

华北农牧交错带冬季降雪时空变化特征

王 冀¹, 何丽烨², 张雪梅³

(1. 北京市气候中心, 北京 100089; 2. 天津市气候中心, 天津 300074; 3. 哈尔滨市气象局, 哈尔滨 150028)

摘要: 基于华北农牧交错带冬季227个台站(1961-2012年)逐日降雪资料, 采用多种统计诊断方法分析了冬季降雪的时空特征以及与环流因子的关系。结果表明: 初冬降雪高值中心位于内蒙古东北部。在冬春之交时, 降雪高值区移至华北南部。1960s和1970s为不同等级降雪的偏多时段, 降雪的高值中心由内蒙西部(1960s)东移至河北、山西大部(1970s)。2000s以来大雪在山西、河北的北部地区最为显著, 其次是呼伦贝尔地区。降雪频次的变化上可以发现, 各区的大雪频次均呈减少趋势, 其中Ⅵ区减少的趋势最为显著。在降雪偏少的时段(1980s、1990s)水汽输送较弱, 呈西北—东南向; 而在其他年代水汽输送较强, 近10年水汽输送呈东南—西北向。在年代际上降雪总量与气温、AO指数呈反相关, 而中等以上降雪量与气温和AO指数在内蒙古东北部大兴安岭、太行山脉等高海拔地区呈显著正相关。

关键词: 华北农牧交错带; 降雪; 年代际; 时空特征

DOI: 10.11821/dlxb201509001

1 引言

降雪是由气温和降水^[1-2]等天气现象共同作用而成, 是地球表面最为活跃的自然过程之一。冬季降雪对农作物的生长、净化空气十分有利, 但是会给交通运输、牧业带来极大的危害。对于中国降雪研究已经有一些成果, 李培基、孙秀忠等^[3-4]发现中国存在两个降雪正距平时段(1954/55-1957/58年和1967/68-1972/73年), 气温的变暖有可能导致中国北部高纬、高山地区的降雪量增加, 平原地区降雪减少, 淮河流域下游降雪增加。另外, 对于中国冬季易发生降雪的重点区域也有相关研究。陈兴芳等^[5-9]认为青藏高原地区冬季降雪与1月份的变化特征基本一致: 1960s-1970s为降雪偏少时段, 1980s之后为明显的增多。杨莲梅等^[10]对新疆牧区大一暴雪过程的研究表明新疆有4个大一暴雪过程高发区, 其中塔城大一暴雪出现频次最多。在新疆地区大暴雪过程前冬达50%以上, 其次为春季和隆冬。东北以及周边地区的降雪研究发现^[11-12], 累积积雪呈缓慢增加趋势, 冬季积雪显著增加, 年累积积雪的增加主要由冬季积雪的上升所造成。东北地区冬季降雪主要集中在45°N以北地区。内蒙古^[13-15]发生大雪以上频率最高的地区是内蒙古的东部和南部, 极端降雪量呈至西向东逐渐增多, 内蒙古中东部为降雪的大值区。对于东北地区强降雪的研究^[16-18]发现东北地区暴雪也具有明显的季节分布特征, 春季和秋季是暴雪的主要发生期。暴雪主要集中出现在长白山、辽东半岛、大兴安岭山区, 东北大部分地区暴雪

收稿日期: 2015-02-13; 修订日期: 2015-06-30

基金项目: 公益性行业专项(201206024); 国家自然科学基金(41205061); 中国气象局气候变化专项(CCSF201322)

[Foundation: The research item of China Meteorological Administration, No.201206024; National Natural Science Foundation of China, No.41205061; Climate Change Special Fund of CMA, No.CCSF201322]

作者简介: 王冀(1973-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事全球气候分析和变化研究。E-mail: wangji_zl@163.com

存在一定增加趋势。东北地区降雪集中度呈逐年上升趋势,集中期呈明显下降趋势。降雪集中度由东向西依次增加,吉林的东部地区出现集中度最低值,辽宁中部、吉林中部存在着集中期的高值中心。

目前对于中国的冬季降雪研究已经形成了一些基本结论:中国大部分地区主要降雪出现在秋季、初冬或者早春,尤其是强降雪;中国北方的降雪近几十年以来呈现增加趋势,1980s之后更加显著。但是由上述分析也发现对于华北农牧交错带降雪气候特征的分析很少,尤其是该地区降雪年代际变化特点分析更少。因此本文收集华北农牧交错地区台站降雪资料,对降雪的变化特征进行统计分析,重点分析其时空演变、气候趋势等,以期对降雪的时空变化特征有更深入的了解,为该地区冬季降雪预测提供有力背景依据。

2 资料和方法

2.1 资料

收集整理了华北农牧交错带(北京、天津、河北、山西、内蒙古)227个台站1961/1962-2012/2013年冬季11月至次年2月的逐日降雪和气温资料。1948-2012年NCAR/NCEP再分析逐日平均资料,包括高空水平纬向风、经向风、比湿、地表面气压。

北极涛动是冬季影响中国北方地区主要环流模态,资料来源于CPC网站(<http://www.cpc.ncep.noaa.gov>)。

2.2 资料处理方法

本文采用了多种统计方法包括:旋转EOF、趋势分析、相关分析等。为了分析降雪年代际特点,采用了vondrak^[19]滤波器对降雪和环流指数资料进行低通滤波处理,保留了9年以上的低频信号。为了分析水汽输送的特点,计算了水汽通量 Q (垂直积分的水汽通量),具体算法如下:

$$\text{纬向水汽输送通量: } Q_{\lambda} = \langle qu \rangle = -\frac{1}{g} \int_{p_s}^p q u dp \quad (1)$$

$$\text{经向水汽输送通量: } Q_{\phi} = \langle qv \rangle = -\frac{1}{g} \int_{p_s}^p q v dp \quad (2)$$

式中: Q_{λ} 和 Q_{ϕ} 的单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$; p_s 为地表面气压; p 取300 hPa; g 为重力加速度。公式中变量与NCEP/NCAR逐日平均再分析资料的对应关系是: u 对应 $uwnd$, v 对应 $vwnd$, q 对应 $shum$, p_s 对应 $pres/100$ (单位由Pa换算成hPa), dp 对应1000、925、850、700、600、500、400、300 hPa的位势高度间隔。整层积分时,地形以下等压面的值不作累加,由地形以上最接近的标准等压面开始积分至300 hPa高度。

3 华北农牧交错带降雪的时空变化特征分析

3.1 冬季各月降雪的分布特征

华北农牧交错带由于东—西、南—北跨度大,冬季降雪季节内分布不均,因此了解冬季各月降雪量的分布特征非常必要。本文利用样本标准差 $\left(\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \right)$ 来描述降雪量的变率,从而确定冬季各月降雪量异常关键区的分布情况。

图1为冬季各月份降雪量的样本标准差分布,11月份降雪距平呈东北—西南向分布,降雪量异常的显著关键区位于内蒙古东北部的呼伦贝尔地区,12月份华北南部降雪

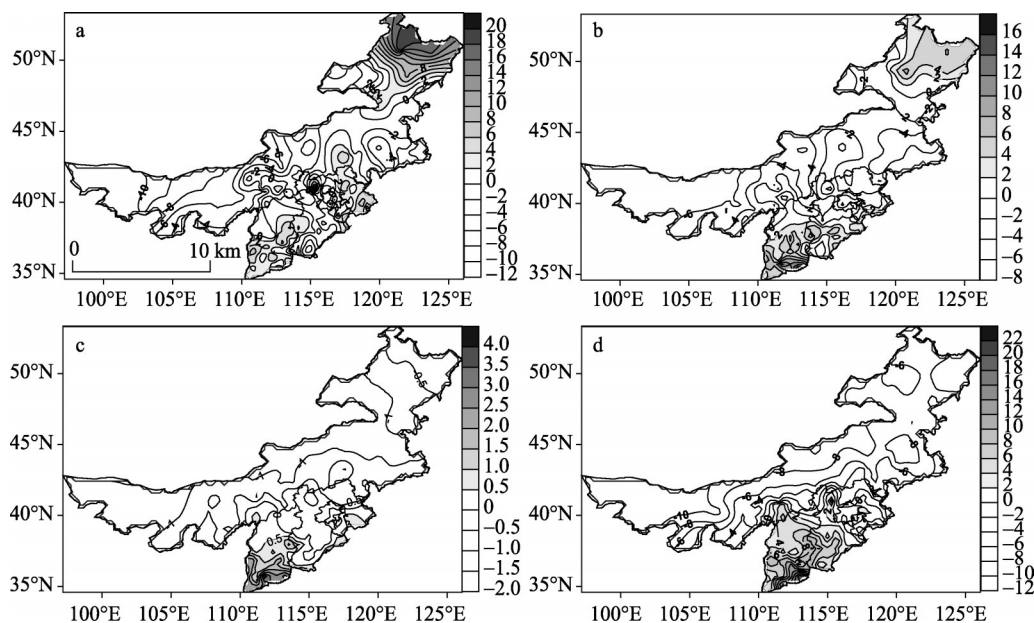


图1 华北农牧交错带冬季各月份降雪量的样本标准差分布图

(a. 11月份, b. 12月份, c. 1月份, d. 2月份, 其中阴影部分为正值)

Fig. 1 Distribution of standard deviations of winter snowfall in each month in agri-pasture transitional zone of North China (a. Nov; b. Dec; c. Jan; d. Feb)

量开始明显增加,并成为另一个高值中心。1月份开始华北地区降雪分布特点与前期不同,降雪量的高值区完全移至华北南部。由此可见,初冬华北地区降雪高值区分别位于内蒙古东部和华北南部地区,其中内蒙古东部更加显著。在冬春之交时,华北地区降雪的高值区南移至华北南部。

3.2 冬季降雪量时空异常特征

为了揭示冬季降雪的时空异常特征,采用经验正交分解(EOF)方法对降雪时空变化特征进行分析。EOF前两个特征向量的方差贡献率为50%、13.4%,累计方差贡献率为50%和63.4%,经检验(North检验)发现前两个特征值具有统计意义。

图2a EOF第一特征向量空间分布发现,全区降雪呈至北向南一致偏多趋势,高值中心位于河北中部地区。从第一模态的时间系数反应出降雪有微弱的上升趋势(没有通过95%显著性检验),这与陈光宇、李多^[11-12]研究结论是一致的,1970s-1980s和2000s之后为降雪主要偏多时段。而第二特征向量(图2c)基本上呈东北—西南反向分布,高值区主要位于华北北部以及内蒙东北部。第二模态的时间系数呈微弱的下降趋势(没有通过95%显著性检验)。

3.3 各等级降雪的年代际变化特点

文中计算了各等级降雪量距平百分率来分析不同年代的分布特征。1960s小雪偏多区位于内蒙古西部和华北东南部地区,高值中心位于内蒙西部、河北南部。1970s为小雪偏多的主要时段,降雪偏多的高值区位于山西和河北南部地区。1980s、1990s为小雪偏少时段,小雪偏多区域主要位于内蒙中部和东部。2000s,小雪明显增加,内蒙古的大部分地区为小雪的偏多区域(图3)。中雪距平年代际分布特点与小雪的分布特点基本一致,1960s、1970s为中雪偏多时段,降雪偏多的高值区由内蒙古西部东移至山西、河北的南部地区。1980s、1990s是中雪最少的时段,没有明显的偏多区域。2000s之后中雪量也开

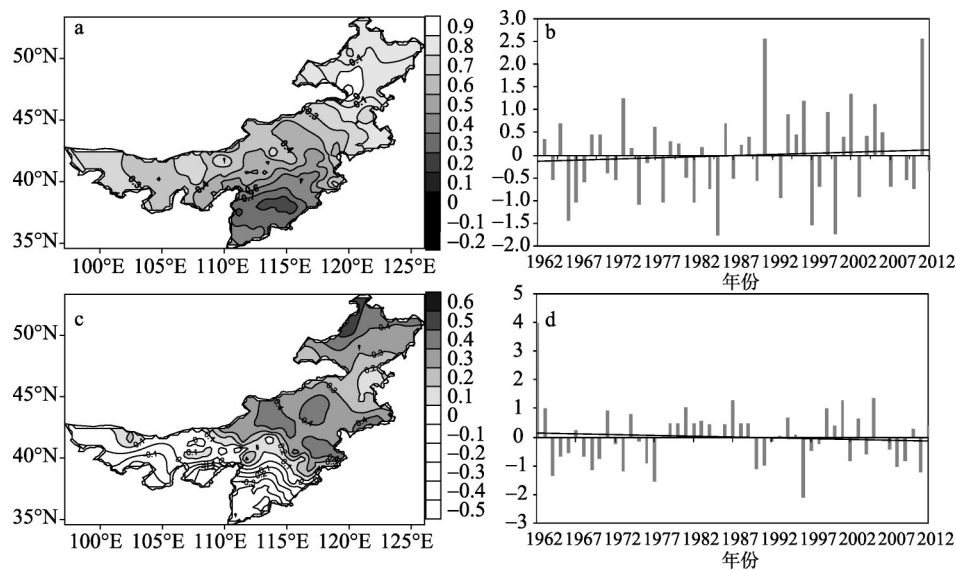


图2 华北农牧交错带冬季降雪EOF分解前2个特征向量的空间模态及标准化时间系数(a. 第一特征向量模态, b. 第一特征向量对应时间系数, c. 第二特征向量模态, d. 第二特征向量对应时间系数)

Fig. 2 Spatial patterns of the first two EOF modes of the DJF snowfall and the related normalized time series of coefficients in agri-pasture transitional zone of North China (a. The eigenvector of the first mode; b. The time series of the first mode; c. The eigenvector of the second mode; d. The time series of the second mode)

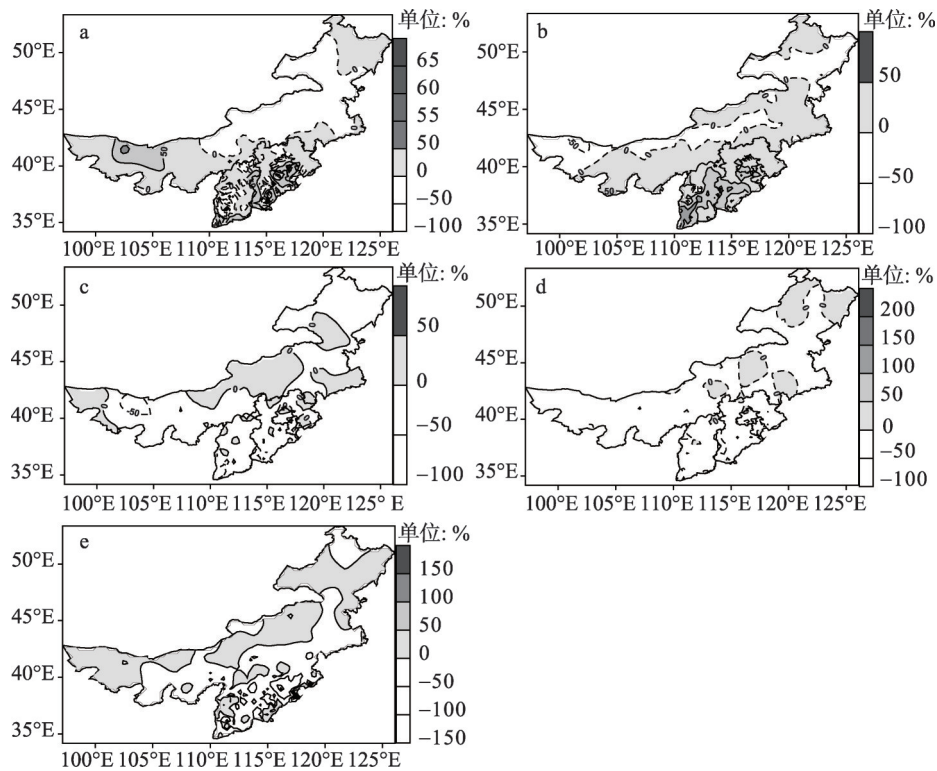


图3 华北农牧交错带小雪量距平百分率的年代际变化特征
(a. 1960s, b. 1970s, c. 1980s, d. 1990s, e. 2000s)

Fig. 3 Inter-decadal variations of slight snow anomaly percentage in agri-pasture transitional zone of North China (a. 1960s; b. 1970s; c. 1980s; d. 1990s; e. 2000s)

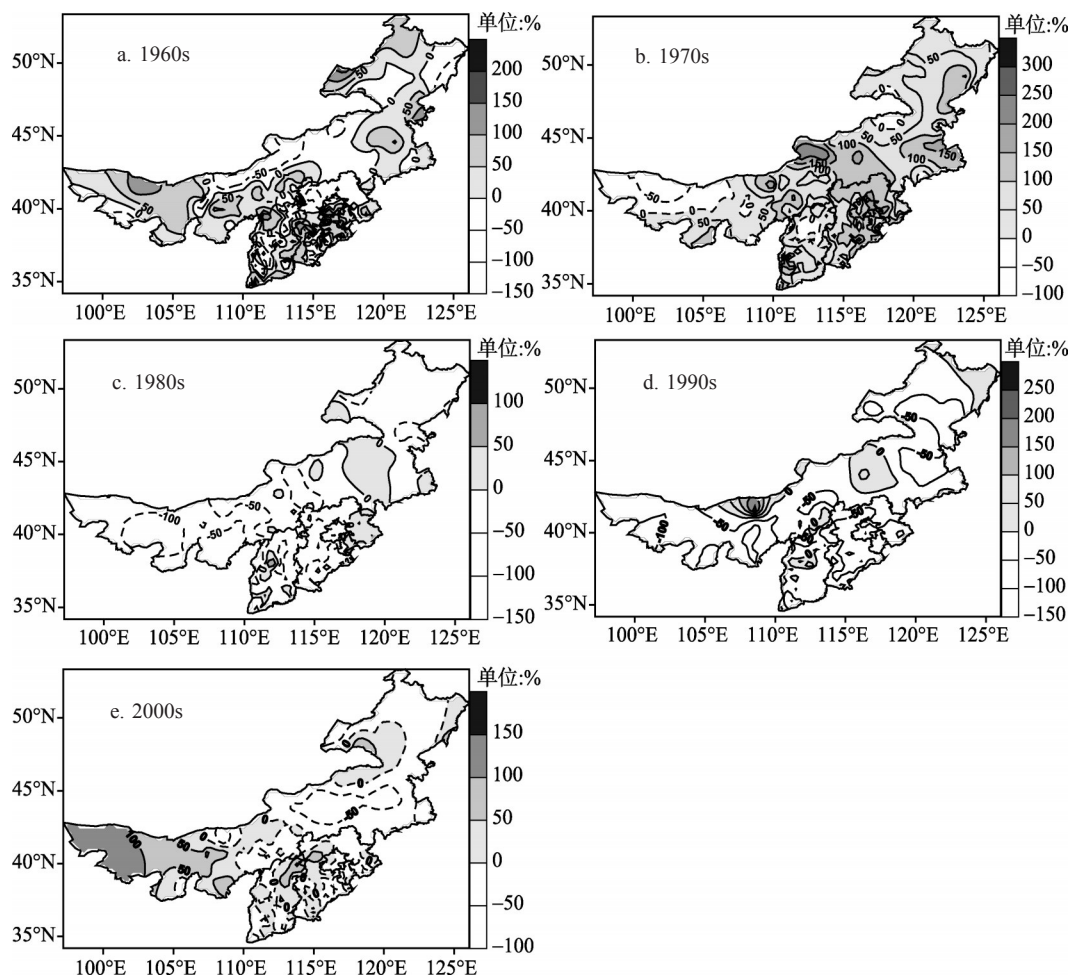


图4 华北农牧交错带冬季大雪及以上降雪距平百分率年代际变化特点

Fig. 4 Inter-decadal variations of anomaly percentage of the DJF snowfall of heavy and higher levels in agri-pasture transitional zone of North China

始增加, 其中内蒙古东北部和西部地区为中雪偏多的中心区。

由于冬季大雪和暴雪发生的频次较少, 因此计算了大雪以上降水量距平百分率并分析其年代际分布特征(图4)。1980s之前大雪以上的降水量为偏多时段, 这与小雪和中雪的年代际变化特征是一致的, 1970s高值区主要位于内蒙中部和河北的大部地区。1980s-1990s为大雪的偏少时段, 没有显著的高值区。2000s之后, 大雪开始增加, 其中内蒙古的西部、东北部和山西、河北北部均有增加的高值中心出现。

总之, 1960s、1970s为华北农牧交错带不同等级降雪的偏多时段, 1980s-1990s为降雪整体的偏少时段。2000s降雪明显开始增加, 其中小雪、中雪增加的主要区域在内蒙古东部地区, 大雪以上的高值中心位于内蒙西部和山西、河北的北部地区。

4 华北农牧交错带不同区域冬季降雪变化特征

从降雪的时空异常以及年代变化特征, 发现不同区域的降雪变化特点并不一致。因

此为详尽了解华北农牧交错带降雪的变化特征对该地区冬季降雪进行合理区划是非常必要的。近年来, REOF 方法已经广泛应用在区域气候变化分型中, REOF 是在 EOF 的基础上经过极大方差旋转, 使高荷载集中在少数变量上, 从而使空间结构更加清晰, 更突出气候变化的区域一致性特征。

降雪 REOF 第一特征向量对应的中心区域为山西和河北的南部地区, 中心荷载值为 0.9, 方差为 23.58, 这反映出该地区是冬季降雪的关键区域, 这也与前文中的研究成果是一致的。REOF 第二特征向量在京津地区存在正高值中心区, 中心值为 0.9, 方差为 18.43。第三特征向量主要位于内蒙中部、山西和河北的北部地区, 中心值为-0.6。第四特征向量主要位于内蒙的西部地区, 第五特征向量位于内蒙的赤峰一带, 第六特征向量位于内蒙的呼伦贝尔地区。REOF 前六个荷载值的方差贡献超过了 70%, 因此前六个特征向量基本覆盖了整个区域, 因此将华北农牧交错地区分为 6 个区域 (图 5), 分别为呼伦贝尔地区 (I 区)、锡林郭勒东部和兴安地区 (II 区)、内蒙古中部地区 (III 区)、内蒙古西部地区 (IV 区)、河北北部地区 (V 区)、河北和山西南部地区 (VI 区)。

为了进一步了解不同区域降雪变化特点, 对不同区域各量级降雪变化趋势分析列入表 1。由表 1 可以看出, 在各区的降雪量变化上, I 区的各个量级降雪均为上升趋势, VI 区各量级的降雪没有变化趋势, 其中 I、II 区小雪增加的趋势最为显著, 分别为 0.3 mm/10 a 和 0.45 mm/10 a; V 区小雪减少趋势最为显著, 为-0.5 mm/10 a; I 区和 IV 区中雪增加的趋势最显著, 分别为 0.17 mm/10 a 和 0.18 mm/10 a; 仅在 V 区中雪量有减少的趋势; 大雪以上增加趋势最显著的是 V 区, 为 0.24 mm/10 a; 其次是 I 区, 而 IV 区则是下降最为显著的区域, 为-0.09 mm/10 a。从降雪频次的变化上可以发现, 大雪的频次各区均呈减少趋势, 其中 VI 区减少的趋势最为显著, 为-0.18 d/10 a, IV 区减少的趋势最小, 为-0.02 d/10 a; I、II 区中雪发生频次呈略增加趋势, 其他区域均为减少趋势, 其中 VI 区减少的最为显著, 为-0.28 d/10 a; 除了 II 区小雪频次为增加趋势外, 其他区域均为减少趋势, 其中 VI 区减少趋势最为显著为-1.07 d/10 a。

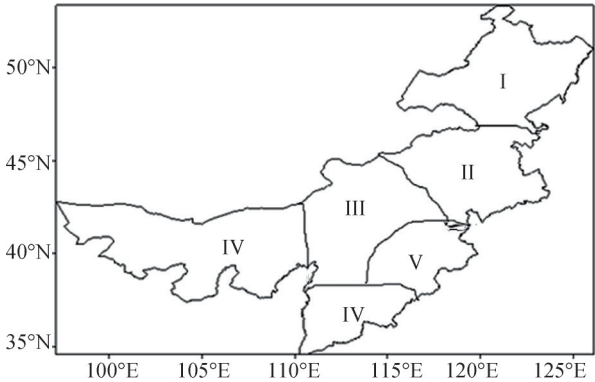


图 5 华北农牧交错带降雪区划

Fig. 5 Winter snow zonation in agri-pasture transition zone of North China

表 1 华北农牧交错带不同区域各量级降雪量、频次变化趋势
Tab. 1 The trend of amount and frequency of the snowfall in difference areas of the agri-pasture transitional zone in North China

	小雪		中雪		大雪及以上量级	
	降雪量	频次	降雪量	频次	降雪量	频次
I 区	0.3 mm/10 a	-0.04d/10 a	0.17 mm/10 a	0.06d/10 a	0.04 mm/10 a	-0.04d/10 a
II 区	0.45 mm/10 a	0.03d/10 a	0.05 mm/10 a	0.05d/10 a	-0.02 mm/10 a	-0.07d/10 a
III 区	-0.07 mm/10 a	-0.04d/10 a	0.07 mm/10 a	-0.13d/10 a	-0.06 mm/10 a	-0.07d/10 a
IV 区	-0.11 mm/10 a	-0.5d/10 a	0.18 mm/10 a	-0.1d/10 a	-0.09 mm/10 a	-0.02d/10 a
V 区	-0.5 mm/10 a	-0.7d/10 a	-0.03 mm/10 a	-0.12d/10 a	0.24 mm/10 a	-0.1d/10 a
VI 区	无变化趋势	-1.07d/10 a	无变化趋势	-0.28d/10 a	无变化趋势	-0.18d/10 a

5 影响华北农牧交错带降雪的主要年代际因子

5.1 影响冬季降雪的水汽输送年代际变化特征

水汽是产生降雪的最重要因素之一, 分析水汽输送路径和强度的年代际变化特点, 可以了解降雪年代际变化的发生机制。因此我们计算了影响不同年代冬季降雪的水汽输送通量距平 (图6)。

1960s的水汽输送主要来自北太平洋西传的较强冷湿空气, 分别在内蒙古的东北部呼伦贝尔地区以及内蒙西部存在着水汽输送的辐合区, 对应着上述地区降雪的偏多。1970s水汽输送由西南输送至内蒙东北地区, 主要的水汽辐合区位于内蒙中部、京津冀等地, 这

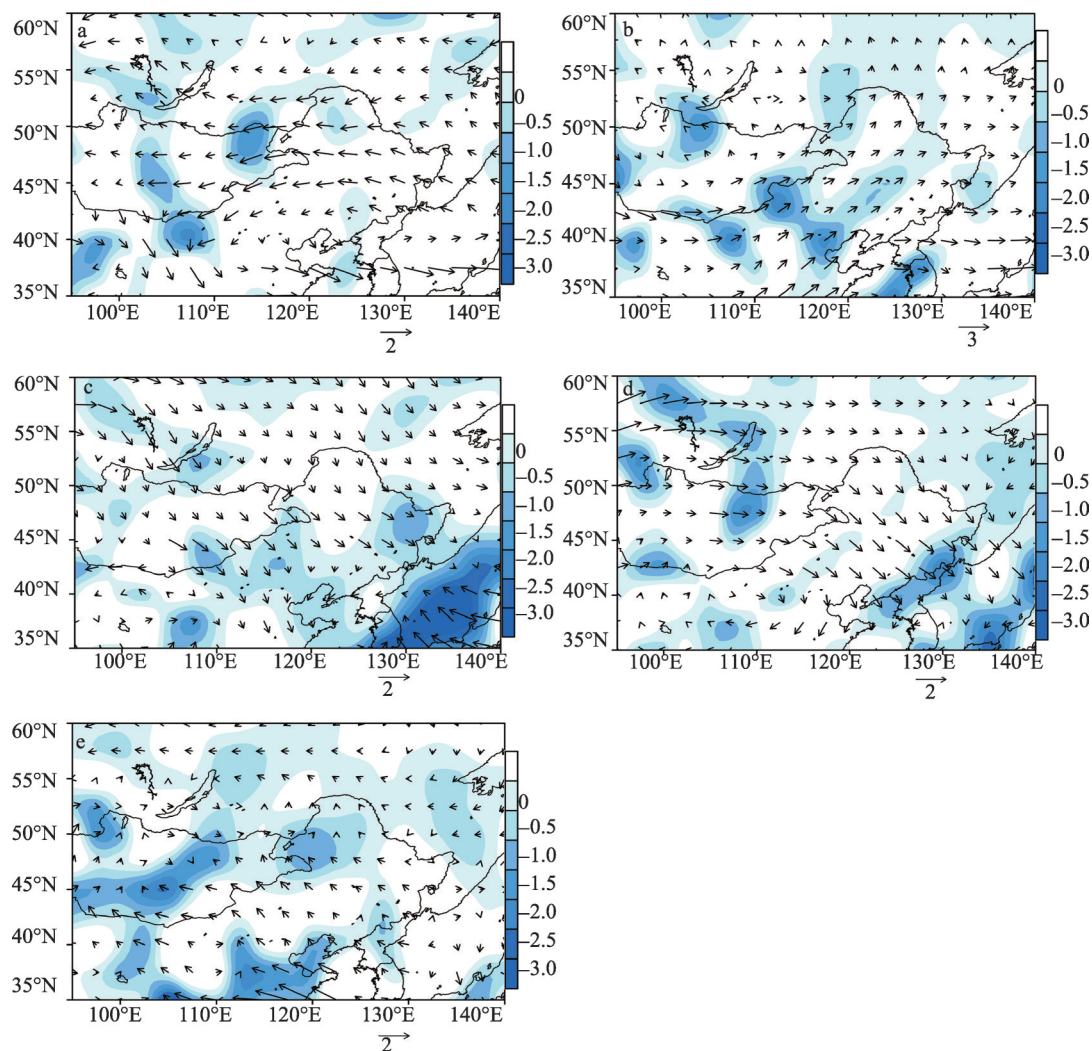


图6 不同年代影响华北农牧交错带降雪的冬季整层垂直积分水汽输送通量
矢量场和水汽输送通量散度距平分布图

(a. 1960s, b. 1970s, c. 1980s, d. 1990s, e. 2000s; 单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 阴影区为水汽输送散度 ≤ 0 的区域)

Fig. 6 Anomaly distribution of whole-layer vertical integration of the water vapor flux vector and flux divergence of winter snowfall in agri-pasture transitional zone of North China ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. Shaded areas show regions of water vapor flux divergence ≤ 0) (a. 1960s; b. 1970s; c. 1980s; d. 1990s; e. 2000s)

也进一步解释了1960s-1970s期间降雪的高值区由东移至京津冀地区的原因。1980s和1990s水汽输送的方向均为西北—东南方向,水汽输送弱于1960s和1970s,水汽的辐合区与前文中分析的降雪高值中心基本一致。2000s水汽输送开始增强,水汽输送呈东南—西北向,在内蒙古东北部的呼伦贝尔地区以及京津冀南部地区均存在着水汽输送辐合的高值区,也反应出上述地区降雪量的增加。

5.2 气温对降雪的年代际变化影响

Ye^[20]等对于欧亚大陆北部降雪的研究表明降雪量与气温关系密切。近几十年来中国北方气温不断升高已经成为公认的事实,气温年代际变化对于不同等级降雪的影响是值得我们去分析的。另外由研究表明(图7),中等以上降雪量占冬季降雪总量的百分率(以下简称降雪百分率)分布呈由北—南逐渐增加的趋势,在内蒙古地区降雪百分率整体不超过40%。在内蒙古冬季降雪最多的呼伦贝尔地区降雪百分率仅占30%左右,这说明内蒙古冬季是以小雪为主的,小雪占了整个冬季的60%~80%。京津冀和山西大部降雪百分率为50%以上,因此也反应出在华北南部地区冬季降雪的多少是由中等以上量级降雪决定的。因此在下文中重点分析气温变化对降雪总量和中等以上降雪的影响。

在年际尺度上,冬季气温与同期降雪总量以及中雪以上降雪量相关比较弱,没有统计意义,这与Ye^[21]对于欧亚大陆北部地区研究的结果是一致的。利用vondrak滤波对于降雪量和气温进行低频滤波并保留年代际信号后求相关,结果发现降雪总量、中等以上降雪量与气温的相关特征并不一致。其中降雪总量与气温总体上呈反相关,除内蒙呼伦贝尔的部分地区外,其他地区的相关系数均通过95%的信度检验。而中等以上降雪量与气温正相关地区较多,其中显著正相关区域位于内蒙古东北部、京津冀北部等地区,而上述地区大部分为高海拔山区(大兴安岭、太行山脉等)。因此,可以认为随着温度的升高小雪量在不断减少,而高海拔地区中等以上降雪量在增加。

5.3 环流因子对华北降雪的年代际变化影响

已有研究指出^[22-24]北极涛动、北大西洋涛动对北半球很多地方气候的年际、年代际变化有非常重要的影响。尤其是AO对中国冬季风、冬季气温和降水等的年际、年代际波动也存在显著关系^[25-27]。

AO指数与降雪总量均在整体上呈负相关(图8),负相关高值区(通过95%显著性检验)主要位于内蒙古中部和东部偏南地区、山西北部以及京津冀的东南地区。AO与中等以上降雪量则存在不同相关分布,其中正相关显著区主要位于京津冀的东部以及内蒙古东北部地区,这个特点与温度与中等以上的降雪量相关分布特征一致。

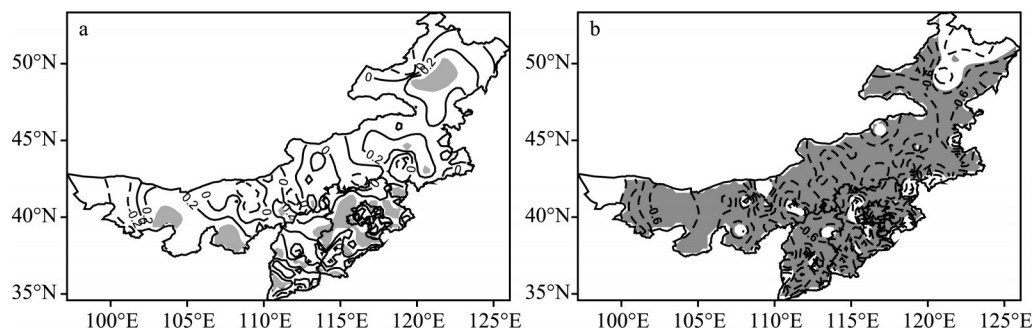


图7 华北农牧交错带年代际气温与降雪总量(a)和中等以上降雪总量(b)的相关系数空间分布(其中阴影区域通过95%的显著性检验)

Fig. 7 Correlation distribution between surface air temperature and (a) snowfall; (b) snowfall of moderate and high levels in agri-pasture transitional zone of North China. Shaded areas denote significance at 95%

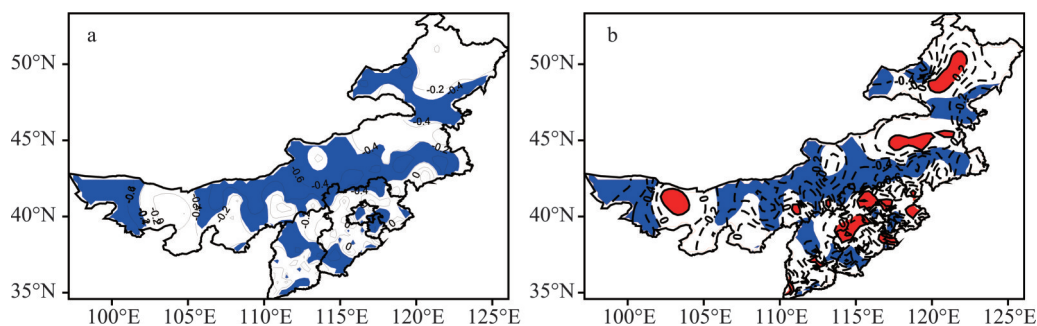


图8 北极涛动指数与华北农牧交错带降雪总量(a)和中雪以上降雪总量(b)的年代际相关系数空间分布(其中阴影区域通过95%的显著性:蓝色为负相关显著区,红色为正相关显著区)

Fig. 8 Inter-decadal Correlation between Arctic Oscillation (AO) Index and (a) snowfall, (b) snowfall of moderate and high levels in agri-pasture transitional zone of North China. Shaded areas denote significance at 95%, with blue (red) areas showing significant negative(positive) correlation.

由上分析可知, AO与华北农牧交错带降雪的关系与气温是基本一致的, 众多学者已经对 AO与华北气温关系进行了探讨^[26-29], 认为冬季 AO指数是影响中国华北地区气温变化的主要因素。年代际 AO指数处于正位相时, 东亚冬季风减弱, 导致气温年代际的增暖, 容易带来暖湿空气^[30-31], 使得向中国北方的水汽输送也相应增多了, 导致中国北方高海拔地区强降雪事件的增多。上述分析与王会军等^[32]的结论一致。

6 结论

利用华北农牧交错带 1961-2012 年冬季降雪资料, 分析降雪的年代际变化特征如下:

(1) 华北农牧交错带冬季降雪量高值中心随时间变化由东北部移至南部。初冬降雪高值区主要位于内蒙古东北部。12 月份开始南部降雪量开始明显增加。在冬春之交时, 降雪的高值区南移至华北南部。

(2) 华北农牧交错带冬季降雪的年代际分布表明 1960s、1970s 为降雪整体偏多的时段, 降雪偏高高值中心由内蒙西部东移至河北、山西大部, 1980s、1990s 为华北降雪整体的偏少时段。2000s 以来降雪明显开始增加, 其中小雪、中雪增加的主要区域在内蒙古东北部地区, 大雪以上降雪的高值中心位于内蒙西部和山西、河北的北部地区。

(3) 不同区域的降雪量变化上, I 区的各个量级降雪均为上升趋势, VI 区各量级的降雪没有变化趋势, 其中 I、II 区小雪增加的趋势最为显著, I 区和 IV 区中雪增加的趋势最显著; 大雪以上增加趋势最显著的是 V 区, 为 $0.24 \text{ mm}/10 \text{ a}$; 其次是 I 区, 而 IV 区则是下降最为显著的区域, 为 $-0.09 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。从降雪频次的变化上可以发现, 大雪的频次各区均呈减少趋势, 其中 VI 区减少的趋势最为显著, IV 区减少的趋势最小; I、II 区中雪发生频次呈略增加趋势, 其他区域均为减少趋势, 其中 VI 区减少的最为显著, 为 $-0.28 \text{ d}/10 \text{ a}$ 。

(4) 不同年代的水汽输送特点发现, 在降雪偏少的时段 (1980s、1990s) 水汽输送方向均呈西北—东南向。降雪偏多时段水汽输送则分别来自北太平洋西传的较强冷湿空气和西南输送至内蒙东北地区的暖湿空气。2000s 之后水汽输送开始增强呈东南—西北向。降雪总量与气温在年代际上呈反相关, 而中等以上降雪量与气温正相关地区较多, 显著正相关区域位于内蒙古东北部、京津冀北部等高海拔山区。AO 指数与降雪总量在整

体上呈负相关,在内蒙古东北部大兴安岭、太行山脉等高海拔地区AO指数与中等以上降雪呈正相关。

参考文献(References)

- [1] Dery S J, R D Brown. Recent Northern Hemisphere snow cover extent trends and implications for the snowalbedo feedback. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34, L22504. doi: 10.1029/2007GL031474.
- [2] Dyer J L, Mote T L. Spatial variability and trends in observed snow depth over North America. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33, L16503. doi: 10.1029/2006GL027258.
- [3] Li Peiji. A Preliminary study of snow mass variations over past 30 years in China. *Acta Meteorologica Sinica*, 1990, 48 (4): 433-437. [李培基. 近30年来我国雪量变化的初步探讨. *气象学报*, 1990, 48(4): 433-437.]
- [4] Sun Xiuzhong, Luo Yong, Zhang Xia, et al. Analysis on snowfall change characteristic of China in recent 46 years. *Plateau Meteorology*, 2010, 29(6): 1594-1601. [孙秀忠, 罗勇, 张霞, 等. 近46年来我国降雪变化特征分析. *高原气象*, 2010, 29(6): 1594-1601.]
- [5] Chen Xingfang. The short-term climatic analysis of snow disaster over the Tibetan Plateau in winter 1995/1996. *Meteorological Monthly*, 1996, 23(6): 40-43. [陈兴芳. 1995-1996年冬季高原地区雪灾气候分析. *气象*, 1996, 23(6): 40-43.]
- [6] Zhou Lusheng, Li Haihong, Wang Qingchun. The basic characteristics of heavy snowstorm process and snow disaster distribution in eastern pastoral areas of Qinghai-Xizang Plateau. *Plateau Meteorology*, 2000, 19(4): 450-458. [周陆生, 李海红, 汪青春. 青藏高原东部牧区大-暴雪过程及雪灾分布的基本特征. *高原气象*, 2000, 19(4): 450-458.]
- [7] Ma Lin, Li Xifu, Zhang Qingmei, et al. The forming and forecasting of winter snow-disaster weather in eastern pastoral-area of Qinghai-Xizang Plateau. *Plateau Meteorology*, 2001, 20(3): 326-331. [马林, 李锡福, 张青梅, 等. 青藏高原东部牧区冬季雪灾天气的形成及其预报. *高原气象*, 2001, 20(3): 326-331.]
- [8] Dong Anxiang, Ju Zhang, Yin Xianzhi, et al. The singular spectrum analysis of snow damage in eastern Qinghai-Xizang Plateau. *Plateau Meteorology*, 2001, 20(2): 214-219. [董安祥, 瞿章, 尹宪志, 等. 青藏高原东部雪灾的奇异谱分析. *高原气象*, 2001, 20(2): 214-219.]
- [9] Dong Wenjie, Wei Zhigang, Fan Lijun. Climatic character analyses of snow disasters in east Qinghai-Xizang Plateau livestock farm. *Plateau Meteorology*, 2001, 20(4): 402-406. [董文杰, 韦志刚, 范丽军. 青藏高原东部牧区雪灾的气候特征分析. *高原气象*, 2001, 20(4): 402-406.]
- [10] Yang Lianmei, Yang Tao, Jia Lihong, et al. Analyses of the climate characteristics and water vapor of heavy snow in Xinjiang region. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(3): 390-396. [杨莲梅, 杨涛, 贾丽红, 等. 新疆大-暴雪气候特征及其水汽分析. *冰川冻土*, 2005, 27(3): 389-396.]
- [11] Chen Guangyu, Li Dongliang. Temporal-spatial characteristics of cumulative snow depth in Northeast China and its vicinity. *Meteorological Monthly*, 2011, 37(5): 513-521. [陈光宇, 李栋梁. 东北及邻近地区累积积雪深度的时空变化规律. *气象*, 2011, 37(5): 513-521.]
- [12] Li Duo, Xiao Ziniu, Li Zechun. The spatital and temporal characteristics of winter snowfall in Northeast China and its realtion with global sea surface temperature anomaly. *Meteorological Monthly*, 2012, 38(4): 411-418. [李多, 肖子牛, 李泽椿. 中国东部北方地区冬季降雪的时空特征及其与全球异常海温的联系. *气象*, 2012, 38(4): 411-418.]
- [13] Gong Deji, Li Zhangjun. The climatic features of heavy snow, snowstorm and snow disaster in Inner Mongolia. *Meteorological Monthly*, 2000, 26(12): 25-28. [宫德吉, 李彰俊. 内蒙古大(暴)雪与白灾的气候学特征. *气象*, 2000, 26(12): 24-28.]
- [14] Jiang yi, Qian Weihong. Regional characteristics of heavy snowfall or snowstrom. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(增刊): 38-48. [江毅, 钱维宏. 内蒙古大(暴)雪的区域特征. *地理学报*, 2003, 58(Suppl.): 38-48.]
- [15] Li Xicang, Wang Ji, Yang Jing. Characteristics and mechanism analysis of extreme snow change in eastern Inner Mongolia pasturing area. *Scientia Geographica Sinica*, 2013, 33(7): 884-889. [李喜仓, 王冀, 杨晶. 内蒙古东部牧区极端降雪变化特征及形成机理分析. *地理科学*, 2013, 33(7): 884-889.]
- [16] Dong Xiao, Zhou Shunwu, Hu Zhongming, et al. Characteristics of spatial and temporal variation of heavy snowfall in Northeast China in recent 50 years. *Meteorological Monthly*, 2010, 36(12): 74-79. [董啸, 周顺武, 胡中明, 等. 近50年来东北地区暴雪时空分布特征. *气象*, 2010, 36(12): 74-79.]
- [17] Wang Ji, Zhao Chunyu, Lou Dejun. Variations of winter snow concentration degree and snow concentration period in

- Northeast China. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(9): 1069-1078. [王冀, 赵春雨, 姜德君. 东北地区冬季降雪的集中度和集中期变化特征. *地理学报*, 2010, 65(9): 1069-1078.]
- [18] Chen Changsheng, Wang Panxing, Yang Xiufeng. Classification and features of spatio-temporal variation of Snowstorms in Northeast China. *Scientia Geographica Sinica*, 2012, 32(10): 1276-1281. [陈长胜, 王盘兴, 杨秀峰, 等. 东北地区暴雪天气的统计学划分方法及其时空分布特征. *地理科学*, 2012, 32(10): 1276-1281.]
- [19] Zheng Dawei, Dong Danan. Realization of narrow band filtering of the polar motion data with multi-stage filter. *Acta Astronomica Sinica*, 1986, 27(4): 369-375. [郑大伟, 董大南. 用多级滤波器实现极移序列的窄带滤波. *天文学报*, 1986, 27(4): 369-375.]
- [20] Ye Hengchun, Yang Daqing, David Robinson. Winter rain on snow and its association with air temperature in northern Eurasia. *Hydrol. Process.*, 2009, 22: 2728-2736.
- [21] Thompson D W J, Wallace J M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential-height and temperature fields. *Geophysical Research Letters*, 1998, 25: 1297-1300.
- [22] Thompson D W J. Annular modes in the extratropical circulation. *Journal of Climate*, 2000, 13(5): 1018-1036.
- [23] Gong D Y, Ho C H. Arctic oscillation signals in East Asian summer monsoon. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D2)4066. doi: 10.1029/2002JD002193.
- [22] Wu Bingyi, Huang Ronghui. Effects of the extremes in the North Atlantic Oscillation on East Asia Winter Monsoon. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 1999, 23(6): 641-657. [武炳义, 黄荣辉. 冬季北大西洋涛动极端异常变化与东亚冬季风. *大气科学*, 1999, 23(6): 641-657.]
- [24] Gong D Y, Wang S W, Zhu J H. East Asian winter monsoon and Arctic Oscillation. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(10): 2073-2076.
- [25] Wu B Y, Wang J. Winter Arctic Oscillation, Siberian high and East Asian winter monsoon. *Geophysical Research Letters*, 2002, 29(19): 1897. doi: 10.1029/2002GL015373.
- [26] Gong Daoyi, Wang Shaowu. Influence of Arctic Oscillation on Winter Climate over China. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(4): 559-568. [龚道溢, 王绍武. 近百年北极涛动对中国冬季气候的影响. *地理学报*, 2003, 58(4): 559-568.]
- [27] Gong Daoyi, Wang Shaowu, Zhu Jinhong. The significant influence of arctic oscillation on variance of China daily temperature in winter. *Chinese Science Bulletin*, 2004, 49(5): 487-492. [龚道溢, 王绍武, 朱锦红. 北极涛动对我国冬季日气温方差的显著影响. *科学通报*, 2004, 49(5): 487-492.]
- [28] Ju Jianhua, Ren Juzhang, Li Junmei. Effect of interdecadal variation of Arctic Oscillation on temperature increasing in north of East Asian winter. *Plateau Meteorology*, 2004, 23(4): 429-434. [据建华, 任菊章, 吕俊梅. 北极涛动年代际变化对东亚北部冬季气温增暖的影响. *高原气象*, 2004, 23(4): 429-434.]
- [29] He Chun, He Jinhai. Relation between Arctic Oscillation and North China air temperature in winter. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2003, 26(1): 1-7. [何春, 何金海. 冬季北极涛动和华北冬季气温变化关系研究. *南京气象学院学报*, 2003, 26(1): 1-7.]
- [30] Hurrell J W. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation. *Science*, 1995, 269: 676-679.
- [31] Serreze M C, Carse F, Barry R G. Icelandic low cyclone activity: climatological features, linkages with the NAO and relationships with recent changes in the Northern hemisphere circulation. *Journal of Climate*, 1997, 10: 453-464.
- [32] Wang Huijun, He Shengping. The increase of snowfall in Northeast China after mid-1980s. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(8): 629-633. [王会军, 贺圣平. 我国东北冬季降雪的年代际增多及其与冬季风减弱的关系. *科学通报*, 2013, 58(8): 629-633.]

The spatial and temporal variations of winter snowfall in agri-pasture transitional zone of North China

WANG Ji¹, HE Liye², ZHANG Xuemei³

(1. Beijing Regional Climate Center, Beijing 100089, China; 2. Tianjin Climate Center, Tianjin 300074, China;
3. Harbin Meteorological Bureau, Harbin 150028, China)

Abstract: Using daily snowfall observations (1961-2012) of 227 meteorological observation stations which are treated by a series of climatic statistical methods, analysis is performed on the temporal and spatial characteristics of winter snowfall in the agri-pasture transitional zone of North China and its relations with circulation factors. The result shows that the high value center of snowfall is located in the northeast of Inner Mongolia in early winter, and then it moves to the southern part of North China at the end of winter and the beginning of spring. The periods of the 1960s and 1970s witnessed more snowfalls at all levels than normal, with high value centers moving eastward from West Inner Mongolia (in the 1960s) to most parts of Hebei and Shanxi provinces (in the 1970s). Since the 2000s, heavy snowfalls across North China have been the most significant in the north of Shanxi and Hebei provinces, with Hulunbuir coming next. Regarding variations of snowfall frequencies, there is a decline in the frequency of heavy snowfalls in different regions, with the most significant decrease occurring in Hebei province and the south of Shanxi province (named as the VI region in this paper). During the period with fewer snowfalls in North China (in the 1980s and 1990s), vapor transport was weak, moving from northwest to southeast; whereas during the years of strong vapor transport, the water transport in the past decade moved from southeast to northwest. The inter-decadal snowfall has a negative correlation with the air temperature and Arctic Oscillation (AO) index, whereas the snowfall at moderate and high levels is positively correlated with the air temperature and AO index in high latitude areas like the Greater Hinggan and Taihang Mountains in northeastern Inner Mongolia.

Keywords: agri- pasture transitional zone; snowfall; inter- decadal variation; spatial and temporal variation