

杨庆, 马柱国. 2014. 新疆不同降水观测资料的比较及其差异的可能原因 [J]. 气候与环境研究, 19 (4): 452–462, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13045. Yang Qing, Ma Zhuguo. 2014. Comparison of different precipitation observations in Xinjiang and its possible cause analysis [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (4): 452–462.

新疆不同降水观测资料的比较及其差异的可能原因

杨庆^{1, 2} 马柱国¹

¹ 中国科学院东亚区域气候—环境重点实验室, 北京 100029

² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 利用新疆地区 89 个气象站和 38 个水文站 1961~2005 年的降水资料, 对比分析了这两类降水观测资料在表征新疆地区降水的时间演变特征上所存在的差异, 进而探究了造成这种差异的原因, 并在此基础上研究了增暖背景下新疆地区降水与地形(包括海拔高度、坡度和坡向)的关系。研究发现: 1) 从区域平均来看, 水文站观测的年降水量(221.4 mm)明显高于气象站的观测值(152.1 mm), 其差值为 69.3 mm, 但是二者具有相同的时空变化特征; 2) 气象站与水文站降水均值之间的差异, 主要受海拔高度的影响, 坡度和坡向的影响次之。新疆地区地形地貌复杂, 降水时空变化较大, 观测数据分布不均匀均可导致对降水的估算存在较大差异, 因此多源降水数据相互融合是客观估算该地区降水量及其变化的一个途径。

关键词 新疆 降水 气象站 水文站 地形要素

文章编号 1006-9585 (2014) 04-0452-11

中图分类号 P468

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13045

Comparison of Different Precipitation Observations in Xinjiang and Its Possible Cause Analysis

YANG Qing^{1, 2} and MA Zhuguo¹

¹ Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Based on monthly precipitation datasets of 89 meteorological stations and 38 hydrological rain gauges from 1961 to 2005 in Xinjiang, China, differences in temporal-spatial variations of Xinjiang precipitation detected by these two precipitation observations have been compared and causations for these differences have been analyzed. Meanwhile, the relationships between precipitations with topography features (altitude, slope, and aspect) under increasing warming background have been discussed. The results indicate that: 1) Multiyear mean annual precipitation in Xinjiang observed by hydrological rain gauges is 221.4 mm, which is 69.3 mm more than that observed by meteorological stations (152.1 mm). However, meteorological and hydrological observations show the same spatial-temporal change characteristics; 2) Differences between meteorological and hydrological observations are mainly affected by altitude. Besides, slope and aspect are also crucial factors. Precipitation shows huge spatial-temporal variations in Xinjiang because of complicated landform. As a result of uneven distribution of rainfall gauges, there exists great bias in precipitation estimation. In the future, it would be an effective method to objectively assess precipitation in Xinjiang that multi-source precipitation datasets combine together.

收稿日期 2013-03-13 收到, 2013-04-27 收到修定稿

资助项目 科技部公益性行业(气象)专项 GYHY201106028, 国家重点基础研究发展计划项目 2010CB428404, 国家科技支撑计划专题 2013BAC10B0201

作者简介 杨庆, 女, 1986 年出生, 博士, 助研, 主要从事全球及区域干旱化方面的研究。E-mail: yangqing@tea.ac.cn

通讯作者 马柱国, E-mail: mazg@tea.ac.cn

Keywords Xinjiang, Precipitation, Meteorological station, Hydrological station, Topographic factor

1 引言

在全球增暖的背景下, 我国北方的干湿变化存在明显的区域差异性(Ma and Fu, 2003; 王志伟和翟攀茂, 2003; 马柱国和符淙斌, 2006), 西北东部、华北和东北地区由于降水的持续减少呈现出干旱化趋势。在20世纪80年代以后, 全球增暖加剧了以上地区干旱化的进程。然而西北西部, 尤其是新疆地区, 气候发生了转折性变化, 由暖干转为暖湿(施雅风等, 2002, 2003; 张国威等, 2003)。这种转折性变化具体表现为, 温度持续攀升、降水量显著增加、冰川萎缩、河川径流量增加、湖泊水位上升、面积扩大、洪水灾害频发、植被覆盖增加、沙尘暴日数趋于减少。

降水量的变化作为气候变化的重要指标, 成为众多研究关注的焦点。新疆地区平均年降水在1987年发生了显著的转折性变化, 由偏少转为偏多, 其中冬季降水在1986年就发生转折性变化, 早于其他季节(刘波等, 2009)。1987~1996年北疆平均年降水量比前两个10年(1967~1976年和1977~1986年)分别增加16.2%、18.0%, 达到228.8 mm; 南疆平均年降水量比前两个10年分别增加23.2%、30.1%, 达到94.5 mm(姜逢清和胡汝骥, 2004)。从空间分布上来看, 全疆大部分地区降水量的变化趋势都以增加为主, 并以天山山区增幅最明显(韩萍等, 2003)。新疆极端降水强度虽无显著变化, 但频次的显著增多亦导致极端降水量的显著增多

(杨莲梅, 2003)。李剑锋等(2012)通过对新疆地区最大连续降水事件时空变化特征进行分析, 指出新疆最大连续降水天数变长, 降水量增加, 降水强度增加。总之, 增暖背景下新疆地区的降水的确发生了显著的变化。

新疆是一个地形复杂的地区, 而复杂的地形在很大程度上影响着水资源的分布。过去我们对新疆地区降水或者水资源的研究大多基于气象站观测的降水。由于气象站大多建在海拔低和人类聚居的地区, 这就使得气象站在表征高海拔地区降水时具有局限性, 而水文部门的降水观测站点集中在河流流域和高海拔地区, 弥补了气象站观测降水的不足。因此, 水文站和气象站降水观测资料是制作等

雨量线图和计算流域平均降水量的重要参考数据(杨大庆等, 1991)。

过去对新疆降水变化特征的研究, 大多采用常规气象站的降水观测资料, 极少采用水文站观测的降水资料。而对于少数考虑了水文站观测资料的研究工作(薛燕等, 2003; 陈亚宁和徐宗学, 2004; 蓝永超等, 2008; 史玉光等, 2008), 也仅仅是出于扩大观测样本的目的, 并未详细地比较分析气象站与水文站两套降水资料之间的异同。因而, 本文将系统比较气象站与水文站降水观测数据之间的时空差异, 并研究加入水文站观测资料之后新疆地区降水的时空分布及其演变特征是否与仅基于气象站资料所得的结论不同, 并探讨造成这种差异的原因。

2 资料和方法

2.1 数据资料

文中所用数据来自于新疆气象局109个气象站一日两次的降水观测资料和74个水文站逐月降水观测资料, 时间为从建站到2005年12月。为了便于数据的分析和比较, 避免站点数据起始时间的差异, 本文的分析时段取为1961~2005年。同时, 为了与水文站资料时间分辨率一致, 气象站降水也被处理为月平均资料。经过质量筛选后, 气象站保留89个站(其中北疆45个, 南疆44个), 水文站保留38个站(北疆19个, 南疆19个)。气象和水文观测站的分布如图1所示。

2.2 方法

坡度和坡向能够反应地形的起伏形态和结构, 可作为描述地形特征的两个重要指标。基于新疆100 m分辨率的数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM), 我们提取了新疆各个雨量站的坡度和坡向(Dozier and Frew, 1990; 李天文等, 2004)以及伊犁河流域集水区范围(郑子彦等, 2009)。坡度S、坡向A分别是地形曲面函数Z在纬向和经向上高程变化率的函数(Burrough and McDonell, 1998), 其定义如下:

$$Z = f(x, y), \quad (1)$$

$$f_x = \frac{dZ}{dx}, f_y = \frac{dZ}{dy}, \quad (2)$$

$$S = \frac{180}{\pi} \arctan \sqrt{f_x^2 + f_y^2}, \quad (3)$$

$$A = \frac{180}{\pi} \arctan (-f_x / f_y), \quad (4)$$

其中, f_x 是东西方向高程变化率, f_y 是南北方向高程变化率。

鉴于新疆降水空间差异性较大, 我们使用相对差异 ΔD 来表征气象站与水文站之间降水量的差异:

$$\Delta D = \frac{P_h - P_m}{P_m} \times 100\%, \quad (5)$$

其中, P_h 和 P_m 分别表示水文站和气象站的降水量。

我们使用 t 检验 (Dutilleul, 1993) 对一元回归的相关系数进行显著性检验。而对于时间序列突变点的检验, 采用滑动 t 检验 (符淙斌和王强, 1992), 这种方法可以用来检验两组随机样本平均值的显著性差异, 能够准确捕捉到时间序列发生均值突变的年份。但样本时段的选择带有主观性, 会造成突变点的“漂移”, 这里我们通过反复变动样本时段的长度进行试验比较, 以提高计算结果的可靠性。

3 气象站与水文站降水资料的比较

如图 1 所示, 水文站主要分布于海拔较高的河流源地, 而气象站则更集中于海拔低的人类聚居地区。那么气象站和水文站的降水观测资料之间是否存在差异? 本文首先尝试回答这个问题。

3.1 时间演变

首先分别基于气象站、水文站资料以及同时使用气象站和水文站资料, 计算了 1961~2005 年新疆地区平均年降水序列。由图 2a 可以看出, 单用气象站和单用水文站降水数据得到的两条年降水时间序列具有一致的年际变化。二者相关系数为 0.96, 通过 99.9% 的 t 检验。从 1961~2005 年, 二者都呈现显著的增加趋势, 增长率都在 1 mm a^{-1} 以上 (见表 1), 高于 1956~2000 年年降水的增长速率 0.67 mm a^{-1} (薛燕等, 2003)。这说明 2000 年以来, 新疆年降水持续增加, 且增幅加大。通过变动多时段 (序列长度 $n=5, 7, 9, 11$ 年) 的滑动 t 检验发现, 气象站与水文站的年降水都在 1987 年发生了转折性变化, 转折之后年降水分别增加 31.9 mm 与 38.1 mm。但是, 二者观测的年降水量却存

在很大的差异。如表 1 中所示, 对于 1961~2005 年新疆地区平均年降水量, 水文站降水数据显示为 221.4 mm, 比气象站降水资料结果 (152.1 mm) 多 69.3 mm。这种差异在 1987 年后略有增加 (图 2d), 从 66.7 mm 增加为 72.8 mm, 即伴随着新疆地区年降水量的增加, 水文站与气象站各自观测降水量之间的差异也在增大。由图 2d 可知, 差异加大的贡献主要来自于南疆。另外, 在季节降水上 (图略), 气象站与水文站也显示出一致的年际变化 (相关系数都在 0.9 以上) 和长期增加趋势。二者也在季节降水量上存在较大的差异, 即水文站观测的季节降水要明显多于气象站。

表 1 单独使用气象站、水文站资料和同时使用两类资料得到的新疆年降水序列的统计结果

Table 1 Statistics of the time series of Xinjiang average annual precipitation produced by only meteorological observations, only hydrological observations, and both meteorological and hydrological observations

	增长率/mm a ⁻¹	转折年份	年降水量/mm	海拔/m
仅使用气象站资料	1.0655***	1987 年**	152.1	1105.0
仅使用水文站资料	1.1587**	1987 年**	221.4	1475.8
同时使用两类资料	1.0937***	1987 年**	172.8	1213.9

*** 和 ** 分别表示通过 99.9% 和 99% 的 t 检验。

对比北疆和南疆区域平均年降水的时间序列 (图 2b 和 2c) 也可以发现, 气象站与水文站各自观测的年降水具有一致的年际变化和长期增加趋势, 且水文站观测的降水量高于气象站。当同时考虑气象站和水文站的资料时, 新疆区域平均年降水的年际变化 (相关系数都在 0.95 以上)、长期趋势和转折年份都与单独使用气象站或水文站的结果基本一致。但对于多年平均的年降水量, 同时考虑气象站和水文站的结果比单用气象站资料多 20.7 mm (图 2a, 表 1)。

3.2 空间分布

由上面的分析可以看出, 水文站资料记录了更高的降水。那么单独采用气象站降水资料与同时采用两类降水资料, 在表征新疆多年降水均值和趋势的空间分布上是否存在差异呢? 我们将在本节讨论这个问题。

图 3 分别给出仅采用气象站降水资料 (图 3a 和 3c) 与同时采用气象站和水文站降水资料 (图 3b 和 3d) 时, 1961~2005 年年降水趋势和均值的空间分布。比较可以发现加入水文站降水资料后 (图

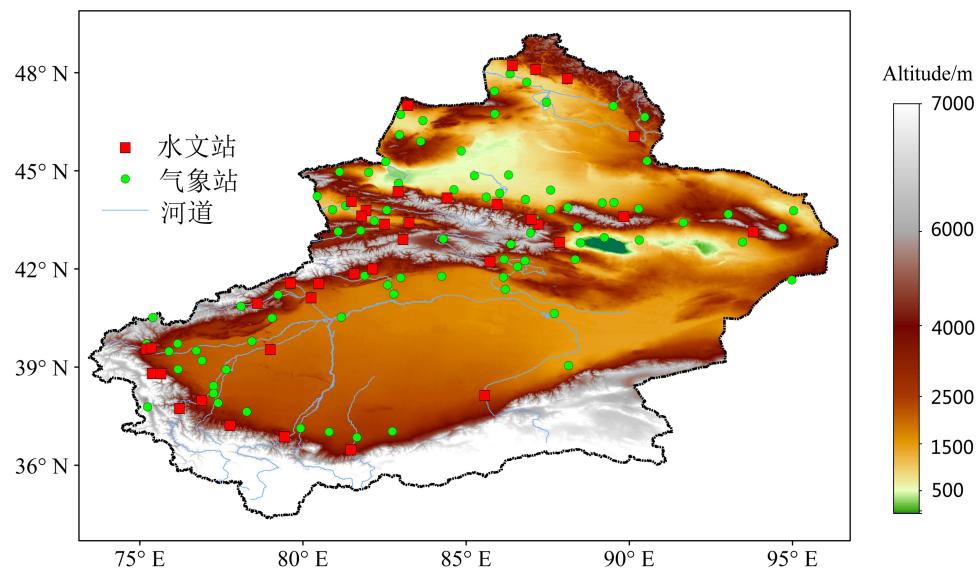


图1 新疆地区雨量站的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of rain gauges in Xinjiang area

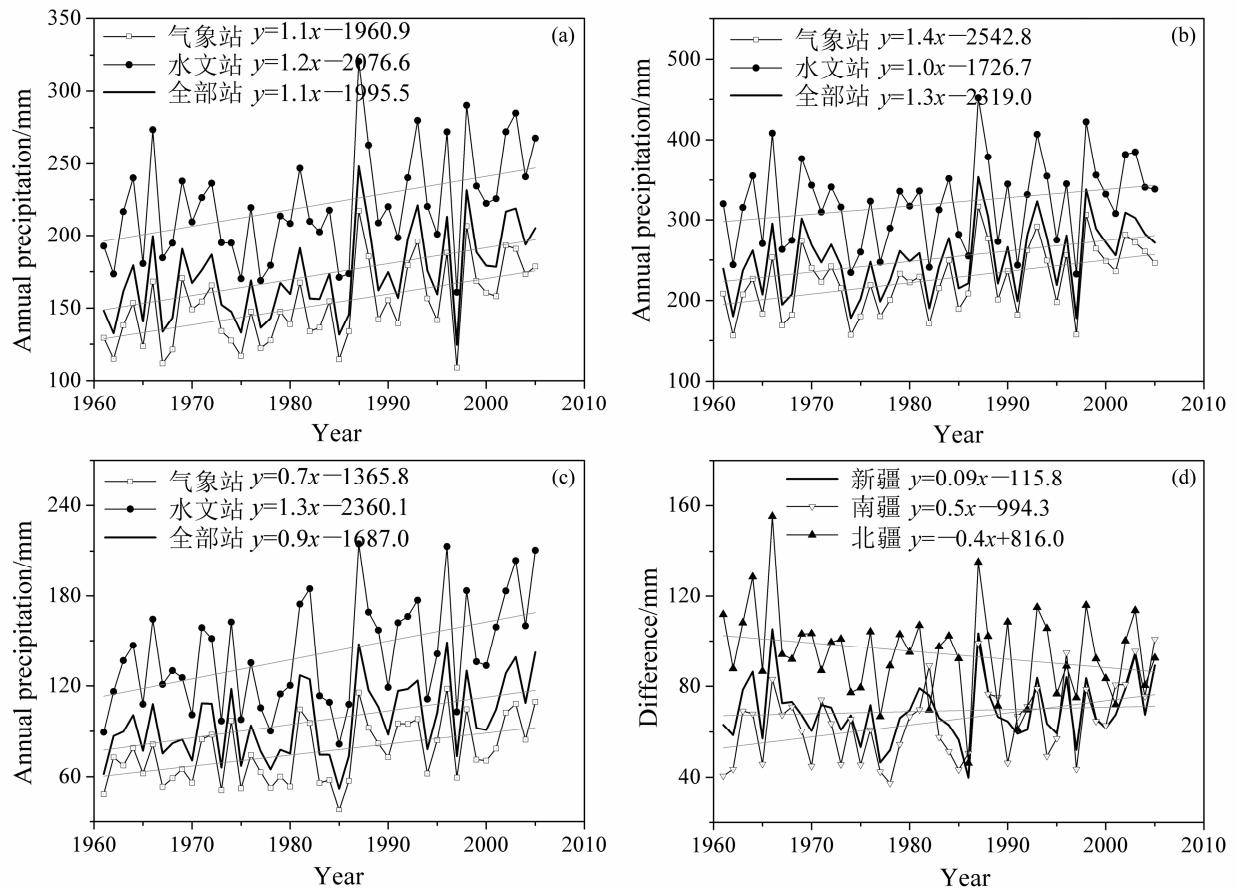


图2 单用气象站、水文站和同时使用气象站和水文站降水资料得到的1961~2005年(a)新疆、(b)北疆和(c)南疆区域平均年降水量的时间序列,(d)水文站与气象站单独观测的年降水序列之差(虚线为各降水序列的线性趋势线)

Fig. 2 (a) Xinjiang, (b) North Xinjiang, and (c) South Xinjiang regional mean annual precipitation time series during 1961 to 2005 based on only meteorological observations, only hydrological observations, and both meteorological and hydrological observations, (d) differences of annual precipitation produced by meteorological and hydrological observations (dash lines are linear trend lines for each annual precipitation time series)

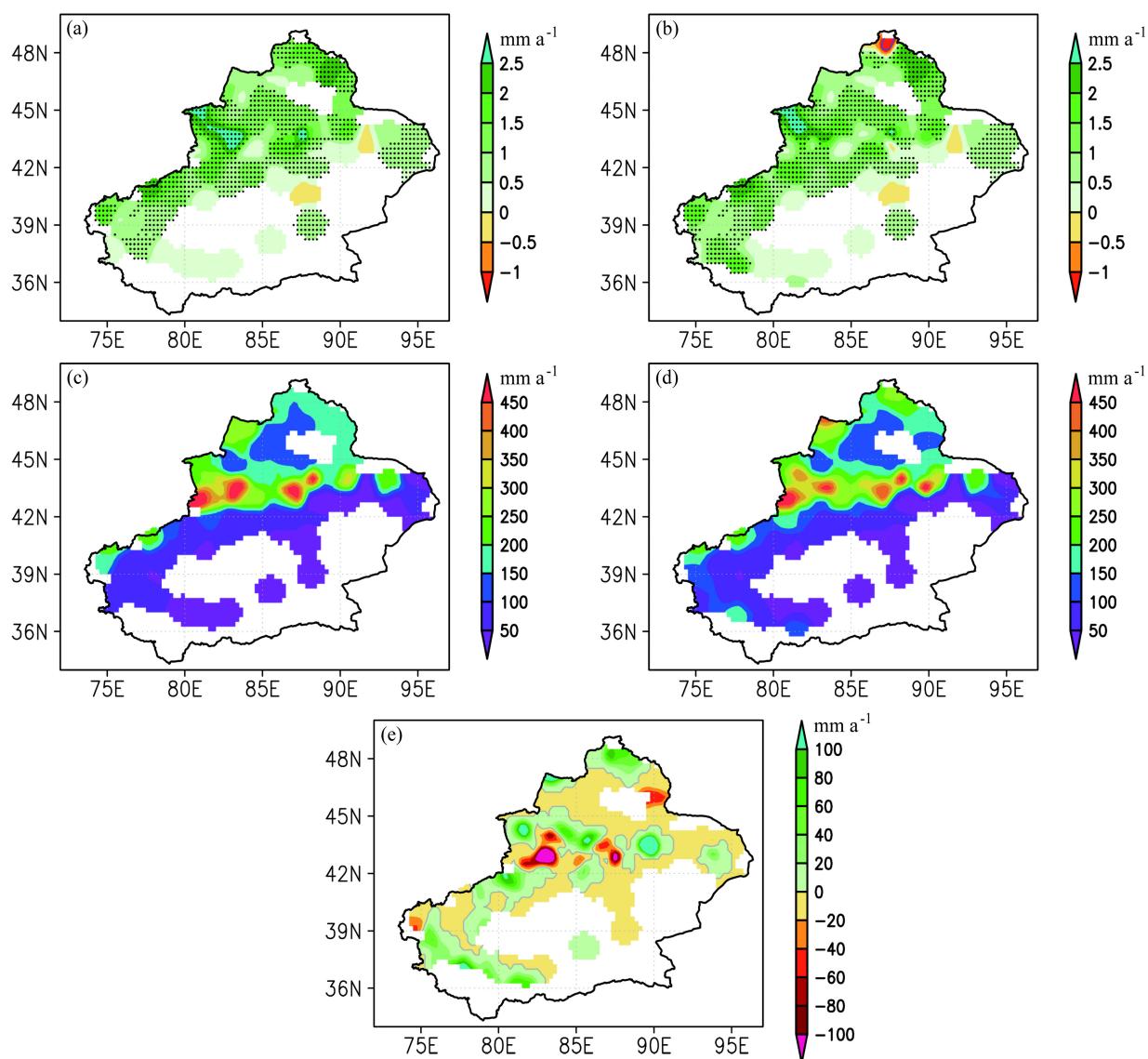


图 3 由 (a、c) 气象站、(b、d) 气象站和水文站降水数据得到的新疆地区 1961~2005 年 (a、b) 年降水趋势系数 (黑色阴影表示通过 95% 信度检验的增加趋势, 蓝色实线则为通过 95% 信度检验的减少趋势) 和 (c、d) 平均年降水的空间分布; (e) 是 (d) 与 (c) 的差值 (空白区由于缺少资料, 没有进行等值线插值)

Fig. 3 Distributions of (a, b) annual precipitation tendency (statistically increasing/decreasing trends at the 95% level are indicated by shadings/blue solid line) and (c, d) multiyear mean annual precipitation from 1961 to 2005 based on (a, c) meteorological observations only and (b, d) both meteorological and hydrological observations; (e) is the difference distribution between (d) and (c) (blank areas mean regions without observations are not be interpolated)

3b), 除了北疆阿尔泰山附近出现了相反的少雨趋势外, 年降水趋势的空间分布与未考虑水文站降水资料的结果基本一致, 都显示出全疆绝大部分地区年降水呈增加趋势, 并且山区年降水的增幅最大 (韩萍等, 2003)。图 3e 给出考虑了水文站观测降水与否, 多年平均年降水差值的空间分布。从中可以发现加入水文站降水数据后, 阿尔泰山、天山和昆仑山脉的年降水量有大幅增加, 有些地区甚至增多 100 mm 以上。这说明气象站的分布具有局限性,

无法准确表征较高海拔地区的降水。

从以上分析可以看出, 气象站和水文站两类观测数据所反映的新疆区域的年际和长期变化特征是一致的, 说明这两类数据都真实记录了新疆降水的趋势变化, 但二者在降水平均值上存在大的差异。考虑到水文站的海拔 (1475.8 m) 要高于气象站 (1105.0 m), 所以降水平均值的差异可能来源于这两类观测系统分布的地理位置差异。我们将在下一部分讨论这个问题。

4 降水的时空分布与地理环境的关系

气象和水文观测系统采用相同的雨量器, 因而两种系统所观测降水量之间的差异与仪器无关。从上一节的分析可知, 与气象站相比, 水文站具有更高的降水观测值, 同时也具有更高的海拔高度。因此, 降水的差异可能与测站的地理位置及地形有关。为了说明这个问题, 以下将从海拔高度、坡度和坡向的角度探究两类观测系统所观测降水量差异的来源。

4.1 海拔高度与降水的关系

首先, 选取距离水文站一定范围 d 内的一个气象站, 与该水文站组成一对, 称之为对站。降水是一个空间连续性较差的天气过程, 受局地对流过程的影响较大。因此, 要使对站中气象站与水文站的降水量具有可比性, d 不能过大, 此处取 $d \leq 20$ km。我们共选取了 6 组对站, 其中南疆与北疆各 3 组。为后面表述方便, 对站中水文站的名字被用来命名这组对站。表 2 给出这 6 组对站的详细信息, 其中, ΔL 、 ΔH 和 ΔP 分别表示对站之间水平距离、海拔落差和年降水量的差值(水文站减去气象站)。

各组对站中气象站与水文站观测的年降水均呈现出一致的年际变化(见图 4, 相关系数都在 0.8 以上, 通过 99.9% 的信度检验)。各季节尺度降水亦具有一致的年际变化(图略)。对于北疆的恰甫、南疆的且末和西大桥 3 组对站, 其气象站与水文站的水平距离 ΔL 都在 8 km 以内, 海拔落差 ΔH 都在 15 m 以下, 且具有相似的坡向和坡度。这 3 组对站中气象站与水文站记录的年降水量差异 ΔP 都很小, 分别是 11.8 mm、1.0 mm 和 5.0 mm(表 2), 季节降水量差异 ΔP 亦很小。这说明当气象站与水文站有基本一致的地理环境时, 二者的降水观测值仅有微小的差异, 且呈现一致的年际变化。这也证实气象

站与水文站观测的降水量并不存在系统误差。

对于北疆的阿勒泰和制材厂、南疆的卡拉贝利 3 组对站中各自气象站与水文站记录的年降水量差异 ΔP 都很大, 季节降水量的差异亦很大。在制材厂这组对站中, 水文站(制材厂) 1961~2005 年平均年降水量为 363.1 mm, 气象站(51465) 却高达 543.3 mm, ΔP 为 180.2 mm; 卡拉贝利这组对站的 ΔP 最小, 但也达到 50.1 mm。由表 2 可知, 3 组对站都具有很大的海拔落差, ΔH 依次为 191.8 m、560.8 m 和 454.4 m。另外值得注意的是, 在阿勒泰这组对站中, 水文站的海拔高于气象站, 对应的水文站观测的降水亦高于气象站。而在制材厂和卡拉贝利这两组对站中, 气象站有更高的海拔, 且其降水观测值也较高。

通过对以上 6 组对站的比较分析发现, 当气象站和水文站之间水平距离足够接近($d \leq 20$ km)时, 二者之间海拔高度落差的大小决定了降水量观测值差异的大小。也就是说, 气象站与水文站海拔落差较小时, 二者记录的降水量之间差异亦较小, 如北疆的恰甫、南疆的且末和西大桥; 当气象站与水文站海拔落差较大时, 二者记录的降水量之间差异亦随之加大, 如北疆的阿勒泰和制材厂、南疆的卡拉贝利。另外, 对站中海拔越高的雨量站, 其降水的观测值也越大。

如果对站中气象站与水文站的海拔落差能够完全决定二者所观测降水量的大小, 那么越大的海拔落差会对应越大的降水差异。考虑到新疆地区降水空间差异性大(图 3c 和 3d), 采用相对差异 ΔD 来表征对站中气象站与水文站之间降水量的差异。比较发现, 在阿勒泰、制材厂和卡拉贝利 3 组对站中, 阿勒泰组具有最小的海拔落差(191.8 m), 但气象站与水文站降水相对差异 ΔD 却最大。而海拔落差最大的制材厂组, 年和季节降水 ΔD 都较小, 约为 30%。这主要是因为在制材厂组中, 气象站和

表 2 6 组对站的地理位置特征以及观测降水量的差别

Table 2 Topography information and observed precipitation differences for six pairs of meteorological-hydrological stations

		$\Delta P/\text{mm}$	$\Delta L/\text{km}$	$\Delta H/\text{m}$	坡向		坡度	
					气象站	水文站	气象站	水文站
北疆	阿勒泰	90.8	4.52	191.8	SW	E	2.30	1.76
	恰甫	-11.8	7.71	4.6	NW	NW	0.64	0.63
	制材厂	-180.2	11.55	-560.8	NE	NW	5.08	4.43
南疆	且末	1.0	2.97	4.0	NE	N	0.33	0.35
	西大桥	-5.0	5.59	-11.8	SE	SW	0.02	0.12
	卡拉贝利	-50.1	17.32	-454.4	NE	SW	2.05	5.10

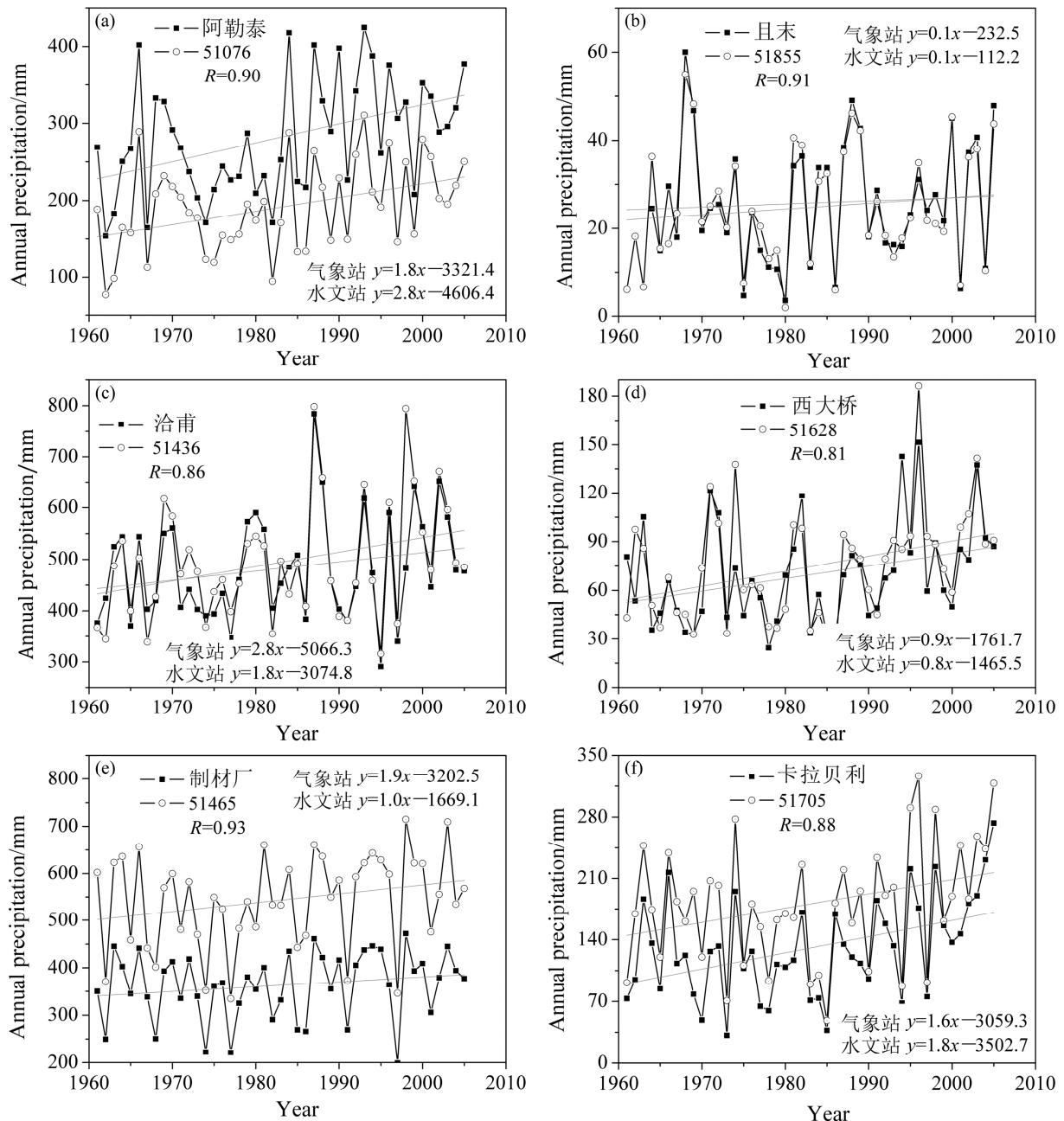


图4 北疆（左列）和南疆（右列）对站1961~2005年年降水量的时间序列（ R 为对站中气象站与水文站观测年降水序列的相关系数，虚线分别对应对站中气象站与水文站年降水序列的线性趋势线）

Fig. 4 Time series of annual precipitation for six pairs meteorological-hydrological stations in North Xinjiang (left panel) and South Xinjiang (right panel) during 1961 to 2005 (R in each figure is the correlation coefficients between annual precipitation time series produced by meteorological observation and hydrological observations and dash lines indicate the linear trend lines for time series of meteorological observations only and hydrological observations only, respectively)

水文站分别位于东北坡和西北坡，差异较小，而在阿勒泰组中，气象站位于西南坡，水文站则位于东坡（表2）。卡拉贝拉组中气象站与水文站更有完全相反的坡向和迥异的坡度。因此海拔落差的大小并不能完全决定降水相对差异的大小，即除了海拔高度这一主导因素外，坡度和坡向亦会影响气象站与

水文站的观测降水量大小。关于坡度和坡向与降水关系会在下一节中详细阐述。

图5a呈现了新疆地区所有雨量站观测的年降水量与海拔的关系。总体上看，年降水量随着海拔高度的增加而递增的趋势非常明显（蓝永超等，2008）。过原点的线性回归线将散点分为上下不同

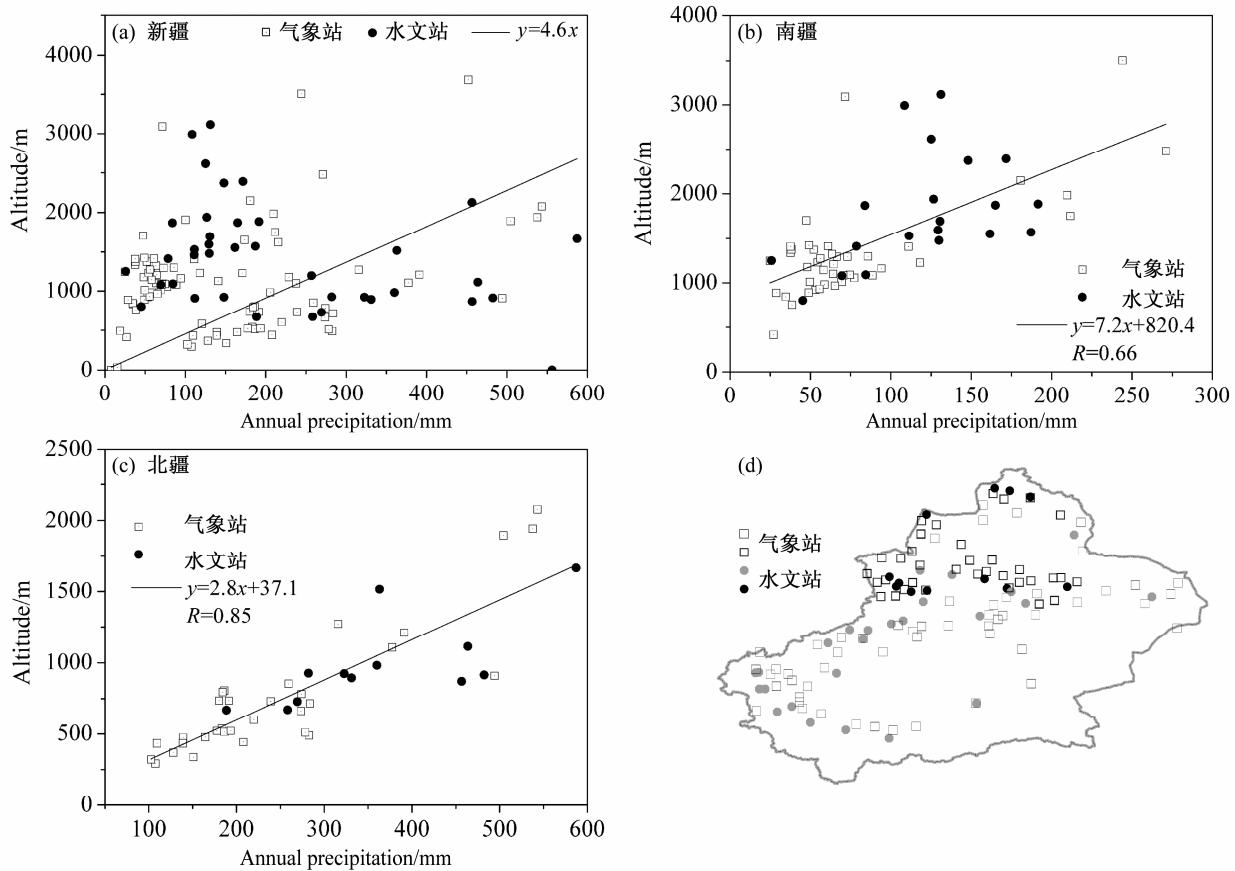


图 5 (a) 新疆地区、(b) 南疆、(c) 北疆气象站和水文站 1961~2005 年平均年降水量与海拔的散点图 (黑线是拟合的线性回归线, R 为相关系数), (d) 为雨量站所对应的空间分布 (灰色和黑色分别代表图 a 中线性回归线以上和以下的雨量站)

Fig. 5 Scatter plots of mean annual precipitation and altitude for all rain gauges in (a) Xinjiang, (b) South Xinjiang, and (c) North Xinjiang between 1961–2005 (black lines are the linear regression lines and R means correlation coefficient); (d) spatial distribution of rain gauges (gray and black spots indicate rain gauges above and below the linear regression line in Fig. 5a)

分布形态的两部分, 这与图 5d 中雨量站的空间分布有较好的对应关系, 即线性回归线以上部分主要集中于南疆, 以下部分则集中于北疆。为了更清楚地说明这个问题, 把新疆地区分为南北疆两个部分来分析海拔高度和年降水量的关系。从图 5c 和 5d 中可以看出, 在南北疆均存在着年降水随着海拔高度增加而增大的线性关系, 且这种关系在北疆尤其突出。高度每增加 100 m, 南北疆年降水分别增加 6.1 mm 与 25.8 mm。南北疆年降水量与海拔的相关系数分别为 0.66 与 0.85, 通过 99.9% 的信度检验。

分别对全疆、南北疆的气象站和水文站的海拔高度及降水量做了区域平均, 发现水文站的海拔高度普遍高于气象站, 分别高出 370.8 m、154.6 m 和 524.8 m。同时, 对应的水文站年和季节降水量的观测值亦都大于气象站。因此, 海拔高度的大小总体上决定了水文站与气象站降水观测资料的差异。

4.2 坡度和坡向与降水的关系

新疆深处内陆, 属于非季风区。水汽主要源于纬向西风环流和北冰洋, 因此坡向对降水的影响显著 (蓝永超等, 2008)。由于在大部分地形复杂的高海拔区, 往往缺乏观测资料, 因此为了认识坡度和坡向与降水的关系, 我们选取数据相对比较完善的伊犁河谷为对象来研究降水与坡度及坡向的关系。

伊犁河流域位于中纬度大陆中部, 呈三面环山的喇叭口 (向西) 地形 (如图 6a 所示)。西风气流进入盆地, 在地形作用下易形成降水。这使得伊犁河谷成为天山山系中最大的降水中心和新疆降水最多的地区 (张军民, 2006)。

我们所选取的流域内共有 8 个气象站和 5 个水文站 (图 6a)。下面分别基于气象站和水文站降水资料, 给出 1961~2005 年伊犁河流域平均年降水

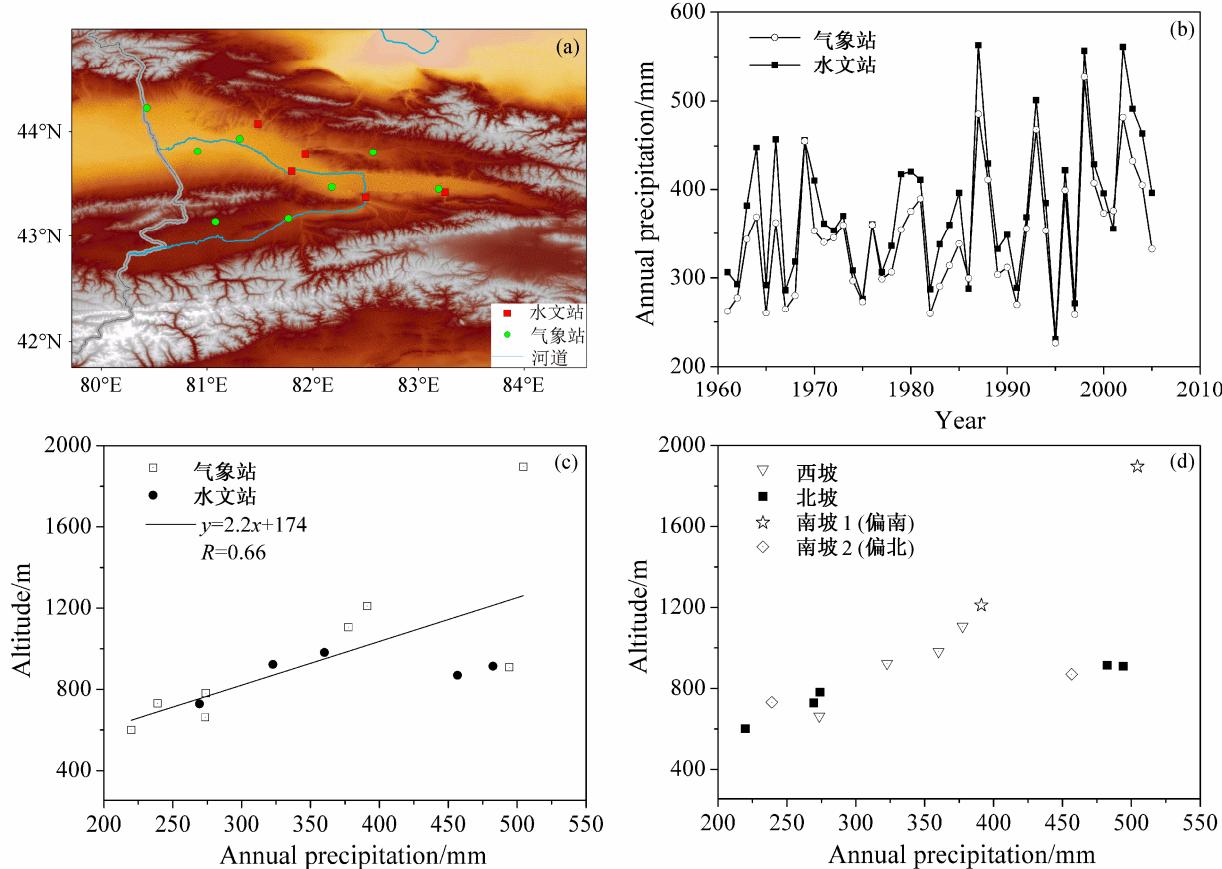


图 6 伊犁河流域 (a) 地形图及气象站与水文站的空间分布, 由气象站和水文站计算的 1961~2005 年 (b) 平均年降水序列和 (c) 平均年降水量与海拔的散点图 (黑线是拟合的线性回归线, R 为相关系数), (d) 4 个坡向平均年降水量与海拔的关系

Fig. 6 (a) Spatial distribution for all rain gauges on top of topography map; (b) regional mean annual precipitation in Ili river valley during 1961 to 2005 based on meteorological stations and hydrological stations and (c) its scatter plot with altitude (black lines are the linear regression lines and R means correlation coefficient); (d) relationships between mean annual precipitation and altitude in four different aspects in Ili River valley

序列。如图 6b 所示, 二者均呈现显著的增加趋势, 增长率分别为 1.98 mm a^{-1} 和 1.97 mm a^{-1} , 且具有一致的年际变化, 二者相关系数达 0.95。值得注意的是, 虽然水文站的年降水量观测值要高于气象站, 但并不是整体性的偏高, 而是在一些降水极大值年份时远大于气象站观测值。前面一部分中我们指出, 因为水文站有比气象站更高的海拔, 使其记录了更大的降水量。然而在伊犁河流域中, 水文站的平均海拔低于气象站 103.9 m, 但其观测的年降水量仍要略高于气象站 31.6 mm。这再次说明海拔高度大小并不能完全解释气象站与水文站观测降水量之间的差异。从坡度大小上可以看出, 气象站坡度较小, 主要分布在河谷平原地区; 而水文站坡度较大, 主要分布在河谷平原与山区过渡的较高海拔梯度地区。西风气流携带水汽进入伊犁河谷, 在地形的抬升下凝结降水, 降水会更多的发生在高坡

度地区, 进而造成水文站观测的年降水量高于气象站。

图 6c 给出了伊犁河流域气象站和水文站年降水量与海拔的关系。可以看出降水随着海拔高度增加而递增的趋势 (相关系数为 0.66)。季节尺度上, 有且仅有冬季降水与海拔高度呈现弱的负相关 (图略)。但是以上结论的样本量较小, 且这种关系仅限于 1200 m 以下。

叶佰生等 (1997) 分析了伊犁河三大支流流域内降水量与海拔的关系, 指出降水与海拔的关系在不同流域各不相同。基于坡向的空间分布图, 可以发现雨量站主要分布于流域北坡、两个南坡和西坡。图 6d 给出了各个坡向上雨量站年降水量与海拔的散点分布, 结果表明当雨量站位于同一个坡向时, 随着海拔高度的增加年降水量一定增加。同时, 季节尺度上, 除冬季降水外, 当雨量站位于同一个

坡向时, 也都是随着海拔高度的增加降水量一定增加。

此外, 分析了天山北坡所有雨量站年降水量与海拔高度的关系, 发现限定同一个坡向时, 年降水量与海拔显著相关, 相关系数达 0.92。高度每增加 100 m, 天山北坡年降水增加 24.9 mm。其中, 天山北坡的水文站所处海拔高于气象站, 其观测的年降水量亦高出气象站 160 mm。

以上分析说明, 在新疆地区, 降水与地形要素关系密切。一般来讲, 在最大可能降水高度以下的垂直范围内, 降水随海拔高度增加而增大。但在较小的区域尺度上, 坡向和坡度也会影响降水量。

5 总结与讨论

本文对新疆地区 89 个气象站和 38 个水文站 1961~2005 年降水资料进行了对比分析, 并进一步讨论了新疆降水与海拔高度、坡度和坡向的关系。主要结论如下:

(1) 就全疆平均而言, 气象站和水文站观测的年降水具有相同的时间变化特征, 二者都在 1987 年后显著增多, 分别增加 31.9 mm 和 38.1 mm。但是在平均值上, 水文站观测的年降水量高于气象站 69.3 mm, 占气象站平均年降水 45.6%, 且这种差异随着 1987 年后年降水量的增加而加大; 在季节尺度上, 这一现象依然存在。

(2) 在南疆、北疆、伊犁河流域与天山北坡, 降水量的大小与海拔高度都存在显著的正相关关系, 即降水量随着海拔高度的增加而递增, 其中北疆的增长速率最大 [$25.8 \text{ mm} / (100 \text{ m})^{-1}$]。总体而言, 水文站多建于海拔较高的山区, 使得水文站观测的降水普遍高于气象站。但也需要注意, 只有在最大可能降水高度以下的垂直范围内, 降水量才正比于海拔高度。在高海拔地区, 由于观测资料的匮乏, 降水与海拔高度的关系还有待进一步验证。

(3) 除了海拔高度外, 地形的坡度和坡向也是影响降水变化的重要因素。尤其是在较小的区域尺度, 坡向不同时, 降水与海拔高度的正相关关系是不成立的。同时, 一定大小的坡度, 有利于气流抬升, 凝结降水, 这也是导致水文站具有更高降水观测值的一个原因。另外, 除了地形因素, 相比于气象站, 水文站多建于河流附近, 水汽条件更加充沛, 这种局地气候, 也可能造成水文站的降水观测值更

高。

(4) 气象站与水文站观测降水所存在的差异, 并不是源于两类降水观测系统中雨量仪器等系统误差, 而是与雨量站所处海拔高度、坡度和坡向存在密切的关系。因而这两类观测系统都真实的记录了新疆降水的变化, 两类数据的年际变化、转折年份和增加趋势都基本一致, 说明水文站数据的纳入, 并没有影响之前单纯基于气象站观测资料所得出的结论。但是二者在观测降水量上的巨大差异, 也说明单纯采用气象站观测的降水资料难以对新疆大气水资源做出准确的估算。

由于观测数据的限制, 过去对新疆地区降水的研究主要依赖于气象站观测的降水。但气象站多建于低海拔和人类居住的区域, 对高海拔和地形复杂的地区缺乏代表性。因此, 仅用气象站观测降水资料不足以反应新疆降水真实的时空特征, 以及客观估算其水资源, 而水文站观测降水的使用是一个很好的补充。未来遥感降水数据质量的提高也将进一步提高对新疆降水的估算能力。

另外, 在新疆整体降水于 1987 年后突然增加的背景下, 相比于低海拔地区, 高海拔地区降水增加的更多。这个问题的成因比较复杂, 有待于利用数值模拟的方法从大尺度环流场和区域地气相互作用的角度做进一步的探索。

参考文献 (References)

- Burrough P A, McDonell R A. 1998. Principles of Geographical Information Systems [M]. Oxford: Oxford University Press, 190pp.
- 陈亚宁, 徐宗学. 2004. 全球气候变化对新疆塔里木河流域水资源的可能性影响 [J]. 中国科学 (D 辑), 34 (11): 1047~1053. Chen Yaning, Xu Zongxue. 2004. Potential influence of global climate change to water resource of Tarim River valley in Xinjiang [J]. Science in China (Ser. D) (in Chinese), 34 (11): 1047~1053.
- Dozier J, Frew J. 1990. Rapid calculation of terrain parameters for radiation modeling from digital elevation data [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 28 (5): 963~969.
- Dutilleul P. 1993. Modifying the t test for assessing the correlation between two spatial processes [J]. Biometrics, 49 (1): 305~314.
- 符淙斌, 王强. 1992. 气候突变的定义和检测方法 [J]. 大气科学, 16 (4): 482~493. Fu Congbin, Wang Qiang. 1992. The definition and detection of the abrupt climate change [J]. Scientia Atmospherica Sinica (in Chinese), 16 (4): 482~493.
- 韩萍, 薛燕, 苏宏超. 2003. 新疆降水在气候转型中的信号反应 [J]. 冰川冻土, 25 (2): 179~182. Han Ping, Xue Yan, Su Hongchao. 2003. Precipitation signal of the climatic shift in Xinjiang region [J]. Journal of

- Glaciology and Geocryology (in Chinese), 25 (2): 179–182.
- 姜逢清, 胡汝骥. 2004. 近 50 年来新疆气候变化与洪、旱灾害扩大化 [J]. 中国沙漠, 24 (1): 35–40. Jiang Fengqing, Hu Ruji. 2004. Climate change and flood & drought disasters in Xinjiang during recent 50 years [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 24 (1): 35–40.
- 蓝永超, 沈永平, 苏宏超. 2008. 全球变暖情景下新疆降水的变化 [J]. 干旱区资源与环境, 22 (10): 66–71. Lan Yongchao, Shen Yongping, Su Hongchao. 2008. Study on precipitation variations in Xinjiang region under global warming [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment (in Chinese), 22 (10): 66–71.
- 李剑锋, 张强, 白云岗, 等. 2012. 新疆地区最大连续降水事件时空变化特征 [J]. 地理学报, 67 (3): 312–320. Li Jianfeng, Zhang Qiang, Bai Yungang, et al. 2012. Spatio-temporal probability behaviors of the maximum consecutive wet days in Xinjiang, China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 67 (3): 312–320.
- 李天文, 刘学军, 陈正江, 等. 2004. 规则格网 DEM 坡度坡向算法的比较分析 [J]. 干旱区地理, 27 (3): 398–404. Li Tianwen, Liu Xuejun, Cheng Zhengjiang, et al. 2004. Study on the accuracy and algorithms for calculating slopes and aspects based on the digital elevation model [J]. Arid Land Geography (in Chinese), 27 (3): 398–404.
- 刘波, 冯锦明, 马柱国. 2009. 1960~2005 年新疆气候变化的基本特征 [J]. 气候与环境研究, 14 (4): 414–426. Liu Bo, Feng Jinming, Ma Zhuguo. 2009. Characteristics of climate changes in Xinjiang from 1960 to 2005 [J]. Climatic and Environment Research (in Chinese), 14 (4): 414–426.
- Ma Z G, Fu C B. 2003. Interannual characteristics of the surface hydrological variables over the arid and semi-arid areas of northern China [J]. Global and Planetary Change, 37 (3–4): 189–200.
- 马柱国, 符淙斌. 2006. 1951–2004 年中国北方干旱化的基本事实 [J]. 科学通报, 51 (20): 2429–2439. Ma Zhiguo, Fu Congbin. 2006. Some evidence of drying trend over northern China from 1951 to 2004 [J]. Chinese Science Bulletin, 51 (23): 2913–2925.
- 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 2002. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨 [J]. 冰川冻土, 24 (3): 219–226. Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. 2002. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in northwest China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 24 (3): 219–226.
- 施雅风, 沈永平, 李栋梁. 2003. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨 [J]. 第四纪研究, 23 (2): 152–164. Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Doliang. 2003. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in northwest China [J]. Quaternary Sciences (in Chinese), 23 (2): 152–164.
- 史玉光, 孙照渤, 杨青. 2008. 新疆区域面雨量分布特征及其变化规律 [J]. 应用气象学报, 19 (3): 326–332. Shi Yuguang, Sun Zhaoobo, Yang Qing. 2008. Characteristics of area precipitation in Xinjiang region with its variation [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 19 (3): 326–332.
- 王志伟, 翟攀茂. 2003. 中国北方近 50 年干旱变化特征 [J]. 地理学报, 58 (增刊): 61–68. Wang Zhiwei, Zhai Panmao. 2003. Climate change in drought over northern China during 1950–2000 [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 58 (Suppl.): 61–68.
- 薛燕, 韩萍, 冯国华. 2003. 半个世纪以来新疆降水和气温的变化趋势 [J]. 干旱区研究, 20 (2): 127–130. Xue Yan, Han Ping, Feng Guohua. 2003. Change trend of the precipitation and air temperature in Xinjiang since recent 50 years [J]. Arid Zone Research (in Chinese), 20 (2): 127–130.
- 杨大庆, 施雅风, 康尔泗. 1991. 天山乌鲁木齐河流域雨量器对比观测降水实验成果分析 [J]. 水文, (3): 26–32. Yang Daqing, Shi Yafeng, Kang Ersi. 1991. Analysis of experimental results of rain gauge comparative observation in Urumqi River valley [J]. Journal of China Hydrology (in Chinese), (3): 26–32.
- 杨莲梅. 2003. 新疆极端降水的气候变化 [J]. 地理学报, 58 (4): 577–583. Yang Lianmei. 2003. Climate change of extreme precipitation in Xinjiang [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 58 (4): 577–583.
- 叶伯生, 赖祖铭, 施雅风. 1997. 伊犁河流域降水和气温的若干特征 [J]. 干旱区地理, 20 (1): 46–52. Ye Baisheng, Lai Zuming, Shi Yafeng. 1997. Some characteristics of precipitation and air temperature in the Ili River basin [J]. Arid Land Geography (in Chinese), 20 (1): 46–52.
- 张国威, 吴素芬, 王志杰. 2003. 西北气候环境转型信号在新疆河川径流变化中的反映 [J]. 冰川冻土, 25 (2): 183–187. Zhang Guowei, Wu Sufen, Wang Zhijie. 2003. The signal of climatic shift in northwest China deduced from river runoff change in Xinjiang region [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 25 (2): 183–187.
- 张军民. 2006. 伊犁河流域气候资源特点及其时空分布规律研究 [J]. 干旱气象, 24 (2): 1–4. Zhang Junming. 2006. Study on temporal and spatial distribution of climate resource in Ili River basin [J]. Arid Meteorology (in Chinese), 24 (2): 1–4.
- 郑子彦, 张万昌, 邵庆国. 2009. 基于 DEM 与数字化河道提取流域河网的不同方案比较研 [J]. 资源科学, 31 (10): 1730–1739. Zheng Ziyan, Zhang Wanchang, Tai Qingguo. 2009. A comparative study on different schemes of automatic river system extraction based on DEM and vector channels [J]. Resources Science (in Chinese), 31 (10): 1730–1739.