

# 三北防护林工程区气候变化分析

王鹏涛<sup>1</sup>, 延军平<sup>1</sup>, 蒋冲<sup>2</sup>, 刘宪锋<sup>3</sup>, 廖光明<sup>1</sup>

(1. 陕西师范大学 旅游与环境学院, 陕西 西安 710119; 2. 北京师范大学 全球变化与地球科学  
研究院 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 3. 北京师范大学 资源学院, 北京 100875)

**摘要:** 利用三北防护林工程区内气象站点近 52 a 气温与降水资料, 研究了工程建设前后该区的气候变化特征。结果表明: (1) 近 52 a 工程区增温趋势明显, 增温速率为 0.346 °C/10 a; 1960—1977 年为相对低温期, 1978—1995 年气温逐渐上升, 建设后期 1996—2011 年气温显著增高; 增温趋势具有明显的南北分异特征, 显著升温区主要分布在工程区北部内蒙古高原、松嫩平原和吉林西部平原。(2) 年降水量呈下降趋势, 下降速率为 3.554 mm/10 a; 建设之前降水偏少, 建设初期有所增加, 1996 年以来又呈明显减少趋势; 降水变化东西差异明显, 东部除嫩江平原、内蒙古阴山地区降水增多外, 其他地区普遍减少, 而西部大部降水呈增加趋势。(3) 工程区气候变化空间差异明显, 暖湿化区域主要集中在西部阿勒泰地区、柴达木盆地和东部内蒙古阴山地区、河套平原和松嫩平原, 而其他地区如呼伦贝尔草原、大兴安岭山区、辽嫩平原则暖干化趋势显著。

**关键词:** 三北防护林工程区; 气候变化; 空间差异

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2014)01-0273-06

中图分类号: P964

## Climate Change in Three-North Shelter Forest Program Areas

WANG Peng-tao<sup>1</sup>, YAN Jun-ping<sup>1</sup>, JIANG Chong<sup>2</sup>, LIU Xian-feng<sup>3</sup>, LIAO Guang-ming<sup>1</sup>

(1. College of Tourism and Environment, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710119, China; 2. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Institute of Global Change and Earth System Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. College of Resources, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Using the temperature and precipitation data from 117 stations in the three-north shelter forest program areas from 1960 to 2011, we compared the characteristics of climate change in the areas before and after the implementation of the project. (1) Temperature in the project areas during the years showed a significantly increasing trend with a warming rate of 0.346 °C/10 a. The years from 1960 to 1977 were a relatively low temperature period; temperature increased from 1978 to 1995; and the years from 1996 to 2011 were a significant warming period. The warming trend generally manifested the north-south difference, and the areas for notable increasing temperature mainly concentrated in northern regions such as Inner Mongolia Plateau, Songnen Plain in Heilongjiang Province and Plain of Western Jilin Province. (2) The annual precipitation of the project areas overall showed a declining trend with a decreasing rate of 3.554 mm/10 a. Precipitation was less than normal before the implementation of the project. In the beginning of implementation, there was a slight increase, but after 1996, precipitation performed an obviously decreasing trend. The tendency rate of precipitation distribution showed an apparent east-west difference. Precipitation in eastern regions decreased, while in western regions it showed a widespread increase and in eastern regions like Heilongjiang Songnen Plain and Inner Mongolia Yinshan Mountain area there was a notable increase of precipitation. (3) Spatial variation of climate change was obvious. The main climate changing trend in western regions like Altay Region and Qaidam Basin, and in the east regions of Inner Mongolia, Hetao Plain and Songnen Plain was warming and wetting, while in other regions, such as Hulun Buir prairie, Daxingan Mountains and Nenjiang Plain in Liaoning Province, the trend was warming and drying.

**Keywords:** three-north shelter forest program areas; climate change; spatial variation

收稿日期: 2013-04-19

修回日期: 2013-05-03

资助项目: 国家自然科学基金项目“部分重大自然灾害的时空对称性: 结构、机理与适应对策”(41171090)

作者简介: 王鹏涛(1988—), 男(汉族), 陕西省渭南市人, 硕士研究生, 主要从事环境变化与灾害防治等研究。E-mail: wnpengtao@126.com。

1978 年 11 月,为改善中国北方的生态环境,防止三北地区风沙灾害和水土流失的恶化,正式启动三北防护林工程,工程建设 35 a 以来取得了一定的生态效益<sup>[1]</sup>。20 世纪以来全球进入变暖期<sup>[2-5]</sup>,而防护林的建设期,正处在近百年全球变暖加剧期<sup>[4-6]</sup>。中国对气候变暖有着显著的响应<sup>[4-5]</sup>,但这种响应存在区域差异<sup>[7]</sup>,三北防护林建设以来,工程区气候对全球变化响应的的时间、幅度如何,这种变化是否会阻碍防护林生态效益的发挥都是亟需探讨的问题。

多年来,针对全国气候变化及北方地区的局部气候变化的研究较多<sup>[4-15]</sup>,可作为研究区域气候背景的科学依据,但未充分揭示出三北防护林工程区的气候变化特点。而关于三北防护林的研究,又多集中在防护林建设给区域带来的生态效应<sup>[16-21]</sup>,对该区多年来的气候变化的响应研究较少。赵国藏<sup>[21]</sup>选用气温及相对湿度的指标,分析了 1951—1988 年工程实施引起的区域气候变化。但是研究序列过短,对气候变化的空间差异也未作分析。王强<sup>[22]</sup>在分析植被覆被变化对气候变化的响应时,采用 1982—2006 年气象数据,对工程区 25 a 的气温降水变化作了研究,可是该研究也存在时间序列过短的问题,对于防护林建设前后气候变化的阶段特征缺乏对比。

本文选取 117 个站点 52 a 的气象数据,对三北防护林多年气候变化进行分析,探讨该区气候对全球变化的响应及其对三北防护林工程建设的可能影响,以期防护林后续建设布局及改善区域生态环境等提供科学依据。

## 1 研究区概况

三北防护林工程区位于中国北半部,东起黑龙江省的宾县,西至新疆维吾尔自治区的乌孜别克里山,北抵国界线,南沿天津、汾河、渭河、洮河下游、布尔汗达山、喀喇昆仑山,东西长 4 480 km,南北宽 560~1 460 km,面积约  $4.069 \times 10^6$  km<sup>2</sup>,占国土总面积的 42.4%。建设范围包括黑龙江、吉林、辽宁、北京、天津、河北、山西、内蒙古、陕西、甘肃、宁夏、青海、新疆 13 个省(自治区、直辖市)的 551 个县(市、旗、区)<sup>[23]</sup>。

三北地区地势西高东低,呈 3 级台阶分布。全区地貌类型多样,山地,丘陵,平原,高原盆地,沙漠均有分布。根据区域自然特征差异,三北防护林工程区在地域上区划为东北西部,蒙新,黄土高原,华北北部 4 个 I 级区,22 个 II 级区,59 个 III 级区。该区气候类型属北温带大陆性季风气候,就全国范围而言属少雨区,气候干旱,自然植被以森林草原,草原,荒漠草原为主,生态环境脆弱<sup>[24-26]</sup>,再加上三北地区土地利用

结构的不合理,干旱、半干旱地区沙漠化逐年加剧,导致生态平衡严重失调和经济的恶性循环。

## 2 资料与方法

### 2.1 资料选取

为反映各站点在防护林建设前后的气候变化,参考在一期工程规划的县域,选取其中代表性站点 117 个,并从气象数据完整的 1960 年开始,统计到 2011 年,建立气象资料的时间序列。划分 1960—1977 年建设前为第一时段;1978 年(一期工程开始)—1995 年(二期工程结束)命名为第二时段,此时一期 117 个站点防护林生态效应已经发挥出来;1996—2011 年为第三时段,以对比分析近期区域气候变化。三个时段跨度分别为 18,18,16 a,序列长短接近,有利于进行数据的比较。站点的气温、降水资料,来源于中国气象资源共享网。

### 2.2 研究方法

本文采用气候倾向率,距平分析法及空间插值等方法,分析该区的近 52 a 的气候变化趋势。统计各站点不同时段的气象要素距平值(均以 52 a 均值为距平基准值)及气候倾向率,利用 ArcGIS 软件绘制出各时段的距平分布图及多年倾向率分布图。为了直观反映气象数据的正负距平及正负倾向率变化,我们把零值线在相应的分图中标注出来。

## 3 气温变化趋势分析

### 3.1 气温的时间变化

该区近 52 a 来平均气温为 6.81 °C,年均温的三个高值均出现在 1996—2011 年,分别为 1998 年(8.10 °C),2006 年(7.82 °C),2007 年(8.29 °C),3 个低值均出现在 1960—1977 年时间段,分别为 1967 年(5.78 °C),1969 年(5.50 °C),1976 年(5.79 °C)。其中最高温出现在 1998 年,这与李庆伟等<sup>[9]</sup>研究结果一致,最低温出现在 1969 年,与最高温相差 2.79 °C。多年来区域气温呈明显上升趋势,由 1960 年的年均温 6.29 °C 上升到 2011 年的 7.19 °C,线性拟合增温速率为 0.346 °C/10 a,符合全球气温变化趋势,但区域增温速率明显高于同期全球增温速率  $0.13 \pm 0.03$  °C/10 a<sup>[4,10]</sup> 和全国增温速率 0.25 °C/10 a<sup>[8]</sup>。

从年平均距平图(图 1)来看,在 1960—1977 年,区域温度先下降,1970 年开始缓慢上升。各年气温,除 1975 年外,均处于负距平状态,阶段距平为 -0.57 °C,气温偏低。1978—1995 年气温正距平年份达 39%,阶段距平为 -0.09 °C,已经接近 52 a 平均值。1996—2011 年气温继续上升,在 2004 年达

到峰值,阶段距平上升到 0.74 °C,增暖趋势显著。统计年均温 3 个高值均出现在该段时间,也与此阶段温度升高的趋势相符。

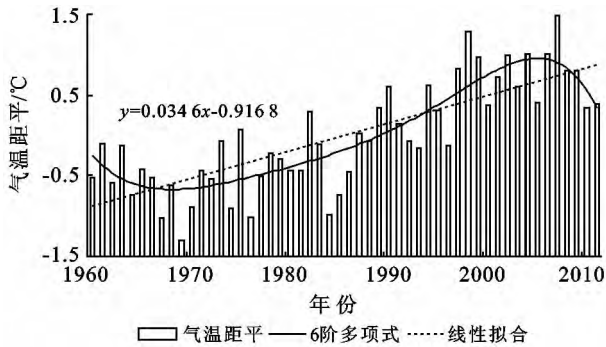


图 1 1960—2011 年三北防护林工程区气温变化

### 3.2 气温的空间变化

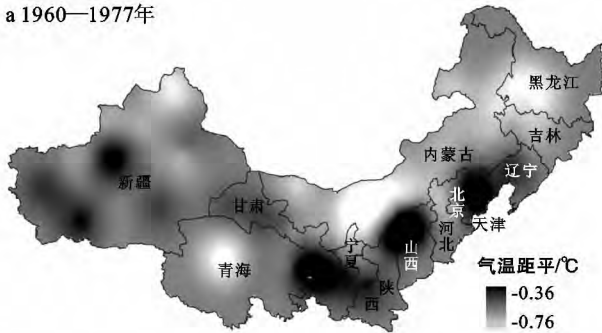
3.2.1 气温距平空间变化 由图 2 可见,1960—1977 年工程区相对温度普遍偏低,大多站点为负距平。空间分布上,气温距平的分布存在南北差异,以工程区东部的南北差异最为明显。北部除吐鲁番盆地、河西走廊外,黑龙江松嫩平原、吉林西部平原、内蒙古高原、冀西北山地、新疆阿勒泰地区、柴达木地区

为显著低值区。辽宁北部、冀北山地、山西西部黄土高原、陕北地区、陇中地区、青海东部、新疆吐鲁番盆地、天山南部地区及塔里木盆地均为高值分布区,距平值在 -0.56 °C 以上。3 个正距平站河曲、库车、承德均分布在该范围内。

1978—1995 年区域大部分地区仍为负距平区,但是气温正距平站点明显增加,各站点的温度显著提高,平均距平值上升 0.48 °C。区域气温正距平站点 32 个,其中 30 个都分布在东北、华北和北疆地区。新疆阿勒泰地区、黑龙江松嫩平原、辽西走廊、冀北山地为气温正距平区。距平高值中心已经发生了迁移,相较于第一阶段气温分布,陕西、山西、甘肃、青海东部、新疆南部由高值中心转为低值中心,绝对温度降低较大。

1996—2011 年气温正距平区进一步扩大,仅西宁,承德,库车 3 站为负距平,区域整体距平值达到正距平 0.74 °C,提高了 0.85 °C,增温趋势相对第二阶段更为明显,相对气温的高温中心继续迁移,内蒙古及柴达木盆地增温最显著,成为新的高值中心,距平值可以达到 0.78 °C 以上。塔里木盆地、华北平原的相对温度较低。

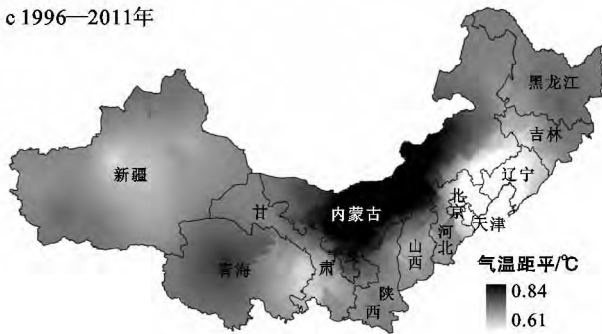
a 1960—1977年



b 1978—1995年



c 1996—2011年



d 1960—2011年

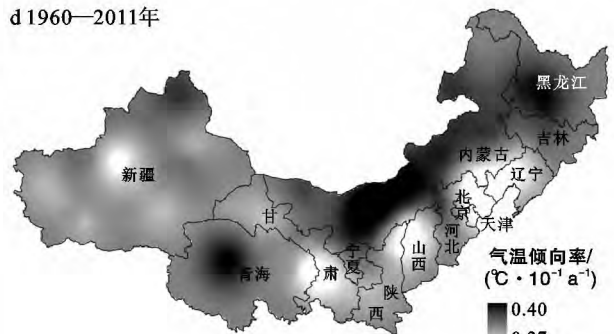


图 2 三个时段气温距平及其变化趋势分布

3.2.2 气温倾向率分布 统计各站点气温倾向值,除承德、河曲、库车 3 站为负值,其他站均为正值,区域整体变暖趋势明显。整个工程区,除了南部的柴达木盆地为增温高值区外,大致反映出南低北高的线性

变化趋势。内蒙古高原、黑龙江松嫩平原、吉林西部平原、柴达木盆地均为显著增暖区,华北北部、山西西部、陕北、陇东、塔里木盆地为增温低值区,这与气温距平图反映出的高低值中心迁移变化过程相符。

另外,观察第一阶段距平分布图 2a 与气温倾向图 2d,1960—1977 年气温在空间上,呈现出“高值增温慢,低值增温快”的变化规律,即建设初期的相对气温低值区增温速率最大,高值区域增温速率最小的对应变化趋势,其中河北、辽宁、陕西、山西、甘肃、新疆等建设初期的高值中心,多年来增温趋势最为缓慢。这与郭志梅等<sup>[14]</sup>的研究结果基本一致,但是从图 2d 分析,第三阶段西北西部的增温趋势已明显放缓。

### 4 降水变化趋势分析

#### 4.1 降水的时间变化

区域多年平均降水 309.0 mm,降水的高值在 3 个时段均有分布(图 3),3 个年份分别为 1964 年(387.8 mm),1990 年(367.7 mm),1998 年(392.2 mm),这与气温高值的分布有所差异。降水 3 个低值则分布在前两个时段内,分别为 1965 年(242.2 mm),1980 年(253.4 mm),1982 年(246.2 mm)。最大降水量与最小降水量相差达 149.9 mm。52 a 来工程区年平均降水量从 1960 年的 317.6 mm 下降到 2011 年的 280.8 mm,下降拟合速率为 3.554 mm/10 a。

从降水距平的拟合曲线来看,区域平均降水总体呈现波动下降趋势。第一时段,区域降水先波动下降,在后半段 1975 年附近降水量开始缓慢增加,整个时段降水距平 3.42 mm。第二时段,降水量先呈升高

趋势,在 90 年代初期又逐渐减少,此阶段降水量平均距平增加为 7.84 mm,平均降水量有所增加。1996—2011 年,降水变化也是呈现先减少,在 2006 年附近又波动增加的趋势,平均距平为 -12.7 mm,此阶段降水量较常年平均值偏少。

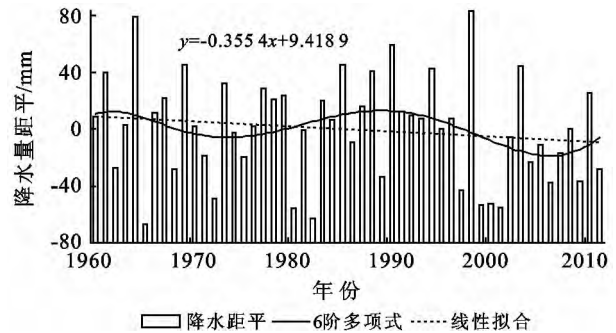
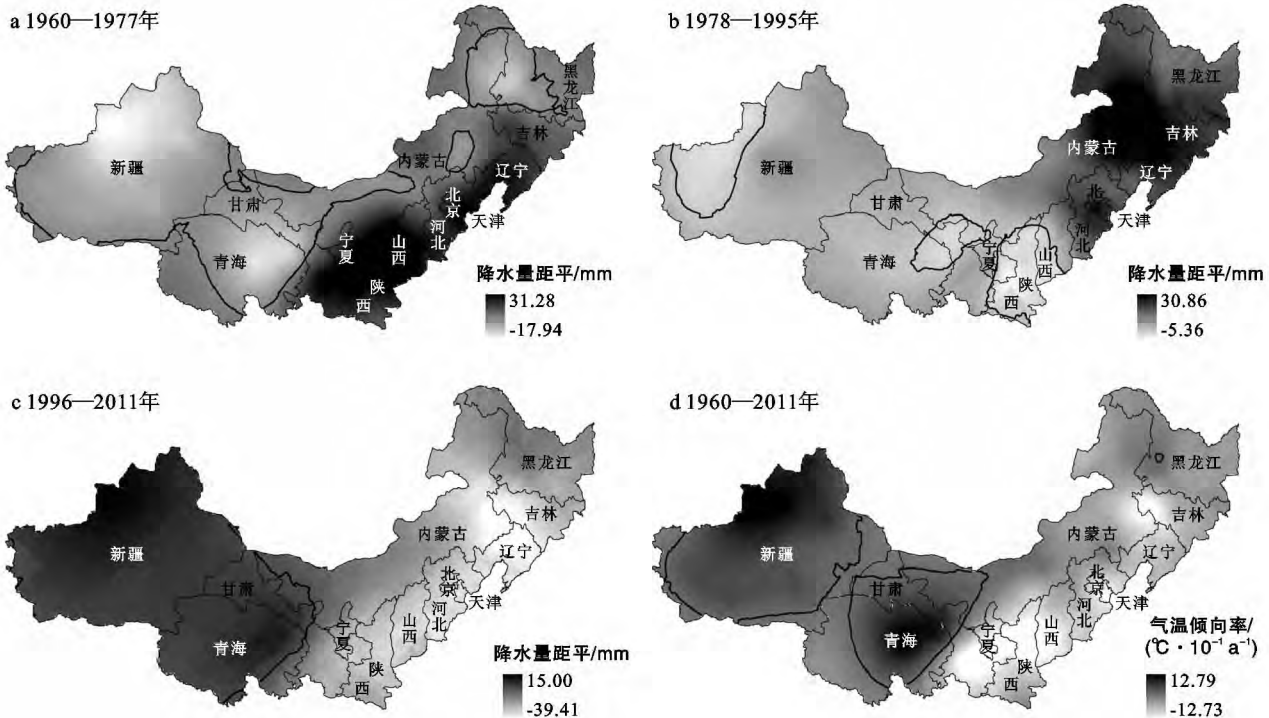


图 3 1960—2011 年三北防护林工程区降水量变化

#### 4.2 降水的空间变化

4.2.1 降水量距平空间变化 图 4 为各站点不同时段降水量距平的空间分布。在第一时段(图 4a),区域降水距平 3.42 mm,其空间分布基本呈现出东高西低的变化特征,西部地区相对降水量普遍偏少。雨量负值区分布在东部的黑龙江松嫩平原和大兴安岭及内蒙古阴山山地。东北西部其他地区、华北北部、黄土高原均为降水距平高值区,58 个正距平站均分布在此区。

图 4 3 个时段降水距平及其变化趋势分布



第二时段(图 4b),降水正距平面积进一步扩大,有 77 个站为高值站,平均距平增加为 7.84 mm。可

以看出这一时段,工程区普遍降水增加,降水空间分布仍然表现出东西差异,低值区主要分布在山西西

部、陕西、青海及甘肃祁连山区、塔里木盆地及天山山地、其他地区降水量普遍增加,其中东部的东北西部、华北北部地区为降水高值中心,与前一时段相比,陕西、山西、甘肃祁连山地降水量明显下降。新疆、柴达木盆地、河西走廊地区降水有所增加。

第三时段(图 4c),降水平均距平为 $-12.7\text{ mm}$ ,整体降水呈下降趋势。降水分布的东西差异明显,大致以河西走廊及青藏高原为界,界线以西为降正距平区。此阶段 37 个降水正距平站,有 28 个都分布在界限以西。对比前一时段,可以看出,东部地区除黑龙江松嫩平原外,其他区域普遍降水有所减少,而西部区域仍然为正距平态势,降水量进一步增加。

4.2.2 降水倾向率分布 从降水倾向率统计来看(图 4d),降水线性趋势的东西差异明显,全区降水呈增加趋势的站点达到了 59%。西部地区除库尔勒,额济纳旗,民和站外,降水倾向率均大于 0,倾向率的最大值伊宁站就位于西部,倾向率达到了 $21.4\text{ mm}/10\text{ a}$ 。说明近 52 a 来,中国西部地区降水量显著增加。这与叶柏生等<sup>[11]</sup>,姚惠明等<sup>[12]</sup>研究结果一致。区域东部的黑龙江松嫩平原、内蒙古阴山山地也是显著的增加区。东部其余地区,降水则呈现减少趋势,线性趋势图与工程区降水高值区的空间变化结果相符,只是总的变化趋势反映不出东部的东北西部、华北北部地区在第二时段降水增加的过程。

## 5 结论

(1) 近 52 a 来,工程区气温呈显著增加趋势,多年增温速率为 $0.346\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 。防护林建设前为偏冷期,第二时段,区域的气温逐步升高,第三时段为显著偏暖期,其中 1998 年达到多年最高值。区域气温距平在三个时段表现出普遍低温—高温区增多—普遍高温的变化规律。另外区域的高低温区发生明显的迁移,高温区由黄土高原、塔里木盆地、华北平原北部迁移到第二时段的黑龙江、吉林、北疆阿勒泰地区,再到第三时段的内蒙古及柴达木盆地。线性增温趋势大致表现出南北差异,显著区主要集中在柴达木盆地、内蒙古高原、黑龙江松嫩平原、吉林西部平原。另外第一时段距平分布图与气温倾向图呈现出低值区增温速率最大,高值区域增温速率最小的对应变化趋势。综合气温各时段距平及倾向率变化,可以看出三北防护林区在全球变化的背景下,区域响应仍是以变暖趋势为主,但是三北防护林的工程的建设实施,可能在局部地区起到了减缓这种趋势的作用。其中河北、吉林、辽宁、内蒙、陕西、山西、黑龙江省,均由建设初期的升温趋势变为降温趋势。河北、辽宁、陕西、山

西、甘肃、新疆等建设初期的高温中心增温趋势较为缓慢的现象,说明这几个省区的三北防护林工程对其气温增暖起到了一定的抑制作用。

(2) 多年来区域降水量呈下降趋势,下降速率为 $-3.5\text{ mm}/10\text{ a}$ 。其时段性特征建设前偏少,建设初期有所增加,但是 1996 年后又有明显减少趋势。区域降水量距平,在三个时段发生了显著的空间变化。第一时段东部地区普遍降水较常年平均值高。第二时段,工程区大部分地区降水成正距平,高值区仍然位于东部。第三时段工程区西部降水较东部丰沛,降水增距平区均位于西部。降水的高值区,由工程区中部的黄土高原、华北平原北部向上转移到东北地区北部,再转移到西部地区。各时段降水量均有正负距平站点,这与气温距平的显著变化不同,表现出了降水变化的复杂性,可能是因为与降水受更多的因素影响有关。降水的倾向率分布,表现为明显的东西差异,东部地区降水普遍减少,西部大部分地区降水均在增加,黑龙江松嫩平原、内蒙古阴山山地也是显著的增加区。综合降水距平及倾向率分布,降水整体减少,而三北防护林的建设只是在局部地区起到了减缓这种趋势的作用。

(3) 综合气温及降水变化,52 a 来工程区总体暖干化趋势增加,其中气温变化以南北分布差异为主,而降水变化的东西差异变化更为显著。增暖显著区主要位于工程区北部高纬区,降水增加区则主要集中在工程区西部。可以判断出,多年来在西部以北疆阿勒泰地区、柴达木盆地暖湿化趋势最为明显,西部其余地区则表现为微弱的暖湿化。在东部,内蒙古阴山地区及河套平原地区、黑龙江松嫩平原、有暖湿化趋势,内蒙古呼伦贝尔草原、大兴安岭山区、辽嫩平原均呈明显暖干化趋势。黄土高原、华北北部地区、吉林、辽宁则为微弱的暖干化趋势。

(4) 一个地区的气候变化,是由自然气候波动和人类活动的影响两类因素造成的<sup>[27]</sup>。就工程区的气候变化而言,三北防护林的建设对工程区小区域的气候变化起到了一定的改善作用<sup>[17-19]</sup>,但并没有改变区域长期的气候变化趋势。多年来,东部大部呈暖干化趋势,西部地区虽然为暖湿化趋势,但由于西部地区年降水总量较少<sup>[11-12]</sup>,这种变化并不能改善工程区西部干旱的气候特征。工程区整体气候的发展趋势,将会限制防护林工程的实施。因此,继续深入研究工程区气候变化规律,制定适应气候变化的工程建设策略,对改善区域生态环境显得很有必要。

[参 考 文 献]

- [1] 姜凤岐,于占源,曾德慧,等.气候变化对三北防护林的影响与应对策略[J].生态学杂志,2009,28(9):1702-1705.
- [2] IPCC. Summary for Policymakers of Climate Change 2007: The Physical Science Basis Contribution of Working Group 1 to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [3] Jones P D. The influence of ENSO on global temperatures[J]. Climate Monitor, 1988,17(3):80-89.
- [4] 施雅风.全球和中国变暖特征及未来趋势[J].自然灾害学报,1996,5(2):5-14.
- [5] 王绍武.近百年气候变化与变率的诊断研究[J].气象学报,1994,52(3):261-273.
- [6] 沙万英,邵雪梅,黄玫.20世纪80年代以来中国的气候变暖及其对自然区域界线的影响[J].中国科学(D辑):地球科学,2002,32(4):317-326.
- [7] 李宗省,何元庆,辛惠娟,等.我国横断山区1960—2008年气温和降水时空变化特征[J].地理学报,2010,65(5):563-579.
- [8] 任国玉,初子莹,周雅清,等.中国气温变化研究最新进展[J].气候与环境研究,2005,10(4):701-716.
- [9] 李庆祥,李伟,鞠晓慧.1998年以来中国气温持续极端偏暖的事实[J].科技导报,2006,24(4):37-40.
- [10] 秦大河,罗勇,陈振林,等.气候变化科学的最新进展:IPCC第四次评估综合报告解析[J].气候变化研究进展,2007,3(6):311-314.
- [11] 叶柏生,李翀,杨大庆,等.我国过去50a来降水变化趋势及其对水资源的影响(I):年系列[J].冰川冻土,2004,26(5):587-594.
- [12] 姚惠明,吴永祥,关铁生.中国降水演变趋势诊断及新事实[J].水科学进展,2013,24(1):1-10.
- [13] 丁一汇,戴晓苏.中国近百年来温度变化[J].气象,1994,20(12):19-26.
- [14] 郭志梅,缪启龙,李雄.中国北方地区近50年来气温变化特征的研究[J].地理科学,2005,25(4):66-72.
- [15] 王菱,谢贤群,李运生,等.中国北方地区40年来湿润指数和气候干湿带界线的变化[J].地理研究,2004,23(1):45-54.
- [16] 张雪芹,孙杨,郑度,等.中国干旱区温度带界线对气候变暖的响应[J].地理学报,2011,66(9):1166-1178.
- [17] 代力民,王宪礼,王金锡.三北防护林生态效益评价要素分析[J].世界林业研究,2000,13(2):47-51.
- [18] 钟中,王汉杰.三北防护林体系建设前后华北春季生态环境对比[J].气象,2001,27(9):13-17.
- [19] 陈炳浩,郝玉光,陈永富.乌兰布和沙区区域性防护林体系气候生态效益评价的研究[J].林业科学研究,2003,16(1):63-68.
- [20] 王晓慧,陈永富,陈尔学,等.基于遥感和GIS的三北防护林工程生态效益评价研究:以山西省中阳县为例[J].水土保持通报,2011,31(5):171-175.
- [21] 赵国藏.近40年来三北地区的温湿变化[J].气象学报,1992,50(3):383-384.
- [22] 王强.三北防护林工程区植被覆盖变化特征及其对气候变化的响应研究[D].兰州:西北师范大学,2012.
- [23] 林业部三北防护林建设局.中国三北防护林体系建设[M].北京:中国林业出版社,1992:1-3.
- [24] 朱俊凤.“三北”防护林地区自然资源与综合农业区划[M].北京:中国林业出版社,1985:3-6.
- [25] 申元村,张妙弟.我国“三北”防护林地区土地资源特点及防护林体系合理布局的探讨[J].自然资源,1993,15(5):21-27.
- [26] 姜凤岐,于占源,曾德慧,等.气候变化对三北防护林的影响与应对策略[J].生态学杂志,2009,28(9):1702-1705.
- [27] 白爱娟,翟盘茂.中国近百年气候变化的自然原因讨论[J].气象科学,2007,27(5):584-590.