

青藏高原积雪日数的空间分布及变化分析^①

李锡福¹, 唐红玉²

1. 重庆市气象局, 重庆 401147; 2. 重庆市气候中心, 重庆 401147

摘要: 选用青藏高原 88 个气象台站 1961—2007 年的逐日积雪观测资料, 分析了青藏高原年积雪日数的空间异常分布特征及其时间变化, 并对不同季节的积雪日数变化也进行了分析. 结果表明: 青藏高原年的积雪日数分布在空间上具有很好的一致性, 说明高原积雪的多少首先受大尺度环流背景影响的, 其次也受海拔和地形及不同天气系统的影响. 用 REOF 方法可将青藏高原积雪日数在空间上分为青海东部型, 山南、藏东南型, 唐古拉山型, 青南高原型、青海柴达木盆地型和西藏西部型 6 个异常敏感分布型. 从空间看, 青藏高原的年积雪日数在喜马拉雅山南麓的聂拉木、亚东、错那、改则、申扎以及念青唐古拉山一带呈增多趋势, 青南高原、青海海西东部及海东也有明显增加, 而拉萨河谷地区、怒江和澜沧江一带及青海海西西部、海北、海南、黄南北部呈减少趋势.

关键词: 青藏高原; 积雪; 趋势

中图分类号: P468.0⁺25

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2016)05-0153-08

青藏高原是世界上海拔最高面积最大的高原, 平均海拔约 4 000 m, 总面积约 200 万 km², 占我国陆地总面积的四分之一, 地形十分复杂, 地表的物理特性也很复杂, 因而具有独特的天气气候特征. 由于青藏高原对我国乃至全球气候有重要影响^[1], 对青藏高原气候变化的研究一直倍受科学家的关注.

当前, 在全球变化的研究中, 青藏高原由于其特殊性而倍受关注, 高原地表环境对气候变化的响应和影响是人们所关心的热点. 青藏高原积雪是高原地表的重要特征量, 对气候的变化十分敏感, 对它的研究可以揭示高原及其周边地区的气候变化^[2-3].

李培基^[4]利用逐日积雪深度资料对青藏高原积雪对全球变暖的响应进行了研究; 柯长青等^[5]对青藏高原 SMMR 微波积雪深度资料和逐日积雪深度资料进行了 EOF 分析, 结果表明青藏高原积雪空间分布极不均匀. 四周多雪, 特别是东西两侧多雪与广大腹地少雪形成鲜明对比, 高原东部是高原积雪年际变化最显著的地区, 它主导了整个高原积雪的年际变化, 并且与西部多雪区年际波动呈反位相关关系, 从 20 世纪 60 年代到 80 年代积雪年际波动幅度有明显增加的趋势.

潘维玉等^[6]利用青藏高原东部的玉树、曲麻来和沱沱河站的积雪日数资料分析了它们的变化特征. 韦志刚等^[7-8]分别利用积雪深度和积雪日数研究了青藏高原积雪的空间分布和年代际变化特征, 以及积雪异常的持续变化. 高荣等^[3]对 20 世纪 80、90 年代青藏高原积雪和冻土变化进行了研究, 从青藏高原积雪的变化研究看, 主要是应用气象台站的实测观测资料积雪深度和积雪日数研究为主, 由于青藏高原气象台站稀少, 资料年代短、空间分布上存在一定的可信度问题, 也有少量的应用卫星探测资料(SMMR 微波积雪深度资料)的研究^[9-10], 但高原上持续不断的云层对卫星观测积雪带来了极大的困难, 资料的连续性也

① 收稿日期: 2013-07-26

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41175080).

作者简介: 李锡福(1965-), 男, 青海互助人, 高级工程师, 主要从事天气气候及其灾害防御方面的研究工作.

是一个问题. 对实际观测资料积雪深度和积雪日数的代表性问题, 也有不同的观点, 雷俊等^[11]对其进行了比较分析, 认为两者之间有良好的相关性.

目前, 对青藏高原积雪年际和年代际变化研究比较多, 资料下限大多在 1999 年; 王叶堂^[12]利用 MODIS 卫星反演的积雪资料以及同期气象资料, 分析了 2000—2005 年青藏高原积雪分布特征、年际变化及其与同期气温和降水的关系. 文献[13]中对积雪深度进行了简单的 EOF 分析. 由于卫星资料的获取和时效性等问题, 对气象台站开展气候预测和诊断分析带来了困难, 另外, 目前对我们最为关心的 20 世纪 90 年代后的高原积雪变化的分析相对较少.

由于积雪对气候变暖的响应十分显著, 用 EOF 展开的各向量场也应有所反映. 而目前的工作仅限于对时间场和空间场变化规律的单一研究, 对各型空间展开场的时间变化趋势分析较少, 使各空间型的时间变化差异及对积雪长期变化的贡献被淡化. 本文在青藏高原积雪资料更新到 2007 年的基础上, 用 EOF 和 REOF 方法对青藏高原积雪日数进行空间展开, 在此基础上分析前几个主要特征向量场的时间变化趋势及对积雪长期变化的贡献, 以便对青藏高原积雪的变化规律有更清楚地认识.

1 资料及方法

1.1 资料来源

青藏高原积雪监测资料十分缺乏且年代不一致, 给积雪研究带来了极大的困难. 本文使用的青藏高原积雪资料从青海西藏辖区内所有气象台站逐日积雪观测资料中选取, 由于青藏高原地区尤其是西藏地区的气象台站建站较晚, 大部分台站的建站时间都是在 20 世纪 50 年代末到 60 年代, 为了全面研究青藏高原积雪的特征, 尽可能多地应用到高原地区极其珍贵的气象观测资料, 本文选取 1961 年为资料统一起始年, 结束年统一截止到 2007 年, 对于少数台站缺测年的资料, 将这些站现有的观测资料与所有其他台站同时段资料计算相关, 选出通过显著性检验并最大相关的其他台站资料, 与订正站的资料建立回归方程, 反算出缺测年的资料, 这样最终收集到青藏高原 88 个气象台站 1961—2007 年的逐日积雪观测资料进行分析.

文中年资料为上年 8 月至当年 7 月, 如 1961 年 8 月至 1962 年 7 月记为 1961 年.

1.2 方法简介

气象分析研究中, 对一个变量场进行时空分离最常用的方式是 EOF 和 REOF, EOF 称经验正交函数分析方法, 是一种分析矩阵数据中的结构特征, 提取主要数据特征量的一种方法, 因其能在有限区域对不规则分布的站点进行分解, 容易将变量场的信息集中在几个模态上, 分离出的空间结构具有一定的物理意义, 被广泛应用在气象科学研究中. REOF 称为旋转正交函数分析方法, 是对 EOF 的进一步分解, REOF 能克服 EOF 在展开时存在一定取样误差的局限性, 旋转后的时空场空间分布结构清晰, 不但可以较好地反映不同地域的变化, 还可以反映不同地域的相关分布状况. 为保证最大限度地反映高原积雪分布的局地差异, 本文中选取了前 6 个主分量进行方差最大化正交旋转(即 REOF). 该方法的介绍详见文献[14—15].

2 青藏高原积雪日数空间分布特征及其变化

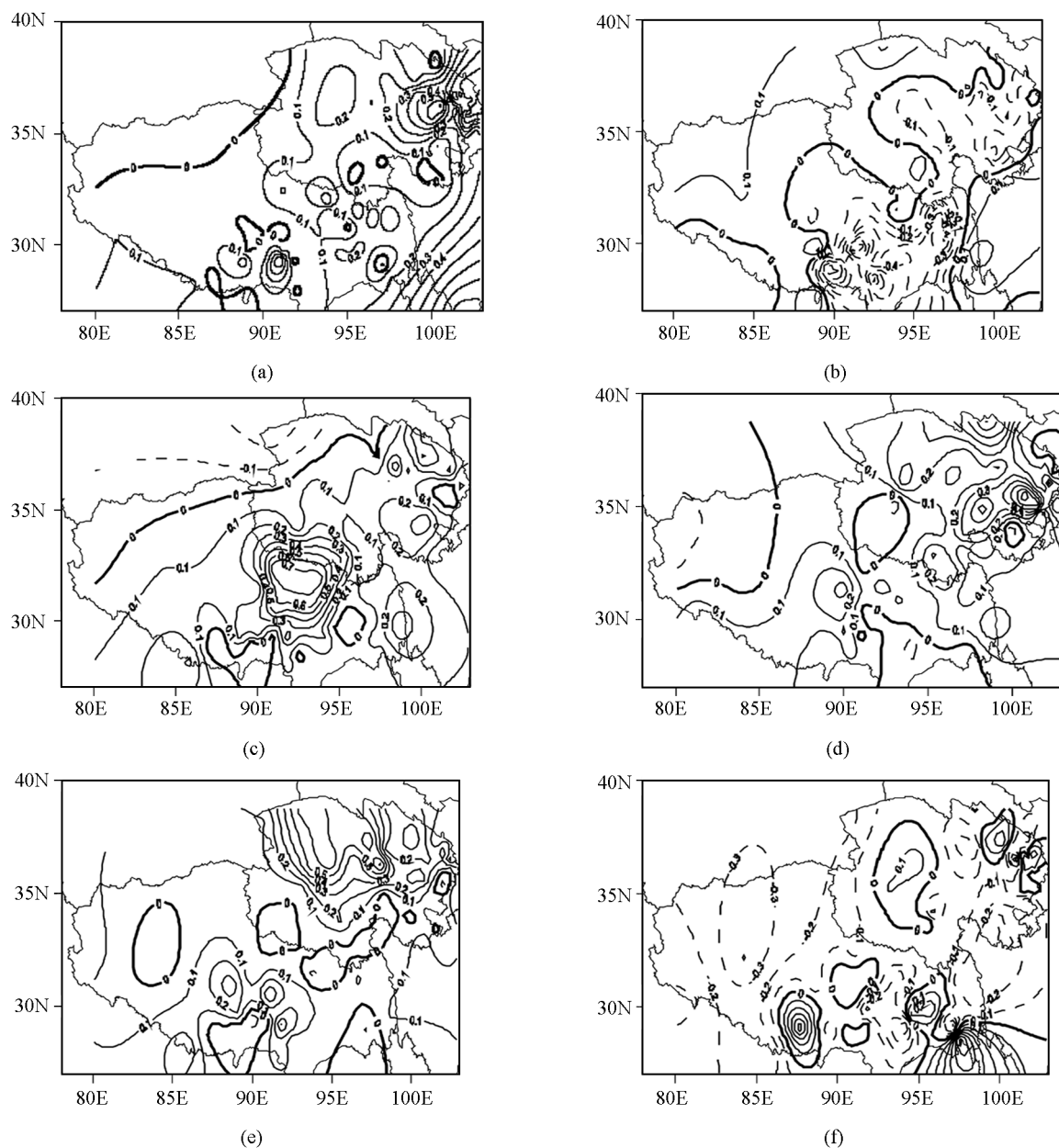
2.1 青藏高原积雪的异常空间分布特征

通过对青藏高原 88 个测站 1961—2007 年历年 8—7 月积雪日数资料进行 EOF 后, 其前 10 个主分量的累积方差贡献率达到 67.5%, 前 6 个主分量的累积方差贡献为 61.6%, 可基本反映青藏高原积雪日数的空间分布特征.

为进一步分析青藏高原积雪分布的主要局地特点, 在以上分析的基础上选前 10 个主成分所对应的载荷向量进行旋转. 旋转后的前 10 个主分量的累积方差贡献率达到 68.4%, 前 6 个主分量的累积方差贡献为 60.2%, 也能基本反映出青藏高原积雪日数的局地空间分布特征, 故对前 6 个空间异常分布型及其时间变

化进行具体分析:

第 1 旋转载荷向量场(RLV1)高值区在青海东部地区, 这一地区是青海省主要农业区, 中心值达 $+0.7$ (图 1-a). 该地区海拔相对较低, 平均在 2 000 m 左右, 属河湟谷地, 一般易受到河西走廊冷空气的倒灌和海西东移冷空气的汇合作用, 降雪较多, 尤其是冬春季降雪相对较多, 是青藏高原积雪日数异常的主要空间型, 也是最为敏感的地区——定义为青海东部型.



a—f 依次为第 1—6 载荷向量场.

图 1 前 6 个旋转主成份空间分布

第 2 旋转载荷向量场(RLV2)高值区在西藏的东南部到拉萨附近, 高值区在雅鲁藏布江河谷附近, 有多个相对高值区, 中心值达 -0.6 左右(图 1-b). 该地区地形复杂, 受大地形的影响很大, 局地特征更加明显, 主要受西南季风爬坡作用影响, 使藏东南、怒江下游成为西藏降水最丰沛的地区之一, 而在喜马拉雅山北麓受山脉背风坡, 局地地形影响又形成相对少雨带, 这充分说明了季风对积雪日数的影响. 第 2 型即定义为山南、藏东南型.

第 3 旋转载荷向量场(RLV3)高值区在唐古拉山地区, 中心值达 $+0.7$ (图 1-c), 定义为唐古拉山型.

该地区是青藏高原的核心区, 远离高原边缘, 受唐古拉山的影响, 相对海拔较高, 对天气系统的响应有特殊性, 此型反映了地形、海拔对天气系统影响的特殊性, 积雪与其他地区有明显的差异.

第 4 旋转载荷向量场(RLV3)高值区在在青南高原玉树、果洛, 即巴颜喀拉山和阿尼玛卿山一带, 中心值达 +0.7(图 1-d). 该地区受巴颜喀拉山和阿尼玛卿山地形抬升, 以及西南和东南暖湿气流的影响较大, 初冬季节还会受到孟加拉湾风暴的影响, 是青海积雪较多的地区. 定义该型为青南高原型.

第 5 旋转载荷向量场(RLV3)高值区在柴达木盆地(图 1-e), 则定义为柴达木盆地型. 柴达木盆地四周高山环绕, 盆地下垫面内以戈壁荒漠为主, 受地形影响, 气候干燥, 降雪稀少, 是降雪极少的地区, 不论冬春季积雪还是年积雪都很少, 且不稳定.

第 6 旋转载荷向量场(RLV3)高值区在西藏西部(图 1-f), 该区域地域辽阔, 台站稀少, 积雪较少, 离散性大, 特征比较独特——此分布型定义为西藏西部型.

综上所述, 青藏高原积雪日数的异常变化空间分布型主要可分为青海东部型、山南及藏东南型、唐古拉山型、青南高原型、柴达木盆地型和西藏西部型 6 种空间分布型(图 2), 是积雪异常敏感性最强的区域. 做好以上类型区积雪的变化特征分析, 对掌握青藏高原积雪变化有重要意义.

2.2 不同空间类型的时间变化特征分析

图 3 是 6 个异常空间分布型所对应的时间系数的变化, 可以看出: 第 1 型青海东部型的积雪日数时间变化(图 3-a)呈现多—少—多—少的变化特征, 即 20 世纪 60 年代初较多, 然后下降, 60 年代末到 70 年

年代初又开始缓慢增加, 90 年代相对比较多, 但是波动比较大, 进入 2000 年呈下降趋势. 第 2 型山南、藏东南型(图 3-b)的积雪日数时间变化呈现多—少—多—少的变化特征, 20 世纪 60 年代中后期带 70 年代前期偏少, 其后增加, 1985 年开始减少, 一直到 2000 年呈偏少趋势. 第 3 型唐古拉山型(图 3-c)的积雪日数时间变化呈现多—少—多的变化态势, 60 年代初相对较多, 60 年代后期开始减少, 70 年代末开始呈缓慢增加趋势, 增幅比较平缓. 第 4 型青南高原型(图 3-d)的积雪日数时间变化呈现多—少—多—少—多的变化, 波动比较大, 60 年代前期比较多, 60 年代中期开始减少, 80 年代以多为主, 90 年代以少为主, 2000 年代开始又增加趋势. 第 5 型青海柴达木盆地型(图 3-e)的积雪日数时间变化呈现多—少—多的变化态势, 从 60 年代开始到 80 年代中期波动式下降, 其后略又上升趋势, 但仍然在零线及以下浮动. 第 6 型西藏西部型(图 3-f)的积雪日数时间变化呈现少—多—少的变化, 与其他类明显不一致, 从 60 年代开始到 90 年代一直增加, 进入 2000 年呈下降趋势.

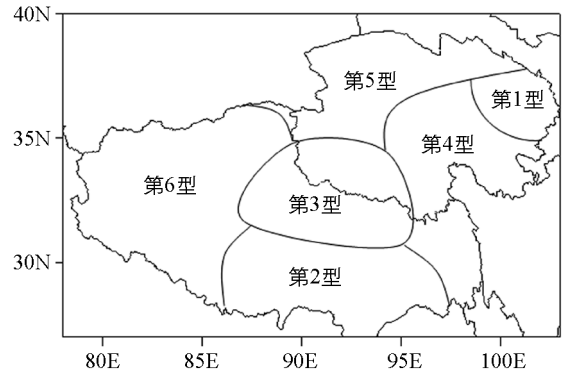
从不同空间类型时间变化特征分析看出, 青海东部型, 山南、藏东南型对积雪日数变化比较敏感, 呈现多—少—多—少的变化特征.

3 青藏高原积雪日数的季节分布及年代际变化

3.1 时间变化

青藏高原的积雪主要出现在 10 月至次年 5 月, 9 月和 6 月的积雪相对来说很少, 7 月和 8 月基本无积雪. 为了解不同时段积雪的变化, 对前冬(10—12 月)、隆冬(12—2 月)、春季(3—5 月)、冬春季(10—5 月)和年的积雪变化趋势进行了分析(见表 1).

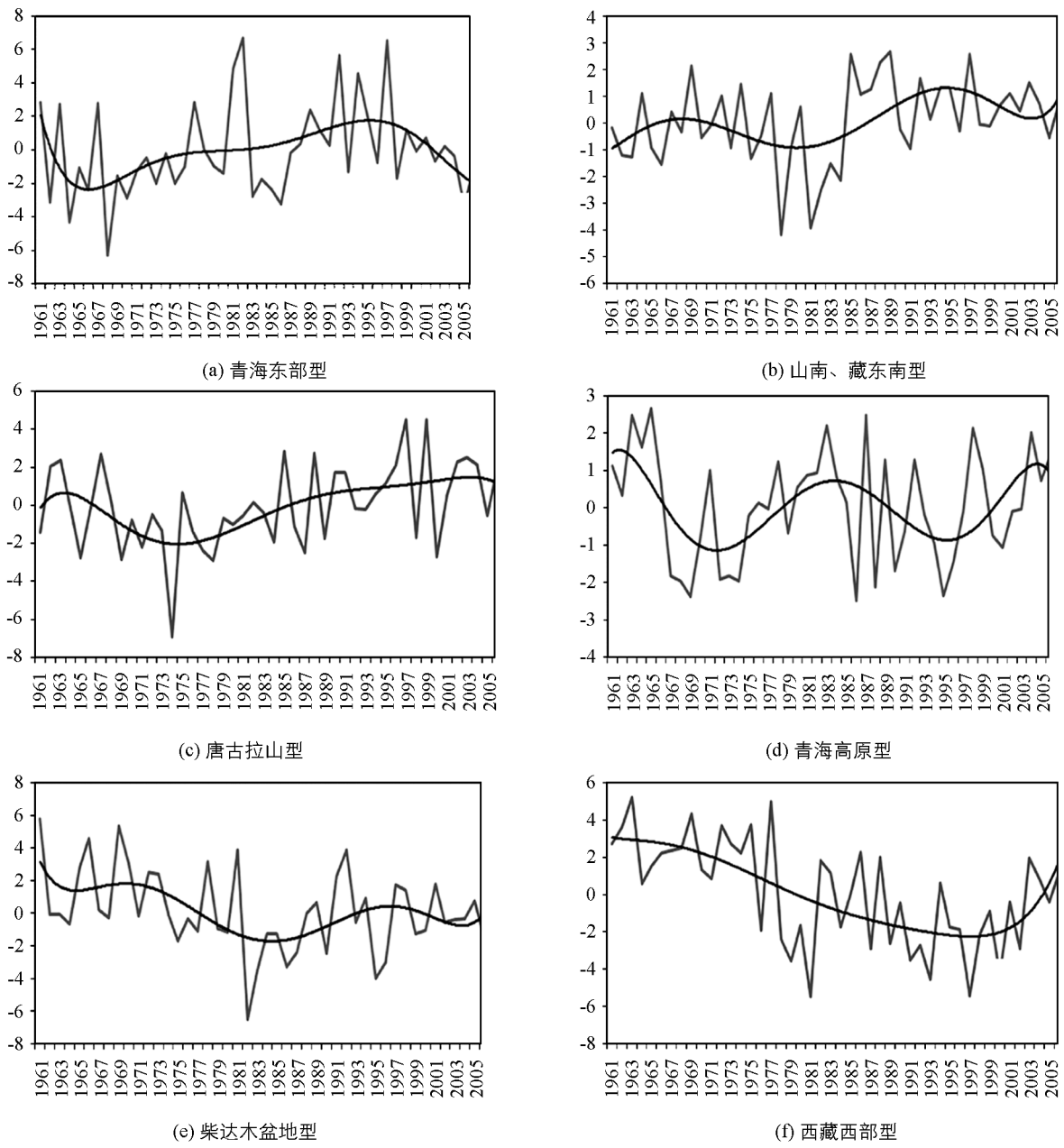
可以看出, 青藏高原 1961—2006 年积雪日数总趋势是呈微弱增加趋势的, 平均以 0.39 d/10 a 速度增加, 其中除 70 年代呈不显著的增加趋势外, 自 80 年代以来其余时段的积雪日数均呈减少趋势, 尤其是进



a—f 依次为第 1—6 载荷向量场.

图 2 青藏高原积雪日数空间分布型

入 80 年代以来, 显著减少趋势明显, 并以 90 年代的减少趋势最为显著, 速率最大, 为 $5.43 \text{ d}/10 \text{ a}$. 积雪日数的这种变化可能与 80 年代中期以来青藏高原年气温的显著增暖^[16]有关. 而总趋势增加的变化特征与文献[4, 12]中的分析结论基本一致, 说明虽然资料增加到了 2007 年, 但青藏高原积雪总的变化趋势并没有发生显著变化. 从各季节的变化趋势看, 冬春季和年变化趋势一致, 60 年代是呈减少的变化趋势, 70 年代呈增加趋势, 进入 80 年代以来的各个阶段, 积雪日数均呈减少趋势, 并在 90 年代减少趋势最显著, 减少幅度最大. 隆冬季节和春季积雪日数在 60 年代变化不同, 该阶段隆冬的积雪日数呈显著减少趋势, 而春季积雪日数则呈弱的增加趋势, 且没有显著的统计意义. 在进入 70 年代后, 隆冬和春季的积雪则表现出步调一致的变化趋势, 即在 70, 80 年代呈增加趋势, 并均以 70 年代的增加速率为最大; 在 90 年代和 21 世纪前期呈减少趋势, 所不同的是隆冬季节减少速率最大是在 90 年代, 以 $6.42 \text{ d}/10 \text{ a}$ 的速率呈显著的减少趋势, 而春季减少速率最大的时段是在进入 21 世纪以后, 2001—2006 年, 春季积数日数是以 $1.78 \text{ d}/10 \text{ a}$ 的速率呈显著的减少趋势. 可见不同季节的变化趋势也有差异, 尤其是春季积雪日数的变化有一定的特殊性.



横轴: 年份; 纵轴: 距平/d.

图 3 6 个空间分型的时间系数变化 (折线) 及多项式趋势 (波浪线) 变化

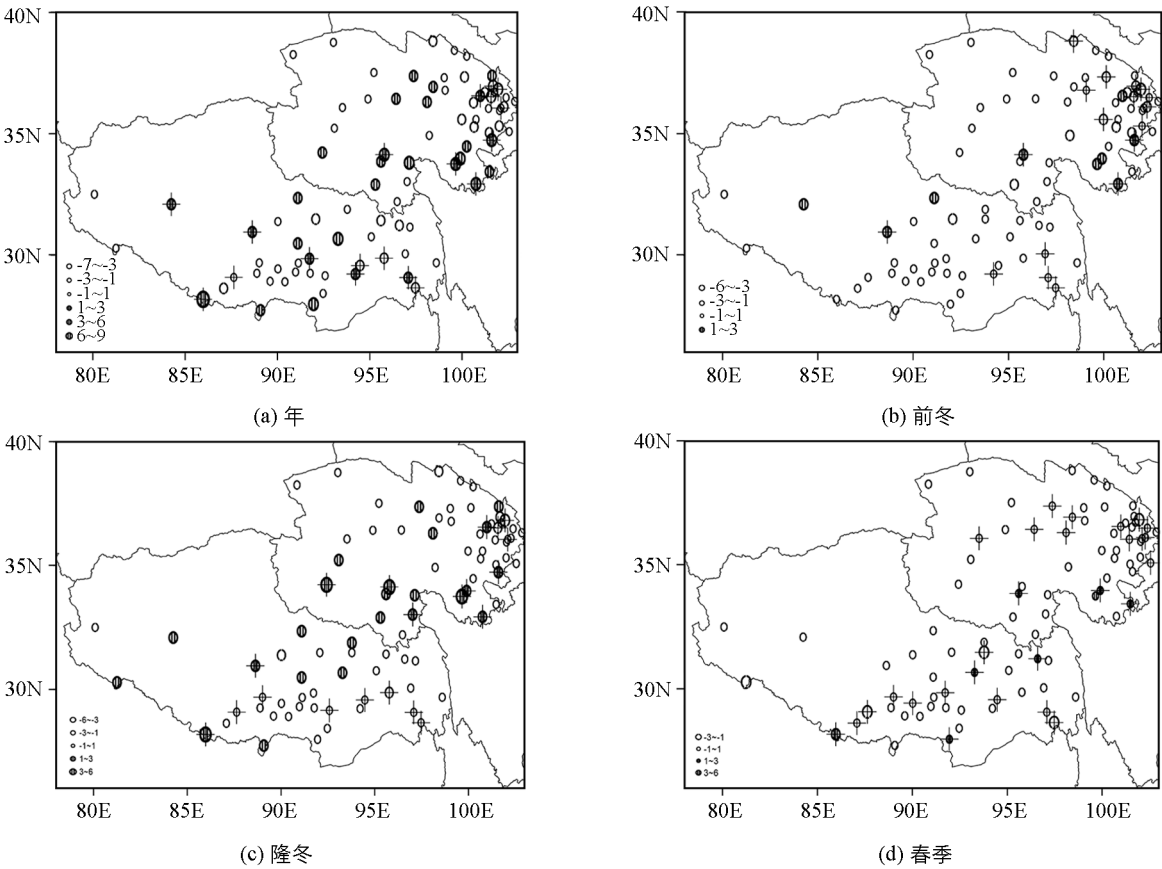
表 1 青藏高原不同时段积雪日数变化(表中带 * 的数据为通过 $\alpha=0.05$ 显著性检验)

不同时段	变化趋势(d/10 a)			
	隆冬(12—2 月)	春季(3—5 月)	冬春季(10—5 月)	年(8—7 月)
1961—1970	−3.61*	0.11	−4.26*	−4.59*
1971—1980	1.39	0.69	0.38	1.50
1981—1990	0.51*	0.22	−0.93	−1.24
1991—2000	−6.42*	−1.54*	−5.26*	−5.43*
2001—2006	−2.6	−1.78*	−1.24*	−1.35*
1961—2006	0.49	0.21	0.37	0.39*

3.2 空间变化

从积雪日数的空间的变化趋势看,年(上年 8 月—下年 7 月,图 4—a)积雪日数 3 个区域呈显著的增加趋势:① 在喜马拉雅山南麓的聂拉木、亚东及错那呈显著增多趋势,增加幅度为 3~9 d/10 a;② 在改则、申扎以及念青唐古拉山一带呈增多趋势,增幅在 3~6 d/10 a;③ 在青南高原、青海海西东部及海东也有显著增加,增幅在 3~6 d/10 a.而在雅鲁藏布江河谷地区、怒江和澜沧江一带及青海海西西部、海北、海南、黄南北部呈减少趋势,减少幅度一般在 3 d/10 a 左右.冬春季节积雪日数的变化(图略)与年的变化非常一致,说明年积雪主要由冬春季积雪组成,年积雪的变化主要由冬春季积雪日数变化来主导.

前冬(10—12 月,图 4—b)积雪日数的变化大多数以减少趋势为主,减少幅度一般在 3 d/10 a 左右,横断山一带和青海东部的前冬积雪日数呈显著减少趋势.但在西藏的个别地区有显著增加,如改则、申扎、安多是以 1~3 d/10 a 的速率增加;青海的东南部个别地区也有显著增加.



图中带+的点即为通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,单位: d/10 a.

图 4 青藏高原积雪日数不同季节空间变化趋势

隆冬季节(12—2 月,图 4—c)积雪日数显著增加的地区主要在高原的中部地区,包括西藏普兰、聂拉木、亚东、改则、申扎、当雄、安多、嘉黎,青海东南部及西部的都兰、德令哈等地,这些地区隆冬的积雪日

数呈显著的增加趋势,增加速率为 $1\sim 6\text{ d}/10\text{ a}$. 高原上其余地区则普遍以 $3\text{ d}/10\text{ a}$ 左右的速率呈减少变化趋势,以横断山一带及拉萨等河谷地区的变化最为显著.

春季(3—5月,图4—d)积雪日数在西藏的中部及南部的个别地区和青海境内的黄河上游地区呈显著增多趋势,其他地区为变化不明显或为弱减少的趋势.

从不同季节空间的变化趋势分析看出,积雪日数的变化有明显的地域性,青藏高原的南缘和青海东南部是一致的增多区,雅鲁藏布江河谷地区、怒江和澜沧江一带是一致的减少区,年、隆冬和冬春季的区域变化基本一致,春季和前冬积雪日数的区域变化有所不同,个别地方如西藏中部的当雄、嘉黎和青海西部的都兰、德令哈等到地的积雪日数的变化在不同季节的变化趋势相反.

4 结 语

1) 青藏高原积雪日数的空间异常分布型可分为青海东部型,山南、藏东南型,唐古拉山型,青南高原型、青海柴达木盆地型,西藏西部型 6 种异常型,是积雪日数异常敏感性最强的区域.

2) 不同空间分布型的时间变化结果并不相同,青海东部型的积雪日数时间变化呈现多—少—多—少的变化特征;山南、藏东南型的积雪日数时间变化呈现多—少—多—少的变化特征;唐古拉山型的积雪日数时间变化呈现多—少—多的变化态势;青南高原型的积雪日数时间变化呈现多—少—多—少—多的变化,波动比较大;青海柴达木盆地型的积雪日数时间变化呈现多—少—多的变化态势;西藏西部型的积雪日数时间变化呈现少—多—少的变化,与其他类明显不一致,从 20 世纪 60 年代开始到 90 年代一直增加,进入 2000 年代呈下降趋势.

3) 在不同季节和不同时段,青藏高原积雪的变化趋势也各不相同. 1961—2006 年积雪日数总趋势是微弱增加的,增加速率为 $0.39\text{ d}/10\text{ a}$. 其中除 70 年代呈不显著的增加趋势外,自 80 年代以来的其余时段,积雪日数均呈减少趋势,尤其是进入 80 年代以来,显著减少趋势明显,并以 90 年代的减少趋势最为显著,速率最大. 积雪日数的这种变化可能与 80 年代中期以来青藏高原年气温的显著增暖有关.

4) 从积雪日数的空间的变化趋势看,年积雪日数变化在喜马拉雅山南麓的聂拉木、亚东及错那为增多趋势,改则、申扎以及念青唐古拉山一带为增多趋势,青南高原、青海海西东部及海东也有明显增加,而拉萨河谷地区、怒江和澜沧江一带,青海海西西部海北海南黄南北部呈减少趋势,冬春季节积雪日数的变化与年的变化非常一致,说明冬春季积雪变化是年变化的主导因素.

参考文献:

- [1] 高国栋. 气候学教程 [M]. 北京:气象出版社,1996:403—418.
- [2] 韦志刚,黄荣辉,董文杰. 青藏高原气温和降水的年际和年代际变化 [J]. 大气科学,2003,27(2):157—170.
- [3] 高 荣,韦志刚,董文杰,等. 20 世纪后期青藏高原积雪和冻土变化及其与气候变化的关系 [J]. 高原气象,2003,22(2):191—196.
- [4] 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.
- [5] 柯长青,李培基. 青藏高原积雪分布与变化特征 [J]. 地理学报,1998,53(3):209—215.
- [6] 潘维玉,余志豪. 青藏高原东部积雪日数特征的分析 [J]. 气象科学,1998,18(1):48—55.
- [7] 韦志刚,黄荣辉,陈 文,等. 青藏高原地面站积雪的空间分布和年代际变化特征 [J]. 大气科学,2002,26(4):496—508.
- [8] 韦志刚. 青藏高原积雪持续性研究 [J]. 冰川冻土,2001,23(3):225—230.
- [9] 郭艳君,翟盘茂,李 威. NOAA 卫星遥感与常规观测中国积雪的对比研究 [J]. 冰川冻土,2004,26(6):756—760.
- [10] 韦志刚,罗四维,董文杰. 青藏高原积雪资料分析及其与我国夏季降水的关系 [J]. 应用气象学报,1998,9(S1):40—47.
- [11] 雷 俊,方芝芳. 青海高原积雪资料比较及其变化趋势研究 [J]. 高原气象,2008(1):402—408.
- [12] 王叶堂,何 勇,候书贵. 2000—2005 年青藏高原积雪的时空变化分析 [J]. 冰川冻土,2007,29(6):855—861.

- [13] 柯长青, 李培基. 用 EOF 方法研究青藏高原积雪分布与变化 [J]. 冰川冻土, 1998, 20(1): 64—68.
- [14] 吴洪宝, 李栋梁, 章基嘉. 中国冬季月平均气温异常旋转 EOF 分析 [J]. 南京气象学院学报, 1995, 18(3): 349—354.
- [15] 叶 钊, 罗孳孳, 唐红玉, 等. 西南地区冬季气温时空特征分析 [J]. 西南大学学报(自然科学版), 2011, 33(9): 113—119.
- [16] 唐红玉, 翟盘茂. 1951—2002 年中国东、西部地区地面气温变化对比 [J]. 地球物理学报, 2005, 48(3): 61—69.

Analysis of Spatial Distribution and Change of Snow-Covered Days on the Qinghai-Xizang Plateau

LI Xi-fu¹, TANG Hong-yu²

1. Chongqing Meteorological Bureau, Chongqing 401147, China;

2. Chongqing Climate Center, Chongqing 401147, China

Abstract: Using the daily snow observation data of 1961—2007 from 88 meteorological stations of the Qinghai-Xizang Plateau, this paper analyses the anomaly spatial distribution of the snow covered days and discusses its variation with time and its seasonal change. The results show that the spatial distribution of snow covered days on the Qinghai-Tibetan Plateau has a very good consistency. The amount of snow on this plateau is influenced primarily by the large scale circulation as the background, and secondly by elevation, topography and different weather systems. Based on REOF, the number of snow covered days of the Qinghai-Xizang Plateau is divided into the following six abnormal sensitivity distribution patterns: eastern Qinghai, Shannan Prefecture and southeast Tibet, the Tangula Mountains, Plateau of southern Qinghai, Qaidam Basin and west Tibet. Spatially, annual snow covered days show an increasing trend in Nyalam, Yadong, Cuona, Gaize and Shenzha, which are located in the south of the Himalayas and in the Nyenchen Tanglha mountains, and also on the Plateau of southern Qinghai, east of Haixi and Haidong of Qinghai. In contrast, there is a decreasing trend in the Lhasa valley, the Salween and Lantsang Rivers, west of Haixi, Haibei, Hainan, and the north of Huangnan.

Key words: the Qinghai-Xizang Plateau; snow; trend

责任编辑 陈绍兰

