

近30 a小兴安岭林区及周边区域的气候变化特征分析

王爱香¹ 潘蔷² 石磊¹

(1 伊春市气象局, 伊春 153000; 2 哈尔滨市公共气象服务中心, 哈尔滨 150028)

摘要: 利用小兴安岭5个测站和黑龙江省内周边6个地级市所在地气象站及与伊春站同纬度2个县级气象站1985—2014年30 a历史资料, 统计近30 a小兴安岭林区及周边区域的气候要素。通过对4类气象要素的时间上纵向及空间上横向的对比分析, 得出小兴安岭地区及周边区域气候变化的不同特征。这种不同体现在: 天然林保护工程实施后, 小兴安岭年平均气温下降0.23 °C, 周边6地市下降0.06 °C, 小兴安岭气温下降幅度大于周边6地市; 小兴安岭年平均降水量增加12.4%, 周边6地市增加10.1%, 小兴安岭降水增加幅度大于周边6地市; 小兴安岭年平均风速减少0.40 m/s, 周边6地市减少0.59 m/s, 小兴安岭风速减小幅度小于周边6地市; 小兴安岭年日照时数减少88.8 h, 与周边6地市减少幅度相同。

关键词: 小兴安岭, 周边区域, 气候变化, 气象要素

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2022.04.009

Analysis of Climate Change Characteristics in the Last 30 Years in the Xiaoxing'an Mountains Forest area and Its Surrounding Areas

Wang Aixiang¹, Pan Qiang², Shi Lei¹

(1 Yichun Meteorological Bureau, Yichun 153000 2 Harbin Meteorological Service Center, Harbin 150028)

Abstract: Using the historical data of 1985–2014 from five stations in Xiaoxing'an Mountains, six stations in six prefecture-level cities around Xiaoxing'an Mountains and two county-level stations at the same latitude as Yichun Station, the climatic factors of Xiaoxing'an Mountains forest area and its surrounding area in recent 30 years were analyzed. Based on the comparison and analysis of the four types of meteorological elements, the different features of climate change in Xiaoxing'an Mountains and its surrounding areas were obtained. The differences are reflected in the following: After the implementation of the natural forest protection project, 0.23 °C the annual average temperature decrease in Xiaoxing'an Mountains, which was 0.23 °C, was stronger than that in its surrounding six cities, which was 0.06 °C; the annual average precipitation increase in Xiaoxing'an Mountains was more significant than that in its surrounding six cities, with the two figures as 12.4% and 10.1%, respectively; the decrease of annual average wind speed in Xiaoxing'an Mountains, which was 0.40 m/s, was lower than that in its surrounding six cities, which was 0.59 m/s; and the annual sunshine hours in Xiaoxing'an Mountains have decreased by 88.8 hours, the same as that in the surrounding six cities.

Keywords: Xiaoxing'an Mountains, peripheral area, climate change, meteorological element

森林作为陆地生态系统的主体, 为人类和生物提供赖以生存的物质基础^[1], 同时也是连接大气、土壤之间的自然“纽带”^[2-3]。作为全球气候系统的重要组成部分, 森林的生长和分布受气温、降水等诸多气候因素的影响^[4-6]; 同时, 森林通过自身的光合作用和呼吸作用调节着大气中CO₂浓度, 影响着森林与大气间碳的交换^[7], 进而调节气候变暖的速率^[8]。总之, 森林在全球气候变化中起到“指示剂”的作用^[2,9], 对生态

系统功能评价、调节气—地间碳、水、能量交换, 涵养水源, 保护生态系统多样性等诸多方面有着至关重要的作用^[10-13]。

小兴安岭, 纵贯黑龙江省中北部, 西北以嫩江为界与大兴安岭相连, 东部连接三江平原, 东南与张广才岭相接, 西南与松嫩平原毗连。南北长约450 km, 东西宽约210 km, 面积77725 km²。小兴安岭蕴含着丰富的森林资源, 是维护我国粮食安全、生态安全的重要屏障。小兴安岭是我国地处寒温带的生态功能区, 对维持生态平衡, 保障区域生态安全发挥着极其重要的作用。1985—2004年正是小兴安岭森林资源采伐殆尽,

收稿日期: 2021年5月6日; 修回日期: 2021年10月19日
第一作者: 王爱香(1967—), Email: kingax@126.com

生态系统遭受严重破坏的20年^[14]。1998年开始实施以减少采伐、封山育林为主要措施的小兴安岭的天然林保护工程(以下称天保工程),到目前为止已实施20多年,2004年全面停止采伐,森林资源得到休养生息,森林覆盖率逐步提高,这项工作对生态环境的保护作用已经初见成效。那么已经得到恢复的森林生态系统对于气候的调节和反馈在气候上是否有相应的数据支持呢?通过对气象数据进行时间纵向对比分析,从中得出小兴安岭地区天保工程前后的气候变化情况,再对非天保工程地区6个地市测站气象数据与天保工程地区相同时期气象数据进行空间横向对比分析,从时间和空间两个维度,揭示天保工程区域与非天保工程区域天保工程前后的气候变化特征。

1 资料和方法

1.1 气象数据及分析方法

1.1.1 气象数据

利用黑龙江省气象服务支撑系统获取气象资料,包括:小兴安岭地区所辖5个气象站(伊春、嘉荫、乌伊岭、五营、铁力),周边6个地市(哈尔滨、黑河、牡丹江、齐齐哈尔、绥化、双鸭山)所在地气象站,同纬度2个非天保工程区域的气象站(甘南、饶河)。时间序列采用1985—2014年共30 a的历史资料。

1.1.2 分析方法

按照不同的森林采伐状态分为三个阶段:过度采伐时段(1985—1994年)、轻采伐时段(1995—2004年)和禁止采伐时段(2005—2014年),统计温度、降水、风、日照4个气象要素,对数据进行列表、折线图分析,首先得出时间上三个时段小兴安岭天保工程区域气象要素的分布特征。然后,选取周边非天保工程区域6个测站,与小兴安岭天保工程区域进行空间对比分析,得出两个不同区域在天保工程实施前后的气象数据的变化情况。最后,选取东、西同纬度两个非天保工程区域的饶河气象站(隶属双鸭山市)和甘南(隶属齐齐哈尔市)与天保工程中心区域伊春气象站的数据进行对比,找出同纬度天保工程区域与非天保工程区域在气候上的变化差异(图1)。

为了比较某气象要素三个时段间是否存在差异及差异是否显著,利用Excel工具菜单中数据分析模块进行差异性检验,判断某两个时段间某气象要素是否存在显著性差异。方法是:在Excel菜单栏数据分析菜单下选择方差分析中的无重复双因素分析,将需要分析的两组数据选入输入区域,设置输出区域,确定后即可得到分析结果,比较F、F crit值的大小,结合P-value,判断两组数据间差异是否显著。如果F大

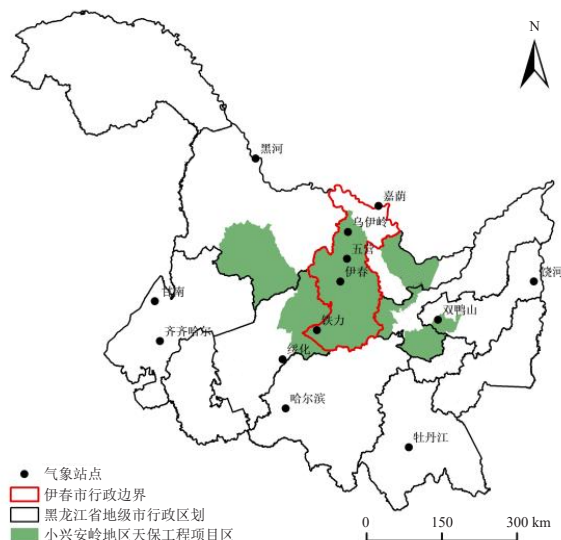


图1 天保工程实施区域(绿色)及相关气象站点分布图(图中红线内为天保区域内5个测站(伊春、嘉荫、乌伊岭、五营、铁力)所在区域;图中周边站点包括黑河、齐齐哈尔、绥化、哈尔滨、牡丹江、双鸭山6个测站;同纬度两个测站是齐齐哈尔的甘南和双鸭山的饶河)

Fig. 1 Distribution of the implementation areas and meteorological stations of the natural forest protection project (Five stations (Yichun, Jiameng, Wuyiling, Wuying and Tieli) of the natural forest protection area are located within the red lines. The six stations in the surround areas are located in Heihe, Qiqihar, Suihua, Harbin, Mudanjiang, and Shuangyashan. The two stations at the same latitude as Yichun Station are Gannan Station of Qiqihar and Raohe Station of Shuangyashan)

于F crit, 对比出有差异,再结合P-value值,若 $0.01 < P\text{-value} < 0.05$,表示差异显著;若 $P\text{-value} < 0.01$,则表示差异极显著。如果 $F < F\text{ crit}$ 且 $P\text{-value} > 0.05$,则表示两组数据无差异。

1.2 森林、植被数据

通过国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据共享服务平台——东北黑土科学数据中心(<http://northeast.geodata.cn>)获取1980年、1990年、2000年和2010年小兴安岭所辖林区的植被覆盖面积,分别代表天保工程前后的森林、植被情况。

天保工程前,1980年植被面积 $2.76 \times 10^4 \text{ km}^2$,经过采伐,1990年植被面积减少到 $2.64 \times 10^4 \text{ km}^2$,减少了4.3%,1998年天保工程实施后,2000年植被面积增加到 $2.67 \times 10^4 \text{ km}^2$,全面停止采伐后,2010年增加到 $2.71 \times 10^4 \text{ km}^2$,可见,天保工程实施后,小兴安岭森林、植被覆盖面积得到了增长^[15]。

2 天保工程前后小兴安岭气候变化特征

研究气候变化,既要研究自然变化,也要研究人类活动对气候的影响。过度采伐和天保工程都属于人

类活动,必然对气候变化产生影响^[16]。通过研究30 a小兴安岭地区的平均温度、平均降水量、平均风速、平均日照时数这四个主要气象要素的变化,得到小兴安岭天保工程前后气候变化特征。

将1985—2014年分为三个阶段,分别是轻采伐时段(1985—1994年)、过度采伐时段(1995—2004年)、停止采伐时段(2005—2014年),分别对三个时段及30 a小兴安岭5个气象站(嘉荫、乌伊岭、五营、伊春、铁力)的平均气温、平均降水量、平均风速、年平均日照时数进行统计分析,结果见表1。

表1 1985—2014年及轻采伐、过度采伐、停止采伐各时段温度、降水量、风速、日照时数统计

Table 1 Statistics of temperature, precipitation, wind speed and sunshine hours in the years of light cutting, excessive cutting and no cutting from 1985 to 2014

时间段	1985—1994年	1995—2004年	2005—2014年	1985—2014年
平均气温/℃	0.90	1.37	1.14	1.14
平均降水量/mm	636.7	563.8	633.6	611.4
平均风速/m·s ⁻¹	2.34	2.28	1.88	2.18
年平均日照时数/h	2320.8	2426.3	2337.5	2361.5

2.1 平均气温

分析地处小兴安岭的5个气象站1985—2014年30 a的年平均气温(图2),小兴安岭30 a平均气温1.14℃。过度采伐时段(1995—2004年)平均气温比轻采伐时段(1985—1994年)平均气温升高0.47℃;停止采伐时段(2005—2014年)平均气温比过度采伐时段(1995—2004年)平均气温低0.23℃。2009—2014年平均气温均在30 a平均值以下。

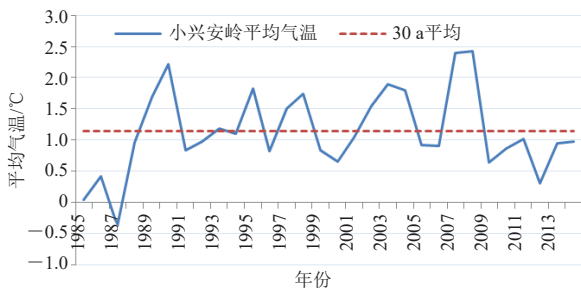


图2 小兴安岭1985—2014年逐年平均气温

Fig. 2 Annual mean temperature in Xiaoxing'an Mountains from 1985 to 2014

为了研究过度采伐时段(1995—2004年)与停止采伐时段(2005—2014年)两个时段小兴安岭气温是否有明显的变化,对两组温度数据进行了差异性分析(表2)。

其中, $F < F_{crit}$ 且 $P\text{-value} > 0.05$,说明两组数据无差异,没有通过0.05的显著性检验。说明两个年代平均气温组间无差异。

表2 过度采伐、停止采伐两个时段温度差异性检验

Table 2 Temperature difference test in the two periods of excessive cutting and no cutting

差异源	SS	df	MS	F	P-value	F crit
行	0.25992	1	0.25992	0.978582	0.348397	5.117355
列	4.10272	9	0.455858	1.716275	0.216665	3.178893
误差	2.39048	9	0.265609			
总计	6.75312	19				

2.2 平均降水量

通过分析小兴安岭5个测站30 a年降水量的逐年变化(图3),1997年天保工程实施以前,年降水量在平均值上下跳跃,而1998年天保工程后,年降水量多在平均值以下,到2009年后又呈现高于平均值的态势。具体变化情况是:停止采伐时段(2005—2014年)小兴安岭5个气象站平均降水量比过度采伐时段(1995—2004年)降水量多69.8 mm,多12.4%;停止采伐时段(2005—2014年)平均降水量比30 a的平均降水量多22.2 mm,多出3.6%。过度采伐时段(1995—2004年)平均降水量只有563.8 mm,比30 a平均降水量少47.6 mm,少7.8%。

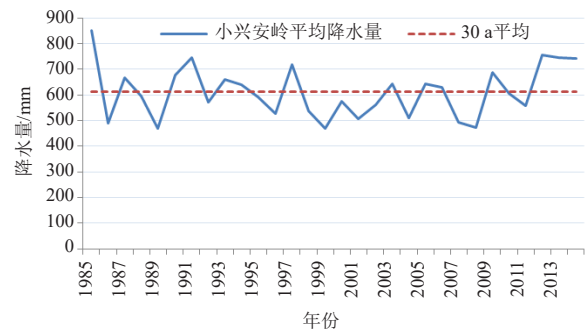


图3 小兴安岭5个测站1985—2014年逐年平均降水量

Fig. 3 Annual average precipitation from five stations in Xiaoxing'an Mountains from 1985 to 2014

同样,对过度采伐时段(1995—2004年)与停止采伐时段(2005—2014年)两组各10 a降水量数据进行差异性分析。 F 值3.069691, F_{crit} 值4.413873, $P\text{-value}$ 值0.096783,可见, $F < F_{crit}$ 且 $P\text{-value} > 0.05$,两组数据无差异,没有通过0.05的显著性检验。说明两个年代的降水量组间无差异。

2.3 平均风速

空气的流动产生风。在高空中,气流受到的摩擦小,风速大;而在地面上,受地表摩擦的影响,风速减小。森林作为地表植被,其增大了地表摩擦力,风入森林后,由于摩擦和阻挡作用,风速很快减小,森林附近风速也比空旷地区小^[17]。森林对减少风灾、固化土壤、防风沙起到了积极的作用^[18]。表1中数据表

明: 停止采伐时段(2005—2014年)小兴安岭的平均风速比过度采伐时段(1995—2004年)、轻采伐时段(1985—1994年)及全部30 a(1985—2014年)的平均风速小14%~23%不等。

分析小兴安岭5个测站1985—2014年年平均风速逐年变化情况, 1985—1999年, 年平均风速大多大于30 a平均值, 2000—2005年, 年平均风速在平均值左右, 2006—2014年年平均风速大多低于30 a平均值。平均风速呈现逐年下降的趋势。天保工程前后相比, 平均风速下降0.40 m/s。天保工程后禁伐年代平均风速在三个年代中最小。

过度采伐时段(1995—2004年)与停止采伐时段(2005—2014年)两组各10 a年平均风速数据进行差异性分析。F值9.990825688, F crit值5.117355, P-value值0.011535, 可见 $F > F_{crit}$ 且 $0.01 < P\text{-value} < 0.05$, 两组数据有差异, 通过了0.05显著性检验。两个年代的平均风速组间差异显著。

2.4 日照时数

日照时数的多少, 反映的是天空云量的多少, 云量多, 日照少, 反之, 云量少, 日照多。森林在此关系中的作用主要是林木的蒸腾作用产生水汽, 水汽扩散到空中, 增加了云形成过程中需要的水分, 从而使云量增加。分析小兴安岭5个测站1985—2014年日照时数逐年变化情况, 30 a中, 1985—1992年, 日照时数处于较少阶段, 1993—1999年日照时数正常, 2000—2008年日照时数较多, 2009—2014年日照时数降至平均值以下, 呈现少—多—少的态势。从天保工程前后对比看, 停止采伐时段(2005—2014年)年平均日照时数比过度采伐时段(1995—2004年)少88.8 h, 相当于每天少0.24 h的日照。

对过度采伐时段(1995—2004年)与停止采伐时段(2005—2014年)各10 a逐年日照时数进行差异性分析。F值15.14740184, F crit值5.117355, P-value值0.003664, 可见 $F > F_{crit}$, $P\text{-value} < 0.01$, 两组数据有差异, 通过0.01显著性检验, 两个年代的日照时数组间差异极显著。

3 天保工程区域与非天保工程区域气候变化对比

单纯研究某地的气候变化, 使用不同时期的温度和降水等气候要素的统计量的差异来反映就可以了, 但是, 要研究这种变化与人类活动的相关性, 就必须对某一具体的人类活动的影响存在与否进行空间对比分析, 才能得出此种人类活动是否和气候变化具有相关性。针对本研究而言, 在研究天然林保护工程对气

候变化的影响过程中, 不仅要研究小兴安岭气候的时间序列变化, 还要与非林业区域(没有进行天然林保护工程)进行对比分析, 进而在剔除气候自然变率的情况下, 分析小兴安岭天保工程区域与周边非天保工程区域气候变化的特征。

选取哈尔滨、黑河、牡丹江、齐齐哈尔、绥化、双鸭山6个非天保工程区域测站与小兴安岭进行对比分析。测站分布见图1。

3.1 温度空间对比分析

研究表明, 森林内气温变化和缓, 白天林内阳光弱, 树木蒸腾耗热, 导致森林内温度低于森林外, 而这种低温状态的常年累积, 对整个林区的温度降低是有贡献的^[19]。整体上看, 1985—2014年小兴安岭平均气温比周边6地市平均气温低2.2 °C, 小兴安岭三个年代的平均气温分别是0.90 °C、1.37 °C、1.14 °C, 从过度采伐年代到禁伐年代平均气温下降0.23 °C; 同时期, 6个周边区域三个年代的平均气温分别是3.01 °C、3.60 °C、3.54 °C, 从过度采伐年代到禁伐年代平均气温下降0.06 °C。可见, 天保工程前后小兴安岭气温下降幅度远大于周边区域(图4)。

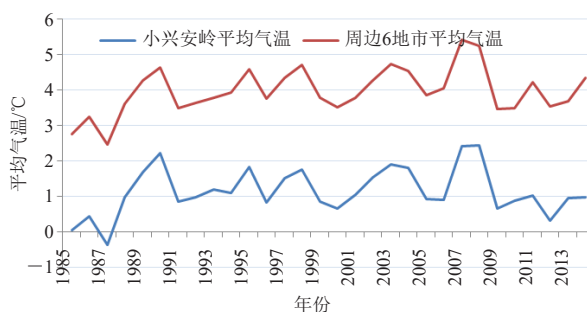


图4 小兴安岭5个测站与周边6地市逐年平均气温变化
Fig. 4 Comparison of annual average temperature between Xiaoxing'an Mountains and the surrounding six cities

3.2 降水空间对比分析

对小兴安岭天保区和周边6个非天保区1985—2014年平均降水量统计分析(图5), 小兴安岭降水量比6地市降水量多81.6 mm, 多15.4%。从天保前后对比看, 6地市的平均降水量, 过度采伐的10 a(1995—2004年)比轻采伐时段(1985—1994年)减少68.2 mm, 减少12.2%, 同期小兴安岭减少72.9 mm, 减少11.4%。6地市的平均降水量在停止采伐的10 a(2005—2014年)比过度采伐时段(1995—2004年)增加49.7 mm, 增加10.1%, 而小兴安岭同期增加69.8 mm, 增加12.4%。小兴安岭降水量比6地市同期多增加2.3个百分点。小兴安岭和6地市降水量在天保工程后同时增加, 说明天保工程后这10 a处在多水气候背景中, 但是天

保工程也起到了一定的作用。

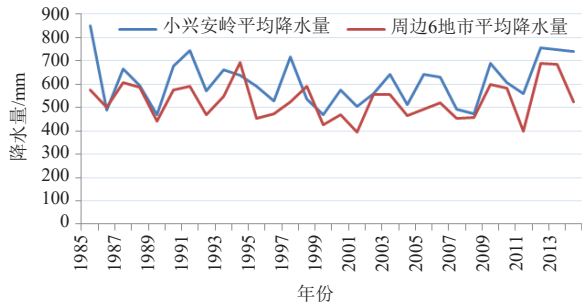


图5 小兴安岭5个测站与周边6地市逐年平均降水量变化
Fig. 5 Comparison of annual average precipitation between Xiaoxing'an Mountains and the surrounding six cities

3.3 平均风速空间对比分析

对小兴安岭天保区和周边6个非天保区1985—2014年平均风速统计分析(图6),小兴安岭的平均风速比6地市平均风速小0.5 m/s。逐年变化看,小兴安岭和周边6地市平均风速均为下降趋势;从天保工程前后看,禁止采伐这10 a比过度采伐10 a平均风速,小兴安岭下降0.40 m/s,6地市平均下降0.59 m/s。

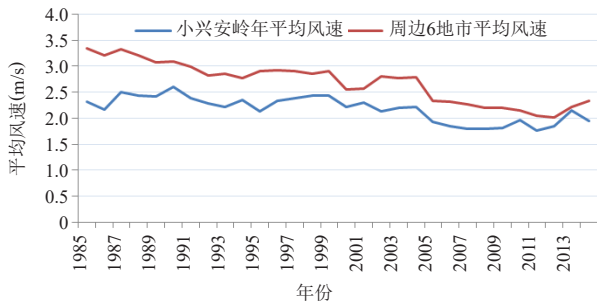


图6 小兴安岭5个测站与周边6地市逐年平均风速变化
Fig. 6 Comparisons of annual average wind speed between Xiaoxing'an Mountains and the surrounding six cities

3.4 日照时数空间对比分析

对小兴安岭天保区和周边6个非天保区1985—2014年日照时数统计分析(图7),30 a平均年日照时数,小兴安岭比6地市少189.5 h,少7.4%;天保工程前

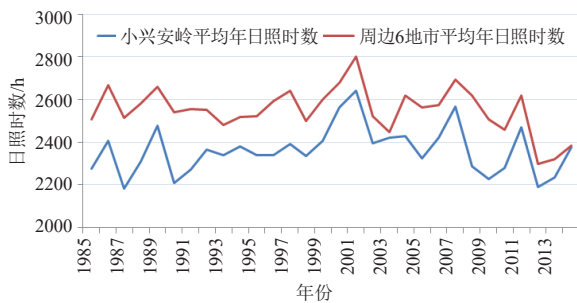


图7 小兴安岭5个测站与周边6地市逐年日照时数变化
Fig. 7 Comparison of annual sunshine hours between Xiaoxing'an Mountains and its surrounding six cities

后相比,6地市日照时数减少和小兴安岭日照时数减少相同,均为88.8 h,减少3.5%。

4 天保工程前后,同纬度气象数据对比

选取与伊春站(天保工程代表站)近似同纬度的非天保工程区域的甘南站(位于齐齐哈尔市北部)和饶河站(位于双鸭山市东北部)气象站数据,与伊春站进行对比(表3),天保工程这10 a甘南温度下降0.15 °C,伊春温度下降0.04 °C,饶河温度上升0.15 °C;降水情况是:伊春、甘南、饶河降水量均是增加的,伊春增加幅度11.4%,甘南8.3%,饶河10.7%,伊春增加幅度最大,甘南最小;风速上看,伊春、甘南、饶河均减小,伊春减小幅度18.5%,甘南22.8%,饶河23.4%,甘南和饶河减少幅度大于伊春;日照时数,天保工程10 a,甘南、饶河日照时数是增加的,分别增加2.8%和2.0%,伊春日照时数减少,减少了12.1%。

表3 同纬度三站各时段温度、降水量、风速、日照时数对比
Table 3 Comparison of decadal variation of temperature, precipitation, wind speed and sunshine duration from the three stations at the same latitude

物理量	站名	1985—1994	1995—2004	2005—2014	变化
平均气温/°C	伊春	1.55	1.83	1.79	-0.04
	甘南	3.73	4.40	4.25	-0.15
	饶河	2.68	3.01	3.16	0.15
平均降水量/mm	伊春	677.63	589.07	656.1	11.4%
	甘南	495.84	437.37	473.53	8.3%
	饶河	568.95	546.74	605.26	10.7%
平均风速/m·s ⁻¹	伊春	2.138	1.972	1.607	-0.365
	甘南	3.401	3.252	2.512	-0.74
	饶河	3.039	3.008	2.303	-0.705
年平均日照时数/h	伊春	2317.77	2491.19	2189.91	-301.28
	甘南	2774.49	2865.57	2946.62	81.05
	饶河	2283.72	2391.82	2438.5	46.68

5 结论

通过对小兴安岭天保工程区域所辖5个气象站、周边非天保工程区域6个地市气象站、同纬度两个非天保工程区域气象站1985—2014年30 a的温度、降水、风速、日照时数四个气象要素的分析,得到以下结论:

1) 天保工程后10 a比天保工程前10 a小兴安岭平均气温降低0.23 °C,平均降水量增加12.4%,平均风速减小0.40 m/s,日照时数减小3.5%。

2) 同纬度天保工程区域和非天保工程区域对比分析,天保工程后10 a与过度采伐10 a相比较,两类区域在温度、降水、风速指标变化上存在差异,表明天保工程区域和非天保工程区域间存在人类活动影响强度

的差异, 这些差异影响这些区域气候要素的时间变化特征, 但这些差异可能不只是某一类站点实施了天保工程引起的。

参考文献:

- [1] 蒋延玲, 周广胜. 中国主要森林生态系统公益的评估. 植物生态学报, 1999, 23(5): 3-5.
- [2] 孙红雨, 王长耀, 牛铮, 等. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系——基于NOAA时间序列数据分析. 遥感学报, 1998, 2(3): 3-5.
- [3] 张蓓蓓, 蔡宏, 田鹏举, 等. 2000—2017年贵州省植被覆盖时空变化特征及其对气候变化的响应. 地球与环境, 2020, 48(4): 461-470.
- [4] 穆少杰, 李建龙, 陈奕兆, 等. 2001—2010年内蒙古植被覆盖度时空变化特征. 地理学报, 2012, 67(9): 1255-1268.
- [5] 王刘明. 气候变化和人类活动对洮河流域植被水分利用效率的影响研究. 兰州: 兰州大学, 2019.
- [6] 孙龙, 王千雪, 魏书精, 等. 气候变化背景下我国森林火灾灾害的响应特征及展望. 灾害学, 2014, 29(1): 12-17.
- [7] 李小梅, 张秋良. 环境因子对兴安落叶松林生态系统CO₂通量的影响. 北京林业大学学报, 2015, 37(8): 31-39.
- [8] 徐雨晴, 肖风劲, 於琨. 中国森林生态系统净初级生产力时空分布及其对气候变化的响应研究综述. 生态学报, 2020, 40(14): 4710-4723.
- [9] 王军邦, 陶健, 李贵才, 等. 内蒙古中部MODIS植被动态监测分析. 地球信息科学学报, 2010, 12(6): 835-842.
- [10] 刘奕汝, 吴强. 森林生态系统服务功能价值计量述评. 林业经济, 2018, 40(10): 100-103.
- [11] Gaumont-Guay D, Black T A, Barr A G, et al. Eight years of forest-floor CO₂ exchange in a boreal black spruce forest: Spatial integration and long-term temporal trends. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, 184: 25-35.
- [12] 张佳楠, 张建军, 张海博, 等. 晋西黄土区典型林分水源涵养能力评价. 北京林业大学学报, 2019, 41(8): 105-114.
- [13] 刘林馨. 小兴安岭森林生态系统植物多样性及生态服务功能价值研究. 哈尔滨: 东北林业大学, 2012.
- [14] 李俊枝. 森林生态功能区适应性管理研究. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.
- [15] 葛绪忠. 实施“天保工程”使美溪林业局森林资源获得显著增长. 黑龙江科技信息, 2015, (8): 187.
- [16] 张妍. 采伐干扰对温带小兴安岭森林湿地碳源/汇影响. 哈尔滨: 东北林业大学, 2016.
- [17] 程肖侠, 延晓冬. 气候变化对中国大兴安岭森林演替动态的影响. 生态学杂志, 2007, 169(8): 1277-1284.
- [18] 韩文堂, 陈学刚, 孙蓓花. 乌鲁木齐城市化进程对局地气候变化的影响研究. 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(6): 54-58.
- [19] 刘学进. 重新认识大小兴安岭森林生态系统在应对全球气候变暖中的作用. 中国环境科学学会. 2013中国环境科学学会学术年会论文集(第六卷). 北京: 中国环境科学学会, 2013.
- [38] Zhao J, Olivas P C, Sujit K, et al. Comparison of sensible heat flux measured by large aperture scintillometer and eddy covariance in a seasonally-inundated wetland. Agricultural and Forest Meteorology, 2018, 259: 345-354.
- [39] Lagouarde J P, Irvine M, Bonnefond J M, et al. Monitoring the Sensible Heat Flux over Urban Areas using Large Aperture Scintillometry: Case Study of Marseille City During the Escompte Experiment. Boundary-Layer Meteorology, 2006, 118(3): 449-476.
- [40] Asanuma J, Iemoto K. Measurements of regional sensible heat flux over Mongolian grassland using large aperture scintillometer. Journal of Hydrology, 2007, 333(1): 58-67.
- [41] Wieringa, J. An objective exposure correction method for average wind speeds measured at a sheltered location. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1976, 102(431), 241-253.
- [42] 卢俐, 刘绍民, 徐自为, 等. 大孔径闪烁仪和涡动相关仪观测显热通量之间的尺度关系. 地球科学进展, 2010, 25(11): 1273-1282.
- [43] 官丽娟, 刘绍民, 双喜, 等. 涡动相关仪和大孔径闪烁仪观测通量的空间代表性. 高原气象, 2009, 28(2): 246-257.
- [44] 彭谷亮, 蔡旭晖, 刘绍民. 大孔径闪烁仪湍流通量印痕模型的建立与应用. 北京大学学报(自然科学版), 2007, 43(6): 822-827.
- [45] 彭谷亮, 刘绍民, 蔡旭晖, 等. 非均匀下垫面湍流通量观测的印痕分析. 大气科学, 2008, 32(5): 1064-1070.
- [46] 郑宁, 张劲松, 孟平, 等. 基于闪烁仪观测低丘山地人工混交林通量印痕与源区分布. 地球科学进展, 2010, 25(11): 1175-1186.
- [47] 黄天宇, 王冠丽, 李东方, 等. 科尔沁沙地沙丘——草甸梯级生态系统不同气象条件下气候学足迹特征. 干旱区研究, 2019, (5): 1127-1135.
- [48] Kohsiek W, Meijninger W M L, De Bruin H A R, et al. Saturation of the Large Aperture Scintillometer. Boundary-Layer Meteorology, 2006, 121(1): 111-126.
- [49] Kleissl J, Hartogensis O K, Gomez J D. Test of Scintillometer Saturation Correction Methods Using Field Experimental Data. Boundary-Layer Meteorology, 2010, 137(3): 493-507.
- [50] Ochs G R, Wilson J J. A Second-generation Large Aperture Scintillometer. NOAA Tech Memor, ERL ETL-232, 1993: 24.
- [51] 王维真, 徐自为, 刘绍民, 等. 黑河流域不同下垫面水热通量特征分析. 地球科学进展, 2009, 24(7): 714-723.
- [52] 卢俐, 刘绍民, 徐自为, 等. 不同下垫面大孔径闪烁仪观测数据处理与分析. 应用气象学报, 2009, 20(2): 171-178.
- [53] 白洁, 刘绍民, 丁晓萍, 等. 大孔径闪烁仪观测数据的处理方法研究. 地球科学进展, 2010, 25(11): 1148-1165.
- [54] 张功, 张劲松, 施生锦, 等. ZLLAS型闪烁仪信号饱和和界限的确定. 中国农业气象, 2017, 38(7): 426-434.
- [55] 张功, 张劲松, 施生锦, 等. 饱和修正系数提高ZLLAS型闪烁仪测量显热通量精度. 农业工程学报, 2018, 34(14): 52-60.
- [56] 朱治林, 孙晓敏, 贾媛媛, 等. 基于大孔径闪烁仪(LAS)测定农田显热通量的不确定性分析. 地球科学进展, 2010, 25(11): 1199-1207.
- [57] 郝小翠, 张强, 杨泽粟. 陇中黄土高原垂直感热平流输送对LAS和EC观测感热通量差异的影响. 中国沙漠, 2015, 35(1): 211-219.
- [58] 郝小翠, 张强, 杨泽粟. 陇东黄土高原下垫面不均匀性指标的建立及其对大孔径闪烁仪(LAS)观测感热通量的影响. 地球物理学报, 2016, 59(3): 816-827.
- [59] 徐安伦, 李建, 彭浩, 等. 洱海湖滨农田下垫面大口径闪烁仪与涡动相关仪测量的湍流热通量对比分析. 高原气象, 2017, 36(1): 98-106.
- [60] 王亮, 胡凝, 王咏薇, 等. 南京地区大口径闪烁仪与涡动相关仪感热通量观测对比. 生态学杂志, 2020, 39(1): 315-325.
- [61] 张荣华, 杜君平, 孙睿. 区域蒸散发遥感估算方法及验证综述. 地球科学进展, 2012, 27(12): 1295-1307.
- [62] 黄彬香. 北方典型草原湍流运动特征及湍流通量测定方法研究. 北京: 中国农业大学, 2014.
- [63] 王介民, 王维真, 刘绍民, 等. 近地层能量平衡闭合问题——综述及个例分析. 地球科学进展, 2009, 24(7): 705-713.
- [64] Lee S-H. Determination of Turbulent Sensible Heat Flux over a Coastal Maritime Area Using a Large Aperture Scintillometer. Boundary-Layer Meteorology, 2015, 157(2): 309-319.
- [65] 支克广, 涂钢, 王琪. 使用LAS监测乾安县环境干旱. 气象水文海洋仪器, 2007, (2): 27-30.
- [66] 支克广, 涂钢, 付光极, 等. 乾安县LAS数据与未来降水关系的统计检验. 气象水文海洋仪器, 2007, (4): 35-37.
- [67] Marx A, Kunstmann H, Schuttemeyer D, et al. Uncertainty analysis for satellite derived sensible heat fluxes and scintillometer measurements over Savannah environment and comparison to mesoscale meteorological simulation results. Agricultural and Forest Meteorology, 2008, 148(4): 656-667.
- [68] 贾贞贞, 刘绍民, 毛德发, 等. 基于地面观测的遥感监测蒸散量验证方法研究. 地球科学进展, 2010, 25(11): 1248-1260.
- [69] 郝小翠, 张强, 杨泽粟, 等. 陇中黄土高原LAS在非均匀下垫面的观测优势及其在区域陆面模式验证中的初步应用. 冰川冻土, 2017, 39(5): 1057-1064.
- [70] 田勇志, 刘建国, 陆亦怀, 等. 应用大口径闪烁仪测量近地表横向风速的研究. 大气与环境光学学报, 2012, 7(5): 333-337.
- [71] 吴晓军, 王红星, 宋博, 等. 不同环境下光强起伏测量与传输特性研究. 光子·激光, 2015, 26(6): 1138-1145.

(上接42页)