

近 50 a 西北干旱区冬季积雪日数变化特征

马 荣, 张明军*, 王圣杰, 王 杰, 杨 森, 陈 荣

(西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

摘要: 论文基于西北干旱区 104 个站点 1961—2010 年的日积雪深度、日平均气温、日降水量数据和 NCEP/NCAR 数据, 利用 *K-means* 聚类分析、*Mann-Kendall* 法等方法, 对西北干旱区冬季积雪日数的时空变化特征及其变化原因进行分析。结果表明: 1) 冬季积雪日数大值主要集中在阿尔泰山和准噶尔盆地地区, 西辽河流域、鄂尔多斯高原、天山、塔里木、阿拉善高原地区冬季积雪日数相对较少, 内蒙古高原地区冬季积雪日数基本呈由高纬地区向低纬地区减少的趋势。2) 近 50 a, 西北干旱区冬季积雪日数呈增加趋势, 且各区域主要在 1984 年发生突变现象。内蒙古高原地区内站点冬季积雪日数变化较大, 其他分区内站点的冬季积雪日数基本无变化。3) 西北干旱区各分区周期变化主要集中在 5、10、25 a 左右, 其中 25 a 的周期变化最为明显。4) 冬季东亚大槽、南支槽的减弱与西风的增强使西北干旱区降水量增加是导致西北干旱区冬季积雪日数增加的主要原因。

关键词: 气候变化; 冬季积雪日数; 西北干旱区

中图分类号: P426.63⁵

文献标志码: A

文章编号: 1000-3037(2018)01-0127-12

冰冻圈作为气候系统的重要圈层, 以巨大的热容量和冰储量调节着地球上的能量平衡和水分平衡^[1]。积雪是由降雪覆盖形成的地球表面的雪层, 是冰冻圈的重要组成部分^[2]。作为一种特殊的下垫面, 积雪的高反射率、低导热率以及相变潜热等特点会对地表能量、水文、大气环流等方面产生影响, 进而影响气候变化^[3-5]。此外, 积雪作为一个气候变化指标, 能够对全球变暖迅速做出响应^[6-8]。所以, 监测积雪变化和明确积雪变化趋势对研究全球气候变化具有重要意义^[9]。

国内外学者对积雪长期变化的研究已得出一些有意义的研究成果。*Armstrong* 等^[10]在研究中发现全球大约 98% 的季节性积雪分布在北半球。而随着全球变暖, 北半球积雪表现出不同的变化特征。*Marty*^[11]研究表明瑞士阿尔卑斯山区平均积雪深度在 20 世纪 80 年代之前呈缓慢增加趋势, 之后到 20 世纪末表现为减少趋势; *Laternser* 等^[12]研究表明该区在 20 世纪 80 年代出现积雪日数由多到少的突变, 平均损失的积雪日数大约为 20%~60%。*Leathers* 等^[13]研究表明 1949—1988 年积雪在美国东北部无长期变化趋势。*王春学*等^[14]研究表明中国春、秋季积雪日数和最大积雪深度呈递减趋势, 冬季最大积雪深度和最大积雪日数呈增加趋势。在青藏高原地区的研究表明 1981—2010 年青藏高原平均年积雪日

收稿日期: 2016-11-17; 修订日期: 2017-09-08。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41161012); 全球变化国家重大科学研究计划项目 (2013CBA01801)。

[Foundation items: Natural Science Foundation of China, No. 41161012; National Basic Research Program of China (973 Program), No. 2013CBA01801.]

第一作者简介: 马荣 (1990-), 女, 山东莱芜人, 硕士研究生, 主要从事全球变化与可持续发展研究。E-mail: geo_marone@126.com

*通信作者简介: 张明军 (1974-), 男, 甘肃宁县人, 教授, 博士生导师, 主要从事气候变化与冰川方面的研究。E-mail: mjzhang2004@163.com

数以4.81 d/10 a的幅度减少^[15], 西藏地区1979—2010年的雪深表现出显著的增加趋势^[16], 青藏高原东部的积雪日数主要受降雪变化的影响^[17], 青藏高原西部积雪日数可能主要受冬季气温升高的影响^[18]。在北疆地区的研究表明阿勒泰地区1961—2011年最大积雪深度呈显著增加趋势^[19], 且对北疆积雪各变量的影响程度为海拔>坡向>坡度>植被>纬度>经度^[20]。在东北地区的研究表明, 该区积雪存在增加的趋势^[21-22]。由此发现, 国内外学者对中国积雪的研究主要集中在青藏高原、北疆与东北地区, 而对整个西北干旱区积雪的研究相对较少。干旱区内高山冰雪融水是干旱区域重要的水资源补给方式之一, 同时干旱区域冬季积雪时间长、积雪范围大, 可能会造成农牧业方面的灾害^[23-24], 而整个西北干旱区积雪的变化特征和影响因素尚未清晰。所以, 研究整个西北干旱区积雪参数(如积雪日数、积雪面积、积雪深度等)的变化对当地气候变化和农业生产具有重要的现实意义。

因此, 本文基于西北干旱区1961—2010年的积雪数据, 较为全面地分析了西北干旱区冬季积雪日数的时空变化, 并结合降水、气温和NCEP/NCAR数据揭示气候变化对积雪日数的影响, 从而解释西北干旱区冬季积雪日数的变化规律。

1 研究区概况

西北干旱区(图1)位于大兴安岭以西, 祁连山、阿尔金山、昆仑山一线以北, 总

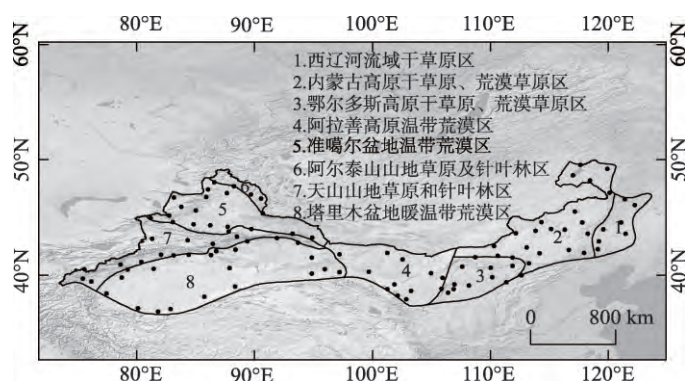


图1 研究区域气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in the study area

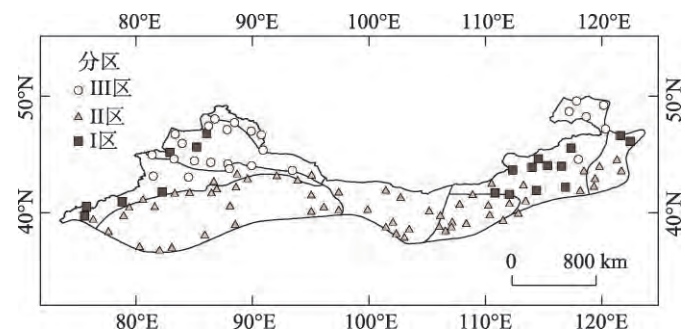


图2 K-means聚类分析方法对西北干旱区冬季积雪日数分区

Fig. 2 Zones of snow cover days in winter in arid region of Northwest China clustered by K-means

面积约占全国陆地面积的1/3, 地处中纬度, 远离海洋, 身居大陆腹地, 以干旱、半干旱气候为主, 沙漠、戈壁分布广泛, 其特殊的地理位置和地貌组成决定了该区域气候变化的复杂性, 是全球变化最敏感的区域之一^[25-26]。

为了了解西北干旱区详细、准确的冬季积雪日数变化, 本文对西北干旱区站点年冬季积雪日数进行K-means聚类分析, 并结合中国自然地理区划^[25-26], 将西北干旱区划分为3个区(图2): 内蒙古草原干草原、荒漠草原区为I区; 西辽河流域干草原区、鄂尔多斯高原干草原、荒漠草原区、阿拉善高原温带荒漠区、天山山地草原和针叶林区、塔里木盆地暖温带荒漠区为II区; 准噶尔盆地温带荒漠区、阿尔泰山山地草原及针叶林区为III区。

2 数据与方法

2.1 数据来源

地面气象站积雪、气温和降水量数据均来自于国家气象信息中心。NCEP/NCAR 再分析资料为全球逐月高度场、风场、比湿资料。积雪日数以积雪深度为标准进行定义, 当日积雪深度 > 1 cm 时记为 1 个积雪日数^[27]。对于冬季积雪资料的缺测现象, 剔除缺测资料连续超过 1 a 的站点, 而对于部分站点资料缺测少于 1 a 的现象, 选出了与缺测站积雪深度序列通过 0.05 置信度检验且相关系数最大的站建立回归方程, 进而对缺测站资料进行插补, 最后选取了西北干旱区内 104 个站点上 1961—2010 年的观测资料进行研究。

2.2 研究方法

1) 聚类分析法

聚类分析作为一种多元统计分析方法, 可以把一个无类别标记样本按某种相似性划分成若干类, 尽可能地将相似样本归为一类, 将不相似样本划分至不同类中。本文通过 K-means 聚类分析法对西北干旱区进行区域划分。K-means 算法的步骤为: 首先, 从 N 个元组或数据集中选择 k 个对象作为初始的 k 个簇的质心; 其次, 对剩余的每个对象, 根据其与其各个质心的距离, 将它赋予最近的簇; 然后, 重新计算每个簇的质心, 这个过程不断重复至标准测度函数收敛^[28-30]。

2) 线性趋势法

利用线性方法来分析积雪日数的趋势变化:

$$y = a + bt \quad (1)$$

式中: a 为常数; b 为回归系数, $b \times 10$ 称为积雪日数倾向率 (d/10 a), $|b|$ 的大小显示增加或减少趋势的程度, b 值的正负显示随时间增加或减少的趋势。

3) Mann-Kendall 检验法

Mann-Kendall 在目前突变检验方法中理论基础强、人为性少, 其样本不遵从正态分布, 也不受少数异常值的影响^[31-32]。本文通过 Mann-Kendall 非参数统计检验法研究了冬季积雪日数的气候突变现象。

4) 森斜率法

本文通过森斜率法^[33]对西北干旱区各个站点的冬季积雪日数变化倾向率进行估算, 计算过程为:

$$Sen_i = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_k}{j - k} \right) \quad (2)$$

式中: x_k 、 x_j 分别是第 k 和 j ($\forall k < j$) 时刻的样本值; $i \in N^*$, 若各个时段内均对应一个数据值, 则 $n = t(t-1)/2$ (t 为时间周期数值)。 Sen_i 值由 n 的奇偶性决定:

$$Sen = \begin{cases} Sen_{(t+1)/2} & (n = 2k + 1) \\ [Sen_{t/2} + Sen_{(t+2)/2}]/2 & (n = 2k) \end{cases} \quad (3)$$

5) 多元线性回归模型

分析积雪日数与降水量、气温之间的关系时, 可采用多元线性回归模型^[34-36]。为消除资料各时间序列因权重和各要素因单位不同而产生的影响, 本文对冬季积雪日数、冬季降水量和冬季平均气温进行了均值标准化处理^[37], 使得各序列要素平均值为 0, 方差为

1, 这样在同一水平上, 不同要素和各序列数据之间具有了可比性。然后, 对标准化处理的冬季积雪日数、冬季平均气温和冬季降水量时间序列建立回归方程:

$$S_i = aT_i + bP_i + c \quad (4)$$

式中: S_i 、 T_i 、 P_i 分别是第 i 年标准化后的冬季积雪日数、冬季平均气温、冬季降水量; a 、 b 、 c 均是回归方程的回归系数。

6) 小波分析

小波分析是在傅立叶变换的基础上, 把一个时间序列分为频率与时间的贡献, 它能够获取一个复杂时间序列的调整规律, 能够显示气候变化在时间尺度上的周期变化特征, 是一种可以显示气候周期变化特征的数学手段^[21,38-39]。

3 结果分析

3.1 冬季积雪日数的时空分布特征

3.1.1 积雪日数的空间分布

近 50 a, 西北干旱区平均冬季积雪日数在 1~90 d 之间, 冬季积雪日数大值主要集中在 III 区, 该区内大部分站点冬季积雪日数高于 55 d。II 区内大部分站点冬季积雪日数低于 40 d, 其中塔里木盆地中的铁干里克冬季基本无积雪现象, 冬季积雪日数仅 1 d, 但位于天山地区的奇台站冬季积雪日数高达 90 d。I 区内冬季积雪日数主要呈现出由高纬地区向低纬地区减少的趋势 (图 3)。

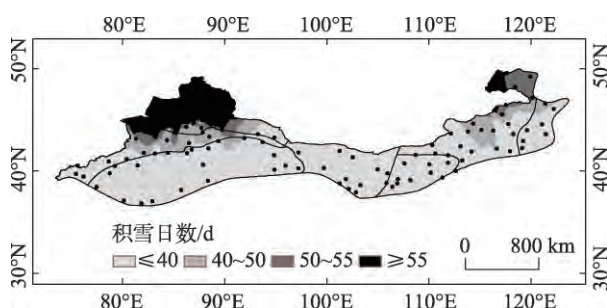


图3 西北干旱区平均冬季积雪日数空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of the average snow cover days in winter in arid region of Northwest China

3.1.2 积雪日数的年际变化

西北干旱区包含盆地、山地、荒漠等, 地形地貌复杂, 积雪所呈现出的时间特征差异性比较显著。由图 4 可知, 近 50 a, I 区冬季积雪日数呈显著增加趋势, 该区通过了 0.05 置信度检验, 增幅为 3.02 d/10 a [图 4(a)], 其他分区以及整个西北干旱区冬季积雪日数呈增加趋势, 但增加趋势不明显, 均未通过 0.05 置信度检验 [图 4(c)、(e)、(g)]。

在此基础上, 通过 Mann-Kendall 检验法对西北干旱区及其各分区冬季积雪日数的变化进行详细分析, 可以发现, 全区冬季积雪日数在 20 世纪 70 年代中期之前呈波状减少趋势, 之后呈持续增加趋势, 且在 1993、2003 年左右增加趋势显著, 突破 0.05 置信区间, 全区冬季积雪日数在 1984 年左右发生了由少到多的突变 [图 4(h)]。从各个分区来看, I 区冬季积雪日数在 20 世纪 80 年代中期之前呈波状减少趋势, 之后呈持续增加趋势, 且在 1993 年左右增加趋势显著, 突破 0.05 置信区间, I 区冬季积雪日数在 1984 年左右发生了由少到多的突变 [图 4(b)]。II 区冬季积雪日数在 20 世纪 80 年代之前呈波状增加趋势, 之后到 21 世纪初表现为波状减少趋势, 之后一直持续增加, 但并未突破 0.05 置信区间, II 区冬季积雪日数在 2000 年发生了由少到多的突变 [图 4(d)]。III 区冬季积雪日数在 20 世纪 80 年代中期呈波状减少趋势, 且在 1970、1975、1980 年左右减少趋势明显, 突破 0.05 置信区间, 20 世纪 80 年代中期之后呈持续增加趋势, 且在 2003 年左右突破 0.05 置信区

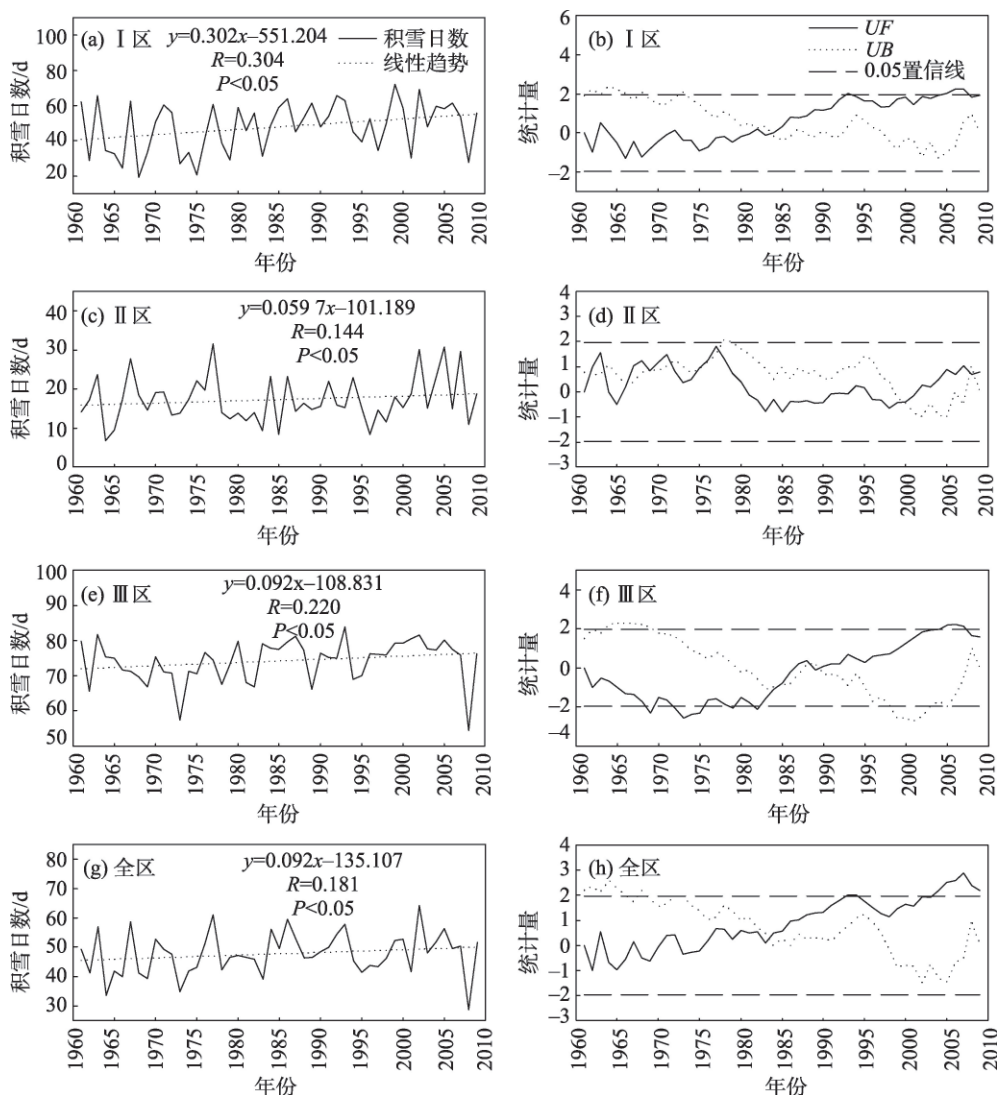


图4 西北干旱区冬季积雪日数的年际变化和Mann-Kendall突变检验

Fig. 4 The inter-annual changes of snow cover day in winter and Mann-Kendall test for abrupt climate change

间, 增加趋势明显, III区冬季积雪日数在1984年左右发生由少到多的突变 [图4(f)]。

3.1.3 积雪日数的空间变化

近50 a, 西北干旱区的冬季积雪日数倾向率在 $-2.0 \text{ d}/10 \text{ a}$ ~ $7.9 \text{ d}/10 \text{ a}$ 之间, 104个气象站点中有13个站冬季积雪日数呈减少趋势, 41个站呈增加趋势, 其余50个站倾向率为0, 冬季积雪日数在近50 a均无明显变化, 全区只有14个站积雪日数通过0.05的置信度检验。其中: I区内站点冬季积雪日数倾向率在 $-0.3 \text{ d}/10 \text{ a}$ ~ $7.9 \text{ d}/10 \text{ a}$ 之间, 冬季积雪日数主要呈增加趋势; II区、III区内站点冬季积雪日数倾向率均在 $-2.0 \text{ d}/10 \text{ a}$ ~ $4.0 \text{ d}/10 \text{ a}$ 之间, 大部分站点积雪日数倾向率为0, 积雪日数变化较小 (图5)。

3.1.4 积雪日数的周期变化

小波分析可以呈现出时间变化规律, 诊断气候变化内在层次结构, 分辨不同尺度上

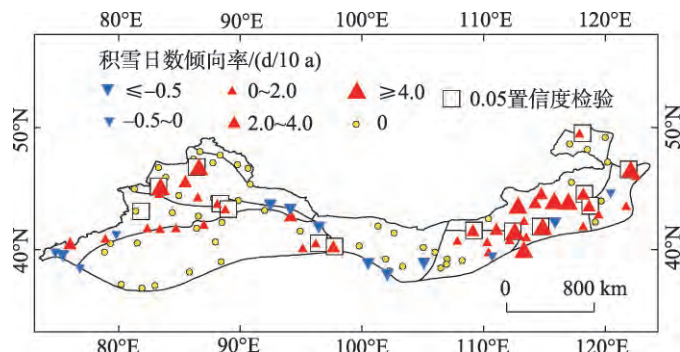


图5 西北干旱区冬季积雪日数倾向率年际变化空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of trend magnitude of snow cover days in winter in arid region of Northwest China

时间序列演变特征。本文通过西北干旱区各分区冬季积雪日数小波方差和小波分析系数实部图(图6)进行周期变化分析。I区冬季积雪日数存在5、10、25 a的周期变化[图6(b)], 3个周期变化在近50 a始终明显存在[图6(a)]。II区冬季积雪日数存在13、25 a的周期变化[图6(d)], 其中13 a周期变化是在20世纪70年代到21世纪初之间

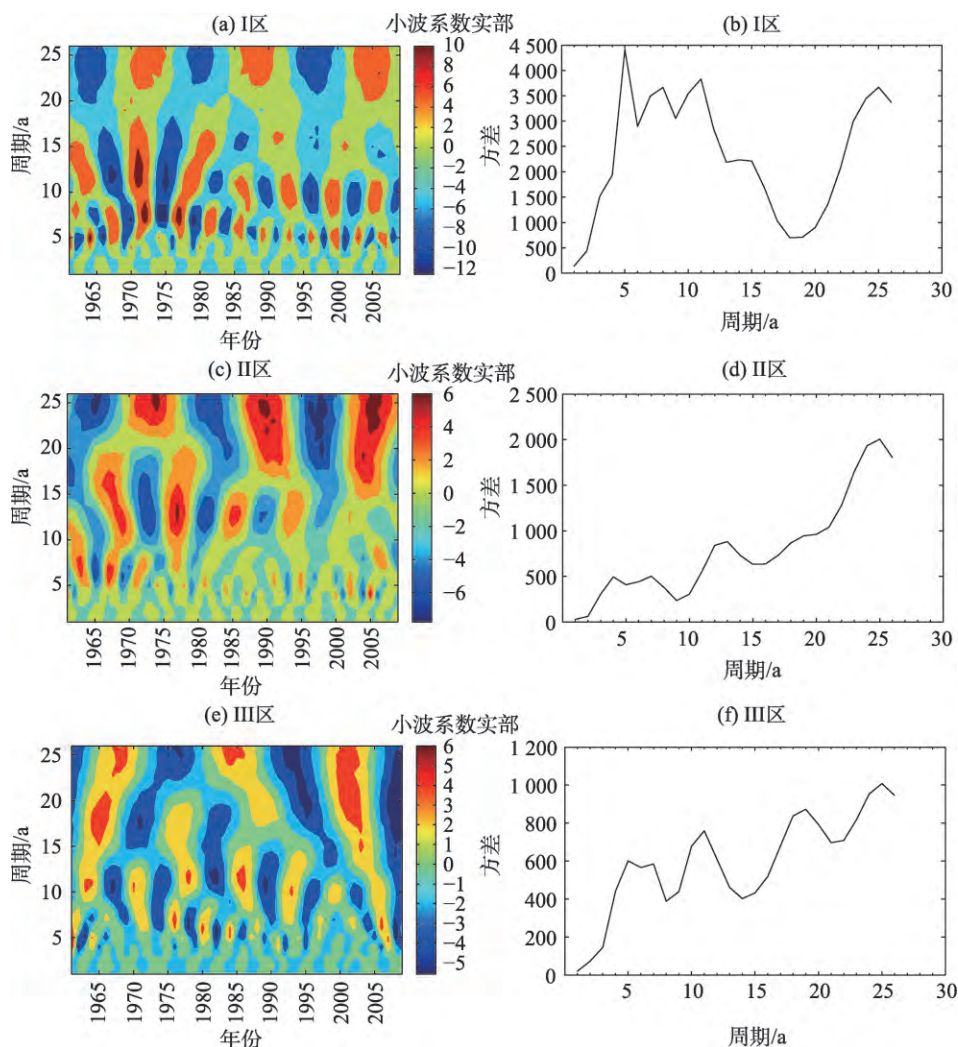


图6 西北干旱区各分区冬季积雪日数 Morlet 小波系数实部和周期变化的方差

Fig. 6 Morlet wavelet coefficient and variance of cycle change of snow cover days in winter in each arid region of Northwest China

表现明显, 经历4次“+ -”相位循环, 其余时间均处于削弱状态, 25 a的周期变化在近50 a一直明显存在, 经历3次“- +”相位循环 [图6(c)]。III区冬季积雪日数存在5、10、19和25 a的周期变化 [图6(f)], 其中5 a左右的周期近50 a变化并不明显, 10 a的周期变化在20世纪70年代之前变化明显, 之后开始向短周期靠近, 19 a的周期变化在20世纪80年代之前一直明显存在, 之后向更长周期靠近, 25 a的周期变化在近50 a始终明显存在, 经历3次“+ -”相位循环 [图6(e)]。

3.2 成因分析

3.2.1 西北干旱区冬季积雪日数偏多期、偏少期的大气环流分析

图7是通过NCEP/NCAR再分析资料做出的冬季积雪日数偏少期(1961—1984年)与冬季积雪日数偏多期(1985—2009年)两个时段的由地面到300 hPa的可降水量、水汽通量

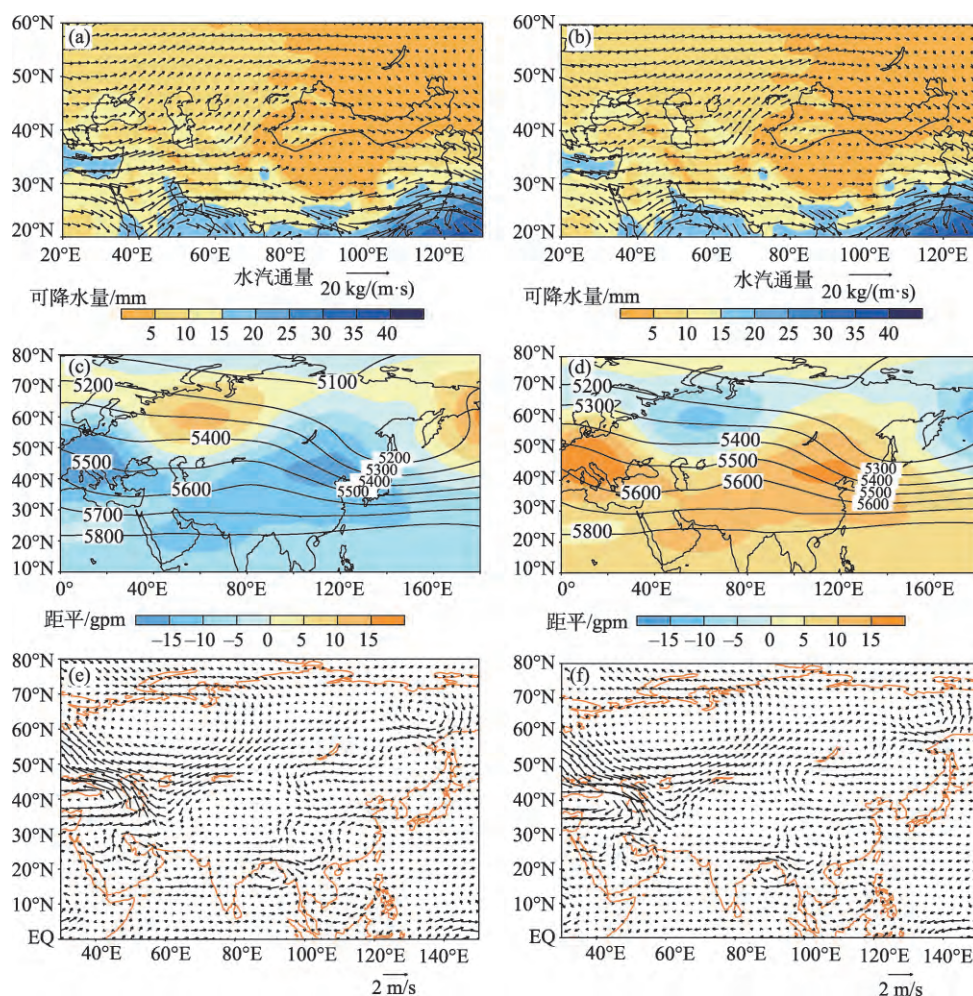


图7 西北干旱区冬季积雪日数偏少时段(a、c、e)、偏多时段(b、d、f)平均冬季由地面到300 hPa的可降水量、水汽通量, 500 hPa合成高度场、距平场和850 hPa风场距平

Fig. 7 The precipitable water and vapor flux from surface to 300 hPa, the composite geopotential height and its anomaly field at 500 hPa and the anomaly field of 850 hPa wind in winter with less snow cover days period (a, c, e) and rich snow cover days (b, d, f)

汽通量, 500 hPa 合成高度场、距平场, 以及 850 hPa 风场距平图。由图 7(a)、(b)可知, 在冬季积雪日数偏少期与偏多期, 地中海、黑海和里海均为可降水量的较大值区域, 是冬季西北干旱区的水汽源地, 水汽由地中海上空经黑海、里海, 再到西伯利亚, 从而为西北干旱区带来水汽。

对于冬季积雪日数偏少期 [图 7(c)、(e)], 中高纬度 60°E 高压脊附近的位势高度较常年上升, 140°E 低压槽附近的位势高度较常年下降, 说明高压脊和东亚大槽均有增强的情况, 南支槽也存在加强的情况, 东亚冬季风存在的加强情况利于冷空气向南方移动, 且西北干旱区多为东北风正距平与偏东风正距平, 不利于将地中海、里海、黑海水汽输送到西北干旱区, 从而减少了西北干旱区雨雪天气的产生。

对于冬季积雪日数偏多期 [图 7(d)、(f)], 中高纬度 60°E 高压脊附近的位势高度较常年下降, 140°E 低压槽附近的位势高度较常年上升, 说明高压脊和东亚大槽均有减弱的情况, 东亚冬季风存在的减弱情况不利于冷空气向南方移动, 虽然南支槽的减弱也不利于冷空气向南方移动, 但利于南方暖湿气流向北移动, 且西北干旱区多为西南风正距平, 利于将地中海、里海、黑海水汽输送到西北干旱区, 这均利于在西北干旱区形成雨雪天气。

3.2.2 气温和降水对积雪日数的影响

冬季气温变化会对积雪的消融造成影响, 冬季降水量的多少也会直接影响积雪的深浅, 气温和降水量这两个气候变量在气候变化对积雪影响的分析中是不可或缺的, 因此, 本文分析冬季气温和降水量对冬季积雪日数的影响。

近 50 a, 西北干旱区各分区冬季降水均呈显著增加趋势, 增幅范围在 0.51 mm/10 a~3.77 mm/10 a 之间, III 区增幅最大, 增幅为 3.77 mm/10 a, II 区增幅最小, 仅 0.51 mm/10 a。通过数学统计方法^[40]计算出了 104 个站点的雨、雪临界温度, 并得出每个分区与整个西北干旱区的雨、雪临界温度, 如图 8 所示, 整个西北干旱区及其各分区均以增幅 0.48 °C/10 a~0.54 °C/10 a 左右的趋势显著增加, 但均远未超过雨与雪的临界温度。

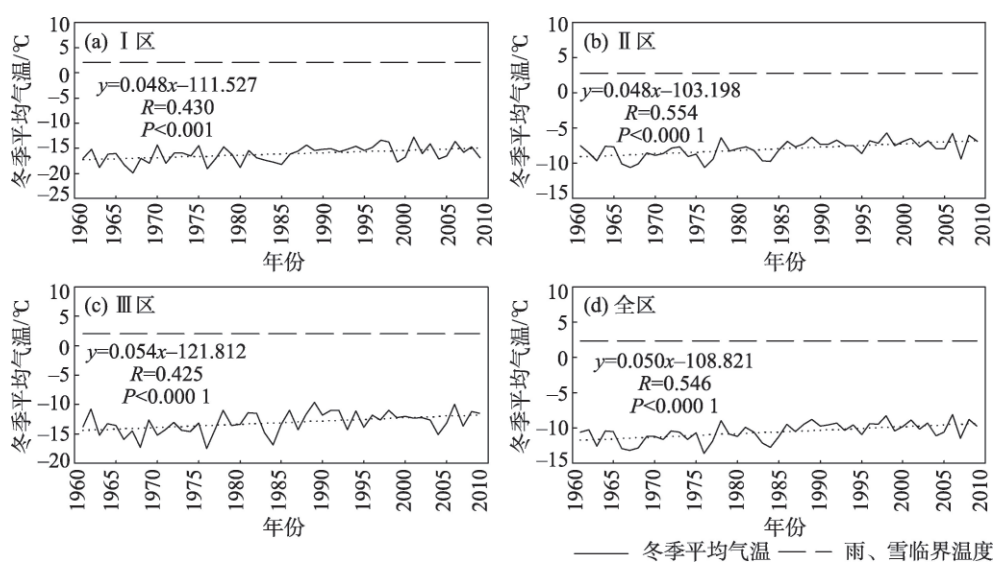


图8 西北干旱区冬季平均气温的年际变化

Fig. 8 The inter-annual changes of average temperature in winter in arid region of Northwest China

从表 1 可知, 西北干旱区及其各分区冬季积雪日数与冬季降水量和平均气温表现为以下特征, 冬季积雪日数与冬季降水量呈正相关, 在 II 区, 相关系数高达 0.689, 且所有区域均通过 0.05 置信度检验; 冬季积雪日数与冬季平均气温表现出较低的负相关, 除 II 区, 其他区域均未通过 0.05 置信度检验。

利用回归分析, 进一步分析冬季气温、降水对冬季积雪日数的影响。结果如表 2 所示, 各区域冬季积雪日数与冬季气温、降水量复相关系数都在 0.38 以上, II 区复相关系数高达 0.791, 且全部通过 0.05 的置信度检验。从表 2 分析, 西北干旱区及其各分区均为冬季降水量对积雪日数的影响大于冬季平均气温对积雪日数的影响。

由此可知, 虽然近 50 a 西北干旱区及其各分区冬季平均气温升高, 但均未超过雨、雪的临界温度, 不会较大影响到降雪情况的产生, 而冬季东亚大槽、南支槽的减弱与西风的增强使西北干旱区雨雪天气增多, 并且西北干旱区冬季降水量对冬季积雪日数的影响大于冬季平均气温对积雪日数的影响。所以, 冬季东亚大槽、南支槽的减弱与西风的增强使西北干旱区冬季降水量增加, 这可能是导致西北干旱区冬季积雪日数增加的主要原因。

4 结论

本文基于 1961—2010 年地面气象站积雪、气温、降水量和 NCEP/NCAR 数据, 对近 50 a 西北干旱区冬季积雪日数的时空变化、突变、周期和影响因子进行了分析, 主要结论如下:

- 1) 通过对各个站点冬季积雪日数进行聚类分析, 将西北干旱区划分为 3 个区, 发现西北干旱区冬季积雪日数大值主要集中在 III 区, II 区内冬季积雪日数相对较少, I 区内冬季积雪日数基本呈由高纬地区向低纬地区逐渐减少的趋势。
- 2) 西北干旱区及其 3 个分区冬季积雪日数均表现出了由少到多的变化趋势, 且除 II 区在 2000 年发生由少到多的突变, 西北干旱区及其余分区均在 1984 年左右发生冬季积雪日数由少到多的突变。近 50 a, I 区内站点的冬季积雪日数大部分呈增加趋势, II 区、III 区内各站点的冬季积雪日数基本无变化。
- 3) 西北干旱区各分区周期变化出现频率较高, 周期变化主要集中在 5、10、25 a 左右, 其中 25 a 左右的周期变化是西北干旱区近 50 a 最为明显的周期。
- 4) 东亚大槽、南支槽的减弱与西风的增强使西北干旱区降水量增多, 这可能是西北干旱区冬季积雪日数增加的主要原因。

表 1 西北干旱区冬季气温、降水与积雪日数的相关性分析
Table 1 Correlation analysis of snow cover days with temperature and precipitation in winter in arid region of Northwest China

	I 区	II 区	III 区	全区
气温	-0.222	-0.384**	-0.173	-0.172
降水	0.631**	0.689**	0.299*	0.432**

注: *, ** 分别表示通过 0.05、0.01 置信度检验。

表 2 西北干旱区冬季积雪日数与冬季降水、气温的回归分析结果

Table 2 Regression analysis of annual snow cover days, precipitation and temperature in winter in arid region of Northwest China

区域	气温系数	降水系数	复相关系数	显著性水平
I 区	-0.118	0.611	0.642	<0.001
II 区	-0.389	0.692	0.791	<0.001
III 区	-0.242	0.348	0.382	<0.05
全区	-0.287	0.499	0.515	<0.001

参考文献(References):

- [1] LEMKE P, REN J. Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground [M]. Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Paris: The Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007: 48.
- [2] 李培基, 米德生. 中国积雪的分布 [J]. 冰川冻土, 1983, 5(4): 9-18. [LI P J, MI D S. Distribution of snow cover in China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 1983, 5(4): 9-18.]
- [3] 秦大河, 周波涛, 效存德. 冰冻圈变化及其对中国气候的影响 [J]. 气象学报, 2014, 72(5): 869-879. [QIN D H, ZHOU B T, XIAO C D. Progress in studies of cryospheric changes and their impacts on climate of China. *Acta Meteorologica Sinica*, 2014, 72(5): 869-879.]
- [4] BARNETT T P, DUMENIL L, SCHLESE U, et al. The effect of Eurasian snow cover on regional and global climate variation [J]. *Journal of the Atmospheric Science*, 1989, 46(5): 661-686.
- [5] CHEN X, LIANG S, CAO Y, et al. Distribution, attribution, and radiative forcing of snow cover changes over China from 1982 to 2013 [J]. *Climatic Change*, 2016, 137(3/4): 363-377.
- [6] 朱玉祥, 丁一汇. 青藏高原积雪对气候影响的研究进展和问题 [J]. 气象科技, 2007, 35(1): 1-8. [ZHU Y X, DING Y H. Influences of snow cover over Tibetan Plateau on weather and climate: Advances and problems. *Meteorological Science and Technology*, 2007, 35(1): 1-8.]
- [7] BAVAY M, LEHNING M, JONAS T, et al. Simulations of future snow cover and discharge in Alpine headwater catchments [J]. *Hydrological Processes*, 2009, 23(1): 95-108.
- [8] LINDE J, GRAB S. The changing trajectory of snow mapping [J]. *Progress in Physical Geography*, 2011, 35(2): 139-160.
- [9] 李培基. 青藏高原积雪对全球变暖的响应 [J]. 地理学报, 1996, 51(3): 260-265. [LI P J. Responses of Tibetan snow cover to global warming. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51(3): 260-265.]
- [10] ARMSTRONG R L, BRODZIK M J. Recent northern hemisphere snow extent: A comparison of data derived from visible and microwave satellite sensors [J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28(19): 3673-3676.
- [11] MARTY C. Regime shift of snow days in Switzerland [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008, 35(12): L12501. doi: 10.1029/2008GL033998.
- [12] LATERNER M, SCHNEEBELI M. Long-term snow climate trends of the Swiss Alps (1931-99) [J]. *International Journal of Climatology*, 2003, 23(7): 733-750.
- [13] LEATHERS D J, LUFF B L. Characteristics of snow cover duration across the northeast United States of America [J]. *International Journal of Climatology*, 1997, 17(14): 1535-1547.
- [14] 王春学, 李栋梁. 中国近 50 a 积雪日数与最大积雪深度的时空变化规律 [J]. 冰川冻土, 2012, 34(2): 247-256. [WANG C X, LI D L. Spatial-temporal variations of snow cover days and the maximum depth of snow cover in China during recent 50 years. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(2): 247-256.]
- [15] 除多, 杨勇, 罗布坚参, 等. 1981—2010 年青藏高原积雪日数时空变化特征分析 [J]. 冰川冻土, 2015, 37(6): 1461-1472. [CHU D, YANG Y, LUOBU J C, et al. The variations of snow cover days over the Tibetan Plateau during 1981-2010. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 27(6): 1461-1472.]
- [16] 白淑英, 史建桥, 沈渭寿, 等. 近 30 年西藏雪深时空变化及其对气候变化的响应 [J]. 国土资源遥感, 2014, 26(1): 144-151. [BAI S Y, SHI J Q, SHEN W S, et al. Spatial-temporal variation of snow depth in Tibet and its response to climatic change in the past 30 years. *Remote Sensing for Land and Resources*, 2014, 26(1): 144-151.]
- [17] 胡豪然, 梁玲. 近 50 年青藏高原东部冬季积雪的时空变化特征 [J]. 地理学报, 2013, 68(11): 1493-1503. [HU H R, LIANG L. Spatial and temporal variations of winter snow over east of Qinghai-Tibet Plateau in the last 50 years. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68(11): 1493-1503.]
- [18] 唐小平, 闫小利, 尼玛吉, 等. 西藏高原近 40 年积雪日数变化特征分析 [J]. 地理学报, 2012, 67(7): 951-959. [TANG X P, YAN X L, NI M J, et al. Changes of the snow cover days on Tibet Plateau in last 40 years. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(7): 951-959.]
- [19] 王国亚, 毛炜峰, 贺斌, 等. 新疆阿勒泰地区积雪变化特征及其对冻土的影响 [J]. 冰川冻土, 2012, 34(6): 1293-1300. [WANG G Y, MAO W Y, HE B, et al. Changes in snow covers during 1961-2011 and its effects on frozen ground in Altay region, Xinjiang. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, 34(6): 1293-1300.]
- [20] 王宏伟, 黄春林, 郝晓华, 等. 北疆地区积雪时空变化的影响因素分析 [J]. 冰川冻土, 2014, 36(3): 508-516. [WANG H W, HUANG C L, HAO X H, et al. Analyses of the spatiotemporal variations of snow cover in North Xinjiang. *Jour-*

- nal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(3): 508-516.]
- [21] 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 [J]. 气象, 2011, 37(5): 513-521. [CHEN G Y, LI D L. Temporal-spatial characteristics of cumulative snow depth in Northeast China and its vicinity. Meteorological Monthly, 2011, 37(5): 513-521.]
- [22] 严晓瑜, 赵春雨, 任国玉, 等. 1962—2008年辽宁省积雪变化特征 [J]. 气象与环境学报, 2012, 28(2): 34-39. [YAN X Y, ZHAO C Y, REN G Y, et al. Characteristics of snow cover from 1962 to 2008 in Liaoning Province. Journal of Meteorology and Environment, 2012, 28(2): 34-39.]
- [23] 陈曦. 中国干旱区自然地理 [M]. 北京: 科学出版社, 2010: 23-47. [CHEN X. Physical Geography of Arid Land in China. Beijing: Science Press, 2010: 23-47.]
- [24] SHI Y, SHEN Y, KANG E, et al. Recent and future climate change in Northwest China [J]. Climatic Change, 2007, 80(3/4): 379-393.
- [25] 赵松乔. 中国综合自然地理区划的一个新方案 [J]. 地理学报, 1983, 38(1): 1-10. [ZHAO S Q. A new scheme for comprehensive physical regionalization in China. Acta Geographica Sinica, 1983, 38(1): 1-10.]
- [26] 赵松乔, 陈传康, 牛文元. 近三十年来我国综合自然地理学的进展 [J]. 地理学报, 1979, 34(3): 187-199. [ZHAO S Q, CHEN C K, NIU W Y. Thirty years in integrated physical geography in People's Republic of China. Acta Geographica Sinica, 1979, 34(3): 187-199.]
- [27] 安迪, 李栋梁, 袁云, 等. 基于不同积雪日定义的积雪资料比较分析 [J]. 冰川冻土, 2009, 31(6): 1019-1027. [AN D, LI D L, YUAN Y, et al. Contrast between snow cover data of different definitions. Journal of Glaciology and Geocryology, 2009, 31(6): 1019-1027.]
- [28] 刘伟东, 杨萍, 尤焕苓, 等. 北京地区热岛效应及日较差特征 [J]. 气候与环境研究, 2013, 18(2): 171-177. [LIU W D, YANG P, YOU H L, et al. Heat island effect and diurnal temperature range in Beijing area. Climatic and Environment Research, 2013, 18(2): 171-177.]
- [29] 韩微, 翟盘茂. 三种聚类分析方法在中国温度区划分中的应用研究 [J]. 气候与环境研究, 2015, 20(1): 111-118. [HAN W, ZHAI P M. Three cluster methods in regionalization of temperature zones in China. Climatic and Environmental Research, 2015, 20(1): 111-118.]
- [30] 刘伟东, 尤焕苓, 任国玉, 等. 北京地区自动站降水特征的聚类分析 [J]. 气象, 2014, 40(7): 844-851. [LIU W D, YOU H L, REN G Y, et al. AWS precipitation characteristics based on K-means clustering method in Beijing area. Meteorological Monthly, 2014, 40(7): 844-851.]
- [31] 刘占明, 陈子桑, 路剑飞, 等. 广东北江流域降水时空分布及其与 Niño 3 区 SST 相关性分析 [J]. 自然资源学报, 2013, 28(5): 786-798. [LIU Z M, CHEN Z S, LU J F, et al. Analysis of correlation between the spatio-temporal distribution of precipitation in Beijiang River Basin and SST in Niño 3. Journal of Natural Resources, 2013, 28(5): 786-798.]
- [32] JIANG C, LI D, GAO Y, et al. Impact of climate variability and anthropogenic activity on streamflow in the Three Rivers Headwater Region, Tibetan Plateau, China [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2017, 129(1/2): 667-681.
- [33] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau [J]. Journal of the American Statistical Association, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [34] MOTE P W. Climate-driven variability and trends in Mountain Snowpack in western North America [J]. Journal of Climate, 2006, 19(23): 6209-6220.
- [35] 戴声佩, 李海亮, 罗红霞, 等. 1960—2011年华南地区界限温度 10℃ 积温时空变化分析 [J]. 地理学报, 2014, 69(5): 650-660. [DAI S P, LI H L, LUO H X, et al. The spatio-temporal change of active accumulated temperature $\geq 10^{\circ}\text{C}$ in southern China from 1960—2011. Acta Geographica Sinica, 2014, 69(5): 650-660.]
- [36] 白淑英, 吴奇, 史建桥, 等. 青藏高原积雪深度时空分布与地形的关系 [J]. 国土资源遥感, 2015, 27(4): 171-178. [BAI S Y, WU Q, SHI J Q, et al. Relationship between the spatial and temporal distribution of snow depth and the terrain over the Tibetan Plateau. Remote Sensing for Land and Resources, 2015, 27(4): 171-178.]
- [37] 张丽旭, 魏文寿. 天山西部中山带积雪变化趋势与气温和降水的关系——以巩乃斯河谷为例 [J]. 山地学报, 2001, 19(5): 403-407. [ZHANG L X, WEI W S. Variation trends of snow cover in the middle mountains of western Tianshan and their relations to temperature and precipitation—Take the valley of Gongnaisi River as example. Journal of Mountain Science, 2001, 19(5): 403-407.]
- [38] 李森, 夏军, 陈社明, 等. 北京地区近 300 年降水变化的小波分析 [J]. 自然资源学报, 2011, 26(6): 1001-1011. [LI M,

- XIA J, CHEN S M, et al. Wavelet analysis on annual precipitation around 300 years in Beijing area. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(6): 1001-1011.]
- [39] 林振山, 邓自旺. 小波气候诊断技术的研究 [M]. 北京: 气象出版社, 1999. [LIN Z S, DENG Z W. *Climatic Diagnosis Technology Based on Wavelet*. Beijing: China Meteorological Press, 1999.]
- [40] 王杰, 张明军, 王圣杰, 等. 基于高分辨率格点数据的 1961—2013 年青藏高原雪雨比变化 [J]. *地理学报*, 2016, 71(1): 142-152. [WANG J, ZHANG M J, WANG S J, et al. Change of snowfall/rainfall ratio in the Tibetan Plateau based on a gridded dataset with high resolution during 1961–2013. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71(1): 142-152.]

Variation Characteristics of Snow Cover Days in Winter in Arid Region of Northwest China in Last 50 Years

MA Rong, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, WANG Jie, YANG Sen, CHEN Rong
(College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In this paper, the daily datasets of snow depth, mean air temperature, and precipitation from 104 meteorological stations and NCEP/NCAR were used to study the snow cover days in winter in the arid region of Northwest China during 1961–2010. *K*-means clustering, Mann-Kendall test and other methods were used to calculate the temporal-spatial characteristics of the snow cover days and interpret the reason of the climate change. The results indicated that: 1) More snow cover days in winter mainly distributed in Junggar Basin and Altai Mountains (i.e. the region of III). The snow cover days in winter decreased gradually from high latitude to low latitude in the Inner Mongolia Plateau (i.e. the region of I). The snow cover days in winter were relatively few in the Xiliao River Basin, Ordos Plateau, Alxa Plateau, Tianshan Mountains and Tarim Basin (i.e. the region of II). 2) During the period 1961–2010, the snow cover days in winter presented an increased trend in the arid region of Northwest China, and the abrupt change was found in 1984. The big change of snow cover days in winter happened at some meteorological stations in the Inner Mongolia Plateau (i.e. the region of I), while snow cover days in winter had no obvious change at the stations in the Xiliao River Basin, Ordos Plateau, Alxa Plateau, Tianshan Mountains, Tarim Basin, Junggar Basin and Altai Mountains (i.e. the regions of II and III). 3) The variation of snow cover days in winter showed the periods of 5 years, 10 years, 25 years, approximately. The period of 25 years showed the most significance. 4) The increased precipitation in winter, caused by the weaken the East Asia major trough and Southern branch trough and the enhancement of the westerly wind, maybe the main factor of the increased trend of the snow cover days in winter in the arid region of Northwest China.

Key words: climate change; snow cover days in winter; arid region of Northwest China