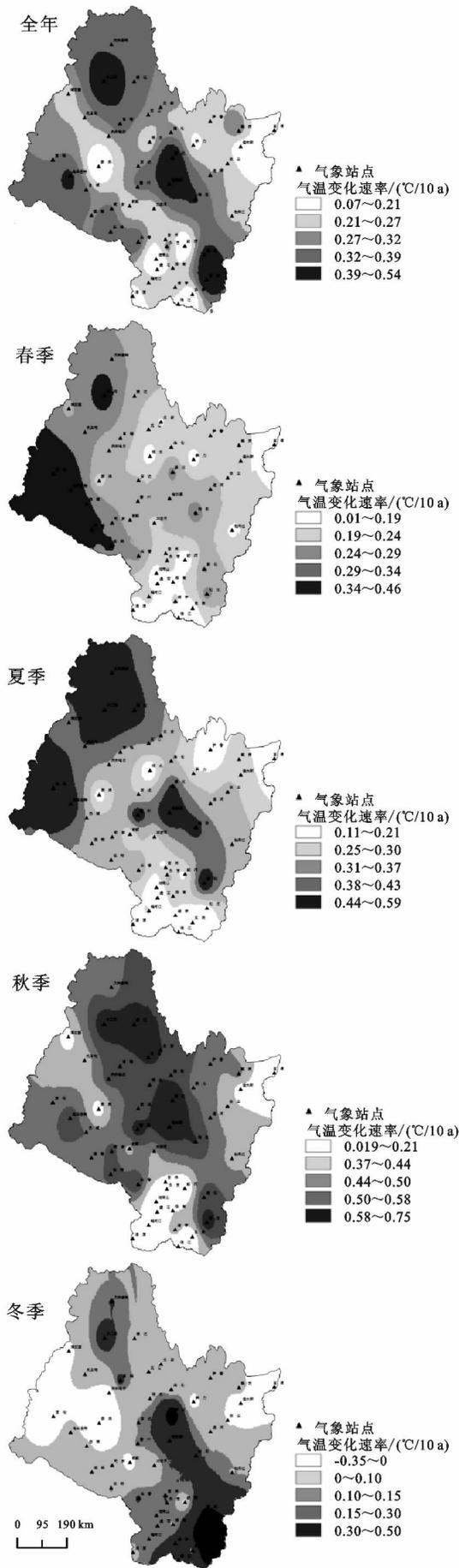


图4 松花江流域年及四季平均气温变化速率空间分布

受 21 世纪初期北方气温转折性降温变化影响, 冬季各地区升温不显著, 有些地区出现降温趋势, 全流域气温变化速率在 $-0.35 \sim 0.33^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$ 。哈尔滨、绥化、小二沟及东南部地区为增温变化, 佳木斯、富锦、索伦、泰来等地呈降温趋势。各地均未通过 $r=0.05$ 显著性检验。

综上所述, 松花江流域年、四季气温变化区域差异明显, 空间分布不均。小二沟、哈尔滨、敦化、松江等地增温幅度较大, 乌兰浩特、索伦除冬季外其他季节升温幅度也较大。富锦、鹤岗、佳木斯、泰来及西南部地区增温幅度最小, 且冬季多地出现降温变化。究其原因, 主要因为不同季节气温分布格局是由不同控制机制决定: 冬季气温分布格局主要由纬度控制, 夏季主要由地形控制^[33], 另外除区域气候自身变化因素外, 局地气温在自然变暖基础上, 下垫面差异、城市化效应和土地利用等诸多条件也是影响气温变化的重要因素。

4 结论

(1) 松花江及 3 个子流域年、四季平均气温总体随年代发展呈增温趋势, 各地平均气温自 20 世纪 80 年代末增温明显, 进入 21 世纪后气温均有所回落, 其中冬季降温最为显著。

(2) 松花江流域及 3 个子流域多年平均气温及年升温速率相差不大, 气温变化趋势总体一致。松花江与松花江干流流域年平均气温倾向率为 $0.29^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$, 嫩江及第二松花江流域为 $0.31^{\circ}\text{C}/10 \text{ a}$, 夏季和秋季增温幅度大于春季和冬季; 1979—2015 年松花江流域平均气温在 $2.37 \sim 5.12^{\circ}\text{C}$, 多年平均气温 3.67°C 。

(3) 松花江流域及 3 个子流域年、四季平均气温均发生突变, 其中年平均气温在 1989 年发生增温性突变, 春季、秋季主要发生在 20 世纪 80 年代末, 夏季主要发生在 90 年代中后期, 冬季主要发生在 1986 年和 21 世纪初期。

(4) 流域各地气温变化速率空间差异较大, 其中小二沟、哈尔滨、敦化、松江等地升温速率较大, 富锦、佳木斯、泰来及第二松花江流域西南部分地区气温变化速率偏低。

(5) 气候快速变暖会导致极端天气增加、气象灾害频发, 给人类生命和财产安全带来威胁, 因此了解区域气候变化形成机制和影响因素以及如何有效应对, 将是今后研究的重要内容。

参考文献:

- [1] 《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.
- [2] 秦大河, Thomas Stocker. IPCC 第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 1-6.
- [3] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 等. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2007, 3(S): 1-5.
- [4] 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.
- [5] 孙娟, 林振山. 经验模态分解下中国气温变化趋势的区域特征[J]. 地理学报, 2007, 62(11): 1132-1141.
- [6] 刘宣飞, 朱乾根. 中国气温与全球气温变化的关系[J]. 大气科学学报, 1998(3): 390-397.
- [7] 易湘生, 尹衍雨, 李国胜, 等. 青海三江源地区近 50 年来的气温变化[J]. 地理学报, 2011, 66(11): 1451-1465.
- [8] Medhaug I, Drange H. Global and regional cooling in a warming climate from CMIP5 models[R]. EGU General Assembly Conference, 2015.
- [9] Gao X J, Shi Y, Zhang D F, et al. Climate change in China in the 21st century as simulated by a high resolution regional climate model[J]. Chinese Science Bulletin, 2012, 57(10): 1188-1195.
- [10] 梁苏洁, 丁一汇, 赵南, 等. 近 50 年中国大陆冬季气温和区域环流的年代际变化研究[J]. 大气科学, 2014, 38(5): 974-992.
- [11] 姜晓艳, 刘树华, 马明敏, 等. 中国东北地区近百年气温序列的小波分析[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(2): 122-125.
- [12] 沈志超, 任国玉, 李娇, 等. 中国东北地区冬季气温变化特征及其与大气环流异常的关系[J]. 气象与环境学报, 2013, 29(1): 47-54.
- [13] 杨素英, 王谦谦, 孙凤华. 中国东北南部冬季气温异常及其大气环流特征变化[J]. 应用气象学报, 2005, 16(3): 334-344.
- [14] 王澄海, 李健, 许晓光. 中国近 50 年气温变化准 3 年周期的普遍性及气温未来的可能变化趋势[J]. 高原气象, 2012, 31(1): 126-136.
- [15] 杨建莹, 陈志峰, 严昌荣, 等. 近 50 年黄淮海平原气温变化趋势和突变特征[J]. 中国农业气象, 2013, 34(1): 1-7.
- [16] 李小燕, 任志远, 张翀. 陕南气温变化的时空分布[J]. 资源科学, 2012, 34(5): 927-932.
- [17] 李双双, 延军平, 万佳. 全球气候变化下秦岭南北气温变化特征[J]. 地理科学, 2012, 32(7): 853-858.
- [18] 孟悦. 松花江流域气候年代际变化分析及预测[D]. 兰州: 兰州大学, 2007.
- [19] 曾小凡, 李巧萍, 苏布达, 等. 松花江流域气候变化及ECHAM5 模式预估[J]. 气候变化研究进展, 2009, 5(4): 215-219.
- [20] 俞方圆, 郑粉莉, 李志, 等. 近 51 年松花江流域温度变化趋势分析[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(5): 242-246.
- [21] 杜国明, 孙晓兵, 王介勇. 东北地区土地利用多功能性演化的时空格局[J]. 地理科学进展, 2016, 35(2): 232-244.
- [22] 王志杰, 简金世, 焦菊英, 等. 基于 RUSLE 的松花江流域不同侵蚀类型区泥沙输移比估算[J]. 水土保持研究, 2013, 20(5): 50-56.
- [23] 冯波, 章光新, 李峰平. 松花江流域季节性气象干旱特征及风险区划研究[J]. 地理科学, 2016, 36(3): 466-474.
- [24] 温姗姗, 姜彤, 李修仓, 等. 1961—2010 年松花江流域实际蒸散发时空变化及影响要素分析[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(2): 79-86.
- [25] 韩翠华, 郝志新, 郑景云. 1951—2010 年中国气温变化分区及其区域特征[J]. 地理科学进展, 2013, 32(6): 887-896.
- [26] 张晶晶, 陈爽, 赵昕奕. 近 50 年中国气温变化的区域差异及其与全球气候变化的联系[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(4): 1-6.
- [27] 陆志华, 夏自强, 于岚岚, 等. 近 51 年松花江流域气温时空变化特征[J]. 河海大学学报自然科学版, 2012(6): 629-635.
- [28] Medhaug I, Drange H. Global and regional surface cooling in a warming climate: a multi-model analysis[J]. Climate Dynamics, 2016, 46(11/12): 3899-3920.
- [29] 刘实, 隋波, 涂钢, 等. 我国东北地区冬季气温变化的东亚冬季风背景[J]. 应用气象学报, 2014(1): 11-21.
- [30] 翟献帅, 苏筠, 方修琦. 东北地区近 30 年来温度变化的时空差异[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(2): 20-27.
- [31] 范兰, 吕昌河, 杨彪. 近 15 a 中国气温变化趋势分析[J]. 沙漠与绿洲气象, 2014(5): 34-38.
- [32] 宋燕, 季劲钧. 气候变暖的显著性检验以及温度场和降水场的时空分布特征[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(2): 157-165.
- [33] 卢爱刚, 康世昌, 庞德谦, 等. 地形对中国气温季节分布格局的差异影响[J]. 生态环境学报, 2008, 17(4): 1450-1452.