

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2012.06.006

近51年松花江流域气温时空变化特征

陆志华^{1,2,3}, 夏自强^{1,2,3}, 于岚岚³, 王景才³

(1. 河海大学国际河流研究所, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098;

3. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 基于松花江流域35个气象站1960—2010年的气温资料, 采用协克里格插值法研究气温的空间分布, 采用线性倾向估计法与M-K秩次相关法分析气温的时间变化趋势。结果表明: (a) 近51 a松花江流域年平均气温呈显著上升趋势, 变化倾向率为 $0.039\text{ }^{\circ}\text{C/a}$, 比全球和全国的气温上升幅度大; 年平均气温年际变化阶段性明显, 显著升温始于1988年。(b) 四季平均气温均呈显著上升趋势, 变化倾向率分别为 $0.037\text{ }^{\circ}\text{C/a}$, $0.028\text{ }^{\circ}\text{C/a}$, $0.036\text{ }^{\circ}\text{C/a}$ 和 $0.048\text{ }^{\circ}\text{C/a}$; 冬季对流域年平均气温的上升趋势贡献最大。(c) 流域年平均气温和四季平均气温在空间分布上具有一定相似性, 总体由南向北递减; 松嫩平原一带气温较高, 流域北部气温较低, 松花江干流两侧地区的气温居中。

关键词: 松花江流域; 年平均气温; 四季平均气温; 气温时空分布; 协克里格插值法

中图分类号: P339

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2012)06-0629-07

Characteristics of spatio-temporal variation of temperature in Songhua River Basin from 1960 to 2010

LU Zhihua^{1,2,3}, XIA Ziqiang^{1,2,3}, YU Lanlan³, WANG Jingcai³

(1. Research Institute of International Rivers, Research Academy of Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on data from 35 meteorological stations in the Songhua River Basin from 1960 to 2010, the co-kriging interpolation method was used to study the spatial distribution of temperature, and the linear trend method and Mann-Kendall test were used to analyze the temporal change trend of temperature. The results show the following: (a) During the study period, the annual average temperature in the basin showed a significant increasing trend with a rate of $0.039\text{ }^{\circ}\text{C/a}$, which was higher than the global and national temperature increase, and the annual average temperature had increased dramatically since 1988. (b) The seasonal average temperature also showed a significant increasing trend, with rates of $0.037\text{ }^{\circ}\text{C/a}$, $0.028\text{ }^{\circ}\text{C/a}$, $0.036\text{ }^{\circ}\text{C/a}$, and $0.048\text{ }^{\circ}\text{C/a}$, respectively, for four seasons. Winter made the most significant contribution to the increasing trend of the annual average temperature. (c) The annual average temperature and the seasonal average temperature were similar in spatial distribution; they both decreased from south to north. The temperature was higher in the Songnen Plain area, lower in the northern basin, and moderate on both sides of the main stream of the Songhua River.

Key words: Songhua River Basin; annual average temperature; seasonal average temperature; spatio-temporal distribution of temperature; co-kriging method

随着全球气候变暖, 气候及其变化受到越来越广泛的关注。IPCC 研究报告指出, 近百年来(1906—

2005 年)全球平均气温已经升高 $0.74\text{ }^{\circ}\text{C}$ ^[1],而且这种趋势还将上升。随着全球变暖趋势的进一步加剧,极端天气和气候事件数量也大幅度增加,对人类社会造成极大威胁。目前,已有很多学者对国内各大流域开展这方面的研究^[2-3]。

松花江流域位于我国东北地区的北部(北纬 $41^{\circ}42' \sim 51^{\circ}38'$,东经 $119^{\circ}52' \sim 132^{\circ}31'$),南北长 $1\,070\text{ km}$,东西宽 920 km ,流域面积 $54.6\times 10^4\text{ km}^2$,占黑龙江流域总面积的 29.4% 。我国东北地区地处中高纬度、欧亚大陆东岸,气候的季节性变化与整个东亚大气环流紧密相关,气候变化率较大,低温冷害等灾害性天气多发^[4]。松花江流域近年来所发生的极端天气和气候事件日渐增多,给人民生命财产、国民经济造成巨大损失^[5]。而且松花江是中俄界河黑龙江—阿穆尔河右岸最大的支流,松花江流域的气候变化会影响黑龙江下游俄罗斯境内的水资源情况、人民的生活以及跨境生态安全,因此研究松花江流域的气候变化具有重要的现实意义。

目前,已有不少学者对东北地区气温的变化情况、空间分布特征等进行了大量研究^[1,4-5],但是将松花江流域作为整体来研究的还很少^[6-7]。笔者以协克里格插值方法(Co-Kriging)为技术支撑,对松花江流域年平均气温和四季平均气温进行分析,以揭示该流域气温变化的整体特征和区域差异,为流域生态环境保护、气候变化影响综合评估等提供科学的依据。

1 资料和方法

1.1 资料来源

笔者基于松花江流域 35 个气象站 1960—2010 年逐月气温资料(来源于中国气象科学数据共享服务网),建立松花江流域年平均气温和四季平均气温系列。流域内的气象站点分布见图 1,四季划分如下:春季为 4—5 月,夏季为 6—8 月,秋季为 9—10 月,冬季为 11 月至翌年 3 月^[8]。

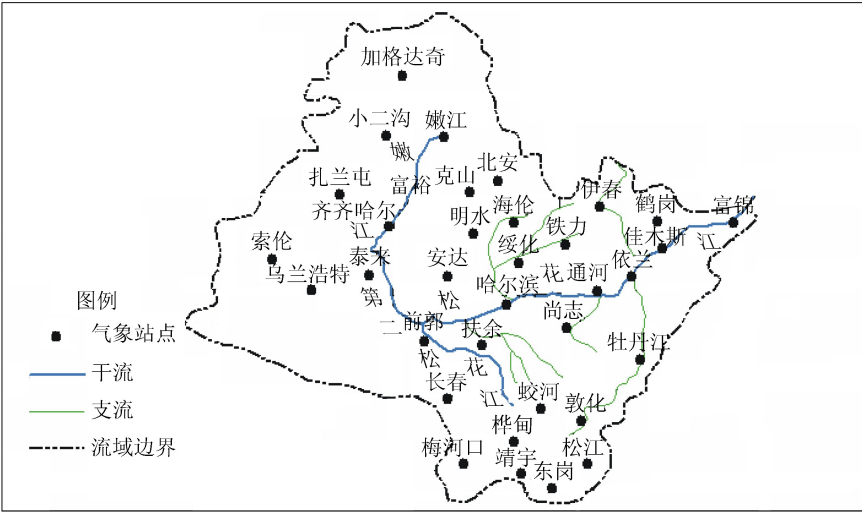


图 1 松花江流域及气象站点分布
Fig. 1 Songhua River Basin and distribution of meteorological stations

1.2 研究方法

近年来,常利用区域内的气象站点资料,通过空间插值方法来研究区域内气象要素的空间分布情况。常用于气象要素的空间插值方法有样条插值法、协克里格法、逆距离权重法、趋势面插值法、多项式插值法等^[9]。这些方法各有利弊,应该针对不同的插值对象选择最优的空间插值方法。考虑到协克里格法具有明确的物理意义和较好的插值效果^[10],同时考虑到海拔高度对气温的影响,因此,笔者在 ArcGIS 环境下采用协克里格插值法对整个流域的气温系列进行插值(得到了 $3.2\text{ km}\times 3.2\text{ km}$ 气温栅格序列),绘制相应的空间分布图,并对气温变化的区域差异进行分析。采用线性倾向估计方法^[11]与 M-K 秩次相关法^[12]研究年平均气温、四季平均气温系列的时间变化趋势。

利用年平均气温、四季平均气温系列,以时间 t 为自变量,年(或四季)平均气温为因变量,建立一元回归方程,其趋势变化率方程为

$$y(t)=b_0+b_1t\quad \frac{dy}{dt}=b_1\tag{1}$$

式中: b_0 ——拟合系数,可以用最小二乘法确定; b_1 ——气温变化倾向率, $^{\circ}\text{C}/\text{a}$,由最小二乘法确定。 b_1 为正值,表示气温为增高趋势; b_1 为负值,表示气温为降低趋势;绝对值越大,变化趋势越明显。

采用世界气象组织推荐的 M-K 秩次相关法来研究气温的时间变化趋势,M-K 秩次相关法不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,因此其适用于分析水文、气象等非正态分布的数据。计算方法如下:

假设有一时间序列 $X_1,X_2,X_3,\cdots,X_n$,其趋势检验统计量公式为

$$S=\sum_{i=2}^n\sum_{j=1}^{i-1}\text{sgn}(X_i-X_j)\tag{2}$$

式中: $\text{sgn}(*)$ 为符号函数。当 X_i-X_j 小于、等于或大于零时, $\text{sgn}(X_i-X_j)$ 分别为 $-1,0$ 或 1 。M-K 统计量 Z 值的计算公式为

$$Z=\begin{cases}\frac{S-1}{\sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}}}&S>0\\0&S=0\\\frac{S+1}{\sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}}}&S<0\end{cases}\tag{3}$$

Z 为正值表示增加趋势、负值表示减少趋势。 $|Z|\geq 1.64,1.96,2.58$ 时,分别表示通过置信度为 90%,95%,99% 的显著性检验。

2 气温变化的时间特征

2.1 年平均气温

a. 年际变化。在全球变暖背景下,松花江流域年平均气温在波动中上升(图 2)。近 51 a 流域年平均气温上升约 1.99°C ,比全球和全国的气温上升幅度要大很多^[2-3]。年平均气温的变化倾向率为 $0.039^{\circ}\text{C}/\text{a}$,略高于整个东北地区年平均气温的变化倾向率($0.036^{\circ}\text{C}/\text{a}$)^[4],明显高于全国年平均气温的变化倾向率($0.025^{\circ}\text{C}/\text{a}$)^[2]。5 a 滑动平均过程线也表明,流域年平均气温呈现明显上升趋势。年平均气温的 Z 值为 5.133,通过 99% 的显著性检验,表明年平均气温上升趋势极为显著。进入 20 世纪 80 年代后,流域内的气温明显升高,20 世纪 90 年代上升幅度最明显。左洪超等^[3]研究指出,东北地区是我国增温最快、增温范围最大的地区。因此可以认为,松花江流域是我国气候变化的敏感区。

b. 阶段性分析。为了明显地显现年平均气温的变化阶段,采用距平累积分析方法^[8]绘制年平均气温距平累积变化过程线(图 3)。图 3 表明,流域年平均气温显著升温始于 1988 年,与东北地区年平均气温和黑龙江省年平均气温显著升高的时间是一样的^[1,4],比全国年平均气温显著升高的时间晚 2 a^[13]。

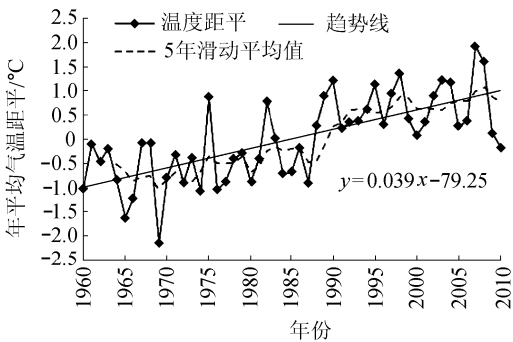


图 2 松花江流域年平均气温距平的年际变化
Fig. 2 Inter-annual variation of annual average temperature anomaly in Songhua River Basin

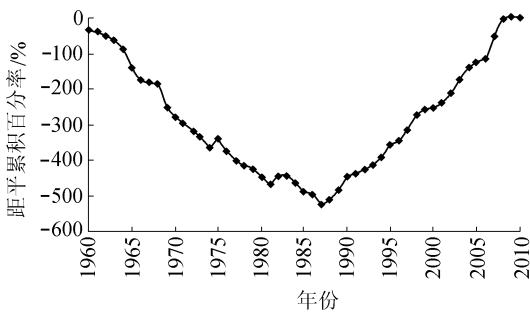


图 3 松花江流域年平均气温距平累积变化过程线
Fig. 3 Accumulative annual temperature anomalies in Songhua River Basin

2.2 四季平均气温

松花江流域气温存在明显的季节性差异,过渡季节气温变化剧烈,春、夏、秋、冬四季平均气温分别为 9.66℃,20.34℃,9.00℃和-12.36℃。

流域四季平均气温的年际变化过程见图4,1960—2010年四季气温均在波动中上升,春季和夏季在90年代中期开始显著升温,秋季和冬季在80年代末90年代初开始显著升温。四季气温的变化倾向率分别为0.037℃/a,0.028℃/a,0.036℃/a和0.048℃/a。其中,冬季变化倾向率高于年平均气温,冬季升温幅度最大,夏季升温幅度最小,春季升温幅度略大于秋季。可以认为,冬季对松花江流域年平均气温的上升趋势贡献最大。春、夏、秋、冬气温系列的Z值分别为3.330,3.769,4.029和3.476,均通过了99%的置信度检验,表明四季气温上升趋势极为显著。

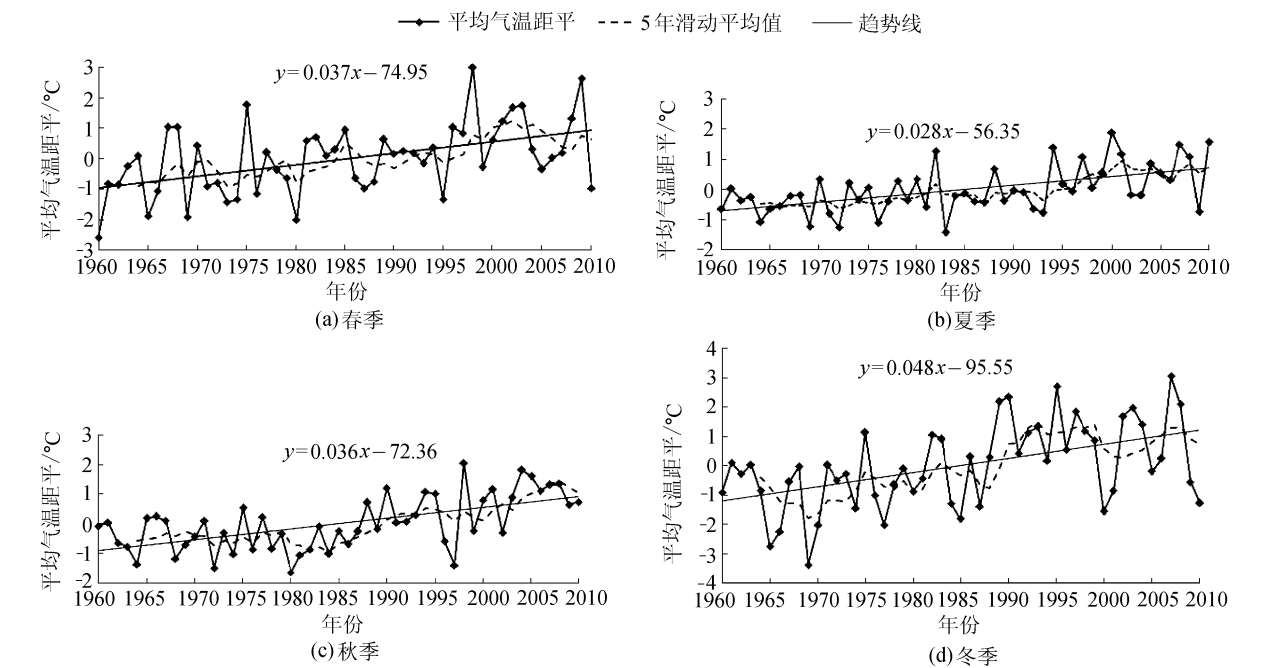


图4 松花江流域四季平均气温距平的年际变化

Fig. 4 Inter-annual variation of seasonal average temperature anomaly in Songhua River Basin

3 气温变化的空间分布特征

3.1 年平均气温

流域年平均气温空间分布(图5(a))大致为从南至北随纬度升高逐渐降低,区域差异明显,流域年平均气温一般在-0.62~5.55℃之间。北部地区气温较低,加格达奇、小二沟附近年平均气温最低,在0℃以下;嫩江附近为0~0.75℃;北安、克山、海伦、铁力、伊春一带为0.75~2.12℃。流域西南部地区气温较高,松嫩平原的前郭、长春、梅河口一带气温最高,为4.86~5.55℃;乌兰浩特、泰来、扶余、桦甸一带为4.18~4.86℃。

为分析不同区域年平均气温变化趋势,绘制年平均气温的变化幅度分布图和M-K统计量Z值分布图(图5(b)(c))。近51a来整个流域年平均气温均呈上升趋势,各地增温幅度不同,增幅为0.034~0.041℃/a,大部分地区增幅为0.038~0.040℃/a。气温上升幅度最大的区域为嫩江、小二沟、富裕一带和哈尔滨、绥化、北林一带,增幅均为0.040~0.041℃/a。增幅最小的是第二松花江源头地区一带和索伦附近,分别为0.034~0.037℃/a,0.036~0.037℃/a。全流域年平均气温的Z值为4.59~5.47,均通过99%的显著性检验,说明流域各地年平均气温的上升趋势极为显著。

3.2 四季平均气温

通过绘制四季平均气温空间分布图分析流域4个季节平均气温在空间上的分布情况,为节省篇幅,只叙述分析的结果。

春季,流域平均气温在7.08~11.50℃之间,由南向北递减;北部地区气温较低,其中加格达奇、小二沟、

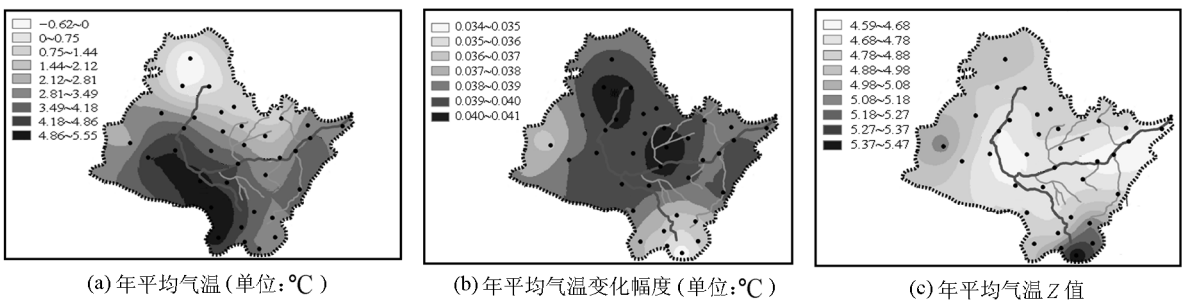


图 5 松花江流域年平均气温空间分布及变化趋势分布

Fig. 5 Spatial distribution and change trend of annual average temperature in Songhua River Basin

嫩江一带气温最低,为 7.08 ~ 8.55 ℃;西南部松嫩平原地区气温较高,其中的泰来、前郭、长春一带气温最高,为 11.01 ~ 11.50 ℃。

夏季,流域平均气温最高,为 18.00 ~ 22.14 ℃,也由南向北递减;北部地区气温较低,加格达奇、小二沟一带气温最低,为 18.00 ~ 18.92 ℃;西南部松嫩平原地区气温较高,其中泰来、前郭一带气温最高,为 21.22 ~ 22.14 ℃。

秋季,流域平均气温为 5.80 ~ 11.07 ℃,空间分布与春季、夏季相近;最低气温出现在加格达奇、小二沟一带,为 5.80 ~ 6.97 ℃;前郭、长春、梅河口一带气温最高,为 10.49 ~ 11.07 ℃。

冬季,流域平均气温为 -17.29 ~ -8.70 ℃,空间分布与其余季节略有不同,总体也由南向北递减;北部气温较低,最低出现在加格达奇、小二沟、嫩江一带,为 -17.29 ~ -16.34 ℃;第二松花江流域一带冬季气温较高,最高气温出现在长春、梅河口一带,为 -9.66 ~ -8.70 ℃。

总体来讲,流域四季平均气温在空间分布上具有一定的相似性,松嫩平原一带四季气温均较高,流域西部地区气温较低,松花江干流两侧地区气温居中。

为进一步分析流域四季平均气温变化趋势的区域差异,绘制四季平均气温变化幅度分布图和 M-K 统计量 Z 值分布图。为节省篇幅,只给出了流域四季平均气温变化幅度分布图。

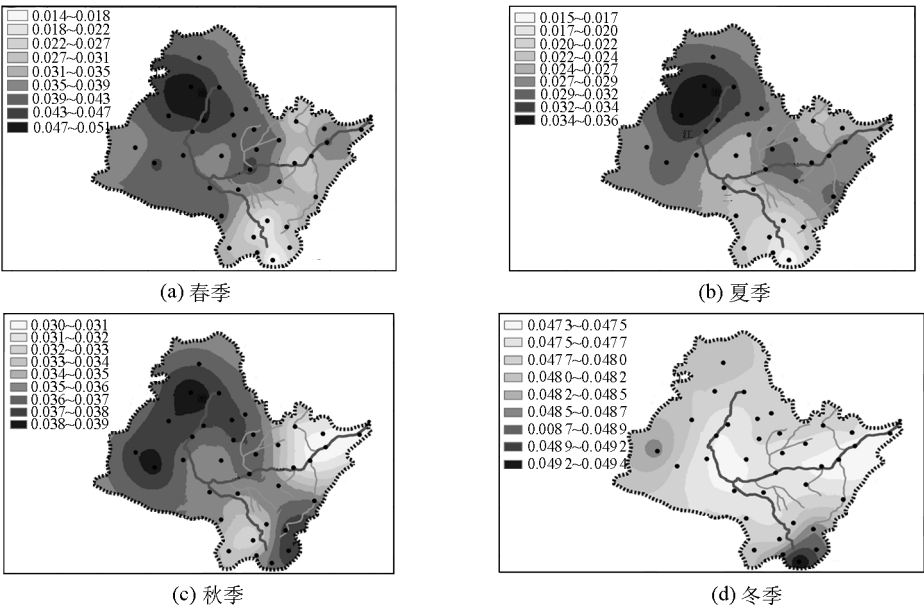


图 6 松花江流域四季平均气温变化幅度(单位:℃/a)

Fig. 6 Variation of seasonal average temperature in Songhua River Basin

春季,流域平均气温增加,各地增温幅度不同,为 0.014 ~ 0.051 ℃/a,总体呈东南向西北递增的趋势。流域 50% 以上地区(主要为流域左半部分)的增幅在 0.035 ~ 0.051 ℃/a,增幅最大的是大兴安岭东部小二沟附近(为 0.047 ~ 0.051 ℃/a),增幅最小的是二松源头一带(为 0.014 ~ 0.027 ℃/a)。全流域的 Z 值为 1.22 ~ 4.35,且 95% 以上面积的 Z 值大于 2.58,通过 99% 的显著性检验,说明流域各地春季气温上升明显,

且绝大部分地区变暖趋势显著。

夏季,流域平均气温呈上升趋势,但是增幅是四季中最小的,在 0.015 ~ 0.036 ℃/a 之间。空间分布仍表现为由东南向西北递增的趋势,大兴安岭东部小二沟、扎兰屯一带的平均气温增幅最大(为 0.032 ~ 0.036 ℃/a),第二松花江源头一带的增幅较小(为 0.015 ~ 0.020 ℃/a)。全流域夏季气温的 Z 值为 2.14 ~ 4.55,均通过 95% 的显著性检验,绝大部分地区 Z 值为 2.58 ~ 4.55,通过 99% 的显著性检验,说明全流域夏季气温变暖趋势显著。

秋季,流域平均气温增幅较大(为 0.030 ~ 0.039 ℃/a)。各地增幅差异不大,嫩江流域增幅较大,大兴安岭东部小二沟附近和呼兰浩特附近最大(为 0.038 ~ 0.039 ℃/a),松花江下游地区增幅较小(为 0.030 ~ 0.031 ℃/a)。秋季气温的 Z 值在 3.40 ~ 4.44 之间,通过 99% 的显著性检验,全流域秋季变暖趋势极其显著。

冬季,流域平均气温增幅最大,为 0.047 ~ 0.049 ℃/a,而且各地增幅的空间分布非常均匀。冬季气温的 Z 值为 2.85 ~ 4.52,通过 99% 的显著性检验,说明整个流域冬季气温上升明显,变暖趋势极其显著。

4 结 论

a. 近 51 a,松花江流域年平均气温呈显著上升趋势,变化倾向率为 0.039 ℃/a,比全球和全国的气温上升幅度要大;流域年平均气温年际变化的阶段性明显,显著升温始于 1988 年。

b. 流域气温四季分明,四季平均气温均在波动中上升,春、夏、秋、冬四季的变化倾向率分别为 0.037 ℃/a,0.028 ℃/a,0.036 ℃/a 和 0.048 ℃/a,冬季对流域年平均气温的上升趋势贡献最大。四季气温的 Z 值均通过 99% 的置信度检验,上升趋势极为显著。

c. 流域年平均气温的空间分布大致从南至北随纬度升高逐渐降低,一般在-0.62 ~ 5.55 ℃,北部地区气温较低,西南部地区气温较高;全流域年平均气温呈上升趋势,各地增幅为 0.034 ~ 0.041 ℃/a。M-K 法表明流域各地年平均气温呈显著上升趋势。

d. 流域四季气温的空间分布具有一定的相似性,由南向北递减,松嫩平原一带气温较高,北部地区气温较低,松花江干流两侧地区气温居中。春季全流域呈增暖趋势,增幅为 0.014 ~ 0.051 ℃/a;夏季平均气温呈上升趋势,增幅为 0.015 ~ 0.036 ℃/a;秋季平均气温增幅为 0.030 ~ 0.039 ℃/a;冬季气温增幅最大,为 0.047 ~ 0.049 ℃/a。

参考文献:

[1] 于梅,邢俊江,于洪敏. 黑龙江省近 46 年的气温变化[J]. 自然灾害学报,2009,18(3):158-164. (YU Mei, XING Junjiang, YU Hongmin. Air temperature change in Heilongjiang Province in recent 46 years[J]. Journal of Natural Disasters, 2009,18(3):158-164. (in Chinese))

[2] 任国玉,徐铭志,初子莹,等. 近 54 年中国地面气温变化[J]. 气候与环境研究,2005,10(4):717-727. (REN Guoyu, XU Mingzhi, CHU Ziyang, et al. Changes of surface air temperature in China during 1951-2004[J]. Climatic And Environmental Research, 2005, 10(4):717-727. (in Chinese))

[3] 左洪超,吕世华,胡隐樵. 中国近 50 年气温及降水量的变化趋势分析[J]. 高原气象,2004,23(2):238-244. (ZUO Hongchao, LV Shihua, HU Yinqiao. Variations trend of yearly mean air temperature and precipitation in China in the last 50 years [J]. Plateau Meteorology, 2004, 23(2):238-244. (in Chinese))

[4] 董满宇,吴正方. 近 50 年来东北地区气温变化时空特征分析[J]. 资源科学,2008,30(7):1093-1099. (DONG Manyu, WU Zhengfang. Analysis of temporal and spatial characteristics of temperature change over the last 50 years in Northeast China[J]. Resources Science,2008,30(7):1093-1099. (in Chinese))

[5] 潘华盛,张桂华. 黑龙江气候变暖的时空变化特征[J]. 黑龙江气象,2002(3):3-7. (PAN Huasheng, ZHANG Guihua. Climate warmer time-space variable features in Heilongjiang[J]. Heilongjiang Meteorology, 2002(3):3-7. (in Chinese))

[6] 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.

[7] 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. (ZENG Xiaofan, LI Qiaoping. SU Buda, et al. Change and projection of climate in the Songhua River Basin[J]. Advances in Climate Change Research, 2009, 5(4):215-219. (in Chinese))

[8] 陆志华,夏自强,于岚岚. 松花江佳木斯站径流变化规律及演变趋势分析[J]. 水电能源科学,2011,29(4):14-17. (LU

Zhihua, XIA Ziqiang, YU Lanlan. Analysis of change rules and variation trend of runoff of jiamusi station in Songhua River[J]. Water Resources and Power, 2011,29(4):14-17. (in Chinese))

[9] 游松财,李军. 海拔误差影响气温空间插值误差的研究[J]. 自然资源学报,2005,20(1):140-145. (YOU Songcai, LI Jun. Study on error and its pervasion of temperature estimation[J]. Journal of Natural Resources, 2005, 20(1):140-145. (in Chinese))

[10] 杨凤海,孙彦坤,于太义,等. 近 10 年黑龙江省气温的时空变异分析[J]. 地球信息科学学报,2009,11(5):585-596. (YANG Fenghai, SUN Yankun, YU Taiyi, et al. The spatiotemporal variation analysis of air temperature in Heilongjiang Province during 1997-2006[J]. Journal of Geo-Information Science, 2009, 11(5):585-596. (in Chinese))

[11] 胡彩虹,郭慕平,任健美,等. 近 50 年汾河流域气候变化特征分析[J]. 水利水电科技进展, 2006, 26(增刊 1):1-6. (HU Caihong, GUO Muping, REN Jianmei, et al. Analysis of characteristics of temperature change in Fenhe River Basin in recent 50 years [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2006, 26(Sup1):1-6. (in Chinese))

[12] 郝振纯,孙乐强. 我国 1961—2009 年气温变化规律分析[J]. 河海大学学报:自然科学版,2011,39(6):595-601. (HAO Zhenchun, SUN Leqiang. Analysis of temperature changes in China from 1961 to 2009[J]. Journal of Hohai University:Natural Sciences, 2011,39(6):595-601. (in Chinese))

[13] 董杰,高永刚,顾红. 黑龙江省近 43 年气温的变化特征[J]. 现代化农业, 2006 (12):10-12. (DONG Jie, GAO Yonggang, GU Hong. Variation characteristics of atmospheric temperature in recent 43 years in Heilongjiang Province [J]. Modernizing Agriculture, 2006(12):10-12. (in Chinese))

河海大学获第十四届中国专利优秀奖

国家知识产权局近日发布了关于第十四届中国专利奖授奖的决定,以河海大学为专利权人、刘汉龙教授等为发明人的“软基处治大直径现浇管桩复合地基施工方法”获第十四届中国专利优秀奖。

“现浇混凝土大直径管桩及复合地基技术与应用”是针对软土地基工后沉降控制难题而研制开发的具有独立自主知识产权的地基工程新技术,已应用于我国沿海及内地湖泊地区多项高速公路、高速铁路、港口建设和市政工程软土地基处理,产生直接经济效益 1.84 亿元,成果获 2011 年度国家技术发明二等奖以及国家发明专利 5 项、实用新型专利 5 项,并编制出版了国家行业标准《现浇混凝土大直径管桩复合地基技术规程》。

(本刊编辑部供稿)