

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2015.04.006

中国天山山区降水空间分布模拟及成因分析

张正勇¹, 何新林¹, 刘琳¹, 李忠勤², 王璞玉²

(1. 石河子大学, 新疆 石河子 832000; 2. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 为了研究中国天山山区降水空间分布规律及其形成机理, 基于研究区 DEM 及气象站点数据资料, 运用偏最小二乘法和 GIS 技术建立了山区降水估算模型, 并分析其降水成因。结果表明: 天山山区年降水具有明显的经度和纬度地带性, 西段多于东段, 北坡(迎风坡)多于南坡(背风坡); 研究区降水在海拔 4 000 m 以下呈线性增加特征, 随后显著减少, 在 5 500 m 左右出现第二极大值带; 坡度小于 50°时降水与坡度呈显著正相关。在地形抬升条件下, 随气温下降和相对湿度上升使降水增加, 这也是山区降水形成的必要条件。总体来看, 偏最小二乘法可以有效解决降水及各因子间多重相关性问题, 模型回归效果较显著, 在模拟山区降水方面具有一定适用性。

关键词: 降水分布; 地形因子; 地理因子; 偏最小二乘; 天山山区

中图分类号: P426.615 文献标志码: A 文章编号: 1001-6791(2015)04-0500-09

山区降水是干旱区水文循环最重要的环节之一, 其变化可直接影响河流径流变化, 对陆面水文过程产生重要影响。但山区降水空间分布复杂, 它既与大气气候条件有关, 又受地形和海拔高度等因素影响^[1-3]。中国天山是新疆众多重要河流的发源地, 由于其特殊的地理位置和复杂多样的地形地貌, 使得降水空间分布差异明显。由于山区水文气象观测站和雨量站多设在低山和平原处, 高海拔处雨量数据缺失, 估算和模拟天山山区降水时空分布及其形成机制显得尤为重要^[4]。众多学者就山区降水估算和模拟展开研究, 并取得了丰富成果, 多用以下 3 种方法: ① 空间插值法, 该方法能反映空间数据的自相关特性且操作简便, 但由于受到插值模型及参数选择、样点数目及分布的限制, 插值精度尚存在不确定性, 因而难以反映地形地貌对降水空间变异的影响, 众多学者运用该方法对不同山区降水变化特征进行了分析^[5]; ② 遥感定量反演法, 该方法主要基于卫星降水数据对区域降水量时空分布进行估算。国内外诸多学者已做了很多探讨, 并对其精度及有效性进行了验证。如 TRMM 数据受空间分辨率较低所限适合应用在大范围降水时空变化研究, 无法满足流域尺度研究需要, 且难以进行复杂地形降水时空分析的精细分析^[6-9]。Heidinger 等^[7]、Zhang 等^[8]和赵传成等^[9]用该方法对山区降水分布和强度等进行了研究; ③ 统计回归分析法, 通过建立降水要素与空间变量间的关系方程, 使用多元回归分析方法建立降水与地理地形等影响因子间的关系, 其在研究范围较小、影响降水分布的因子明确且相互独立时效果较好, 但对较大范围的降水空间分布却难以给出准确的估算分析结果^[10-13]。其中 Zhang 等^[11]、穆振侠^[13]利用降水、高程和地形等建立了回归模型, 对山区降水形成的机理与规律进行了探究。由于山区降水时空变化强烈且可供验证其估算结果的雨量站极少, 造成了应用不同估算和模拟方法得出山区降水分布规律的研究结果存在一定分歧^[14-15], 同时以往研究缺少山区降水对地理、地形和其他气象条件等多因子响应机制研究。

目前一些学者已对中国天山山区开展了降水时空分布及其估算研究, 张正勇等^[5]利用山区 32 个气象站

收稿日期: 2014-12-22; 网络出版时间: 2015-07-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20150714.1748.024.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41461086); 新疆联合基金重点支持项目(U1203282)

作者简介: 张正勇(1978—), 男, 甘肃景泰人, 副教授, 博士研究生, 主要从事 GIS 及其在水资源方面的研究。

E-mail: zyz0815@163.com

通信作者: 何新林, E-mail: 564623267@qq.com

逐月降水数据和 DEM 数据进行了降水时空变化趋势分析; 刘俊峰等^[4]、张涛等^[6]使用 TRMM 卫星降水数据结合雨量计估算天山山区逐月降水空间分布规律; 宁理科^[15]以天山山区 DEM 为基础分析了不同地貌及地形因子对降水的影响。然而山区降水分布格局及其成因是多因素共同作用的结果, 而集主成分分析、多元线性回归分析和典型相关分析的基本功能于一体的偏最小二乘回归法(PLS), 能通过数据分析简化数据结构, 使模型的精度、实用性得到提高^[12]。因此本文拟在因子多重相关性分析的基础上运用 PLS 建模, 分析天山降水空间分布规律及其成因探究。以期为天山山区气候变化及区域响应和水文水资源变化监测提供依据, 也对其他山区降水时空模拟有一定借鉴意义。

1 数据来源及研究方法

1.1 研究区概况

天山是亚洲中部最大的山系, 习惯上将其分为“东天山”和“西天山”, 中国境内的天山为东天山, 其东西绵延 1 700 km, 宽度为 250 ~ 350 km, 约占总长度的 2/3(图 1)。山区平均海拔 4 000 m, 是地理上一条重要界线。天山由 20 多条山脉夹杂着许多菱形山间盆地、谷底以及山前平原等组成。山区降水丰富、积雪覆盖、冰川发育, 孕育了新疆众多河流和湖泊。近 50 年来山区气温和降水年际变化均表现出递增趋势, 气候整体向暖湿化转变, 年均降水量为 154.3 mm, 其倾斜率高达 9.5 mm/10a, 1980s 后递增趋势明显增强, 季节分配分别为春季(25.3%)、夏季(47.2%)、秋季(19.4%)和冬季(8.2%), 四季的降水倾向率分别为 1.6 mm/10a、3.7 mm/10a、2.1 mm/10a 和 1.8 mm/10a^[5]。

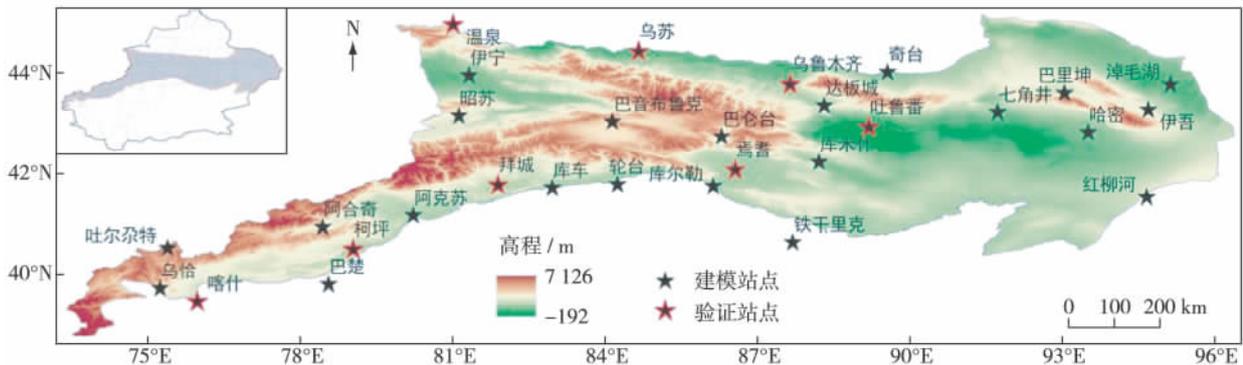


图 1 研究区示意

Fig. 1 Sketch map on the study area

1.2 数据来源

本文采用的 DEM 数据为 90 m 分辨率的 SRTM3 V4.1, 数据来自中国科学院计算机网络信息中心国际科学数据镜像网站(<http://datamirror.csdb.cn>); 气象资料选用天山山区及附近 30 个气象站(图 1 和表 1) 1952—2012 年间降水量、气温、水汽压和相对湿度等月均数据, 来源于国家气象信息中心(<http://www.nmic.gov.cn/>), 其中海拔在 800 m 以上站点占 72%。

1.3 研究方法

利用天山山区 DEM 及其周边气象站点的气象数据, 采用文献[16]中的传统气温线性模型, 对站点月均温进行线性回归和栅格计算, 得到月均温栅格数据; 对站点水汽压和相对湿度进行 spline 插值得到矢量数据; 利用 DEM 提取研究区坡度与坡向。在分析降水及影响因子(经纬度、坡度、坡向、高程、温度、水汽压和相对湿度)的多重相关性基础上, 采用偏最小二乘(PLS)回归分析建模, 得到天山山区降水模型, 并用研究区内 8 个气象站 2013 年的月降水数据对模型精度进行检验, 最后分析山区降水的空间分布特征并探讨其形成机制。

表1 天山山区30个气象站情况

Table 1 Introduction to 30 weather stations in Tianshan Mountains

站名	地理位置	海拔/m	站名	地理位置	海拔/m	站名	地理位置	海拔/m
温泉	44°58'N 81°01'E	1 358	乌恰	39°43'N 75°15'E	2 176	红柳河	41°32'N 94°40'E	1 574
乌苏	44°26'N 84°40'E	479	焉耆	42°05'N 86°34'E	1 055	阿合奇	40°56'N 78°27'E	1 985
奇台	44°01'N 89°34'E	794	拜城	41°47'N 81°54'E	1 229	巴仑台	42°44'N 86°18'E	1 739
伊宁	43°57'N 81°20'E	663	轮台	41°47'N 84°15'E	976	达板城	43°21'N 88°19'E	1 104
昭苏	43°09'N 81°08'E	1 851	库车	41°43'N 82°58'E	1 082	铁干里克	40°38'N 87°42'E	846
伊吾	43°16'N 94°42'E	1 729	吐鲁番	42°56'N 89°12'E	35	七角井	43°13'N 91°44'E	721
哈密	42°49'N 93°31'E	737	阿克苏	41°10'N 80°14'E	1 104	库米什	42°14'N 88°13'E	922
巴楚	39°48'N 78°34'E	1 117	库尔勒	41°45'N 86°08'E	932	乌鲁木齐	43°47'N 87°39'E	935
柯坪	40°30'N 79°03'E	1 162	巴里坤	43°36'N 93°03'E	1 677	吐尔尕特	40°31'N 75°24'E	3 504
喀什	39°28'N 75°59'E	1 289	淖毛湖	43°46'N 95°08'E	479	巴音布鲁克	43°02'N 84°09'E	2 458

2 统计分析与偏最小二乘法建模

2.1 统计分析

天山山区降水受大西洋和北冰洋湿润气流的影响,空气受到山体扰动和阻滞使得区域内降水与地理因子、地形因子和其他气象因子等具有复杂的相关性。为揭示这种关系并估算空间各点上的降水量,本文采用 PLS 统计方法,建立地理、地形及气象因子与降水分布的关系式如下:

$$P = P(\varphi \lambda h \alpha \beta a b c) \quad (1)$$

式(1)中的8个自变量可以分为3类,即地理因子组包括纬度(φ)和经度(λ);地形因子组包括海拔(h)、坡度(α)和坡向(β);气象因子组包括温度(a)、水汽压(b)和相对湿度(c)。地理因子能够反映大气和环流背景,地形因子反映局地地形地貌的特征,气象因子反映降水发生的气象条件。回归分析中的残差用 ε 表示,则地理、地形及气象要素影响下的降水量估算公式为

$$P = a_0 + a_1\varphi + a_2\lambda + a_3h + a_4\alpha + a_5\beta + a_6a + a_7b + a_8c + \varepsilon \quad (2)$$

式中 a_0 为常数项; a_1 至 a_8 为各项系数。

2.2 多重相关性分析

传统的基于普通最小二乘法(OLS)进行多元线性回归的前提是各因子之间相互独立,当总模型 R^2 较大、 F 统计量高度显著、通过 t 检验时,表明模型与数据的拟合程度较好,可用线性模型来表示。研究区地形复杂、高差较大的地势造就了区域降水与地理、地形和气候诸因子间的复杂关系,因此建模之前进行自变量多重相关性分析。表2为各因子的相关系数矩阵, $r(h, b) = -0.796$, $r(h, a) = -0.882$, $r(\alpha, a) = -0.361$, $r(a, b) = 0.610$, $r(a, c) = -0.749$,表3中大多数变量的容差均小于0.10, VIF 值均大于10,可见自变量并非相互独立,存在着显著的多重相关性。由表3可知,OLS建模时,因子 λ 、 h 和 β 的 t 值均小于临界值 1.697 ($\alpha = 0.05$),均未通过 t 检验,说明这些因子对降水线性影响不显著,对降水预测力度不理想,在回归方程中不具有统计学意义,建模时应剔除这几个变量。然而对地势变化较大的山区来说,海拔显然是影响降水分布的一个重要因子,表2中海拔(h)与降水量的相关系数也较大。同时天山山区降水受到西风气流的影响很大,相关研究结果显示天山西段伊犁地区的降水远大于位于东段的吐鲁番地区^[5,9,13],证明经度(λ)对降水影响较明显。山区迎风坡为降水丰沛区,所以坡向(β)也是必须包含的重要因子之一。如果剔除以上3个因子,其结果很难令人信服。可见 OLS 建模模拟山区降水时,因子多重相关性的典型病兆显而易见,由于自变量系统的解释性不够和自变量之间的多重相关性,使得某些有重要解释意义的因子不被引入,从而使得估算值与实测值存在较大误差^[12],将影响模型的精确性和实用性。因此本文运行 PLS 法构建模型以有效克服自变量多重相关性的问题。

表 2 天山山区地理、地形及气象因子与夏季降水的多重相关系数矩阵

Table 2 Multiple correlation coefficient matrix about geographical position, terrain, climate factors and summer precipitation in the study area

	降水量(<i>P</i>)	纬度(φ)	经度(λ)	海拔(<i>h</i>)	坡度(α)	坡向(β)	均温(<i>a</i>)	水汽压(<i>b</i>)	相对湿度(<i>c</i>)
降水量(<i>P</i>)	1.000								
纬度(φ)	0.239	1.000							
经度(λ)	-0.129	0.489	1.000						
海拔(<i>h</i>)	0.643	-0.374	-0.321	1.000					
坡度(α)	0.553	0.061	0.072	0.380	1.000				
坡向(β)	-0.081	-0.054	0.164	0.089	0.035	1.000			
均温(<i>a</i>)	-0.810	-0.031	0.239	-0.882	-0.361	-0.032	1.000		
水汽压(<i>b</i>)	-0.424	0.234	-0.037	-0.796	-0.345	-0.218	0.610	1.000	
相对湿度(<i>c</i>)	0.739	0.270	-0.285	0.442	0.192	-0.166	-0.749	0.041	1.000

表 3 最小二乘法(OLS) 回归建模各因子与夏季降水的系数、*t* 检验、VIF 值及特征值

Table 3 Regression modeling index coefficient, *t* test, VIF, and conditional by method of least squares (OLS)

因子	回归系数	<i>t</i>	Sig 值	容差	VIF 值	特征值	因子	回归系数	<i>t</i>	Sig 值	容差	VIF 值	特征值
纬度(φ)	44.943	1.738	0.091	0.101	9.909	7.59	坡向(β)	-0.034	-0.264	0.793	0.877	1.140	0.04
经度(λ)	-5.131	-1.516	0.139	0.509	1.965	0.84	均温(<i>a</i>)	6.861	3.014	0.005	0.013	78.536	0.01
海拔(<i>h</i>)	0.136	0.874	0.388	0.014	69.591	0.28	平均水汽压(<i>b</i>)	-10.491	-3.954	0	0.044	22.749	0
坡度(α)	6.940	3.839	0.001	0.713	1.402	0.25	平均相对湿度(<i>c</i>)	35.621	5.378	0	0.038	26.039	0

2.3 PLS 建模及误差分析

2.3.1 PLS 建模

通过对偏最小二乘回归因子精度分析, 选取信息提取和解释能力较强的因子作为典型成分。数据精度测定主要是由偏最小二乘因子所解释的变异角度来讨论。由表 4 可发现, 第一主成分 t_1 分别解释了原自变量和因变量系统中 27.7%、40.7% 的变异信息; 第二主成分 t_2 分别解释了各系统中 17.6% 和 19.4% 的变异信息; 第三主成分 t_3 分别解释了各系统中 20.6% 和 5.9% 的变异信息。前 7 个偏最小二乘因子已经涵盖了几乎全部的自变量组和因变量组的数据信息, 其中前 6 个成分可解释自变量的变异程度达 89.8%, 对因变量的变异解释达 73.1%。第 8 个成分对变量的解释变异程度都很低, 由此可见, 前 6 个被抽取成分综合了自变量组和因变量组的大部分信息, 对结果分析有重要作用。因此取前 6 个成分来建立预报回归模型, 对降水空间分布有较好的预测能力。

表 4 偏最小二乘回归因子解释的变差百分比

%

Table 4 Percent variation accounted for factors by partial least squares

PLS 因子	自变量组变差		因变量组变差		PLS 因子	自变量组变差		因变量组变差	
	比例	累积	比例	累积		比例	累积	比例	累积
1	27.7	27.7	40.7	40.7	5	10.5	85.9	1.8	72.6
2	17.6	45.3	19.4	60.1	6	3.9	89.8	0.4	73.0
3	20.6	65.9	5.9	66.0	7	9.4	99.2	0.2	73.2
4	9.5	75.4	4.8	70.8	8	0.8	100	0.7	73.9

2.3.2 降水分布模型

采用 PLS 回归建模和检验方法, 得到天山山区春(3—5 月)、夏(6—8 月)、秋(9—11 月)、冬(12—次年 2 月)及年平均降水空间分布估算模型(表 5), 并由该模型估算分析各季节和年降水分布特征, 取得了较好的建模效果。表 5 中各系数不但可以得到各时段的降水空间分布, 而且其正负值还表征各因子对山区降水的贡献多少, 已达到实际应用目的。

表 5 天山山区降水估算系数

Table 5 Model parameter for precipitation estimation in the study area

时间	a_0 (常数)	a_1 (纬度)	a_2 (经度)	a_3 (高程)	a_4 (坡度)	a_5 (坡向)	a_6 (温度)	a_7 (水汽压)	a_8 (相对湿度)
春季	-162.230	-0.936	1.283	0.008	0.461	0.062	2.321	0.135	166.305
夏季	-292.177	6.506	-0.440	0.022	0.718	-0.251	0.712	0.624	74.961
秋季	-268.706	6.493	-0.456	0.013	-0.105	0.064	1.577	0.019	23.775
冬季	-109.969	2.475	-0.078	0.003	-0.038	0.307	0.749	0.008	30.295
全年	-309.497	4.248	0.496	0.020	0.271	-0.637	2.637	1.621	104.948

2.3.3 误差分析

为了对模拟结果进行验证,从研究区中选取2013年8个站点降水数据作为验证数据,通过孤立点检测的方法对结果进行误差检验。由表6分析可见,各站点平均误差为12.54%,各站夏季误差较小,为10.86%,冬季误差较大,为15.35%,低海拔站点误差较小,而高海拔站点误差偏大。焉耆站的平均误差较大,可能由于该站点位于山区中部,海拔较高,周边地形复杂所致。降水不仅受到地形、地貌等影响,同时受下垫面整体和局部小地形地貌等众多因素的制约,相互作用和影响非常复杂,所以估算误差较大。温泉站夏、秋两季的误差相对较大,这主要是因为温泉地处伊犁河谷北侧,特有的局地喇叭口地形,使来自大西洋的水汽由于地形抬升作用而大大增强降雨,这种局地地形的影响在模型中未能充分体现,从而产生了误差。

表 6 基于 PLS 回归建模的四季降水量相对误差

%

Table 6 Relative error of seasonal precipitation based on PLS regression modeling

站点号	站名	冬季	春季	夏季	秋季	平均误差	站点号	站名	冬季	春季	夏季	秋季	平均误差
51704	喀什	-12.2	-20.4	12.5	2.7	11.95	51639	拜城	18.5	20.1	-8.5	-15.2	15.58
51238	温泉	-15.6	-1.3	13.5	22.3	13.18	51581	吐鲁番	-11.8	1.6	-5.6	15.1	8.53
51365	乌苏	13.0	10.7	9.7	2.3	8.93	51358	乌鲁木齐	10.3	-12.6	8.4	5.4	9.18
51720	柯坪	-7.8	-17.2	-3.1	-28.7	14.20	51567	焉耆	33.6	-7.3	25.6	8.8	18.83

3 天山山区降水空间分布

3.1 天山山区降水空间分布特征

根据 PLS 降水估算模型,利用 ArcGIS 10 绘制天山山区四季及全年的降水量分布图(图 2),发现天山山区降水时空分布差异较大。研究区夏季降水量大,冬季降水量较小。夏季大西洋水汽通过盛行西风带进入准噶尔盆地,准噶尔盆地西面有缺口,呈“口袋状”便于水汽的集聚,南面有高大的天山阻挡,西风被迫抬升形成地形雨,天山南坡则成为了“雨影区”,天山北坡多年平均降水量可达 500~700 mm,明显多于南坡。而天山北坡与博罗科努山之间的伊犁河谷更有利于西风的深入与抬升,因而形成丰富的降水,成为研究区的典型“湿岛”。水汽在山脉阻挡作用下,自西向东递减,西天山地区最大年降水量可达 800 mm,而天山东南部的吐哈地区远离海洋且地形闭塞,水汽难以到达,在干热的副热带大陆性气团的影响下,盆地内出现晴朗、干燥和炎热天气,难以形成降水,年降水量不到 50 mm,成为研究区的“干极”。以上分析发现,大地形对山区降水的重大影响造就了降水空间分布的复杂多样性。

3.2 地理因子对降水的影响

由图 3 可知,天山山区降水量随纬度变化较大,其变化基本上呈“马鞍状”分布,在 43°00'N—44°30'N 出现大值。究其原因,该纬度区间山体分布连续,天山大致为东西走向,西风将来自大西洋和北冰洋的湿润大气携至天山,在遇到地形快速爬升时,在迎风的西坡和西北坡形成较多降水,而由于雨影区和焚风效应使得南坡降水较少。在 40°30'N—41°30'N 之间,由于“干极”吐哈盆地造成了该区间降水偏少。年均降水量随

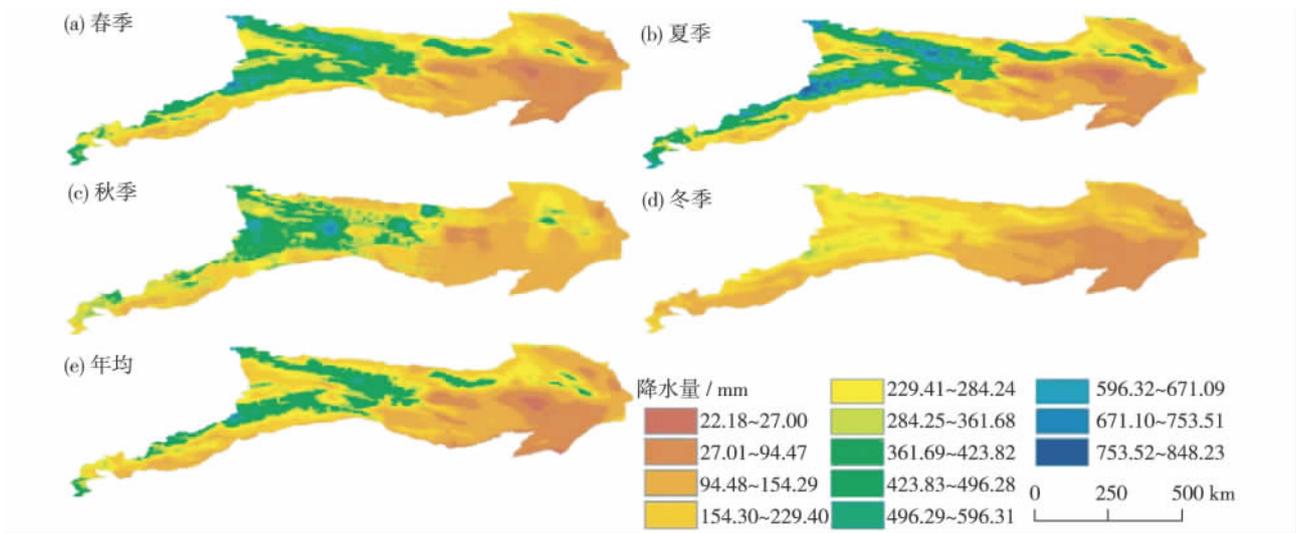


图 2 天山山区季节及年降水量模拟

Fig. 2 Simulation map of seasonal and annual precipitation in Tianshan Mountains

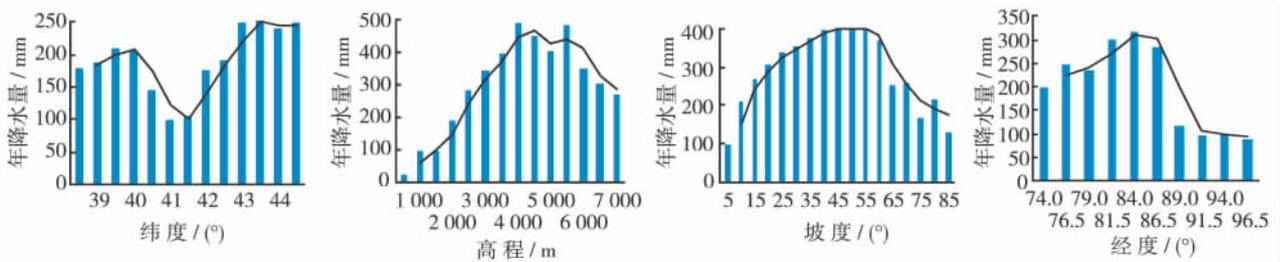


图 3 天山山区年降水量空间分布特征统计

Fig. 3 Annual precipitation statistical chart in different geographic locations in Tianshan Mountains

经度的增大先增加后减小, 呈“M”状曲线变化, 81°30'E—86°30'E 为高大山体集中区域, 是降水高值区, 在 84°00'E 左右达到最大值。从西向东高程不断降低, 西部的高山阻挡了西风带来湿润气流, 所以降水随经度的增加而减少, 直到 89°00'E—96°30'E 对应吐哈地区降水减至最少。

3.3 地形对降水的影响

高程是影响降水空间分布差异的重要地形因子之一。由图 3 可知, 天山山区年降水整体上随海拔升高而增大, 在低于 4000 m 区间呈现典型线性增加特征, 但在高于 4000 m 的高山区降水整体小幅递减, 原因在于暖湿气流受到地形的抬升作用而不断爬升, 气温逐渐下降, 空气中水汽逐渐达到饱和, 冷却凝结形成降水, 但降水之后空气中水汽含量不断减少, 水汽达不到过饱和, 无法继续形成降水, 降水随之减少。另外, 在 5500 m 左右为降水第二极大值带, 可能是由于冰川风与谷风辐合造成降水增多。天山山区降水随坡度的变化总体呈抛物线状(图 3)。平地 and 缓坡降水较少, 当坡度增大至 50°, 降水随坡度增大而显著线性增加。当坡度继续增大, 由于局部地区的地形复杂, 影响降水的因子较多, 降水呈快速减少趋势。

3.4 其他气象因子对降水的影响

由表 2 可知, 均温、平均相对湿度与降水的相关度很高, 对降水的影响较大。随着平均气温上升, 降水量减少, 相对湿度越高, 降水越多。相对湿度表示湿空气中所含水蒸汽的份量接近饱和的程度, 相对湿度越大水汽越容易达到过饱和状态, 这是成云致雨的必要条件。在山区, 相对湿度较大的气团沿山坡爬升, 随海拔升高而气温降低, 使得水汽越过临界点而凝结成水珠, 进而形成降水。这与表 2 中均温与降水量呈较高的负相关以及相对湿度与降水量呈较高的正相关关系的结论相一致。

4 讨 论

4.1 与其他估算方法对比分析

天山山区降水空间分布呈现复杂多样性。张正勇等^[5]采用近 50 年站点降水数据空间插值和 DEM 修正得出伊犁河谷年降水为 500 mm 左右、吐哈盆地为 50 ~ 70 mm, 与本研究结果略有偏差但基本接近, 究其原因可能是前者研究中采用数据时间序列较长和高海拔气象站点稀少不能真实反映山区降水变化所致; 穆振侠^[13]、赵传成等^[9]采用 TRMM 数据估算得天山北坡年降水对于南坡、中段和西段均高于东段, 山区最大降雨高程带为 3 500 ~ 3 700 m, 降水空间分布特征与本研究结果一致, 而最大降雨高程带比本研究中低 300 m 左右, 笔者认为这是由于 TRMM 数据的分辨率(0.25° × 0.25°) 较低所致。就以上结果对比来看, 运用不同方法估算研究区降水分布特征的结果基本一致, 但空间插值和统计方法均需要长时间序列数据, TRMM 卫星降水数据空间分辨率较低, 无法精细刻画地形和高程对降水变化的影响, 而 PLS 降水分布模型不仅能分析其空间分异规律, 还可以揭示降水分布对地理、地形和其他气候因子的响应机理。

4.2 天山山区降水形成机制

天山山体大致呈东西走向, 其南北坡降水具有一定纬度地带性, 由于天山北部有缺口, 来自大西洋和高纬北冰洋的湿润气流在北坡受地形抬升, 加之大气相对湿度和温度变化对高程响应强烈, 进而使得降水具有明显的高程效应, 而在天山南部由于高大山脉背风坡的雨影或焚风效应, 导致北坡降水较南坡丰沛, 另外可能由于冰川风与谷风造成海拔 5 500 m 左右出现第二降水极值带; 而东段、中段和西段的降水差异呈现较明显经度地带性, 位于西部更靠近大西洋的伊犁地区具有特殊的喇叭口地形, 使得水汽得以充分进入, 并在地形抬升作用下形成丰沛降水, 成为研究区的“湿岛”; 水汽在长距离向东输送过程中, 相对湿度持续降低, 使得位于东部的吐哈地区为“干极”, 所以天山山区降水由西至东逐渐减少。降水作为水循环中最活跃的环节, 不仅受海陆位置、大气环流的影响, 同时受下垫面整体和局部的地形地貌等众多因素的制约, 且相互作用和影响非常复杂。由于数据限制, 本文在构建模型过程中, 引入了地理、地形和主要气象因子作为输入参数, 对其他局地影响因子未加以考虑, 因此对降解释释能力有限。

5 结 论

(1) 采用 PLS 方法建立降水分布模型可以有效解决因子多重相关性问题, 该模型能解释 89.8% 的因变量的变异程度, 达到了较好的模拟精度。

(2) 天山山区年降水具有明显的经度和纬度地带性, 西段多于东段, 北坡(迎风坡)多于南坡(背风坡), 伊犁河谷是研究区的“湿岛”, 吐哈盆地则为“干极”。

(3) 天山山区降水量随海拔先增大后减小, 海拔 4 000 m 左右为最大降水高程带, 在 5 500 m 左右出现了第二极大值带。坡度小于 50° 时降水随坡度增大呈显著增加, 且在地形抬升条件下, 降水随气温下降和相对湿度的增加而增加, 这是山区降水形成的必要条件。

由于研究区高海拔山区气象站点稀少, 样本数量较少, 且现有气象站点坐标只精确到分, 定位精度较差。而 DEM 数据分辨率为 90 m, 在计算和提取站点坡度和坡向时可能存在误差, 导致样本数据的不确定, 进而影响模拟效果。

参考文献:

- [1] ZHANG K, PAN S, CAO L, et al. Spatial distribution and temporal trends in precipitation extremes over the Hengduan Mountains region, China, from 1961 to 2012 [J]. Quaternary International, 2014, 349: 346-356.
- [2] CHEVAL S, BIRSAN M V, DUMITRESCU A. Climate variability in the Carpathian Mountains region over 1961—2010 [J]. Global

- and Planetary Change ,2014 ,118: 85-96.
- [3] 陈仁升,康尔泗,丁永建. 中国高寒区水文学中的一些认识和参数[J]. 水科学进展,2014,25(3): 307-317. (CHEN Rensheng, KANG Ersi, DING Yongjian. Some knowledge on and parameters of China's alpine hydrology [J]. Advances in Water Science ,2014 ,25(3): 307-317. (in Chinese))
- [4] 刘俊峰,陈仁升,卿文武,等. 基于 TRMM 降水数据的山区降水垂直分布特征[J]. 水科学进展,2011,22(4): 447-454. (LIU Junfeng ,CHEN Rensheng ,QING Wenwu , et al. Study on the vertical distribution of precipitation in mountainous regions using TRMM data [J]. Advances in Water Science ,2011 ,22(4): 447-454. (in Chinese))
- [5] 张正勇,刘琳,唐湘玲. 1960—2010 年中国天山山区气候变化区域差异及突变特征[J]. 地理科学进展,2012,31(11): 1475-1484. (ZHANG Zhengyong ,LIU Lin ,TANG Xiangling. The regional difference and abrupt events of climatic change in Tianshan Mountains during 1960—2010 [J]. College of Geography Science ,2012 ,31(11): 1475-1484. (in Chinese))
- [6] 张涛,李宝林,何元庆,等. 基于 TRMM 订正数据的横断山区降水时空分布特征[J]. 自然资源学报,2015,30(2): 260-270. (ZHANG Tao ,LI Baolin ,HE Yuanqing , et al. Spatial and temporal based on corrected TRMM data in Hengduan Mountains [J]. Journal of Natural Resources ,2015 ,30(2): 260-270. (in Chinese))
- [7] HEIDINGER H ,YARLEQUE C ,POSADAS A , et al. TRMM rainfall correction over the Andean Plateau using wavelet multi-resolution analysis [J]. International Journal of Remote Sensing ,2012 ,33(14): 4583-4602.
- [8] ZHANG T ,HE Y Q ,MA J , et al. Spatial and temporal distribution of precipitation based on corrected TRMM data around the Hexi Corridor , China [J]. Sciences in Cold and Arid Regions ,2014 ,6(2): 159-167.
- [9] 赵传成,丁永建,叶柏生,等. 天山山区降水量的空间分布及其估算方法[J]. 水科学进展,2011,22(3): 315-322. (ZHAO Chuancheng ,DING Yongjian ,YE Baisheng , et al. Spatial distribution of precipitation in Tianshan Mountains and its estimation [J]. Advances in Water Science ,2011 ,22(3): 315-322. (in Chinese))
- [10] 侯玉婷,南卓铜,潘小多. WRF 和 GLDAS 降水数据在黑河上游山区流域的比较与分析[J]. 兰州大学学报: 自然科学版,2013,49(4): 437-447. (HOU Yuting ,NAN Zhuotong ,PAN Xiaoduo. Comparative evaluation of WRF and GLDAS precipitation data over the upper Heihe River basin [J]. Journal of Lanzhou University: Natural Science Edition ,2013 ,49(4): 437-447. (in Chinese))
- [11] 贺瑞敏,张建云,鲍振鑫,等. 海河流域河川径流对气候变化的响应机理[J]. 水科学进展,2015,26(1): 1-9. (HE Ruimin ,ZHANG Jianyun ,BAO Zhenxin , et al. Response of runoff to climate change in the Haihe River basin [J]. Advances in Water Science ,2015 ,26(1): 1-9. (in Chinese))
- [12] 舒守娟,王元,熊安元. 中国区域地理、地形因子对降水分布影响的估算和分析[J]. 地球物理学报,2007,50(6): 1703-1712. (SHU Shoujuan ,WANG Yuan ,XIONG Anyuan. Estimation and analysis for geographic and orographic influences on precipitation distribution in China [J]. Chinese Journal of Geophysics ,2007 ,50(6): 1703-1712. (in Chinese))
- [13] 穆振侠. 高寒山区降水垂直分布规律及融雪径流模拟研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学,2010: 38-50. (MU Zhenxia. Research on vertical distribution law of precipitation and snowmelt runoff simulation in high cold alpine areas [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University ,2010: 38-50. (in Chinese))
- [14] 陶辉,毛炜峰,黄金龙,等. 塔里木河流域干湿变化与大气环流关系[J]. 水科学进展,2014,25(1): 45-52. (TAO Hui ,MAO Weiyi ,HUANG Jinlong , et al. Drought and wetness variability in the Tarim River basin and possible associations with large scale circulation [J]. Advances in Water Science ,2014 ,25(1): 45-52. (in Chinese))
- [15] 宁理科. 地形地貌对天山山区降水的影响研究[D]. 石河子: 石河子大学,2013: 33-42. (NING Like. Study on the influence of topography and geomorphology on precipitation over Tianshan Mountains , Central Asia [D]. Shihezi: Shihezi University ,2013: 33-42. (in Chinese))
- [16] 杨昕,汤国安,王春,等. 基于 DEM 的山区气温地形修正模型: 以陕西省耀县为例[J]. 地理科学,2007,27(4): 525-530. (YANG Xin ,TANG Guoan ,WANG Chun , et al. Terrain-revised ground surface temperature model of mountain area based on DEM: A case study in Yaodian county of Shaanxi province [J]. Scientia Geographica Sinica ,2007 ,27(4): 525-530. (in Chinese))

Spatial distribution of rainfall simulation and the cause analysis in China's Tianshan Mountains area*

ZHANG Zhengyong¹, HE Xinlin¹, LIU Lin¹, LI Zhongqin², WANG Puyu²

(1. Shihezi University, Shihezi 832000, China; 2. State Key Laboratory of Cryosphere Sciences, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China)

Abstract: To study the rainfall spatial distribution laws as well as the formation mechanism in China's Tianshan Mountains area, this thesis built the mountain area rainfall estimation model and analyzed the rainfall causes with the partial least squares (PLS) and GIS technology, based on the DEM in the research areas as well as the data information from the meteorological stations. The result shows that the rainfall in the Tianshan Mountain area is showing an obvious longitudinal and latitudinal zonality, with more rainfall in the west section than that in the east, and more in the north slope (windward slope) than that in the south slope (leeward slope). We can find a linear increase of the rainfall in the research areas with an altitude of 4 000 m below, and then a rapid decrease, with the second maximum belt at around 5 500 m. The rainfall and the slope are positively associated when the slope is less than 50°. When the topography lifts, the rainfall will increase with the drops of temperature and the rise of humidity, which is the requirement for the rainfall formation in the mountain areas. Generally, the method of PLS can effectively solve the multiple correlation issues between the rainfall and various factors, the regression effect of the model being obvious. This model has certain adaptability for the mountain area rainfall simulation.

Key words: precipitation distribution; topographic factor; geographical factor; partial least squares; Tianshan Mountains

征 稿 启 事

《水科学进展》是以水为论述主题的学术期刊，主要反映国内外在暴雨、洪水、干旱、水资源、水环境等领域中科学技术的最新成果、重要进展，当代水平和发展趋势，报道关于水圈研究的新事实、新概念、新理论和新方法，交流新的科研成果、技术经验和科技动态；她涉及与水有关的所有学科，包括水文科学、大气科学、海洋科学、地质科学、地理科学、环境科学、水利科学和水力学、冰川学、水生态学以及法学、经济学和管理科学中与水有关的内容。

本刊热诚欢迎广大水科学工作者踊跃投稿，尤其欢迎以下几方面的稿件：

- (1) 题材较重大，能为国家对与水有关的重大问题的决策提供科学依据的稿件；
- (2) 反映水科学各分支学科重要研究成果尤其是前沿课题的稿件；
- (3) 探讨水圈与地球其他圈层相互关系及水与社会发展相互关系等宏观科学问题的稿件；
- (4) 报道对推动水科学发展有重要意义的新事实、新概念及新途径的稿件；
- (5) 运用多学科的理论与方法探讨水科学基础理论（尤其是跨学科的生长点）与实际问题的稿件；
- (6) 介绍有推广价值，思路新颖的技术方法和经验的稿件。

《水科学进展》编辑部

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41461086).