

DOI: 10.5846/stxb201111241799

贺伟, 布仁仓, 熊在平, 胡远满. 1961—2005 年东北地区气温和降水变化趋势. 生态学报 2013, 33(2): 0519–0531.

He W, Bu R C, Xiong Z P, Hu Y M. Characteristics of temperature and precipitation in Northeastern China from 1961 to 2005. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(2): 0519–0531.

## 1961—2005 年东北地区气温和降水变化趋势

贺伟<sup>1,2</sup>, 布仁仓<sup>1,\*</sup>, 熊在平<sup>1</sup>, 胡远满<sup>1</sup>

(1. 森林与土壤生态国家重点实验室, 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 利用东北地区 96 个气象站 1961—2005 年的日平均气温和日降水量资料, 采用线性倾向率法, 累积距平法, Mann-Kendall 法和 Morlet 小波分析等方法, 对东北地区近 45 年来的气候变化和突变现象进行了研究。结果表明: 近 45 年来, 东北地区年平均气温变化在 2.45—5.72 °C 之间, 年均温呈现显著上升趋势, 气候倾向率为 0.38 °C/10 a ( $P < 0.01$ ), 1988—1989 年间发生了由低温到高温的突变; 东北地区四季平均气温均呈现增高的趋势, 其中冬季气温增幅最大, 气候倾向率达到 0.53 °C/10 a, 夏季气温增幅最小 0.24 °C/10 a。东北地区年均温和季节均温年代际变化亦呈现明显的增暖趋势, 年均温, 春季均温和冬季均温均在 1981—1990 年开始变暖, 夏季均温和秋季均温在 1991—2000 年开始变暖。东北地区气温增暖幅度随纬度的升高而增大, 大兴安岭北部和小兴安岭地区是增温最明显的地区, 增暖幅度较小的地区为辽河平原, 辽东半岛和长白山南部地区。东北地区年降水量变化在 430.40—678.72 mm 之间, 降水量变化趋势不明显, 整体呈现减少趋势, 气候倾向率为 -5.71 mm/10 a ( $P > 0.05$ ), 1981—1990 年为降水最多的年代, 1982—1983 年间发生了降水量由少到多的突变。四季降水量变化呈现不同的趋势, 其中春季和冬季降水量呈现增多的趋势, 夏季和秋季降水量呈现减少的趋势。降水量减少较明显的地区为辽东半岛和长白山南段, 降水量增多较明显的地区为大兴安岭北部和松嫩平原。Morlet 小波分析结果表明, 东北地区年平均气温存在 11 a 的强显著周期, 此外还有 24 a 和 6 a 尺度的变化周期; 东北地区年降水量存在 16 a 的强显著周期和 6 a 的小尺度变化周期。通过以上分析, 近 45 a 东北地区总体气候呈现明显暖干化趋势。

**关键词:** 气候变化; 气温; 降水量; 突变检测; 小波分析; 东北

## Characteristics of temperature and precipitation in Northeastern China from 1961 to 2005

HE Wei<sup>1,2</sup>, BU Rencang<sup>1,\*</sup>, XIONG Zaiping<sup>1</sup>, HU Yuanman<sup>1</sup>

1 State Key Laboratory of Forest and Soil Ecology, Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract:** Northeastern China is one of the regions that would be mostly affected by the changing climates, and created the particular climate pattern and characteristics under climate changes. The pattern and characteristics of climate changes in Northeastern China was analyzed with the methods of the linear regression method, cumulative anomaly method, Mann-Kendall test method and Morlet wavelets analysis method based on daily average air temperature and daily precipitation data observed at 96 meteorological stations covered the Northeastern China from 1961 to 2005. The linear regression method was used to study the variation trends of mean temperature and precipitation on annual-scale and seasonal-scale in recent 45 years. The cumulative anomaly method and Mann-Kendall test method were used to test trends and abrupt changes of annual mean temperature and precipitation. The Morlet wavelet analysis method was used to detect the change interval of annual mean temperature and precipitation. The linear trend rates for annual and seasonal mean temperature and annual and

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050201); 国家林业公益性行业科研专项资助(200804001)

收稿日期: 2011-11-24; 修订日期: 2012-10-23

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: burc@iae.ac.cn

<http://www.ecologica.cn>

seasonal precipitation were calculated at each meteorological station. Those rates were then interpolated using inverse distance weighted (IDW) interpolation to reveal their spatial distributions. The results showed that the climate in this region showed a significant warming trend, the annual mean temperature varied between 2.45 °C and 5.72 °C, and the annual mean temperature has increased by 0.38 °C/10 a ( $P < 0.01$ ) in recent 45 years, and an abrupt change from low temperature to high temperature occurred in 1988—1989. In addition, all of the seasonal temperatures showed increasing trends, and the increase of temperature in winter were higher (0.53 °C/10 a) than in the summer (0.24 °C/10 a). The decade change of annual and seasonal mean temperature also showed spatially increasing trends and the higher the latitude, the more obvious the increasing trend. The calefactive range was larger in the northern Da Hinggan Mountains and Xiao Hinggan Mountains, and it was smaller in the Liaohe Plain, Liaodong Peninsula and southern Changbai Mountain. The annual precipitation varied between 430.40 mm and 678.72 mm, and the annual precipitation showed a decrease trend in recent 45 years, and decreased by 5.71 mm/10 a ( $P > 0.05$ ), the precipitation in 1980s was more than in the other decades, and the abrupt change in precipitation occurred during in 1982—1983. The seasonal precipitation showed various trends, the spring precipitation and winter precipitation showed increasing trend, but the summer precipitation and autumn precipitation showed decreasing trend. The Liaodong Peninsula and southern Changbai Mountain showed significantly decreasing trend in precipitation, whereas, the northern Da Hinggan Mountains and Songnen Plain showed obviously increasing trend. The climate change interval analysis revealed that the annual mean temperature fluctuated significantly with the interval of 11 years, 24 years and 6 years, and the annual mean precipitation fluctuated with interval of 16 years and 6 years, respectively. For this region, the climate was trended to be warmer and dryer in recent 45 years and the temperature and the precipitation showed different interval.

**Key Words:** climate change; temperature; precipitation; abrupt change test method; wavelet analysis; Northeast China

气候变化及其影响研究是当今全球广泛关注的课题。IPCC 第四次评估报告<sup>[1]</sup>指出,全球平均地表温度一直在增加,全球地表温度均呈现一致的增暖趋势,近 50 年(1956—2005 年)的变暖速率( $0.13 \pm 0.03$ ) °C/10 a) 几乎是近 100 年(1906—2005 年)的两倍。大量研究表明,中国地区气候变化与全球气候变化总趋势是一致的<sup>[2-9]</sup>。中国近 54 年(1951—2004 年)来增温速率约 0.25 °C/10 a,比全球或半球同期平均增温速率高得多,而东北是全国增温最显著的地区之一<sup>[2,5]</sup>。

东北地区是中国最大的商品粮基地和农业生产最具发展潜力的地区之一,同时也是中国重要的工业和能源基地。东北地区位于北半球的中高纬度,是我国纬度最高的地区,是世界著名的温带季风气候区,是典型的气候脆弱区和受气候变暖影响最为敏感的地区之一<sup>[10-11]</sup>。近年来针对东北地区气候变化已展开不少研究,研究结果表明东北地区近百年表现为明显的增温趋势,年降水有减少趋势<sup>[12]</sup>。已有研究较多的关注于对农业生产具有重大影响的夏季旱涝灾害、低温冷害等方面的研究<sup>[13-16]</sup>,而针对东北地区夏季气温和降水变化的时空分布及变化规律的研究也不少<sup>[17-19]</sup>。这些研究对于正确认识东北地区气候变化规律具有重要意义。以往的研究大多都是对气温或降水的单一气象要素,而且所用气象要素资料的长度和气象台站数也不尽一致。

本文选取东北地区 96 个气象站 1961—2005 年的日平均气温和日降水量资料为基础资料,借助线性倾向率法,累积距平法, Mann-Kendall 法和 Morlet 小波分析等方法,研究了东北地区气温和降水的趋势变化,突变变化和周期变化,探讨了东北地区近 45 年来的气候变化对全球变暖的区域响应。这会提高对东北地区气候变化规律的认识,同时对东北地区生态环境建设和保护具有极其重要的现实意义,而且有望加强东北地区应对全球变暖所带来的威胁和灾难的能力。

## 1 研究区概况

本文所指东北地区包括东北三省(黑龙江省、辽宁省和吉林省)和内蒙古自治区东北的三市一盟(呼伦贝尔市、通辽市、赤峰市和兴安盟)。地理位置大体在北纬 38°40′至 53°30′,东经 115°05′至 135°02′,南北纵跨近



$$d_k = \sum_{i=1}^k m_i \quad (2 \leq k \leq N) \quad (4)$$

在原序列的随机独立等假定下  $d_k$  的均值、方差分别为:

$$E(d_k) = k(k-1)/4 \quad (5)$$

$$\text{var}(d_k) = k(k-1)(2k+5)/72 \quad (6)$$

将  $d_k$  标准化,

$$UF_k = (d_k - E(d_k)) / \sqrt{\text{var}(d_k)} \quad (7)$$

这里  $UF_k$  为标准分布,其概率  $a_1 = \text{prob}(|U| > |UF_k|)$  可以通过计算或查表获得,给出显著水平  $\alpha$  (取  $\alpha = 0.05$ ,  $\mu_{0.05} = 1.96$ ),若  $|UF| > u_0$ ,则表明该气候序列呈显著的变化趋势。

按气候序列  $x$  的逆序列  $(x_n, x_{n-1}, \dots, x_1)$ ,再重复上面的过程,同时使  $|UB_k| = -UF_k$ ,  $k = n, n-1, \dots, UB_1 = 0$ 。若  $UF$  值大于 0,则表明序列呈上升趋势,若小于 0,则表明呈下降趋势,当超过置信水平时,表明上升(下降)趋势显著。如果  $UF$  和  $UB$  两条曲线出现交点,且交点位于置信区间内,那么交点对应的时刻即是突变开始的时刻。

#### 2.2.4 小波分析

小波分析在气候变化研究中显现了年与年之间,波长与波长之间的波幅变化形态与特征,已广泛应用于气象领域<sup>[25-29]</sup>,并成为研究气象要素长期变化的工具。本文采用复值 Morlet 小波分析方法研究东北地区年均温和年降水量的周期变化规律。

对于时间序列函数  $f(t)$ ,小波变换定义为:

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt \quad (8)$$

式中,  $W_f(a, b)$  是小波系数,  $a$  是伸缩因子,决定小波宽度;  $b$  是平移因子,是反映小波位置移动的参数,  $\psi$  是  $\psi^*$  的共轭函数。本文采用 Matlab 小波分析工具箱中的 Morlet 小波<sup>[30]</sup> 为小波母函数,对东北地区气候资料序列进行连续小波变换。其解析形式为:

$$\psi(x) = Ce^{-\frac{x^2}{2}} \cos(5x) \quad (9)$$

小波方差为<sup>[31]</sup>:

$$W_p(a) = W_f(a, b)^2 \quad (10)$$

在一定的时间尺度下,小波方差表示时间序列在该尺度中周期波动的强弱(能量大小),小波方差随尺度的变化过程能反映时间序列中所包含的各种时间尺度(周期)及其强弱(能量大小)随尺度的变化特征,对应峰值处的尺度即为该序列的主要时间尺度,即主要周期<sup>[32]</sup>。

### 3 结果分析

#### 3.1 气温与降水量的年际变化

1961—2005 年东北地区年平均气温变化在 2.45—5.72 °C 之间,年平均气温在波动中逐渐上升,气候倾向率 0.38 °C/10 a ( $P < 0.01$ ) (图 2),明显高于全国平均增暖速率 0.22 °C/10 a<sup>[6]</sup>。东北地区四季平均气温均呈现增高的趋势,其中冬季增温幅度最大,达到 0.53 °C/10 a;春季次之,为 0.42 °C/10 a;秋季为 0.30 °C/10 a;夏季增温幅度最小,为 0.24 °C/10 a (图 2)。全国四季均温增暖速率分别为:冬季 0.36 °C/10 a,春季 0.23 °C/10 a,秋季 0.19 °C/10 a,夏季 0.12 °C/10 a<sup>[6]</sup>,可见东北地区年均温和四季均温变化趋势与全国年均温和四季均温变化趋势相同,但东北地区年均温和四季均温增暖速率却明显高于全国水平。

1961—2005 年东北地区年降水量变化在 430.40—678.72 mm 之间,年降水量在波动中下降,气候倾向率为 -5.71 mm/10 a ( $P > 0.05$ ) (图 2),与全国平均年降水量波动略有减少的趋势<sup>[33]</sup> 相同。1961—2005 年东北地区季节降水量呈现不同的变化趋势和不同的变化强度。春季降水量和冬季降水量呈现增多的趋势,春季降水增强幅度最大,为 1.43 mm/10 a,冬季降水为 0.30 mm/10 a;夏季降水和秋季降水呈现减少的趋势,夏季降

水减少幅度最大, 为-5.32 mm/10 a 秋季降水为-2.02 mm/10 a(图 2)。

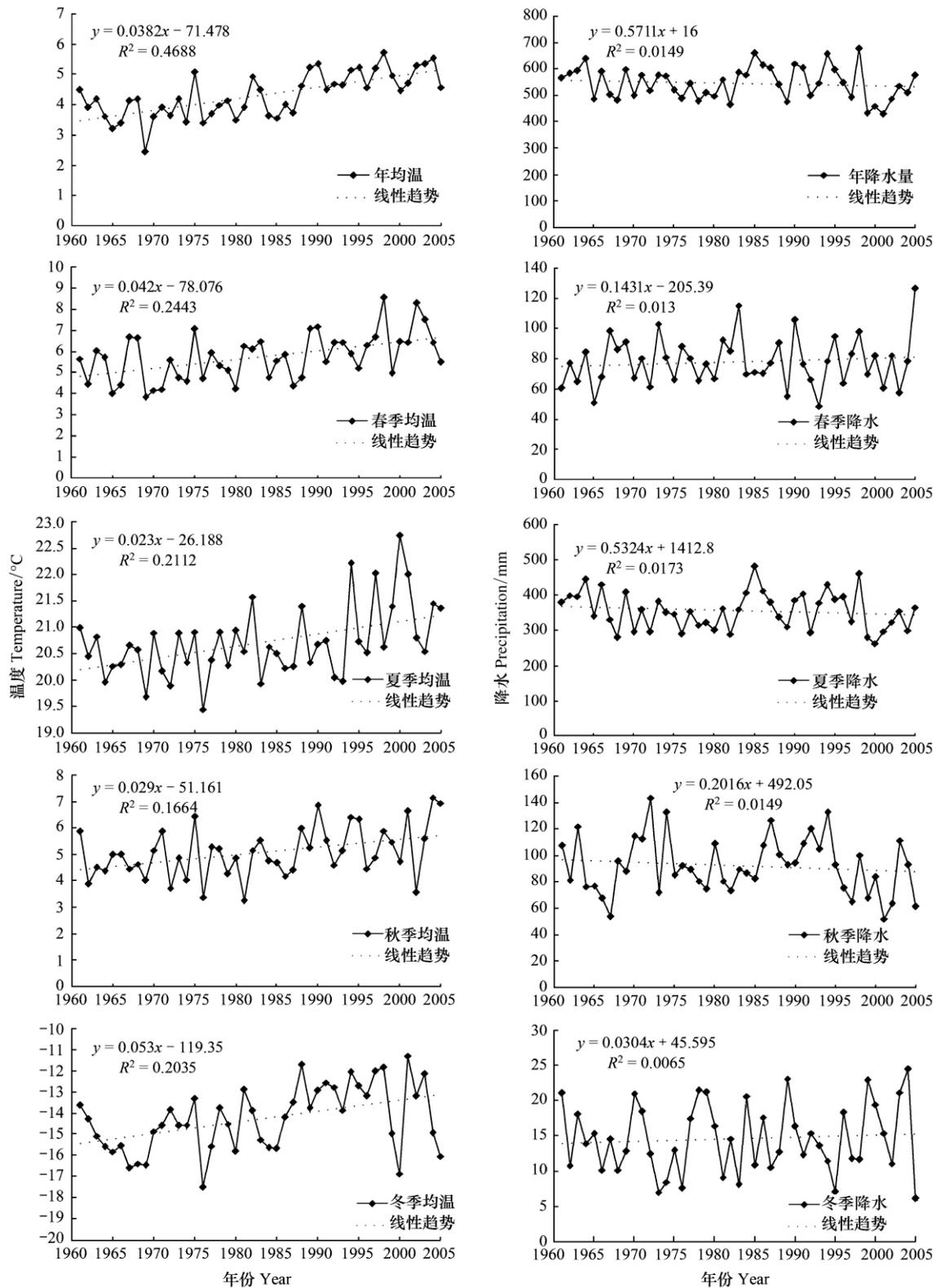


图 2 东北地区气温与降水量的年、季节变化图

Fig. 2 Variation of the annual and seasonal temperature and precipitation in Northeastern China

### 3.2 气温与降水量的年代际变化

东北地区气温年代际变化呈现明显的增温趋势,1961—1970 年和 1971—1980 年气温偏冷,但期间气温已呈现上升趋势,1981—1990 年开始变暖,其后气温逐年升高,且上升幅度逐年增大。季节温度的年代际变化也呈现统一的增暖趋势,春季均温和冬季均温在 1981—1990 年开始变暖,夏季均温和秋季均温在 1991—2000 年开始变暖(表 1)。

表 1 东北地区年、季节温度距平年代际变化/℃

Table 1 The decade change of annual seasonal temperature anomaly in Northeast China

季节 Season	年份 Year				
	1961—1970	1971—1980	1981—1990	1991—2000	2001—2005
春 Spring	-0.58	-0.59	0.11	0.51	1.10
夏 Summer	-0.25	-0.30	-0.10	0.39	0.52
秋 Autumn	-0.38	-0.28	-0.06	0.27	0.91
冬 Winter	-1.16	-0.54	0.33	0.99	0.76
年 Annual	-0.60	-0.42	0.03	0.59	0.77

东北地区降水量年代际变化趋势不明显,整体上呈现出减少的趋势,其中 1971—1980 年和 2001—2005 年属于降水偏少的年份,1981—1990 年属于降水最多的年代。春季和冬季降水量的年代际变化呈现增多的趋势,夏季和秋季降水量呈现减少的趋势(表 2)。

表 2 东北地区年、季节降水量距平年代际变化/mm

Table 2 The decade change of annual seasonal precipitation anomaly in Northeast China

季节 Season	年份 Year				
	1961—1970	1971—1980	1981—1990	1991—2000	2001—2005
春 spring	-3.27	-1.21	5.00	-1.96	2.89
夏 summer	14.98	-23.85	16.86	5.89	-27.75
秋 autumn	-3.72	7.12	1.40	3.09	-15.80
冬 winter	0.18	-0.26	-0.24	-0.20	1.04
年 annual	7.68	-17.62	24.34	4.98	-38.75

### 3.3 气温与降水量的空间变化

采用 IDW 插值对 96 站气温和降水量变化的年、季节气候倾向率进行内插,得到东北地区气温和降水量变化的空间分布图(图 3)。

#### 3.3.1 气温的空间变化

近 45 年来东北地区年均温呈上升趋势,96 站增温趋势显著( $P < 0.05$ ),平均增温幅度为  $0.38\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。气温上升幅度较大的地区位于大兴安岭地区、小兴安岭地区及松嫩平原大部分地区,升温中心位于黑龙江省孙吴( $0.66\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ );增温幅度较小的地区为辽河平原,长白山南部地区及辽东平原,其中辽宁省本溪为气温变化幅度最小的地区( $0.09\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ )(图 3a)。

东北地区春季温度呈增温趋势,平均升温幅度为  $0.42\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,96 站中 94 站(97.91%)增温趋势显著( $P < 0.05$ ),空间分布特征为低纬度向高纬度增温幅度逐渐增大。气温增幅较大的地区位于大小兴安岭北部地区,增幅最大值出现在内蒙古海拉尔( $0.69\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ );增幅较小的地区为燕山山脉东段,辽河平原,辽东山地及长白山等地区,增幅最小值出现在辽宁省本溪( $0.12\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ )(图 3b)。

东北地区夏季温度增温幅度最小,平均升温幅度为  $0.24\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,96 站中 70 站(72.92%)增温趋势显著( $P < 0.05$ ),空间特征表现为由南向北增温幅度逐渐增强。依据夏季温度变化可将东北地区划分为 3 个区域:新巴尔虎左旗,齐齐哈尔,北安,孙吴一线西北侧,包括大兴安岭中北部地区,小兴安岭地区增温幅度超过  $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ;翁牛特旗,开鲁,双辽,东岗一线以南地区,包括燕山山脉东段,辽河平原,长白山南段,辽东半岛,该

区域升温幅度小于 0.2 °C /10 a; 两线中间的地区升温幅度(0.2—0.3) °C /10 a(图 3c)。

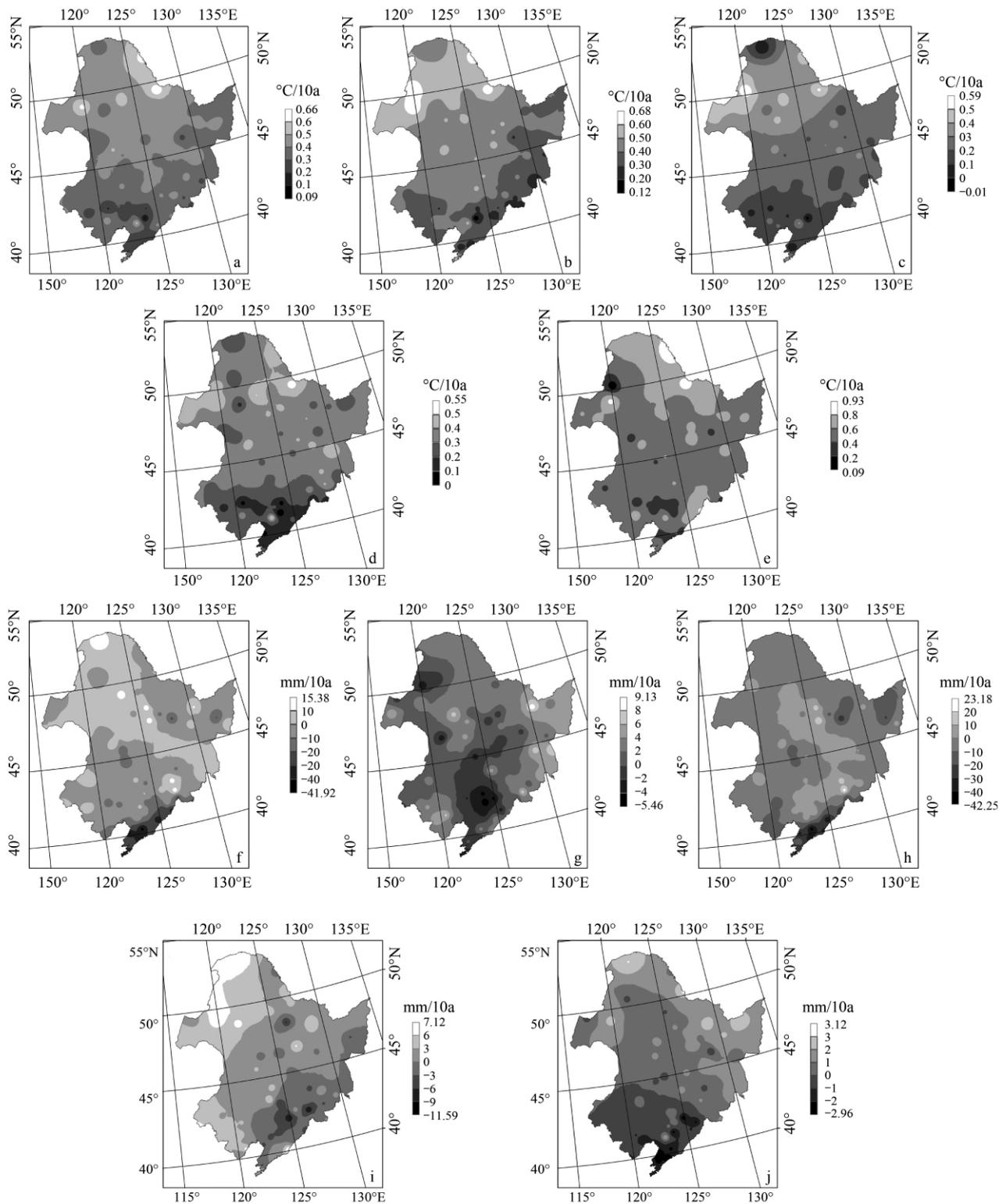


图3 东北地区气温与降水量变化趋势分布

Fig.3 Distribution of climate trend coefficient of temperature and precipitation in northeastern China

(a) 年均温 (b) 春季均温 (c) 夏季均温 (d) 秋季均温 (e) 冬季均温 (f) 年降水量 (g) 春季降水量 (h) 夏季降水量 (i) 秋季降水量 (j) 冬季降水量

东北地区秋季温度呈增温趋势,平均升温幅度为 $0.30\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,96站中73站(76.04%)增温趋势显著( $P<0.05$ )。空间分布上可以翁牛特旗,开鲁,双辽,东岗一线为界划分为2个区域:该线以北地区升温幅度均大于 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ;该线以南地区升温幅度均小于 $0.3\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ (图3d)。

东北地区冬季温度增温幅度最大,平均升温幅度为 $0.53\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,96站中80站(83.33%)增温趋势显著( $P<0.05$ )。气温增幅较大的地区为大兴安岭北部地区,小兴安岭地区和长白山南部地区(图3e)。

东北地区气温增暖幅度随纬度的升高而增大,增暖较明显的地区为大兴安岭北部和小兴安岭地区,增暖幅度较小的地区为辽河平原,辽东半岛和长白山南部地区。

### 3.3.2 降水量的空间变化

东北地区年降水量普遍呈现减少趋势,平均减少幅度为 $-5.71\text{ mm}/10\text{ a}$ 。年降雨量减少幅度较强的地区主要为辽东半岛和长白山南段。年降水量呈增加趋势的地区主要为呼伦贝尔高原,大兴安岭北部地区,松嫩平原,长白山中段(图3f)。

东北地区春季降水量呈现增加趋势,平均增加幅度为 $1.43\text{ mm}/10\text{ a}$ ,春季降水变化随经度的升高而升高。但松嫩平原西南部地区,辽河平原和辽东半岛地区春季降水量呈现减少趋势,减少最大值出现在辽宁省章党( $-5.47\text{ mm}/10\text{ a}$ )(图3g)。

东北地区夏季降水量呈现减少趋势,平均减少幅度为 $-5.32\text{ mm}/10\text{ a}$ 。夏季降雨量减少幅度较强的地区主要为辽东半岛和长白山南段。夏季降水呈现增多趋势的地区主要为大兴安岭东北侧,松嫩平原,长白山中段,辽河平原,增加极值出现在吉林省靖宇( $23.18\text{ mm}/10\text{ a}$ )(图3h)。

东北地区秋季降水量呈现减少趋势,平均减少幅度为 $-2.02\text{ mm}/10\text{ a}$ 。在空间分布上,由东南向西北秋季降水变化趋势由减少逐渐转为增加。可以阿尔山,博克图,嫩江和呼玛一线为界,该线西北地区秋季降水呈现增多趋势,主要包括大兴安岭北段和呼伦贝尔高原地区,其中增加极值出现在内蒙古自治区额尔古纳右旗( $7.12\text{ mm}/10\text{ a}$ );该线东南地区秋季降水量呈现减少趋势,减少极值出现在吉林省靖宇( $-11.59\text{ mm}/10\text{ a}$ )(图3i)。

东北地区冬季降水量呈现增加趋势,平均增加幅度为 $0.30\text{ mm}/10\text{ a}$ 。随着纬度的升高,冬季降水量变化趋势由减少变化增多。可以扎鲁特旗,双辽,四平,梅河口,临江一线为界,该线以北地区冬季降水量呈现增多趋势,增加极值出现在黑龙江省黑河( $3.12\text{ mm}/10\text{ a}$ );该线以南地区冬季降水量呈现减少趋势,减少极值出现在辽宁省熊岳( $-2.96\text{ mm}/10\text{ a}$ )(图3j)。

东北地区降水量减少较明显的地区为辽东半岛和长白山南段,降水量增加较明显的地区为大兴安岭北部,松嫩平原。

### 3.4 年均温和年降水量突变检测

用Mann-Kendall法对东北地区1961—2005年平均气温进行突变检验分析(图4)。由图4可以看出, $UF$ 曲线在1966年前呈现波动下降的趋势,之后呈现波动上升趋势,1990年这种上升趋势超过了显著性水平0.05的置信水平。 $UF$ 曲线在置信区间内与 $UB$ 曲线有一个交点(1988—1989年间)。累积距平分析结果显示,1961—2005年东北地区年平均气温累积距平呈现先下降后上升的“V”字形趋势,1961—1987年呈现下降趋势,1988—2005年呈现上升趋势,说明东北地区温度经历了下降-上升的过程。气温突变可能发生在1987年左右(图5)。结合两种方法的分析结果,判断东北地区年平均气温在1988—1989年间发生了由低温到高温的突变。

年降水量的Mann-Kendall检验结果显示(图6), $UF$ 线波动下降,但这种下降趋势未能越过置信水平, $UF$ 线在置信区间内与 $UB$ 线有5个交点(1967年,1968—1969年间,1969—1970年间,1983年,1995—1996年间)。累积距平分析表明,1961—2005年东北地区年降水量经历了明显的升降变化过程(图7)。1961—1964年年降雨量呈现增多趋势,1964—1974年降雨量在波动中缓慢下降,1975—1982年降雨量减少明显,低于多年平均降水量,1982年下降到最低值,1982—1998年降雨量逐渐增加,1998年上升到最大值,1998—2005年

降雨量呈现减少趋势,由此推断 1982 年和 1998 年可能是降水发生突变的年份。结合两种方法的分析结果,判断东北地区降水量在 1982—1983 年间可能发生了由少到多的突变。

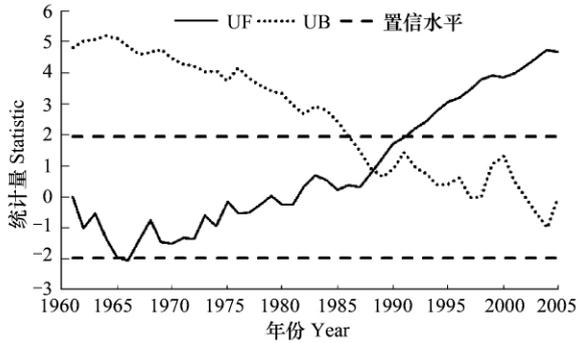


图 4 东北地区年平均气温 Mann-Kendall 突变判别曲线

Fig. 4 Mann-Kendall test of annual mean temperature in northeastern China

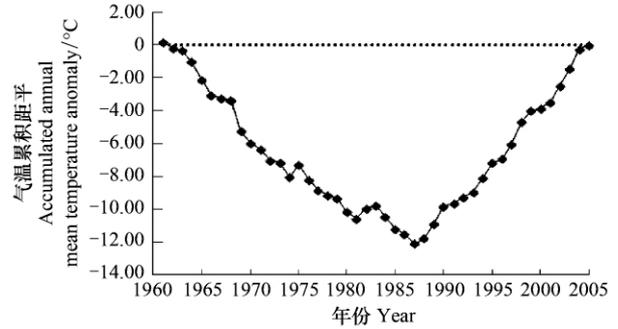


图 5 东北地区年平均气温累积距平

Fig. 5 Accumulated annual mean temperature anomaly in Northeastern China

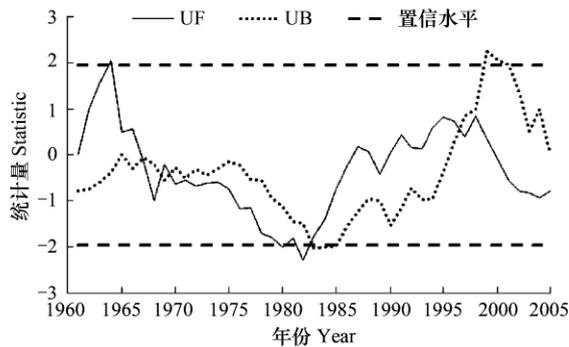


图 6 东北地区年降水量 Mann-Kendall 突变判别曲线

Fig. 6 Mann-Kendall test of annual precipitation in Northeastern China

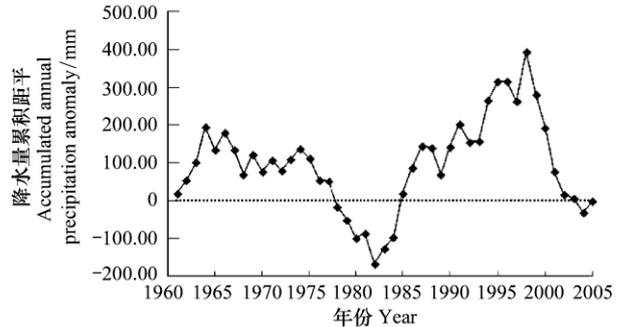


图 7 东北地区年降水量累积距平

Fig. 7 Accumulated annual precipitation anomaly in Northeastern China

### 3.5 年均温和年降水量周期变化分析

图 8a 给出了东北地区年平均气温的 Morlet 小波变换系数的实部时频变化,正值区表示气温偏高,负值区表示气温偏低。由图 8a 可以看出年平均气温小波系数等值线在 5—6a, 9—11a 和 23—26a 左右时间尺度上较为密集,且发生了小波系数高、低值中心的变化。年平均气温小波方差图(图 8b)显示小波方差在 11 a、24 a 和 6 a 存在极值,因此,可以得出东北地区年平均气温在 45 a 尺度内存在 11 a 的强显著周期,此外还有 24 a 和 6 a 的尺度变化周期。

由图 8a 和图 8b 判读还可以得到,在 45 a 尺度内东北地区年平均气温变化的主周期约为 11 a。通过提取该尺度的小波系数作图,得到主周期下年平均气温变化的小波系数过程线(图 8c)。由于小波系数过程线是对特定尺度下原数据序列信息的提取,因此,小波系数过程线可以反映数据序列在该尺度下的波动信息。从图 8c 上可以看出,东北地区年平均气温相对偏高的阶段:1961—1963 年,1966—1969 年,1973—1977 年,1981—1984 年,1988—1992 年,1996—1999 年,2002—2005 年;年平均气温相对偏低阶段为:1964—1965 年,1970—1972 年,1978—1980 年,1985—1987 年,1993—1995 年,1999—2001 年。从图中还可以看出,东北地区年平均气温的突变年份为:1963 年,1966 年,1969 年,1973 年,1977 年,1981 年,1984 年,1988 年,1992 年,1995 年,1999 年,2002 年。结合累积距平分析和突变检测的结果,东北地区年平均气温突变的年份为 1988 年。

图 8d 为年降水量的 Morlet 小波变换系数的实部时频变化,正值区表示降水偏多,负值区表示降水偏少。年降水量在小波系数等值线在 5—6 a 和 15—18 a 时间尺度上较为密集,且发生了小波系数高、低值中心的变化。年降水量的小波方差图(图 8e) 显示小波方差在 16 a 和 6 a 存在极值。由此可推断东北地区年降水量存在 16 a 的强显著周期和 6 a 的小尺度变化周期。

通过对图 8d 和图 8e 的判读还可以得出,在 45 a 尺度内东北地区年降水量变化的主周期约为 16 a。提取该尺度的小波系数作图,得到主周期下年降水量变化的小波系数过程线(图 8f)。从图 8f 上可以看出,东北地区年降水量相对偏多的阶段:1961—1964 年,1971—1976 年,1983—1987 年,1993—1998 年,2004—2005 年;年降水量相对偏少的阶段为:1965—1970 年,1977—1982 年,1988—1992 年,1999—2003 年。从图中还可以看出,东北地区年降水量的突变年份为:1964 年,1970 年,1976 年,1982 年,1987 年,1993 年,1998 年,2003 年。结合累积距平分析和突变检测的结果,东北地区年降水量突变的年份为 1993 年。

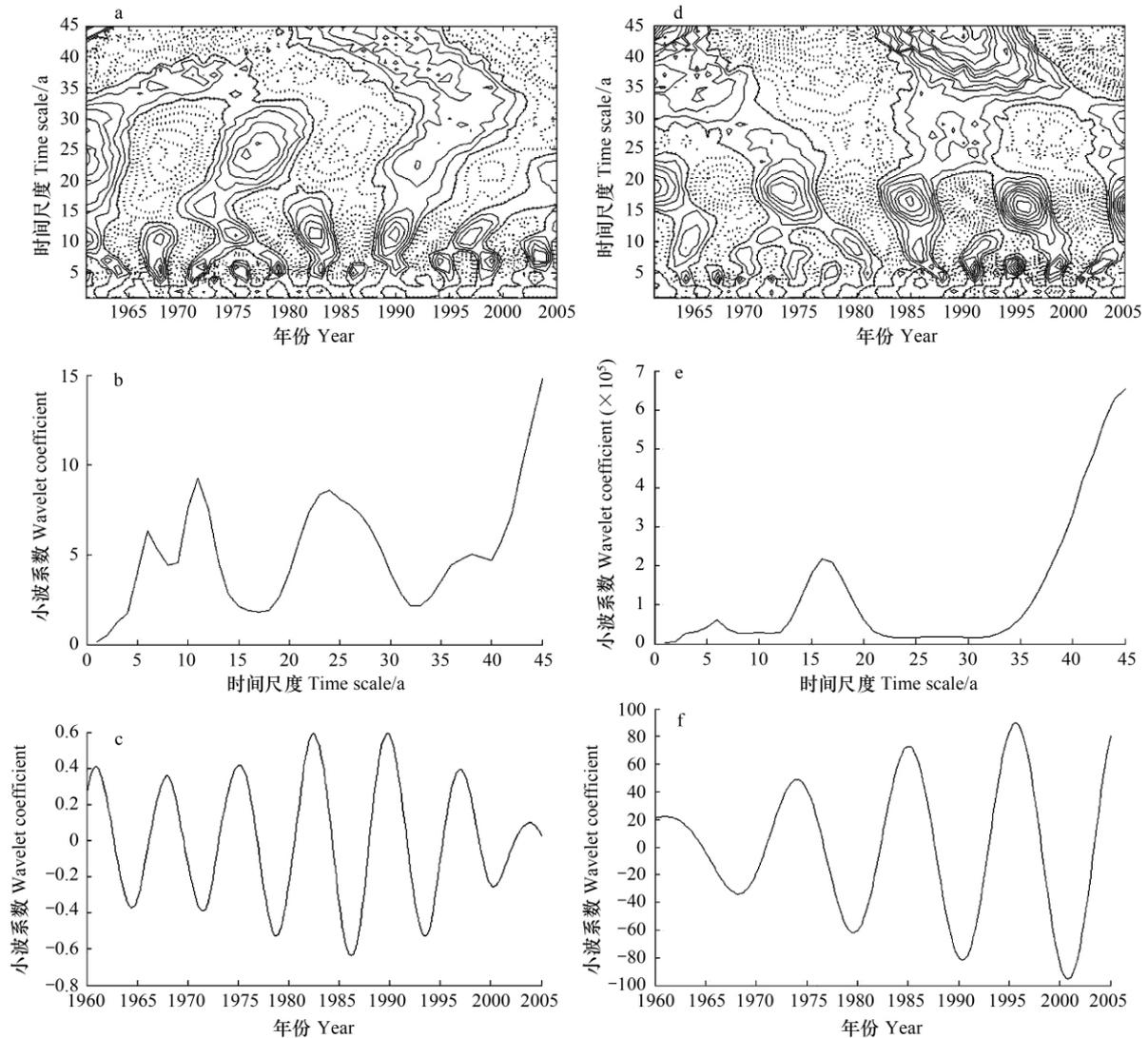


图 8 小波变换系数实部等值线图、小波方差图、主周期小波系数过程线

Fig. 8 The isoline of the real part of Morlet Wavelet coefficients, wavelet variance and the wavelet coefficient curves in the principal period scales

图中虚线为负等值线,实线表示小波系数为正数或 0

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

通过对我国东北地区 1961—2005 年气温和降水量的变化特征分析,1961—2005 年东北地区气温呈现显著上升趋势,降水量呈现下降趋势,总体气候呈现暖干化趋势,对全球变暖响应显著。

(1) 东北地区年平均气温上升趋势显著,年平均气温以  $0.38\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$  ( $P<0.01$ ) 的速率上升,年平均气温累积距平经过了下降—上升的过程,年平均气温在 1988—1989 年发生了由低温到高温的突变。四季平均气温均呈现增高的趋势,冬季增温幅度最大。东北地区年均温和季节均温年代际变化亦呈现明显的增暖趋势,年均温,春季均温和冬季均温均在 1981—1990 年开始变暖,夏季均温和秋季均温在 1991—2000 年开始变暖。

(2) 东北地区年降水量变化不明显,整体呈现减少趋势,气候倾向率为  $-5.71\text{ mm}/10\text{ a}$  ( $P>0.05$ ),1981—1990 年为降水量最多的年代,东北地区年降水量突变发生在 1982—1983 年间。春季降水和冬季降水量呈现增多的趋势,夏季降水和秋季降水呈现减少的趋势。

(3) 近 45 年东北地区气温增幅较大的地区为大兴安岭北部和小兴安岭地区,增幅较小的地区为辽河平原,辽东半岛和长白山南部地区。东北地区降水量减少较明显的地区为辽东半岛和长白山南段,增加较明显的地区为大兴安岭北部和松嫩平原。

(4) Morlet 小波分析结果表明,东北地区年平均气温存 11 a 的强显著周期,此外还有 24 a 和 6 a 尺度的变化周期,东北地区年降水量存在 16 a 强显著周期和 6 a 的小尺度变化周期。

### 4.2 讨论

本研究中东北地区年平均气温上升趋势显著:年平均气温以  $0.38\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$  ( $P<0.01$ ) 的速率上升,该结果略高于前人的增暖趋势估计值<sup>[34-35]</sup>。其原因主要为不同的研究者对东北地区范围定义不一,气候要素序列的起止时间不同和区域站点选择等方面存在差异。研究表明,全国台站中城镇站的气象资料大多数可能存在城市热岛效应增强所造成的影响<sup>[36-37]</sup>,如果能剔除城市化对地表气温的影响,东北地区的增温速率将小于  $0.38\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ ,这将有待今后的进一步研究。年平均气温累积距平经历了下降—上升的变化过程,年平均气温在 1988—1989 年发生了由低温到高温的突变,东北地区年降水量变化不明显,整体呈现减少趋势,气候倾向率为  $-5.71\text{ mm}/10\text{ a}$  ( $P>0.05$ )。

气温的显著增高和降水的减少加剧了东北地区的暖干化发展态势,将影响到东北地区的经济发展、生态与环境等诸多方面,首先是农业,已有研究表明气候变暖对东北地区农业影响总体有利,温度的升高缓解了低温对东北农业生产造成的危害,低温冷害、冰雹灾害发生机率明显降低。气候变暖带来了新生的农业气候资源,为作物种植制度的调整提供了可能。但气候变化对农业影响的研究存在较大的不确定性,有必要针对农业气候变化及其对农业影响展开系统性研究<sup>[16]</sup>。其次,气候变暖使得东北地区自然环境发生着变化。东北地区的湿地正面临着巨大的威胁,气候变暖使蒸腾蒸发量增大,降水变率增大,极端降水事件(旱涝灾害)的频率和强度增加,致使许多湿地干涸,湿地生态系统严重退化<sup>[38]</sup>。大兴安岭地区冻土呈现出自南向北的区域性退化趋势,岛状融区在扩大,多年冻土上限下降,下限在上移,气候变暖是其变化的最主要原因<sup>[39]</sup>。气候因素是荒漠化发展的一个基本因素,在全球气候变化的大背景下,东北地区在向着干旱发展<sup>[14]</sup>,东北平原西部的荒漠化和沙漠化问题比较严重<sup>[40]</sup>。

### References:

- [1] Solomon S. Climate Change 2007: The scientific basis // Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge and New York: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Chen L X, Zhou X J, Li W L, Luo Y F, Zhu W Q. Characteristics of the climate change and its formation mechanism in China in last 80 years. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 62(5): 634-646.
- [3] Lin X C, Yu S Q, Tang G L. Series of average air temperature over China for the last 100-years period. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1995, 19(5): 525-534.
- [4] Shi N, Chen J Q, Tu Q P. 4-phase climate change features in the last 100years over China. *Acta Meteorologica Sinica*, 1995, 53(4): 431-439.

- [5] Zuo H C, Lü S H, Hu Y Q. Variations trend of yearly mean air temperature and precipitation in China in the Last 50 Years. *Plateau Meteorology*, 2004, 23(2): 238-244.
- [6] Ren G Y, Guo J, Xu M Z, Chu Z Y, Zhang L, Zou X K, Li Q X, Liu X N. Climate changes of China's mainland over the past half century. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(6): 942-956.
- [7] Ding Y H, Ren G Y, Shi G Y, Gong P, Zheng X H, Zhai P M, Zhang D E, Zhao Z C, Wang S W, Wang H J, Luo Y, Chen D L, Gao X J, Dai X S. China's national assessment report of climate change ( I ): Climate change in China and the future trend. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 2(1): 3-8.
- [8] Wang S W, Ye J L, Gong D Y, Zhu J H, Yao T D. Construction of mean annual temperature series for the last one hundred years in China. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1998, 9(4): 392-401.
- [9] Wang S W. Diagnostic studies on the climate change and variability for the period of 1880—1990. *Acta Meteorologica Sinica*, 1994, 52(3): 261-273.
- [10] Jiang X Y, Liu S H, Ma M M, Zhang J, Song J. A wavelet analysis of the precipitation time series in Northeast China during the last 100 years. *Geographical Research*, 2009, 28(2): 354-362.
- [11] Wu Z F, Jin Y H, Liu J P, Shang L N, Zhao D S. Response of vegetation distribution to global climate change in northeast China. *Scientia Geographica Sinica*, 2003, 23(5): 564-570.
- [12] Sun F H, Yuan J, Lu S. The change and test of climate in northeast China over the last 100 years. *Climatic and Environmental Research*, 2006, 11(1): 101-108.
- [13] Sun L, An G, Ding L. The characteristics of summer drought and flood in northeast area of China. *Scientia Geographica Sinica*, 2002, 22(3): 311-316.
- [14] Xie A, Sun Y G, Bai R H. Arid climate trend over northeastern China and its response to global warming. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(S1): 75-82.
- [15] Chen L, Fang L J, Li S. Study on drought trend of crop growing season in northeast China in recent 50 Years. *Journal of Catastrophology*, 2010, 25(4): 5-10.
- [16] Zhao X L. Influence of climate change on agriculture in northeast China in recent 50 years. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2010, 41(9): 144-149.
- [17] Sun L, An G, Ding L, Shen B Z. A climatic analysis of summer precipitation features and anomaly in northeast China. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 58(1): 70-82.
- [18] Yang S Y, Wang Q Q. Spatial/temporal variations of summer temperature in northeast China in recent 50 years. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2003, 26(5): 653-660.
- [19] Zou L Y, Ding Y H. Characteristics of rainstorm in northeast China in 1961—2005. *Plateau Meteorology*, 2010, 29(5): 1314-1321.
- [20] Tan Z C, Wu Z F, Shi Z T. Using MATLAB and Marr Wavelet Method to study multi-time scale characteristic analysis in climate change. *Journal of Shanxi Normal University: Natural Science Edition*, 2007, 21(3): 76-79.
- [21] Deng Z W, Lin Z S, Zhou X L. Multiple time scales analysis of Xi'an climate change for last 50 years. *Plateau Meteorology*, 1997, 16(1): 81-93.
- [22] Jones P D. Hemispheric surface air temperature variations: recent trends and an update to 1978. *Journal of Climate*, 1988, 1(6): 654-660.
- [23] Fu C B, Wang Q. The definition and detection of the abrupt climatic change. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1992, 16(4): 482-493.
- [24] Sun X Z, Sun Z B, Luo Y. Characteristics of snowfall from 1960 to 2005 in Northeast China. *Journal of Meteorology and Environment*, 2010, 26(1): 1-5.
- [25] Hu N F, Wang A Z, Guan D X, Yuan F H, Jin C J, Wu J B, Wang J J. Multiple time scale analysis of precipitation series in Changbai Mountain Region in 1959—2006. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(3): 549-556.
- [26] Liu G S, Wang G X, Hu H C, Ren D X, Sun X Y. Climate change characteristics in the Source Regions of the Yangtze River and Yellow River over the past 45 years. *Resources Science*, 2010, 32(8): 1486-1492.
- [27] Xu Y Q, Li S C, Cai Y L. Wavelet analysis of rainfall variation in the Hebei Plain. *Science in China Series D: Earth Science*, 2004, 48(12): 2241-2250.
- [28] Shao X M, Xu Y Q, Yan C R. Wavelet analysis of rainfall variation in the Yellow River Basin. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2006, 42(4): 503-509.
- [29] Shen Q Q, Shu J, Wang X H. Multiple Time scales analysis of temperature and precipitation variation in Shanghai for the recent 136 years. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(4): 644-654.
- [30] Hu C H, Li G H, Zhou T. *The System Analysis and Design Based on MATLAB 7. X — Wavelet Analysis*. 3rd Edition. Xi'an: Xidian University Publishing House, 2008.
- [31] Wei F Y. *Modern Technology of Statistics Diagnosis and Forecast for Climate*. Beijing: China Meteorological Press, 2007.
- [32] Gao W, Li B L. Wavelet analysis of coherent structures at the atmosphere-forest interface. *Journal of Applied Meteorology*, 1993, 32(11): 1717-1725.
- [33] Wang Z Y, Ding Y H, He J H, Yu J. An updating analysis of the climate change in China in recent 50 years. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 62(2): 228-236.
- [34] Zhao C Y, Ren G Y, Zhang Y F, Wang Y. Climate change of the Northeast China over the past 50 years. *Journal of Arid Land Resources and*

Environment, 2009, 23(7): 25–30.

- [35] Jia J Y, Guo J P. Characteristics of climate change in northeast China for last 46 years. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2011, 25(10): 109–115.
- [36] Zhao Z C. The changes of Temperature and the effects of the urbanization in China in the last 39 years. *Meteorological Monthly*, 1991, 17(4): 14–17.
- [37] Tang G L, Ren G Y. Reanalysis of surface air temperature change of the last 100 years over China. *Climatic and Environmental Research*, 2005, 10(4): 791–798.
- [38] Pan X L, Deng W, Zhang D Y, Luan Z Q. Classification of hydrological landscapes of typical wetlands in Northeast China and their vulnerability to climate change. *Research of Environmental Sciences*, 2003, 16(1): 14–18.
- [39] Gu Z W, Zhou Y W. The effects of climate warming and human turbulence on the permafrost in the northward slope of MT. DA Hinggan Ling-take a sample from Amur area. *Acta Geographica Sinica*, 1994, 49(2): 182–187.
- [40] Li B L, Zhou C H. Climatic variation and desertification in west sandy land of Northeast China Plain. *Journal of Natural Resources*, 2001, 16(3): 234–239.

#### 参考文献:

- [2] 陈隆勋, 周秀骥, 李维亮, 罗云峰, 朱文琴. 中国近 80 年来气候变化特征及其形成机制. *气象学报*, 2004, 62(5): 634–646.
- [3] 林学椿, 于淑秋, 唐国利. 中国近百年温度序列. *大气科学*, 1995, 19(5): 525–534.
- [4] 施能, 陈家其, 屠其璞. 中国近 100 年来 4 个年代际的气候变化特征. *气象学报*, 1995, 53(4): 431–439.
- [5] 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. *高原气象*, 2004, 23(2): 238–244.
- [6] 任国玉, 郭军, 徐铭志, 初子莹, 张莉, 邹旭凯, 李庆祥, 刘小宁. 近 50 年中国地面气候变化基本特征. *气象学报*, 2005, 63(6): 942–956.
- [7] 丁一汇, 任国玉, 石广玉, 官鹏, 郑循华, 翟盘茂, 张德二, 赵宗慈, 王绍武, 王会军, 罗勇, 陈德亮, 高学杰, 戴晓苏. 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. *气候变化研究进展*, 2006, 2(1): 3–8.
- [8] 王绍武, 叶瑾琳, 龚道溢, 朱锦江, 姚檀栋. 近百年中国年气温序列的建立. *应用气象学报*, 1998, 9(4): 392–401.
- [9] 王绍武. 近百年气候变化与变率的诊断研究. *气象学报*, 1994, 52(3): 261–273.
- [10] 姜晓燕, 刘树华, 马明敏, 张菁, 宋军. 东北地区近百年降水时间序列变化规律的小波分析. *地理研究*, 2009, 28(2): 354–362.
- [11] 吴正方, 靳英华, 刘吉平, 商丽娜, 赵东升. 东北地区植被分布全球气候变化区域响应. *地理科学*, 2003, 23(5): 564–570.
- [12] 孙凤华, 袁健, 路爽. 东北地区近百年气候变化及突变检测. *气候与环境研究*, 2006, 11(1): 101–108.
- [13] 孙力, 安刚, 丁立. 中国东北地区夏季旱涝的分析研究. *地理科学*, 2002, 22(3): 311–316.
- [14] 谢安, 孙永罡, 白入海. 中国东北近 50 年干旱发展及对全球气候变暖的响应. *地理学报*, 2003, 58(增刊): 75–82.
- [15] 陈莉, 方丽娟, 李帅. 东北地区近 50 年农作物生长季干旱趋势研究. *灾害学*, 2010, 25(4): 5–10.
- [16] 赵秀兰. 近 50 年来中国东北地区气候变化对农业的影响. *东北农业大学学报*, 2010, 41(9): 144–149.
- [17] 孙力, 安刚, 丁立, 沈柏竹. 中国东北地区夏季降水异常的气候分析. *气象学报*, 2000, 58(1): 70–82.
- [18] 杨素英, 王谦谦. 近 50a 东北地区夏季气温异常的时空变化特征. *南京气象学院学报*, 2003, 26(5): 653–660.
- [19] 邹立尧, 丁一汇. 1961—2005 年东北暴雨气候特征分析. *高原气象*, 2010, 29(5): 1314–1321.
- [20] 谭志昌, 吴正方, 史正涛. MATLAB 在长春多尺度气候诊断中的应用研究. *山西师范大学学报: 自然科学版*, 2007, 21(3): 76–79.
- [21] 邓自旺, 林振山, 周晓兰. 西安市近 50 年来气候变化多时间尺度分析. *高原气象*, 1997, 16(1): 81–93.
- [23] 符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法. *大气科学*, 1992, 16(4): 482–493.
- [24] 孙秀忠, 孙照渤, 罗勇. 1960—2005 年东北地区降雪变化特征研究. *气象与环境学报*, 2010, 26(1): 1–5.
- [25] 胡乃发, 王安志, 关德新, 袁凤辉, 金昌杰, 吴家兵, 王纪军. 1959—2006 年长白山地区降水序列的多时间尺度分析. *应用生态学报*, 2010, 21(3): 549–556.
- [26] 刘光生, 王根绪, 胡宏昌, 任东兴, 孙向阳. 长江黄河源区近 45 年气候变化特征分析. *资源科学*, 2010, 32(8): 1486–1492.
- [27] 许月卿, 李双成, 蔡运龙. 基于小波分析的河北平原降水变化规律研究. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2004, 34(12): 1176–1183.
- [28] 邵晓梅, 许月卿, 严昌荣. 黄河流域降水序列变化的小波分析. *北京大学学报: 自然科学版*, 2006, 42(4): 503–509.
- [29] 申倩倩, 束炯, 王行恒. 上海地区近 136 年气温和降水量变化的多尺度分析. *自然资源学报*, 2011, 26(4): 644–654.
- [30] 胡昌华, 李国华, 周涛. 基于 MATLAB 7. X 的系统分析与设计——小波分析(第三版). 西安: 西安电子科技大学出版社, 2008.
- [31] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术. 北京: 气象出版社, 2007.
- [33] 王遵娅, 丁一汇, 何金海, 虞俊. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析. *气象学报*, 2004, 62(2): 228–236.
- [34] 赵春雨, 任国玉, 张运福, 王颖. 近 50 年东北地区的气候变化事实检测分析. *干旱区资源与环境*, 2009, 23(7): 25–30.
- [35] 贾建英, 郭建平. 东北地区近 46 年气候变化特征分析. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(10): 109–115.
- [36] 赵宗慈. 近 39 年中国的气温变化与城市化影响. *气象*, 1991, 17(4): 14–17.
- [37] 唐国利, 任国玉. 近百年中国地表气温变化趋势的再分析. *气候与环境研究*, 2005, 10(4): 791–798.
- [38] 潘响亮, 邓伟, 张道勇, 栾兆攀. 东北地区湿地的水文景观分类及其对气候变化的脆弱性. *环境科学研究*, 2003, 16(1): 14–18.
- [39] 顾钟炜, 周幼吾. 气候变暖和人为扰动对大兴安岭北坡多年冻土的影响——以阿木尔地区为例. *地理学报*, 1994, 49(2): 182–187.