

黄小燕,王小平,王劲松,等,2017. 1970—2012 年夏半年中国大气 0℃层高度时空变化特征[J]. 气象,43(3):286-293.

# 1970—2012 年夏半年中国大气 0℃层高度 时空变化特征<sup>\*1</sup>

黄小燕<sup>1</sup> 王小平<sup>1</sup> 王劲松<sup>1</sup> 冯建英<sup>1</sup> 王圣杰<sup>2</sup> 陈 斐<sup>1</sup>

1 中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室,  
中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 兰州 730020

2 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070

**提 要:** 基于 1970—2012 年夏半年(4—9 月)84 个探空站和地面气象站资料,分析中国地区近 43 年大气 0℃层高度变化趋势。结果表明:中国夏半年近 43 年来 0℃层高度在 2800~5200 m,平均值为 4442 m,呈南高北低的趋势,海拔 200 m 以上探空站的 0℃层高度随海拔的上升呈显著上升趋势。夏半年 0℃层高度总体呈上升趋势,平均每年上升 2.23 m,通过了 0.01 的显著性水平检验。6、7 和 9 月的上升趋势分别为 1.82、2.03 和 5.38 m·a<sup>-1</sup>,且都通过了 0.05 的显著性水平检验。夏半年大部分探空站 0℃层高度呈上升趋势,其中北方的上升趋势大部分通过了 0.05 的显著性水平检验,且上升幅度大于南方地区。夏半年 84 个站点 0℃层高度与地面温度都呈正相关性,相关系数在 0.07~0.89,且北方地区相关系数较高。

**关键词:** 中国, 0℃层高度, 平均气温, 空间分布, 气候变化

中图分类号: P467

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.03.004

## Spatio-Temporal Changes of 0℃ Isotherm Height in China During Summer Half Year of 1970—2012

HUANG Xiaoyan<sup>1</sup> WANG Xiaoping<sup>1</sup> WANG Jinsong<sup>1</sup> FENG Jianying<sup>1</sup>  
WANG Shengjie<sup>2</sup> CHEN Fei<sup>1</sup>

1 Institute of Arid Meteorology of CMA, Key Laboratory of Arid Climate Change and  
Reducing Disaster of Gansu Province, Key Open Laboratory of Arid Climate Change  
and Reducing Disaster of CMA, Lanzhou 730020

2 College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070

**Abstract:** Based on the meteorological data at 84 sounding and surface stations in China during summer half year from 1970 to 2012, the interannual variation of 0℃ isotherm height ( $H_0$ ) is analyzed. The result indicates that the mean  $H_0$  is between 2800 m and 5200 m in China during summer half year of the last 43 years, and the south  $H_0$  is higher than the north  $H_0$ , mainly controlled by latitude and altitude. The annual mean  $H_0$  increases by 2.23 m·a<sup>-1</sup>, which has passed the 0.01 level of significance test. The change trend ( $p < 0.05$ ) on a monthly basis is reported for 1.82, 2.03 and 5.38 m·a<sup>-1</sup> in June, July and September, respectively, and all have passed the 0.05 level significance test. During 1970—2012, the  $H_0$  at most sounding stations in China shows an increasing trend in summer half year. The increasing trend at northern stations is mostly over the 0.05 level, and the ascending range is generally larger than at the southern stations. The mean  $H_0$  is positively correlated to mean air temperature in summer half year with correlation

\* 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201506001-4)、国家自然科学基金项目(41175081、41201370 和 31300376)、干旱气象科学基金(IAM201412)及甘肃省自然科学基金(1208RJYA025)共同资助

2015 年 12 月 9 日收稿; 2016 年 11 月 14 日收修定稿

第一作者:黄小燕,主要从事全球气候变化方面的研究工作. Email:xyhuang0529@sina.cn

coefficients between 0.07 and 0.89. The correlation coefficients for the north are higher than that for the south.

**Key words:** China, 0℃ isotherm height, mean temperature, spatial distribution, climatic change

## 引言

在对流层中,气温一般随高度的增加而减小,当地面气温上升至0℃以上时,在高空中则会出现0℃等温面,此时0℃等温面所对应的海拔高度就是气象学上说的大气0℃层高度。0℃层高度变化表征高空冷气团和暖气团的环流变化,因此0℃层高度是气象预报工作提前反映气温的一个有效指标,其变化趋势总是提前于地面气温的变化趋势(宫恒瑞等,2010)。在全球气候变化的背景下(Haerberli et al,2007;Solomon et al,2007),我国大部分地区气候变化发生重大改变(Sun et al,2010;Chu et al,2010;Wang et al,2011;张强等,2010;王劲松等,2012;张宇等,2013;肖子牛等,2016;李维京等,2015;肖冰霜等,2016)。高空大气是气候系统的重要组成部分,确定高空气温变化已成为气候变化研究不可或缺的部分,近年来迅速成为气候变化研究的热点之一(Chen et al,2012)。0℃层高度是大气探测的一个重要特性层,也是一种温度指标,反映了高空大气中的温度特征,受地面观测场环境的影响较小,研究其变化趋势能较好地反映当地气候变化特征(Zhang et al,2010;Free and Seidel,2005;Herрман et al,2010)。

早期研究多开展于国外(Bradley et al,2009;Diaz and Graha,1996),近年来关于我国0℃层高度变化研究也逐渐丰富起来。Zhang and Guo(2011)利用中国的探空站点资料,从冰川、积雪与冻土三个方面就0℃层高度对中国西部冰冻圈的影响作出分析,发现0℃高度与冰冻圈主要指标表现出较好的一致性。对西北地区的研究发现西北地区近50年来夏季0℃层高度呈先下降后上升趋势,且0℃层高度与平均气温有较好的相关性(黄小燕等,2011;Huang et al,2013)。对天山乌鲁木齐河源1号冰川开展的研究表明,冰川平衡线海拔与年均0℃层高度存在较高的一致性(张广兴等,2009;Zhang et al,2012)。Wang et al(2014)发现平原区监测到的大气0℃层高度与邻近高海拔山区的地面气温存在较好的相关性,这一认识对于实测资料稀

缺的高海拔地区气候重建乃至模拟参数的获取提供了新思路。孙桂丽等(2010)探讨了气候变化与叶尔羌河流域冰川湖突发洪水的关系,发现突发性洪水发生与其前8d的0℃层高度显著上升密切相关。Chen et al(2012)研究表明近50年来,天山北坡和祁连山北坡夏季0℃层高度上升趋势显著,天山南坡上升趋势不明显。以上这些研究仅限于部分区域,对整个中国的0℃层高度变化研究甚少。本文采取实测的探空资料,研究近43年中国0℃层高度的空间分布及其变化趋势,有助于更加深刻地认识我国气候变化的形成,同时希望对未来我国生态环境和国民经济建设等提供一种新的依据。

## 1 数据来源与研究方法

从0℃层高度的计算方法来看,主要有3种:利用定位探空资料进行插补计算、利用卫星遥感资料反演以及利用全球再分析资料插补计算。其中第一种方法是获取0℃层高度的传统方法,也被广泛运用于国内外研究之中(Zhang and Guo,2011),即利用规定层位的资料,选出最接近0℃层之上与之下的层位进行线性插补,从而得到0℃层高度所在位置及其他参数(Bradley et al,2009)。本文也选用这一方法进行计算。

本文所用气象资料由中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.nmic.cn>)提供,选取区域内资料连续性较好的84个探空站及对应地面气象站1970—2012年夏半年(4—9月)的逐月资料(图1)。通过观测发现,0℃层基本上介于925~400 hPa标准气压层之间,因此选择925、850、700、500和400 hPa五个标准气候层逐月平均00和12时(世界协调时)两时次的位势高度和温度作为基础数据。0℃层高度的计算步骤为:先分别判断出每月平均00和12时两个时次0℃所在位置的上下两个标准气压层,然后利用线性插值法计算出每个时次的0℃层高度(假定温度在925~400 hPa垂直方向上均匀变化),再取两个时次的平均值,最后得到0℃高度月值。利用线性插值法计算0℃层高度的公式如下(Wang,2008):

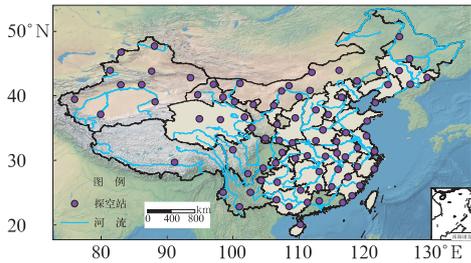


图 1 本研究使用的中国探空站分布图

Fig. 1 Spatial distribution of sounding stations in China used in this study

$$H_i = \frac{H_j - H_k}{T_j - T_k}(T_i - T_k) + H_k \quad (1)$$

式中,变量  $H$  代表高度(单位:m),  $T$  代表温度(单位:°C),下标  $i$  为  $0^\circ\text{C}$  层的标识,  $j$  和  $k$  分别为  $0^\circ\text{C}$  层上、下两个标准气压层的标识。

气象数据的均一性检验和订正是气候变化研究要考虑的重要环节,目前国内常用的方法主要有标准正态检验、二相回归等。近年,Wang et al(2007)和 Wang(2008)在这些常规的检验统计量中引入了惩罚因子,发展了惩罚最大 T 检验等方法。该方法相较传统方法的优势在于其考虑了时间序列一阶滞后自相关并改善了误报警率和检验能力的非均匀分布问题。该方法已集成为软件系统 RHtest,对于我国气候资料均一性检验与订正具有非常好的应用前景(孙佳等,2014)。本文在计算  $0^\circ\text{C}$  层高度前,利用惩罚最大 T 检验方法,以 NCEP/NCAR 再分析资料为参照序列(Chen et al,2012)对 84 个探空站高度和温度资料进行了均一化处理,从而达到消除或减弱观测系统误差的目的。

气象要素的气候倾向率采用一次线性方程表示,即:

$$Y_i = a_0 + a_1 t_i \quad (2)$$

式中, $Y_i$  为气象要素, $t_i$  为时间(1970—2012 年), $a_1$  为线性趋势项(即为每年的气候倾向率)。

样条函数插值法(Spline)可以在空间插值时准确地通过实测样点拟合出连续光滑的表面(Franre, 1982;李军龙等,2006),常用于气象要素插值中。本文在 ArcGIS9.3 软件中通过 Spline 插值法绘制我国夏季  $0^\circ\text{C}$  层高度的空间分布图,进行  $0^\circ\text{C}$  层高度的空间差异分析。

## 2 $0^\circ\text{C}$ 层高度平均值的空间分布

图 2 是近 43 年来中国夏半年平均  $0^\circ\text{C}$  层高度

的空间分布,可以看出全国  $0^\circ\text{C}$  层高度总体表现出南高北低趋势,但也呈现出一定的地域差异。中国北方有 13 个探空站  $0^\circ\text{C}$  层高度在 2800~3700 m,占总站点的 15%,主要分布在东北和北疆地区,其中黑龙江嫩江探空站  $0^\circ\text{C}$  层高度最低,为 2808 m;25% 的探空站  $0^\circ\text{C}$  层高度在 3700~4300 m,主要分布在内蒙古西部、南疆地区、甘肃河西走廊及以西地区、宁夏北部、陕西北部、山西南部、河北南部以及山东东北部地区;31% 的站点  $0^\circ\text{C}$  层高度在 4300~4900 m 之间,主要分布在中国西藏西北部、青海、甘肃南部、四川北部、陕西南部、湖北、河南、安徽、江苏、浙江等地区;29% 站  $0^\circ\text{C}$  层高度在 4900~5500 m,主要分布在大约  $30^\circ\text{N}$  以南的地区,其中西藏的拉萨最高,平均  $0^\circ\text{C}$  层高度为 5464 m。

造成平均  $0^\circ\text{C}$  层空间分布的主要因素是纬度的影响,此外与地形也有关系。因此计算夏半年及各月平均  $0^\circ\text{C}$  高度与纬度和海拔高度的相关性分析可得,各月平均  $0^\circ\text{C}$  层高度与纬度呈显著的负相关性,即  $0^\circ\text{C}$  层高度随着纬度的上升而降低,其中 9 月平均  $0^\circ\text{C}$  层高度与纬度的负相关系数最高(-0.94),且以上相关系数都通过了 0.01 的显著性水平检验。平均  $0^\circ\text{C}$  层高度与所有海拔高度呈正相关性,但相关系数不高,也没有通过显著性水平检验。各月平均  $0^\circ\text{C}$  层高度与海拔大于 200 m 的相关性较好,都通过了 0.01 的显著性水平检验,其中 4 月相关系数达 0.53。说明大于 200 m 以下海拔对  $0^\circ\text{C}$  层高度影响不大,200 m 以上  $0^\circ\text{C}$  层高度随着海拔的上升呈显著的上升趋势。

深入分析各月平均  $0^\circ\text{C}$  高度变化倾向率与纬度的关系(表 1),将所有站点纳入考虑时,在 5—9 月各月的相关系数均较好,且都通过了 0.01 的显著性水平检验,其中 6 月相关系数最高,达 0.84。不同月

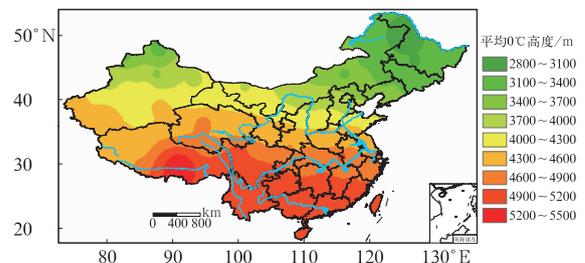


图 2 1970—2012 年中国夏半年  $0^\circ\text{C}$  层高度平均值的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of  $0^\circ\text{C}$  isotherm height in China during summer half year of 1970—2012

份0℃层高度变化趋势与纬度的相关系数有差异。4月20°~30°N有25个站,0℃层高度变化趋势与纬度的相关系数达到-0.54,且通过0.01的显著性水平检验,40°~50°N有23个站,相关系数达到-0.50,且通过0.05的显著性水平检验;5月20°~30°N相关系数为-0.40,40°~50°N相关系数为0.51,且都通过0.05的显著性水平检验;6月30°~40°N的36站两者相关系数达0.79,且通过0.01的显著性水平检验,40°~50°N相关系数达0.48,且通过0.05的显著性水平检验;7月30°~40°N相关系数达0.48,且通过0.01的显著性水平检验,但40°~50°N两者呈负相关性,相关系数为-0.43,且通过0.05的显著性水平检验;8月各纬度带0℃层高度变化趋势与纬度的相关系数都没有通过显著性水平检验;9月30°~40°N和40°~50°N两个纬度带相关系数都呈显著的正相关性,且40°~50°N相关

系数最高,达0.84。从以上分析可以看出纬度对0℃层高度的变化有一定的影响。

0℃层高度变化趋势与海拔高度的关系也不容忽视(表2),从表2可以看出中国夏半年0℃层高度变化趋势与海拔相关系数为0.22,且通过0.05的显著性检验,但海拔>200m的站点呈负相关性,且并没有通过显著性检验。不同月份0℃层高度变化趋势与海拔的相关系数也有所差异:4月海拔>400m的站点呈负相关性,且随海拔的上升相关性也增大,都通过0.05的显著性检验;6月海拔>600m的站点两者相关系数为-0.37,且通过0.05的显著性水平检验;7月海拔>0m的84站两者相关系数为0.39,且通过0.01的显著性水平检验;8月海拔>0m的84站两者相关系数为0.24,且通过0.05的显著性水平检验。

表1 1970—2012年中国夏半年及各月0℃层高度倾向率与纬度的相关系数  
Table 1 Correlation coefficients between linear trends of 0℃ isotherm height and latitude in China during summer half year and different months of 1970—2012

纬度	站点数	4月	5月	6月	7月	8月	9月	夏半年
20°~30°N	25	-0.54**	-0.40*	-0.20	0.20	0.20	-0.07	-0.27
30°~40°N	36	0.33	0.06	0.79**	0.48**	-0.01	0.46**	0.51**
40°~50°N	23	-0.50*	0.51*	0.48*	-0.43*	0.17	0.84**	0.15
20°~50°N	84	0.04	0.34**	0.84**	0.53**	0.37**	0.67**	0.68**

注: \*、\*\* 分别表示通过0.05、0.01的显著性水平。

Note: \*, \*\* have passed the 0.05, 0.01 levels of significance test respectively.

表2 同表1,但为与海拔高度的相关系数  
Table 2 Same as Fig. 1, but for the correlation with altitude

海拔/m	站点数	4月	5月	6月	7月	8月	9月	夏半年
>0	84	0.19	0.03	0.21	0.39**	0.24*	-0.08	0.22*
>100	64	0.12	-0.03	0.11	0.30*	0.07	-0.08	0.12
>200	52	0.10	-0.09	-0.10	0.16	-0.08	-0.16	-0.03
>400	43	-0.30*	-0.06	-0.31*	-0.07	0.03	-0.18	-0.21
>600	40	-0.32*	-0.03	-0.37*	-0.15	0.04	-0.24	-0.26
>800	35	-0.37*	0.05	-0.35*	-0.16	0.12	-0.20	-0.23
>1000	30	-0.38*	-0.04	-0.26	-0.06	0.29	-0.21	-0.18

注: \*、\*\* 分别表示通过0.05、0.01的显著性水平。

Note: \*, \*\* have passed the 0.05, 0.01 levels of significance test respectively.

### 3 0℃层高度变化特征

#### 3.1 年际变化趋势

图3是1970—2012年夏半年及不同月份0℃层

高度年际变化趋势。由图3可见近43年来,中国夏半年0℃层高度呈上升趋势,平均每年上升2.23m,且通过0.01的显著性水平检验。4—9月0℃层高度总体均呈上升趋势,但通过显著性检验的月份较少,6和7月平均每年分别上升1.82和2.03m,通过0.05的显著性水平检验,9月上升幅度最大,

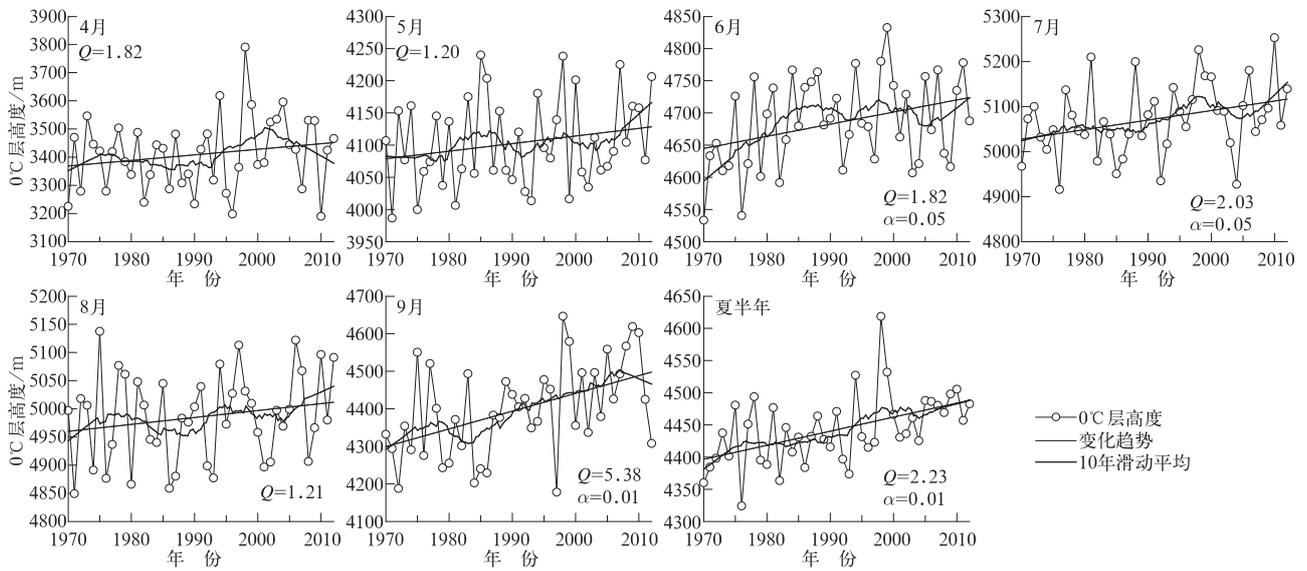


图 3 1970—2012 年中国 4—9 月各月及夏半年 0°C 层高度年际变化趋势

Fig. 3 Interannual variation of 0°C isotherm height in China during summer half year and different months from April to September of 1970—2012

平均每年上升 5.38 m,且通过 0.01 的显著性水平检验。从 10 年滑动平均可以看出 4 月 0°C 层高度在 20 世纪 70 年代中期以前呈上升趋势,70 年代中期至 80 年代末呈下降趋势,90 年代初至 2000 年代初呈上升趋势,2002 年以后又呈下降趋势,即经历了“上升—下降—上升—下降”4 个阶段;5 月 2003 年以前变化趋势较平稳,2003 年以后呈明显上升趋势;6 月 80 年代末期以前上升趋势比较显著,之后呈波动上升趋势;7 月 90 年代初期以前呈弱波动上升趋势,之后呈先下降后上升趋势;8 月 70 年代至 2000 年代初期变化趋势平稳,之后呈明显上升趋势;9 月 70 年代以来呈显著上升趋势。

### 3.2 倾向率的空间变化

图 4 是中国夏半年及各月 1970 年来 0°C 层高度变化趋势的空间变化,可以看出在全球变暖的大背景趋势下,中国夏半年大部分地区 0°C 层高度呈上升趋势,变化趋势在  $-0.8 \sim 4.4 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ ,且北方大部分地区上升趋势大于南方地区,并通过 0.05 或者 0.01 的显著性水平检验。4—9 月各月变化趋势也存在区域差异:4 月绝大部分探空站呈上升趋势,变化趋势在  $-5.2 \sim 6.0 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ ,只有东北黑龙江和吉林以及长江三角洲附近的少部分探空站呈下降趋势,其中延吉站倾向率为  $-5.2 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ ,但只有云南腾冲和海南海口 2 站上升趋势通过了 0.05 的显著

性水平检验。5 和 8 月除长江三角洲附近少部分探空站外大部分地区 0°C 层高度呈上升趋势,但变化幅度较小,在  $-1.3 \sim 3.6 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ ,且基本上都没有通过显著性水平检验,其中黑龙江嫩江探空站 5 和 8 月的上升趋势分别为  $3.6$  和  $3.4 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 。6 月变化趋势在  $-2.4 \sim 5.6 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ ,表现出明显的南北差异,大约以长江为分界线,长江以北的地区呈明显上升趋势,且大部上升趋势都通过了 0.05 或 0.01 的显著性水平检验,其中甘肃酒泉探空站上升趋势最大,为  $5.6 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ ;长江以南大部分地区呈下降趋势,且没有通过显著性水平检验,下降幅度小于长江以北上升幅度。7 月大部分探空站呈上升趋势,变化趋势在  $-1.7 \sim 6.6 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ ,以中国北方的上升幅度较大,其中内蒙古额济纳旗探空站上升幅度最大,达  $6.6 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ ,且通过 0.05 的显著性水平检验。9 月所有探空站均呈增加趋势,北方的增加幅度明显大于南方地区,且北方大部分上升趋势都通过 0.05 或 0.01 的显著性水平检验。

## 4 0°C 层高度与地面气温的关系

为了研究中国地面气温变化对中国夏半年 0°C 层高度变化的响应。选取探空站对应的地面气象站 1970—2012 年 4—9 月平均气温,统计分析夏半年及各月 0°C 层高度和对应地面气温的一元回归系数

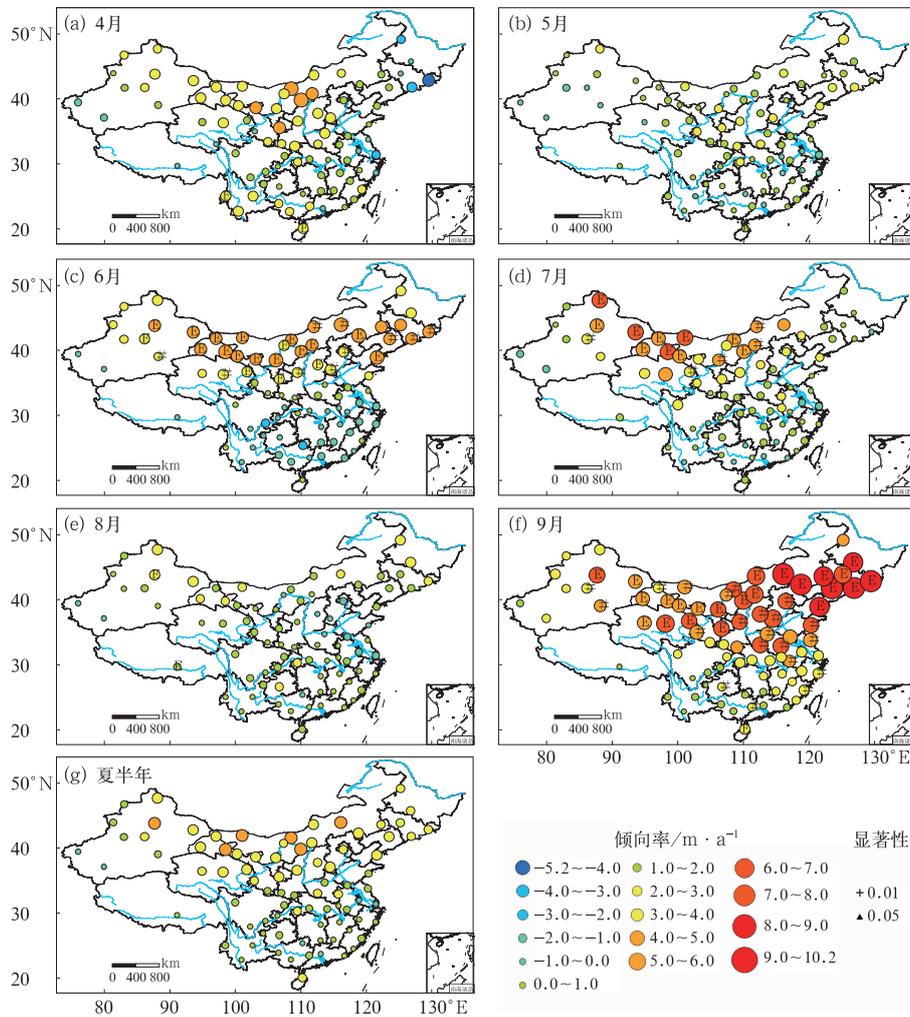


图 4 同图 3, 但为倾向率的空间分布

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for spatial distribution of linear trends

(图 5)。

由图 5 可以看出夏半年 84 个站点 0℃层高度与地面温度都呈正相关性, 相关系数在 0.07 ~ 0.89, 且中国北方的相关系数大于南方地区。4—9 月各月两者相关系数也存在明显的区域差异: 4 月全国 0℃层高度与地面温度呈正相关性, 东南沿海地区相关系数较小在 0~0.6, 东北、西北及西南地区相关系数较大在 0.6~0.96, 且有 15 个站点相关系数 > 0.90, 以内蒙古二连浩特站相关系数最大, 为 0.96。5 月 84 气象站中只有 6 个站两者呈负相关性, 即 93% 的气象站 0℃层高度与地面温度呈正相关性。相关系数也是东南沿海低, 而东北、西北和西南地区较高, 其中新疆阿勒泰相关系数为 0.96。6 月长江中下游一带有少部分气象站呈负相关性, 其他绝大部分气象站都呈正相关性。相关系数表现出南北差异, 即北方的相关系数高于南方地区, 其中内

蒙古锡林浩特站相关系数为 0.94。7 月 84 个气象站 0℃层高度与地面温度都呈正相关性, 东北、西北和西南大部分气象站相关系数较高, 基本都在 0.6 以上。8 和 9 月全国 84 个气象站 0℃层高度与地面温度都呈正相关性, 且整体上看 9 月的相关系数略高于 8 月。

## 5 结论与讨论

(1) 1970 年以来中国夏半年年平均 0℃层高度在 2800~5200 m, 表现出南高北低的趋势, 但也呈现出一定的地域差异。造成这种空间分布的主要因素是纬度的影响, 此外与地形也有关系, 即大于 200 m 以下海拔对 0℃层高度影响不大, 200 m 以上 0℃层高度随海拔的上升呈显著上升趋势。

(2) 从时间变化来看, 1970 年以来中国夏半年

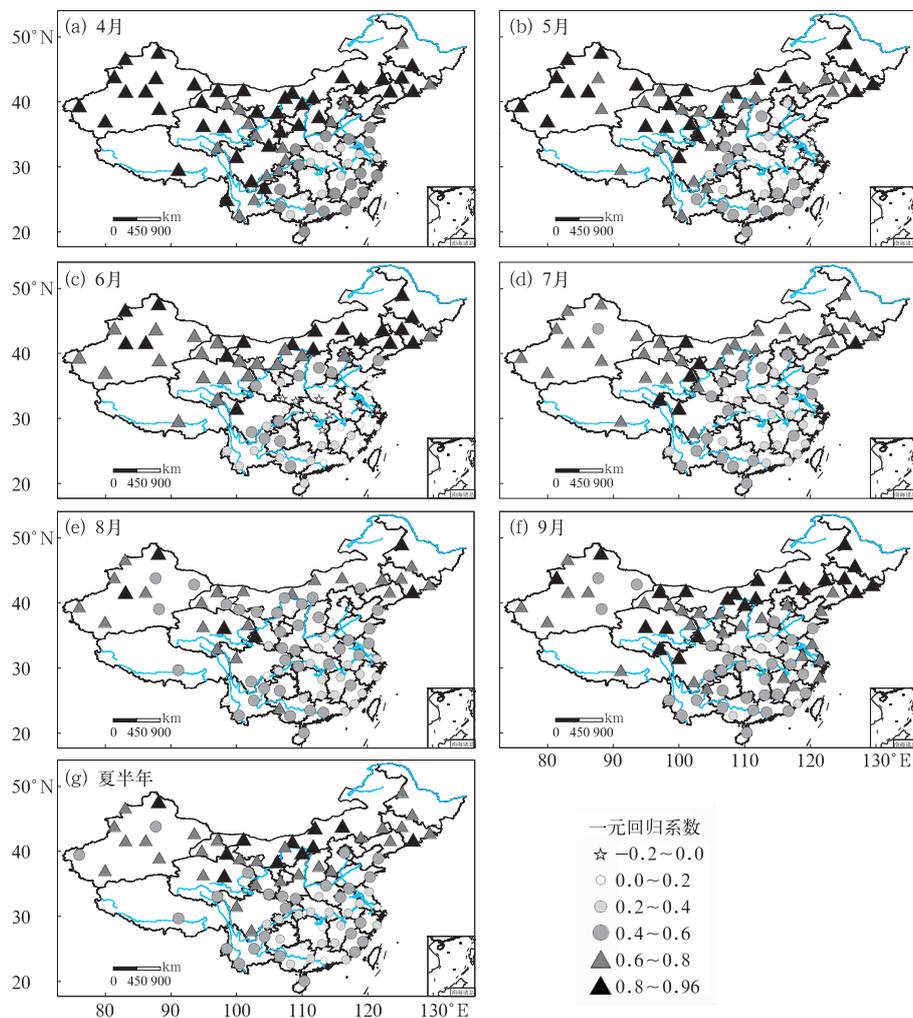


图 5 同图 3, 但为  $0^{\circ}\text{C}$  高度层与平均地面温度回归系数的空间分布

Fig. 5 Same as Fig. 3, but for spatial distribution of regression coefficients between  $0^{\circ}\text{C}$  isotherm height and mean surface temperature

年平均  $0^{\circ}\text{C}$  层高度呈上升趋势, 平均每年上升  $1.95\text{ m}$ , 且通过  $0.01$  的显著性水平检验。4—9 月各月  $0^{\circ}\text{C}$  层高度也均呈上升趋势, 但只有 6、7 和 9 月的上升趋势通过了  $0.05$  或  $0.01$  的显著性水平检验。

(3) 从空间变化来看, 夏半年大部分探空站  $0^{\circ}\text{C}$  层高度呈上升趋势, 北方的上升趋势大部分通过了  $0.05$  或  $0.01$  的显著性水平检验, 且上升幅度大于南方地区。4—9 月各月上升幅度存在区域差异, 比较明显的是 9 月所有站都呈增加趋势, 且北方的增加幅度显著大于南方地区。

(4) 地面气温变化与  $0^{\circ}\text{C}$  层高度变化也有一定的关系, 夏半年 84 个站点  $0^{\circ}\text{C}$  层高度与地面温度都呈正相关性, 相关系数在  $0.07\sim 0.89$ , 且北方地区

相关系数较高。不同的月份也有差异但整体上都是北方相关系数大于南方地区。

本文分析了中国 1970—2012 年夏半年  $0^{\circ}\text{C}$  层高度时空变化特征。但明显不足的是仅讨论了  $0^{\circ}\text{C}$  层高度和纬度、海拔以及地面平均气温的关系,  $0^{\circ}\text{C}$  层高度变化的其他影响要素还有待进一步深入讨论。

#### 参考文献

- 宫恒瑞, 石玉, 冯志敏, 2010. 春季融雪期  $0^{\circ}\text{C}$  层高度与乌鲁木齐河径流量的关系[J]. 干旱区研究, 27(1): 69-74.
- 黄小燕, 张明军, 王圣杰, 等, 2011. 中国西北地区近 50 年夏季  $0^{\circ}\text{C}$  层高度及气温时空变化特征[J]. 地理学报, 66(9): 1191-1199.
- 李军龙, 张剑, 张丛, 等, 2006. 气象要素空间插值方法的比较分析[J]. 草业科学, 23(8): 6-11.

- 李维京,左金清,宋艳玲,等,2015.气候变暖背景下我国南方旱涝灾害时空格局变化[J].气象,41(3):261-271.
- 孙桂丽,陈亚宁,李卫红,等,2010.新疆叶尔羌河冰川湖突发洪水对气候变化的响应[J].冰川冻土,32(3):580-586.
- 孙佳,李永华,李庆祥,等,2014.重庆气温资料均一性检验和订正的初步分析[J].西南师范大学学报:自然科学版,39(9):173-179.
- 王劲松,李耀辉,王润元,等,2012.我国气象干旱研究进展评述[J].干旱气象,30(4):497-508.
- 肖冰霜,马玉霞,赵天保,等,2016.基于均一化资料的中国大陆极端温度的长期趋势[J].气象,42(3):339-346.
- 肖子牛,石文静,段玮,2016.云南夏季降水量在21世纪初的突变减少及原因分析[J].气象,42(3):261-270.
- 张广兴,孙淑芳,赵玲,等,2009.天山乌鲁木齐河源1号冰川对夏季0°C层高度变化的响应[J].冰川冻土,31(6):1057-1062.
- 张强,张存杰,白虎志,等,2010.西北地区气候变化新动态及对干旱环境的影响——总体暖干化,局部出现暖湿迹象[J].干旱气象,28(1):1-7.
- 张宇,李耀辉,魏林波,等,2013.南亚高压与西太平洋副热带高压对我国西南地区夏季降水异常的影响[J].干旱气象,31(3):464-470.
- Bradley R S, Keimig F T, Diaz H F, et al, 2009. Recent changes in freezing level heights in the tropics with implications for the deglaciation of high mountain regions[J]. Geophys Res Lett, 36, L17701. DOI: 10.1029/2009GL037712.
- Chen Z S, Chen Y N, Li W H, 2012. Response of runoff to change of atmospheric 0°C level height in summer in arid region of Northwest China[J]. Sci China: Earth Sci, 55:1533-1544.
- Chu Jianting, Xia Jun, Xu Chongyu, et al, 2010. Spatial and temporal variability of daily precipitation in Haihe River basin, 1958—2007[J]. J Geograph Sci, 20(2): 248-260.
- Diaz H F, Graham N E, 1996. Recent changes in tropical freezing heights and the role of sea surface temperature[J]. Nature, 383:152-155.
- Franre R, 1982. Smooth interpolation of scattered path by local thin plate[J]. Comp Maths with Appls Great Britain, 8(4):237-281.
- Free M, Seidel D J, 2005. Causes of differing temperature trends in radiosonde upper air data sets[J]. J Geophys Res Atmos, 110: D07101. DOI: 10.1029/2004JD005481.
- Haerberli W, Hoelzle M, Paul F, et al, 2007. Integrated monitoring of mountain glaciers as key indicators of global climate change: the European Alps[J]. Annals of Glaciology, 46(1):150-160.
- Herman B M, Brunke M A, Pielke R A, et al, 2010. Satellite global and hemispheric lower tropospheric temperature annual temperature cycle[J]. Remote Sensing, 2:2561-2570.
- Huang Xiaoyan, Wang Shengjie, Wang Jinsong, et al, 2013. Spatio-temporal changes in free-air freezing level heights in Northwest China, 1960—2012[J]. Quatern Int, 313-314:130-136.
- Solomon S, Qin D H, Manning M, et al, 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 1-996.
- Sun Huilan, Chen Yaning, Li Weihong et al, 2010. Variation and abrupt change of climate in Ili River Basin, Xinjiang[J]. J Geograph Sci, 20(5):652-666.
- Wang Shengjie, Zhang Mingjun, Li Zhongqin, et al, 2011. Glacier area variation and climate change in the Chinese Tianshan Mountains since 1960[J]. J Geograph Sci, 21(2):263-273.
- Wang Shengjie, Zhang Mingjun, Pepin N C, et al, 2014. Recent changes in freezing level heights in High Asia and their impact on glacier changes[J]. J Geophys Res: Atmos, 119(4):1753-1765.
- Wang X L, 2008. Accounting for autocorrelation in detecting mean shifts in climate data series using the penalized maximal  $t$  or  $F$  test[J]. J Appl Meteor Climat, 47(9):2423-2444.
- Wang X L, Wen Q H, Wu Y, 2007. Penalized maximal  $t$  test for detecting undocumented mean change in climate data series[J]. J Appl Meteor Climat, 46(6): 916-931.
- Zhang Guangxing, Sun Shufang, Ma Yufen, et al, 2010. The response of annual runoff to the height change of the summertime 0°C level over Xinjiang[J]. J Geograph Sci, 20(6):833-847.
- Zhang Mingjun, Wang Shengjie, Li Zhongqin, et al, 2012. Glacier area shrinkage in China and its climatic background during the past half century[J]. J Geograph Sci, 22(1):15-28.
- Zhang Yinsheng, Guo Y, 2011. Variability of atmospheric freezing-level height and its impact on the cryosphere in China[J]. Annals of Glaciology, 52(58):81-88.