

宏观坡向对不同等级降水的影响

乔 淼¹, 曾 燕², 邱新法³

(1. 南京信息工程大学 地理与遥感学院, 南京 210044; 2. 江苏省气候中心, 南京 210009; 3. 南京信息工程大学 应用气象学院, 南京 210044)

摘 要:降水的大小与空间分布在迎风坡与背风坡处具有显著的差异。为分析宏观坡向对不同等级降水的影响,应用主次降水方位算法,利用地面降水观测资料,结合空间分辨率 1 km×1 km 的 DEM 数据,计算得到全国气象站点 1961—2000 年不同等级降水的主次方位降水日数差/总量差,并通过坡向影响系数、显著性检验、主次方位降水日数差/总量差绝对值三个指标进行对比分析。结果表明:坡向对不同等级降水的相对影响程度为暴雨>大雨>中雨>小雨。此外,坡向对不同等级降水的影响受地貌和干湿条件的共同作用,山地地区的影响最为显著,丘陵次之,平原最小,且坡向对不同山体的影响在降水日数与总量上具有不同的体现;在不同的干湿条件下,随着降水等级的减弱,最显著区由湿润区逐渐向半湿润区、半干旱区、干旱区移动。

关键词:气象学; 等级降水; 主次降水方位; 坡向

中图分类号:P333.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)01-0167-05

Influence of Macro Slope Aspect on Different Grades of Precipitation

QIAO Miao¹, ZENG Yan², QIU Xinfu³

(1. School of Geography and Remote Sensing, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Jiangsu Climate Center, Nanjing 210009, China; 3. School of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: There is a significant difference in rainfall intensity and areal precipitation between windward slope and leeward slope. Using the algorithm of primary and secondary precipitation orientation and the data of surface observation rainfall, we analyzed how slope affects precipitation at different levels. Combining with DEM data, we calculated the day difference and total precipitation difference of national meteorological stations from 1961 to 2000, and then compared and analyzed its characteristics from the aspects of exposures, significance test and absolute value. The result shows that exposures have various effects on different precipitation levels. The effect decreases in the order: torrential rain>heavy rain>moderate rain>light rain. In addition, the effect of exposures on different precipitation levels is also determined by the combined impact of landform and the wet and dry conditions. The results show that it is most significantly correlated with mountain land, less correlated with hills and the least correlated with plains. In the meantime, it is most significantly correlated with sub-humid zone, less correlated with semi-arid zone, and the least correlated with arid zone.

Keywords: meteorology; precipitation grade; primary and secondary precipitation orientation; macro slope aspect

降水对于人类赖以生存的自然环境具有重要的影响,是气候、水文及洪涝干旱等自然灾害研究的必要数据。降水的形成和分布伴随着复杂的过程,除与天气条件因素有关外,地形对降水有着极其显著的影响。大量的观测资料与研究表明,许多区域的降水都具有明显的地形特征^[1]。影响降水的地形因子包括海拔高度、坡向、坡度和地形形态等,其中坡向对降水

的影响尤为显著^[2]。以我国新疆天山为例,位于背风坡的库尔勒(海拔 917.5 m)与位于迎风坡的乌鲁木齐(海拔 917.9 m)海拔基本相同,但年降水量仅为 50.1 mm,与乌鲁木齐 277.6 mm 的年降水量相差悬殊^[3]。坡向不仅影响降水总量的大小,对降水日数和强度的影响也十分显著,乌鲁木齐年降水日数比库尔勒多 60.4 d,中、大雨日分别多 5.7、0.8 d。

收稿日期:2017-01-12

修回日期:2017-03-07

资助项目:国家自然科学基金项目(41330529);江苏省第四期“333 高层次人才培养工程”科研项目(BRA2014373);中国气象局气候变化专项(CCSF201411)

第一作者:乔淼(1992—),女,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,主要研究方向为地理与气象应用。E-mail:bridgemiao@163.com

通信作者:曾燕(1972—),女,吉林安图人,研究员,主要研究方向为水文气象学与气候资源利用。E-mail:jlzengyan@sina.com

通过长期的研究,国内外学者就坡向与降水之间的关系得到了一些一致的结论。Nordo^[4]于 1967 年发现降水的空间分布与风向和山体方位的相对位置密切相关;1979 年 Smith^[5]提出了“迎风坡降水机制”,指出“迎风坡降水”可以使地形两侧产生非常显著的降水差异;近年来,Renard^[6]、Didier^[7]等在探究降水量与地形因子的统计关系中,均采用了风向与坡向的夹角作为其中重要的影响因子。我国学者章淹^[1]通过长期的观测资料发现迎风坡对潮湿气流具有抬升作用;傅抱璞^[2]则推导出了地形抬升速度的数学模式;史岚^[8]在研究长江流域降水空间分布时,将地形抬升降水增量作为重要的因子得到了起伏地形下降水量精细化估算模型。

事实上,由于不同等级降水的水汽条件不同,复杂下垫面的热力和动力作用具有显著的差异^[9]。比如,据文献记载,南疆地区喀什河谷的喇叭口地形更易出现暴雨中心,而该地的小雨、中雨降水日数却相对较少,这说明地形对不同等级的降水具有不同的影响^[3]。研究表明,迎风坡地形对降水的作用主要是通过增加雨强的形式实现,而背风坡主要为减雨作用,大量的暴雨实例分析都提出了坡向对降水强度具有重要的影响^[10-14]。但在以往的研究中,较多为分析坡向对多年平均降水或某次降水过程的影响程度,缺少坡向影响降水强度的系统分析与定量表达。同时,由于降水的等级强度、时空分布是由水汽与地形条件等共同作用的,故不同地貌、干湿条件下的降水也具有显著的不同。本文根据邱新法提出的主次降水方位算法,利用地面降水观测资料,基于不同地貌与干湿条件,定量分析宏观坡向对于不同等级降水的影响,可为雨量定量估算中地形因子模型的建立提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 资料与处理

本文所用资料包括气象站观测降水数据及 DEM 数据。

(1) 气象站观测降水数据。使用全国 756 个常规气象站的日降水量数据,筛选出在 1961—2000 年具有 40 a 观测资料的台站共 553 个,并按照相应的气象标准分别统计了各站点不同等级降水的降水日数及总降水量。其中,采用中央气象台的降水划分标准,将日降水量 P 划分为四个等级,分别是小雨: $0.1 \text{ mm} \leq P < 10 \text{ mm}$;中雨: $10 \text{ mm} \leq P < 25 \text{ mm}$;大雨: $25 \text{ mm} \leq P < 50 \text{ mm}$;暴雨: $P \geq 50 \text{ mm}$ 。

(2) DEM(Digital Elevation Model)数据。选用空间分辨率为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的 DEM 数据。在坡向影响降水

的研究中,有宏观坡向与微观坡向之分。大地形的坡向相对固定,对降水的影响有一定规律且比较稳定;小地形的坡向则各地不同、变化无穷,其对降水的影响错综复杂且不稳定。因此,在研究坡向对降水的影响时,通常将宏观坡向与微观坡向分离,着重研究宏观坡向对降水的影响^[2]。本文采用 7×7 窗口对原始 DEM 数据进行平滑及规范化处理,提取各气象站点宏观坡向。坡向的取值范围为 $[-181, 180)$,其中 -181° 对应平地,正南为 0° ,正东为 -90° ,正西为 90° ,正北为 -180° 。

此外,本文根据前人的研究^[15-16],利用 DEM 数据与计算得到的地形起伏度数据进行叠加分析,将我国的地貌形态按海拔高度和地形起伏度划分为三个宏观类型:平原(起伏度 $0 \sim 20 \text{ m}$);丘陵(海拔 $< 500 \text{ m}$ 且起伏度 $> 20 \text{ m}$;海拔 $> 500 \text{ m}$ 且起伏度为 $20 \sim 150 \text{ m}$);山地(海拔 $500 \sim 800 \text{ m}$ 且起伏度 $> 150 \text{ m}$;海拔 $> 800 \text{ m}$),地貌划分结果见图 1。

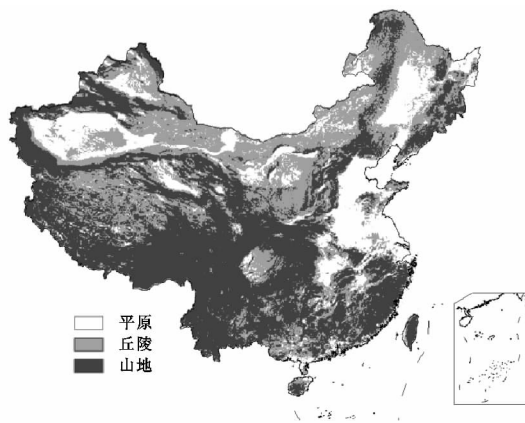


图 1 中国地貌类型分类图

1.2 研究方法

受地形抬升等作用的影响,迎风坡的降水量明显大于背风坡。傅抱璞^[2]根据迎、背风坡降水差异的物理机制,提出降水时盛行风向与坡向之间的夹角是判别迎风坡与背风坡的重要标志,当其夹角的绝对值小于等于 90° 时为迎风坡,大于 90° 为背风坡。其中,降水时的盛行风向由于其多变性与不确定性,在前人的研究中多用经验值、气象站风向、经纬向风再分析资料替代盛行风向,但均无法直接准确地确定降水时的盛行风向,也无法系统的分析坡向与降水之间的定量关系。邱新法在前人研究的基础上,提出了替代降水时盛行风向的普适性方法,引入主次降水方位、主次方位降水差两个概念,直接利用地面降水观测资料确定主次降水方位替代降水时的盛行风向,并通过主次方位降水差定量的分析坡向对降水的影响。

具体算法为^[17]:对于任一气象站,将其设定为目标气象站,设定任意方位 θ ,根据气象站所处宏观地形的地理坡向 β ,可将目标气象站周围附近的若干气象站分为

两组,即气象站地理坡向 β 与方位角 θ_i 夹角绝对值小于等于 90° 的所有台站为 θ_i 方位的迎风坡台站,夹角绝对值大于 90° 的所有台站为 θ_i 方位的背风坡台站。考虑到我国极大部分地区水汽主要来源于东南太平洋,故将 θ_i 在 $[-90^\circ, 90^\circ)$ (-90° 对应正东, 90° 对应正西)半圆内按一定的间距 Δ 旋转,即:

$$\theta_i = -90 + i \cdot \Delta\theta \quad i = 0, 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

统计方位 θ_i 时迎风坡台站与背风坡台站的平均降水量差 DP_i ,其中平均降水量差绝对值最大者,即 $DP_{\max} = \max(|DP_i|)$,对应的方位即为目标气象站的主次降水方位,由降水量大值方位指向小值方位,与水汽来源方位相一致; DP_{\max} 即为主次方位降水差,用以定量表征坡向对降水的影响程度。这里将由主次降水方位与坡向确定的迎风坡、背风坡分别称为主、次降水坡。

高婷^[17]、潘虹^[18]等应用该算法,将中国月平均降水量数据计算得到的主次降水方位分别与 FNL 盛行风向和地方气候专著进行了对比分析,表明主次降水方位宏观分布与 FNL 盛行风向基本吻合,且区域上更能反映各地降水的气候特征。证明该算法可行,结果可靠。

为分析坡向对不同等级降水的影响,本文利用气象站不同等级降水日数与降水总量数据替代平均降水量应用于该算法中,提出主次方位降水日数差与主次方位降水总量差,结合坡向影响系数定量的表达坡向对不同等级降水的影响,并对结果进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 坡向影响系数

为比较坡向对各等级降水的影响,本文利用汤懋苍^[19]提出的坡向影响系数 I 以评价坡向对降水的相对影响,其定义为:

$$I = \frac{P_w - P_l}{P_w + P_l} \quad (2)$$

式中: P_w, P_l 分别为迎风坡和背风坡降水量。考虑到本文在主降水坡与次降水坡台站数量不一定相同的情况,进行归一化处理,改写公式为:

$$I = \frac{\frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} P_{wi} - \frac{1}{n_2} \sum_{j=1}^{n_2} P_{lj}}{\frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} P_{wi} + \frac{1}{n_2} \sum_{j=1}^{n_2} P_{lj}} \quad (3)$$

式中: n_1, n_2 分别为主降水坡、次降水坡的站点个数; P_w, P_l 分别为主降水坡和次降水坡的降水日数(降水量)。坡向影响系数 I 代表了不同等级降水,主、次降水坡的降水日数差(降水量差)与总降水日数(总降水量)的比值,其值在 $0 \sim 1$ 之间变化, I 越大说明坡向对降水的影响越明显。表 1 为全国不同等级降水各站点基于降水日数与降水总量的坡向影响系数均值。

表 1 全国各等级降水坡向影响系数均值

降水等级	基于降水日数	基于降水总量
小雨	0.239	0.270
中雨	0.568	0.624
大雨	0.606	0.636
暴雨	0.819	0.878

比较全国基于降水日数与降水总量得到的各等级降水的坡向影响系数均值,总体趋势一致,均为暴雨最大,大雨、中雨次之,小雨最小。由于坡向影响系数在一定程度上反映了坡向对降水分布影响的相对程度,故可以得到坡向对不同等级降水的相对影响程度为暴雨>大雨>中雨>小雨。暴雨作为一种中小尺度天气过程,地形对暖湿气流造成的强迫抬升,对其是有直接影响的,即当坡向与盛行风向交角较大时,暖湿气流沿坡爬升,必然会产生上升运动,使对流加强,雨量加大,同时地形阻挡也使降水系统移速减慢,雨时延长^[10]。刘裕禄等^[12]分析了长期的降水实况,结果显示当降水系统经过山脉时,因地形抬升出现了较强的扰动,使得降雨增幅,其增幅量与扰动和降水强度呈正相关,即雨强越大,地形抬升作用越明显,这与本文通过坡向影响系数得到的定量结论一致。

此外,分别统计了位于天山和长白山的气象站点各等级降水的坡向影响系数均值,见表 2。林之光^[3]在《地形降水气候学》中提到长白山迎、背风坡降水气候差异的特点与天山不同。天山地区由于气候干旱,两坡降水量均不多,山脉对降水气候影响最大的是降水日数。但对于气候较为湿润的长白山,山脉影响主要表现在降水总量,两侧年降水量相差可达 400 mm。结合表 2 可以看出,天山地区基于降水日数得到的坡向影响系数均大于基于降水总量的坡向影响系数,而长白山地区恰恰相反,说明了坡向对于天山地区降水的影响在降水日数方面更加显著,长白山地区则是更加体现在降水总量上,这与林之光的结论是一致的。

2.2 不同地貌下坡向对不同等级降水的影响分析

为验证主、次降水坡站点的降水日数及总量是否具有显著差异,即坡向是否显著影响不同等级的降水,本文采用单边 t 检验方法检验计算得出的各站点主次方位降水日数差/总量差是否具有显著性,以明确其统计意义。具体做法是^[18]:按照每个站的主次降水方位,将周边站点分为两组,一组为主降水坡站(其坡向与主次降水方位夹角小于或等于 90°),另一组为次降水坡站(其坡向与主次降水方位夹角大于 90°),分别计算两组台站降水日数差/总量差的平均值与标准差,根据 t 检验计算式得到各站 t 统计值,查找 t 统计分布表,得出各站不同降水等级主次方位降水日数差/总量差的显著性置

信水平。附图 4 为各等级降水主次方位降水日数差显著性检验站点分布图,通过对比可以看出,不同等级降水通过 0.05 及以上显著性检验的站点主要分布于山地地区,如天山山脉、大兴安岭山脉、哀牢山脉等地。此外,对于地形起伏较大的平原、丘陵与山地的交界处,如塔里木盆地、东北平原的边界地区,通过 0.05 及以上显著性检验的站点同样较多。而位于华北平原、东北平原中心地势较为平坦的地区未通过 0.05 显著性检验的站点显著较多。

表 2 天山、长白山各等级降水坡向影响系数

山体	降水等级	基于降水日数	基于降水总量
天山	小雨	0.319	0.318
	中雨	0.695	0.681
	大雨	0.716	0.694
	暴雨	0.847	0.828
长白山	小雨	0.068	0.071
	中雨	0.368	0.373
	大雨	0.590	0.597
	暴雨	0.757	0.793

表 3 分别统计了位于平原、丘陵、山地地貌下,基于降水日数和降水总量的通过 0.05 及以上显著性水平检验的台站占台站总数的百分比。此外,表 4 给出了不同地貌下各等级降水主次方位降水日数/总量差绝对值,其值越大,说明主、次降水坡降水日数和总量相差越大,坡向对不同等级降水的影响程度和实际产生的降水效果也越明显。通过表 3 和表 4 可以明显看出通过 0.05 及以上显著性检验的站点比例与主次方位降水日数/总量差绝对值均为山地地区最大,丘陵次之,平原最小,说明在地形起伏较大的山区坡向对降水的影响较为明显,而地势平坦地区则影响相对较小,这与实际降水情况相符。

表 3 不同地貌下主次方位降水日数差/总量差通过 0.05 及以上显著性水平检验的站点比例 %

降水等级	地貌类型	基于降水日数	基于降水总量
小雨	平原	53.1	52.2
	丘陵	61.6	61.6
	山地	65.4	65.8
中雨	平原	55.5	55.8
	丘陵	61.1	60.6
	山地	70.8	68.2
大雨	平原	57.9	56.5
	丘陵	67.5	68.1
	山地	74.6	75.6
暴雨	平原	60.3	60.8
	丘陵	61.7	57.9
	山地	73.2	70.3

表 4 不同地貌下各降水等级主次方位降水日数/总量差绝对值比较

降水等级	地貌类型	基于降水日数/d	基于降水总量/mm
小雨	平原	7.335	19.742
	丘陵	9.281	22.442
	山地	9.872	23.656
中雨	平原	1.766	28.010
	丘陵	1.837	29.215
	山地	2.186	35.120
大雨	平原	0.709	24.574
	丘陵	0.787	27.344
	山地	1.121	39.303
暴雨	平原	0.444	38.659
	丘陵	0.483	41.948
	山地	0.706	59.587

2.3 不同干湿条件下坡向对不同等级降水的影响分析

表 5 分别统计了干旱、半干旱、半湿润、湿润地区的气象站主次方位降水日数差及总量差绝对值的均值,结合附图 5 不同干湿分区下各等级降水主次方位降水日数差空间分布图,可以看出,小雨、中雨、大雨、暴雨的主次方位降水日数差大值区呈现逐渐由干旱区向湿润区东移的现象,即小雨的大值区主要分布于干旱区,主降水坡与次降水坡年平均小雨日数相差可达 40 d 以上;中雨和大雨的大值区则由于干旱区逐渐向半干旱区、半湿润区移动,主降水坡与次降水坡年平均中雨、大雨日数分别相差可达 8 d 和 6 d 左右;暴雨主要分布于湿润区,该大值区年平均暴雨日数在主、次降水坡相差约为 3 d。陈明等^[10]分析了不同干湿分区下坡向对暴雨降水增幅的影响,提出湿润区与半湿润区、半干旱区迎风坡对暴雨影响的重要差别在于前者由于气候潮湿,大气潜在不稳定能量多,空气中水汽条件充沛,在一定对流过程触发下,降水的绝对增加量相当可观,后者则相对较弱,以至坡向对暴雨的影响显著体现在湿润地区,而对大雨、中雨、小雨的最大影响区域逐渐由湿润地区向干旱地区移动。

同时,附图 5 中对于不同等级的降水,哀牢山、武夷山地区都出现了区域大值,此外对于中雨的长白山脉,大雨、暴雨的大兴安岭山脉等地也都出现了区域大值。而四川盆地各等级降水均出现局部小值。这也说明了山脉对主次方位降水日数差影响显著,翁笃鸣^[20]在《山区地形气候》中提到盆地地形始终处于气流的下风侧,由于气流的下沉和辐散,最不利于系统性降水的形成,所以盆地降水主要是依靠热对流过程降水,受地形影响远不及周围山区。

表 5 不同干湿条件下各降水等级主次方位
降水日数/总量差绝对值均值比较

降水等级	地貌 类型	基于降水 日数/d	基于降水 总量/mm
小雨	干旱	24.784	53.942
	半干旱	12.598	27.570
	半湿润	6.274	16.106
	湿润	7.038	19.448
中雨	干旱	1.916	28.113
	半干旱	1.613	24.779
	半湿润	1.329	20.868
	湿润	2.134	34.479
大雨	干旱	0.250	8.077
	半干旱	0.510	17.326
	半湿润	0.517	17.990
	湿润	1.033	36.019
暴雨	干旱	0.037	2.450
	半干旱	0.214	16.708
	半湿润	0.330	27.474
	湿润	0.666	58.439

3 结 论

(1) 通过坡向影响系数的对比,可以得到坡向对不同等级降水的相对影响程度为暴雨>大雨>中雨>小雨。

(2) 坡向对不同等级降水的影响显著地体现在降水日数和降水总量两个方面,但对于某些地区(如天山)在降水日数方面影响的更加显著,而对于长白山等地则更体现在降水总量上。

(3) 坡向对不同等级降水的影响受到地貌和干湿条件的共同作用。山地地区坡向对降水的影响最为显著,丘陵次之,平原最小。坡向对暴雨的影响显著体现在湿润地区,对大雨、中雨、小雨的最大影响区域则由湿润地区逐渐向干旱地区移动。

本文基于地形抬升影响迎、背风坡降水差异的物理机制,应用主次降水方位算法得到主次方位降水日数差/总量差,通过显著性检验及文献的对比分析,该结果能够很好的表征坡向对不同等级降水的影响,算法较可靠。但由于坡向对降水的影响十分复杂,除本文考虑较为主要的地形抬升作用外,也会受到地形摩擦、辐合等作用的影响,在今后的研究中还需进一步分析坡向对降水影响的物理机制,得到更加科学准确的定量表达。

参考文献:

[1] 章淹. 地形对降水的作用[J]. 气象,1983,9(2):9-13.

[2] 傅抱璞. 地形和海拔高度对降水的影响[J]. 地理学报, 1992(4):302-314.

[3] 林之光. 地形降水气候学[M]. 北京:科学出版社,1995.

[4] Nordo J, Hjortnes K. Statistical studies of precipitation on local, national and continental scales[J]. Geophysica Norwegica, 1967,26(12):1-46.

[5] Smith R B. The influence of mountains on the atmosphere[J]. Advances in Geophysics,1979,21:87-230.

[6] Renard F. Local influence of south-east France topography and land cover on the distribution and characteristics of intense rainfall cells[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2016:1-13.

[7] Didier N, Alex O B, Victor O. The Impacts of Topography on Spatial and Temporal Rainfall Distribution over Rwanda Based on WRF Model [J]. Atmospheric & Clmate Sciences, 2016,6(2):145-157.

[8] 史岚. 长江流域起伏地形下降水量分布精细化气候估算模型研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2012.

[9] 廖菲,洪延超,郑国光. 地形对降水的影响研究概述[J]. 气象科技,2007,35(3):309-316.

[10] 陈明,傅抱璞,于强. 山区地形对暴雨的影响[J]. 地理学报,1995(3):256-263.

[11] 赵玉春,许小峰,崔春光. 中尺度地形对梅雨锋暴雨影响的个例研究[J]. 高原气象,2012(5):1268-1282.

[12] 刘裕禄,黄勇. 黄山山脉地形对暴雨降水增幅条件研究[J]. 高原气象,2013(2):2608-2615.

[13] 许美玲,尹丽云,金少华,等. 云南突发性特大暴雨过程成因分析[J]. 高原气象,2013(4):1062-1073.

[14] 袁有林,左洪超,董龙翔,等. 地形和水汽对“7·13”陕西暴雨影响的数值试验[J]. 干旱气象,2015(2):291-302.

[15] 陈志明. 论中国地貌图的研制原则、内容与方法:以 1:4000000 全国地貌图为例[J]. 地理学报,1993(2):105-113.

[16] 陈学兄,常庆瑞,郭碧云,等. 基于 SRTM DEM 数据的中国地形起伏度分析研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2013(4):670-678.

[17] 高婷. 复杂地形下中国月降水量分布式模型研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2013.

[18] 潘虹. 复杂地形下中国月降水量网格化估算模型研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2014.

[19] 汤懋苍. 祁连山降水的地理分布特征[J],地理学报, 1985,40(4):322-332.

[20] 翁笃鸣,罗哲贤. 山区地形气候[M]. 北京:气象出版社,1990.