杨莲梅,杨青,杨柳. 2014. 天山山区大气水分循环特征 [J]. 气候与环境研究, 19 (1): 107–116, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12171. Yang Lianmei, Yang Qing, Yang Liu. 2014. Characteristics of the atmospheric moisture cycle over the Tian Shan mountains [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (1): 107–116.

天山山区大气水分循环特征

杨莲梅^{1,2} 杨青² 杨柳²

1 新疆维吾尔自治区气象台,乌鲁木齐 830002 2 中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究所,乌鲁木齐 830002

摘 要 将自然正交分解(EOF)和水平空间分辨率30"的地理信息数字高程(DEM)相结合,利用1961~2010年 天山山区及其周边79个气象站月降水量应用梯度距离平方反比法计算面雨量,应用2000~2010年NCEP/NCAR逐 日4次再分析1°(纬度)×1°(经度)资料计算水汽输送,研究了天山山区面雨量时空分布、水汽输送和外部水 汽的降水转化率特征,以及降水转化率异常的初步成因。结果表明:1)天山西部和中部降水量平均在450mm以 上,东天山和天山西南端为150mm左右。春季、夏季、秋季、冬季的面雨量分别为291.4×10⁸m³、625.9×10⁸m³、 218.1×10⁸m³和73.6×10⁸m³,降水量分别为108.2mm、232.4mm、81.0mm和27.4mm,年降水量为449.0mm。 2)月水汽输送量呈正态单峰型分布,7月最大、1月最小,夏季水汽输送量为全年的41.3%,冬季为11.9%,春季、 秋季分别为24.5%和22.3%。3)春季、夏季、秋季、冬季和年外部水汽的降水转化率分别为10.3%、12.6%、8.5%、 5.4%和9.2%,降水转化率的大小与伊朗副热带高压、贝加尔湖高压脊和西亚副热带西风急流的位置和强度配置有 关。

关键词 天山山区 水汽输送 面雨量 外部水汽的降水转化率
 文章编号 1006-9585 (2014) 01-0107-10
 中图分类号 P434.5
 文献标识码 A doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.12171

Characteristics of the Atmospheric Moisture Cycle over the Tian Shan Mountains

YANG Lianmei^{1, 2}, YANG Qing², and YANG Liu²

Meteorology Observation of Xinjiang Uygur Autonomous Region, Ürümqi 830002
 Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Ürümqi 830002

Abstract The temporal and spatial distribution of the Tian Shan mountains (TM) area precipitation, water vapor transport, the precipitation conversion rate from outer water vapor, the atmospheric moisture cycle and possible causes for the precipitation conversion rate anomaly over the TM was investigated by using monthly precipitation data from 79 observation stations in and around the TM and the NCEP/NCAR reanalysis daily dataset with 1°(latitude)×1°(longitude) horizontal resolution during 2000–2010. Results from the analysis show that: 1) The average precipitation is above 450 mm in the western and middle areas of the TM, but only about 150 mm in the eastern and southwesterly areas of TM. The total area precipitation in the spring, summer, autumn, and winter is 291.4, 625.9, 218.1, and 73.6×10^8 m³, respectively, which, when converted to mm precipitation, is 108.2, 232.4, 81.0, and 27.4 mm. Annual precipitation is 449.0 mm. 2) The monthly water vapor transport shows a single-peak normal distribution, with a July maximum and a January minimum. Water vapor transport for spring, summer, autumn, and winter is 24.5%, 41.3%, 22.3%, and 11.9%, respectively. 3) The precipitation conversion rate for spring, summer, autumn, winter, and for one complete year is 10.3%,

收稿日期 2012-10-18 收到, 2013-05-15 收到修定稿

资助项目 国家科技支撑项目 2012BAC23B01,国家重点基础研究发展计划 2010CB951001,国家自然科学基金 41075049

作者简介 杨莲梅,女,1969年出生,博士,研究员,主要从事中高纬大气动力学研究。E-mail: yanglm@idm.cn

12.6%, 8.5%, 5.4%, and 9.2%, respectively. The precipitation conversion rate is strongly related to the position and strength of the Iran high, Lake Baikal ridge, and the West Asia subtropical westerly jet stream, but is unrelated to water vapor input.

Keywords Tian Shan Mountains, Water vapor transport, Area precipitation, Precipitation conversion rate from outer water vapor

1 引言

天山山脉是亚洲内陆中部东西向的一条大山 脉,新疆境内长约1700 km,宽约250~300 km,山 脊平均海拔4000 m 左右,是世界干旱区域的多雨 山地之一,降水量西部多东部少、北坡多南坡少,随 海拔和地形差异天山山区年降水量为300~900 mm,新疆70%的河流源于天山山区,其径流量占 全新疆总径流量的54%(邓铭江等,2005),源于 天山的河流为天山南北平原经济发展的主要水资 源,因此有"新疆之水天山来"之说,因此,研究 天山山区大气水分循环特征,对于新疆地区水资源 的合理开发利用以及社会经济的可持续发展均有 着十分重要的意义。

大气中的水汽输送和降水不仅与大气环流有 着密切的内在联系,而且作为能量和水分循环过程 的重要一环,对区域水分平衡起着重要作用,对其 正确估计能对大气环流的形成和演变有更深入的 了解,从而有助于进一步了解天气和气候变化过程 以及水文循环过程。此问题多年来备受国外气象学 家的广泛关注,国际上开展了多次针对水汽的联合 试验,美国能源部支持的最大全球变化项目——大 气辐射测量(Atmosphere Radiation Measure)项目 中, 1996~2000 年先后开展了 5 次加强观测试验 (Revercomb et al., 2003); 全球气候研究计划(World Climate Research Project)中的核心项目全球能量与 水分循环试验 (Global Energy Water Cycle Experment)专门设立了全球水汽项目(Global Vapor Project) (Chahine, 1997), 关键的科学问题 之一是水汽循环在不同地区是如何变化的,控制 这些变化的局地和更广尺度的因子是什么? 水汽 输送和收支是水文循环要素分析中的一个重要环 节和分量,水文、气象工作者对此进行了大量研 究。

降水是新疆所有形式的地表水、地下水和高山 积雪冰川等水体的根本补给源,是水分循环过程中

的一个重要分量。降水不仅决定着新疆水资源总 量,而且它的空间分布和随时间的变化直接影响着 新疆的水分布状况、河川径流形成等,直接关系到 新疆的生态环境与经济社会的发展。面雨量是一个 区域的平均降水量,它代表该区域的实际降水 量,比传统的单点降水量能更加客观地描述该区域 的降水量,是洪水预报中非常重要的指标,也是水 分循环研究的一个重要的基础数据(徐晶等,2001; 毕宝贵等, 2003)。尽管在全球和大陆尺度上的水 分循环过程研究已经取得明显进展,揭示出了一些 大陆或部分区域尺度水分循环的基本事实(徐淑 英, 1958; 谢义炳和戴武杰, 1959; 翟盘茂和周琴 芳,1997;丁一汇和胡国权,2003;丁一汇,2005; 苗秋菊等,2005;周玉淑等,2005;龚晓雪和赵 思雄, 2007; 李香淑等, 2008; 江志红等, 2011), 然而,对于新疆这样的大陆性干旱气候背景下天山 山区水汽的输送、收支及面雨量的定性及定量分析 还比较少。以往研究针对全新疆范围开展了一些初 步研究(史玉光和孙照渤, 2008; 史玉光等, 2008; 刘蕊和杨青, 2010), 而天山山区将新疆分为北疆和 南疆,构成了北疆、天山山区和南疆3大气候区, 天山山区大气水分循环对新疆水资源而言具有举 足轻重的作用。本文用分辨率较高的资料研究天山 山区大气水分循环特征,为新疆水资源利用和可持 续发展提供科学依据。

2 资料和方法

2.1 面雨量计算方法

在天山附近选取海拔高度≥1500 m 的区域确 定为天山山区,考虑到伊犁河谷地处天山之中,气 候特征相近,虽然有部分地区海拔高度<1500 m, 但仍将其划入天山山区,天山山区面积为 27.08× 10⁴ km²。面雨量计算采用天山山区及其周边 79 气 象站和水文站 1961~2010 年月降水量资料(站点 分布如图 1),以及全球数字高程模型(global digital elevation model, GTOPO30)的地理信息系统数据 数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM),其 水平空间分辨率为 30"(近似 1 km×1 km)的网格, 计算方案利用自然正交分解(Empirical Orthogonal Function)和 DEM 相结合,选用适合新疆地理、气 候和站点分布的梯度距离平方反比法(Gradient plus Inverse Distance Squared, GIDS),具体方法如 下:

(1) 插值计算方法

根据天山区域降水的变化规律和特点,首先运用 EOF 对天山区域各站历年降水量矩阵 **P**(50×79)进行分解,将其分解为 n 个空间函数, Z 和时间函数 T 乘积的线性组合:

$$\boldsymbol{P}_{ij} = \sum_{k=1}^{n} T_{ki} Z_{kj} , i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n, (1)$$

其中, *m* 为时间序列(50年), *n* 为测站数(79站)。 一般情况下, 原始场的主要信息仅用前几个特征向 量和时间系数就能得到充分的反映。由此可知, 每 个特征向量都有*n*个分量组成, 与*n*个站点相对应, 即每个分量对应一组经纬度和高度值。

其次,分别建立 79 站气象站前 N 个降水量特征向量与位置及海拔高度的多元回归方程:

$$Z_{k} = b_{k} + a_{k0}x_{0} + a_{k1}x_{1} + a_{k2}x_{2}, \quad k=1, 2, \quad \dots, N,$$
(2)

其中, Z_k 即指由公式(1) EOF 得出的气象站降 水量场的第 k 个特征向量, x₀、x₁、x₂ 分别为经 度、纬度以及海拔高度, a_{k0}、a_{k1}、a_{k2} 是气象站 降水量第 k 个特征向量的各分量与经度、纬度及海 拔高度的回归系数,由公式(2) 求出,选定的参 考点为(32°N, 72°E),以求出气象站点和各计算 点的坐标值。b_k为第 k 个特征向量的回归方程常数 项。

再以 DEM 数据为基础,采用 GIDS 作为差值 公式(Hewitson and Crane, 2005),计算区域内每 个网格点 *l* 的第 *k* 个特征向量值



其中, X_l 、 X_j 为待估点 l 与气象站点 j 的 X 轴坐标 值, Y_l 、 Y_j 为待估点 l 与气象站点 j 的 Y 轴坐标值, E_l 、 E_j 为待估点 l 与气象站点 j 的海拔高度; d_j 为待 估点 l 与第 j 个气象站点的大圆距离;最后,再利 用公式(3)乘以相应的时间系数 Tkl 并求和:

$$\boldsymbol{P}_{il} = \sum_{k=1}^{H} T_{ki} Z_{kl} , \ l=1, \ 2, \ \cdots, \ s,$$
 (4)

其中, *s* 为计算区域内网格点总数。回归方程的个数 *H* 远小于 *m*。

由此得到第 *i* 年整个区域网格点*l*的年降水量 值 P_{il} (单位: mm),再乘以相应的面积 B_l (单位: m^2),得出该格点的面雨量(单位: m^3),然后再对 所有格点的面雨量求和:

$$P_i = \sum_{l=1}^{s} \left(P_{il} \cdot B_l \right), \tag{5}$$

得出第*i*年天山区域的面雨量*P_i*,依次指定年份,重 复公式(4)、(5)的计算,即求出整个区域面雨量 序列。

本计算方案结合地理信息系统数据考虑了海 拔高度的影响,结合 EOF 以最少的插值方程给出 了要素区域平均的序列值。

(2) EOF 及回归方程

对天山山区 79 站和 1961~2010 年的年降水量 场进行了 EOF 分解,结果表明:第一特征向量占 总方差的 97.03%,说明此种分布类型代表了该地 区降水场变化的主要特征,第二特征向量占总方差 的 0.57%,收敛速度很快,浓缩了原始场的主要空 间分布信息(表1)。由此可以看出,前 2 个特征向 量已完全能够代表原始场时空分布的主要特征。因 此,分别求出前两个特征向量与经度、纬度及海拔 高度因子的回归方程,其变量系数与公式(1)对 应,r为复相关系数。对回归效果的计算分析表明, 在显著性 *a*=0.05 的情况下,均通过 *F* 检验。考虑 到建立模型的需要,并使气候要素在边界过度更连 续、合理,各区域选用的站点也包括了在区域边界 外附近的部分站点,也就是说各区域建模使用的站 点在边界附近有一定的重复。

表1 特征向量与地理因子的回归方程系数

Table 1Regression equation coefficients between thecharacteristic vectors and geography factors

特征向量	方差贡献	b_k	$a_{k0}(imes 10^{-5})$	$a_{kl}(\times 10^{-5})$	$a_{k2}(imes 10^{-4})$	r
第1特征向量	97.03%	-0.1054	-0.0056	0.0336	6.5378	0.76
第2特征向量	0.57%	0.2976	-0.0133	-0.0273	0.6252	0.76

(3) 拟合误差分析

为了检验拟合误差,对建模所用 79 个站点的年

降水量数据的计算值与实测值进行对比(见图2), 结果表明,站点的计算值与实测值呈现好的线性 关系,两者的相关系数为0.94,计算值与实测值相 对误差为 6.8%, 检验表明插值结果达到 0.001 显著 性, 表明本文计算方法科学可行, 所得结果客观、 可靠。





from surface to 300 hPa in summer



图 2 天山山区 79 个站点计算年降水量与实测值比较

Fig. 2 Comparison between calculated and observed annual precipitation at 79 stations in Tian Shan mountions

2.2 水汽输送计算

利用 2000~2010 年 NCEP/NCAR 逐日 4 次再 分析 1°(纬度)×1°(经度)资料,1000~100 hPa 共 21 层,应用地面气压、比湿、风场资料,用一 日 4 次的资料得到各层水汽通量,进行时间积分得 到日水汽通量,然后用日值进行时间积分得到 月、季和年水汽通量值,因此其中包含了瞬变扰动 的贡献。对流层水汽输入、输出和收支等取地面至 100 hPa 进行积分计算。计算水汽输入和输出区域 大体为包含天山山区的一个矩形区域(图1)。东、 南、西、北 4 个边界的水汽输送量为其对应的各小 边界各层水汽输送量之和,当各小边界各层的输送 方向不一致时,取相互抵消后的结果为该边界净水 汽输送量。每个小边界只要为输入就计入总输入 量,只要为输出就计入总输出,因此,总输入、总 输出量要大于 4 个边界的净输入、净输出之和。

水汽输送的计算方法如下:单位边长长度大气的水汽输送通量矢量 *Q*的计算公式为

$$\boldsymbol{Q} = -\frac{1}{g} \int_{p_{\rm s}}^{p_{\rm t}} \boldsymbol{V} q \mathrm{d} p$$

其中, g 为重力加速度(单位: $m s^{-2}$), p_s 为所取气 柱底气压,因此剔除了地形的影响, p_t 为气柱顶气 压(100 hPa)。V 为该单位气柱内各层大气的风速 矢量(单位: $m s^{-1}$); q 为各层大气的比湿(单位: $g kg^{-1}$)。先由一日 4 次的资料得到各层各格点水汽 通量,进行边长和垂直方向整层积分,然后进行一 日 4 次时间积分得到日水汽输送量(单位: m^3)。 刘蕊和杨青(2010)对 NCEP/NCAR 2.5°(纬度) ×2.5°(经度)与1°(纬度)×1°(经度)再分析 资料在新疆的适用性进行了讨论,指出1°(纬度) ×1°(经度)再分析资料分析新疆水汽通量更加接 近探空,且能较好地反映新疆降水过程的水汽输 送、辐合和演变特征(杨莲梅等,2012)。图1b为 夏季气候平均地面至300 hPa积分水汽通量矢量, 可见新疆位于西风带,水汽输送整层表现为自西向 东输送。

3 面雨量时空分布特征

图 3 为天山山区年平均降水量空间分布,天山 山区降水量为 300~800 mm,天山西部和中部降水 量大多在 450 mm 以上,最大降水中心位于天山中 部的北坡一带及伊犁河谷两侧,最小区在东天山 和天山西南端的南坡附近,降水量一般 150 mm 左 右,这种降水分布特征与已有研究结果西部多东 部少、北坡多南坡少是一致的(张家宝和邓子风, 1987),但比传统的气象站点降水量能更加客观地 描述该区域的降水量。四季空间分布与年空间分布 基本一致。

表 2 为天山山区 2000~2010 年平均各季节降 水量和面雨量,天山山区年平均降水量为 449.0 mm,夏季(6~8月)和春季(3~5月)降水量分 别为 232.4 mm 和 108.2 mm,秋季(9~11月)为 81.0 mm,冬季(12月至次年2月)仅为 27.4 mm。 春、夏、秋、冬季面雨量分别为 291.4 m³、625.9 m³、 218.1 m³和 73.6×10⁸ m³。夏季面雨量最大约占全



图 3 基于 DEM 空间分辨率为 30"的天山山区年平均降水量分布

Fig. 3 Average annual precipitation distribution in Tian Shan mountions based on Digital Elevation Model (DEM) 30" resolution

年的 51.8%,可以说夏季是天山山区的雨季,天山 平均海拔为 4000 m 左右,因此夏季降水常为雪, 是天山积雪和冰川的重要补充,其次为春季和秋 季,冬季面雨量最小仅占全年的 6.1%。年平均面雨 量为 1209×10⁸ m³,约占全疆总面雨量的 44.4%。 从 1961~2005 年面雨量的变差系数(史玉光等, 2008)来看,天山山区为 0.16,北疆为 0.19,南疆 为 0.32,表明天山山区降水年际变化最稳定,北疆 次之,南疆最不稳定,天山山区降水对新疆水资源 的调节起到了关键作用。

表 2 天山山区 2000~2010 年平均各季节降水量、面雨量 及其比例

Table 2Precipitation, area precipitation and its percentageover Tian Shan mountains in four seasons from 2000 to2010

	降水量/mm	面雨量/10 ⁸ m ³	所占比例
春季	108.2	291.4	24.1%
夏季	232.4	625.9	51.8%
秋季	81.0	218.1	18.0%
冬季	27.4	73.6	6.1%
年总量	449.0	1209.0	100%

4 水汽输送和收支特征

天山山区月平均水汽输入、输出量(图4)呈 正态单峰型分布,7 月最大输入和输出量分别达 1764 m³和1734×10⁸ m³,其次为6月和8月,向 冬季依次减少,1月水汽输送量最小,输入和输出 量分别达417.5 m³和414.6×10⁸ m³,约为7月的 1/4,可见天山山区水汽输送量月际变化较大。

表3为年和四季4个边界对流层水汽净输送和 总输入、总输出水汽量,可见四季均表现为西边界 和北边界水汽输入,东边界和南边界水汽输出,东、

西方向输入、输出相当,南、北方向输入、输出相 当,东、西方向输送量约为南、北方向输送量的2~ 3 倍,这是由于天山山区处于西北气流的控制所造 成的。夏季水汽输入量和输出量最大,均占年输送 量的 41.3%, 水汽净收支为 32.2×10⁸ m³, 约为年 水汽净收支量的 25.7%, 夏季蒸发是一年中最强 的,因此水汽净收支小于春季。水汽输送的季节变 化与北半球大气环流背景季节变化密切联系, 夏季 亚洲副热带西风急流位于天山山区上空,水汽输送 量是一年中最大的,且由于副热带锋区上多短波活 动造成夏季降水量最大,同时还受高纬和低纬环流 系统影响,冷暖空气在中纬交汇,水汽输送在对流 层高、中、低纬输送路径差异很大,比较复杂,各 小边界在不同层次之间相互抵消量较大,因此,夏 季各边界水汽净输送之和远小于总输入、总输出 量。

春季和秋季水汽输送量相当,春季蒙古高压减 弱,新地岛到新疆的西北气流加强,副热带锋区开 始活跃,西风增强,则水汽输送较冬季增强,水汽 输送量仅次于夏季,约占年输送量的24.5%,水汽 净收支为81.4×10⁸ m³,春季蒸发远比夏季小,因 此水汽净收支却比夏季大。秋季新疆脊和中西伯利 亚脊稳定,高压脊控制下下沉气流使得低层辐散 强,同时副热带西风急流10月发生突变南落,中 纬西风减弱,因此东、西边界水汽输送也大大减弱, 水汽输送量约占年输送量的22.3%,而温度仍较 高、蒸发仍然较大,该季节水汽净收支最小约为 1.2×10⁸ m³。

冬季水汽输送量最小约占年输送量的11.9%。 冬季北半球中高纬为三槽三脊型,东欧至乌拉尔山 为平均槽,中亚地区为平均脊控制,同时极锋锋区 偏北(50°N以北),副热带锋区偏南(35°N以南),





新疆上空西风减弱,地面处于蒙古高压控制下,气候干冷,则对流层各层东西边界水汽输送最少,各边界水汽输送量是一年中最少的,虽然天气寒冷,但冰川和积雪存在一定蒸腾作用,水汽净收支约为10.3×10⁸ m³。

表 3 2000~2010 年天山山区上空四季、年平均水汽输送和 收支

Table 3The average vapor transportion and budget for fourseasons over Tian Shan mountains from 2000 to 2010 10^8 m^3

	西边界	东边界	南边界	北边界	总输	总输	净收
	净输送	净输送	净输送	净输送	入量	出量	支
春季	1211.2	-1096.0	-853.9	820.1	2833.2	2751.8	81.4
夏季	1784.7	-1663.9	-822.0	733.4	4757.9	4725.7	32.2
秋季	1140.7	-1123.3	-398.3	382.1	2570.9	2569.7	1.2
冬季	660.6	-618.0	-234.7	202.2	1370.9	1360.6	10.3
年	4797.2	-4501.2	-2308.9	2137.8	11532.9	11407.8	125.1
क्षेत्र व	古山谷)	4 店头	捡山				

注: 正值为输入,负值为输出。

5 降水转化率特征及其异常成因

5.1 降水转化率特征

许多研究从气候学角度用降水量与可降水量 比值定义降水转化率(李霞和张广兴,2003),其 可以大致衡量一个地区一段时间水汽向降水转化 效率的高低。刘国纬(1997)则用降水占水汽输送 总量的比例衡量某个地区一段时间内外部水汽向 降水转化效率的高低(以下简称降水转化率),本 文用此定义表示流入天山山区上空的水汽有多少 转化为降水落到地面。

113

由表4可见,春季、夏季、秋季和冬季水汽输 入量变化率分别为-17.7%~11.8%、-13.4%~ 8.8%、-21.8%~13.9%和-35.0%~34.8%, 夏季 水汽输入量变化率最小,冬季最大,春、秋季相当。 对面雨量而言,春季、夏季、秋季和冬季变化率为 $-25.4\% \sim 31.2\%$, $-12.7\% \sim 15.0\%$, $-30.2\% \sim$ 44.0%和-39.1%~61.8%,夏季变化率最小且与水 汽输入量相当,冬季最大且比水汽输入量变化剧 烈,春、秋季介于冬、夏季之间,但比水汽输入量 变化大。外部水汽的降水转化率夏季最高为 10.8%~16.0%,平均为12.6%;冬季最低3.3%~ 7.4%, 平均为5.4%; 春季为7.8%~12.8%, 平均 为 10.3%; 秋季为 6.3%~12.1%, 平均为 8.5%, 年平均为9.2%,这与利用天山山区15个气象站的 降水量与可降水量比值定义降水转化率(李霞和张 广兴,2003)大致相当,刘国纬(1997)利用降水 量占水汽输送总量的比例定义中国各区域降水转 化率见表 5, 可见天山山区降水转化率小于中国其

表 4 2000~2010年四季天山山区水汽输入量、面雨量和外部水汽的降水转化率

Table 4Water vapor input, area precipitation, and precipitation conversion efficiency from exterior water vapor for fourseasons over Tian Shan mountains from 2000 to 2010

	春季		夏季			秋季			 冬季			
	水汽输入量/	面雨量/	降水转	水汽输入	面雨量/	降水转	水汽输入量	面雨量/	降水转	水汽输入量/	面雨量/	降水转
年份	10^8 m^3	$10^{8} m^{3}$	化率	量 $/10^8 \text{ m}^3$	10^8 m^3	化率	$/10^{8} \text{ m}^{3}$	10^{8} m^{3}	化率	10^{8} m^{3}	10^{8} m^{3}	化率
2000	2607.9	217.7	8.3%	4815.6	676.4	14.0%	2716.0	224.5	8.3%	1847.8	61.1	3.3%
2001	2330.8	205.8	8.8%	4876.1	573.6	11.8%	2930.2	267.1	9.1%	1345.5	65.6	4.9%
2002	3068.9	382.4	12.5%	4786.4	719.8	15.0%	2630.1	184.4	7.0%	1547.4	85.5	5.5%
2003	2666.7	312.6	11.7%	4936.5	719.4	14.6%	2750.4	252.4	9.2%	1435.4	63.5	4.4%
2004	3112.6	282.3	9.1%	4292.7	561.0	13.1%	2653.3	184.3	6.9%	1482.7	81.7	5.5%
2005	2871.0	299.3	10.4%	4438.3	675.6	15.2%	2413.1	152.3	6.3%	1241.9	92.5	7.4%
2006	2868.4	283.4	9.9%	4642.4	530.4	11.4%	2430.1	170.2	7.0%	1003.3	44.8	4.5%
2007	3215.1	337.5	10.5%	4929.9	790.9	16.0%	2010.4	177.0	8.8%	891.4	58.8	6.6%
2008	2736.6	213.6	7.8%	4670.1	502.4	10.8%	2623.4	198.2	7.6%	1380.2	51.9	3.8%
2009	2519.6	323.0	12.8%	4562.4	516.8	11.3%	2523.4	274.4	10.9%	1761.3	119.1	6.8%
2010	3168.5	347.5	11.0%	5396.7	618.8	11.5%	2599.5	314.1	12.1%	1142.5	85.0	7.4%
平均	2833.2	291.4	10.3%	4957.9	625.9	12.6%	2570.9	218.1	8.5%	1370.9	73.6	5.4%

表 5 我国各地区年水汽输送总量的降水量转化率 (刘国纬, 1997)

 Table 5
 Mean precipitation conversion rate of precipitable water to real rainfall in China (Liu, 1997)

	青藏高原	华南	长江	华北	西南	东北	西北	天山山区*	天山山区中、西部*
降水转化率	16.0%	13.9%	28.2%	19.6%	20.4%	22.5%	14.41%	9.2%	11.5%

*为本文所得结果。

他区域,由图2可知天山山区中、西部降水量远大 于东部,中、西部降水量平均为东部地区的3倍左 右,如果只考虑天山西部和中部区域(即90°E以 西天山区域)范围,春季、夏季、秋季和冬季的降 水转化率分别为12.7%、16.4%、10.4%和6.6%,年 平均为11.5%。可见虽然天山山区位于欧亚大陆腹 地的干旱区,其降水是新疆区域的主要水资源,但 外部水汽的降水转化率还是比较小的。

5.2 降水转化率异常成因分析

由于夏季为天山山区的雨季,重点分析夏季降水转化率高年和低年的环流特征,2007年为降水转化率最高年,2008年为最低年。图5a为夏季500hPa位势高度气候平均(1981~2010年)场,欧亚范围伊朗高原副热带高压(伊朗副高)强盛并部分向东



图 5 (a) 1981~2010 年夏季 500 hPa 位势高度气候平均场和(b) 2007 年、(c) 2008 年夏季 500 hPa 位势高度纬向偏差(单位: dagpm) Fig. 5 (a) Climatology geopotential height at 500 hPa in summer during 1981–2010 and latitude difference of geopotential height at 500 hPa in summer of (b) 2007 and (c) 2008 (units: dagpm)

伸展控制新疆地区,新疆干旱、高温、少雨,贝加 尔湖东北部为高压脊,西太平洋地区为强大副热带 高压 (西太副高),伊朗副高和西太副高之间的印 度为平均槽。2007 年夏季距平场(图 5b)表明伊 朗副高东部减弱、西部增强,贝加尔湖东北部高压 脊西退约 20 个经度到贝加尔湖地区,在欧亚中高 纬形成了黑海—中亚至新疆—贝加尔湖的正—负 一正的位势高度异常分布,中亚到新疆处于负位势 高度异常控制,表明该区域瞬变扰动活跃,这种两 高一低的环流场利于新疆产生降水(张家宝和邓子 风, 1987)。2008年夏季距平(图 5c), 伊朗副高 东部增强并东扩控制中亚至新疆地区, 使得新疆地 区干旱少雨, 贝加尔湖东北部高压脊明显增强, 中 国东部地区为负位势高度异常,在欧亚中高纬形成 了中亚至新疆—中国东部—贝加尔湖东北部的正 一负一正的位势高度异常分布,比 2007 年东移了 半个波长,可见影响天山山区夏季降水异常的控制 环流系统为伊朗副高和贝加尔湖高压脊,它们位置 和强度的异常变化导致天山山区降水的异常。

夏季亚洲副热带西风急流位于 42°N 附近,位 于天山山区上空,其南北位置异常与新疆夏季降水 变化密切联系(杨莲梅和张庆云,2007,2008), 西风急流位置偏北(南)新疆降水偏少(多)。分 析 2007 年和 2008 年夏季 200 hPa 纬向风异常(图 略)表明,2007 年夏季西风急流中心经度比气候平 均偏西 5°E,急流西部(西亚急流)纬度偏南、强 度增强,天山山区恰好处于西亚急流出口处左前 方,高空急流出口处左前方存在强辐散,形成一个 次级环流,造成中低层出现上升运动,从而利于天 山山区产生降水。2008 年西亚急流位置偏北、强度 增强,则天山山区处于急流出口区的右前方,该区 域存在强辐合,形成次级环流造成中低层出现下沉 运动,不利于天山山区产生降水。

2007年与2008年夏季500 hPa和700 hPa水汽 通量矢量之差(图略)表明两年没有显著差异,2007 年与2008年夏季天山山区的水汽输入量分别为 4929.9×10⁸m³和4670.1×10⁸m³,11 a平均为 4957.9×10⁸m³,2007年水汽输入与2008年和气候 平均差异很小,但降水却最多,表明天山山区上空 水汽输送量多少与降水异常没有必然联系,关键是 造成降水的环流系统异常所致,这与新疆区域季节 降水异常由环流和水汽输送量异常共同作用所致 的结果有所不同(杨莲梅等,2010a,2010b)。

6 小结和讨论

(1) 天山山区降水量和面雨量分布呈西部多东 部少、北坡多南坡少,夏季和春季降水量分别为 232.4 mm 和 108.2 mm,秋季为 81.0 mm,冬季仅为 27.4 mm,年平均降水量为 449.0 mm,天山西部和 中部降水量大多在 450 mm 以上,最大降水中心位 于天山中部的北坡一带及伊犁河谷两侧,最小区在 东天山和天山西南端的南坡附近,降水量一般在 150 mm 左右。春、夏、秋、冬季面雨量分别为 291.4 m³、625.9 m³、218.1 m³和 73.6×10⁸ m³。

(2) 天山山区月平均水汽输送量呈正态单峰型 分布,7月最大、1月最小约为7月的1/4。四季均 表现为西边界和北边界水汽输入,东边界和南边界 水汽输出,东、西方向输送量约为南、北方向输送 量的2~3倍,夏季水汽输送量最大约为全年的 41.3%,冬季最小约为11.9%,春、秋季分别为 24.5%和22.3%。

(3) 天山山区春、夏、秋、冬和年的降水转化 率分别为10.3%、12.6%、8.5%、5.4%和9.2%,远 比我国华南、长江中下游、华北地区夏季降水转化 率小。降水转化率的大小与控制环流系统伊朗副 高、贝加尔湖高压脊和西亚副热带西风急流的位置 和强度变化有关。

参考文献(References)

- 毕宝贵, 徐晶, 林建. 2003. 面雨量计算方法及其在海河流域的应用 [J]. 气象, 29 (8): 39–42. Bi Baogui, Xu Jing, Lin Jian. 2003. Method of area rainfall calculation and its application to Haihe valley [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 29 (8): 39–42.
- Chahine M T. 1997. The future direction of the GEWEX global water vapor project [J]. GEWEX News, 7 (4): 1–6.
- 邓铭江, 王世江, 董新光, 等. 2005. 新疆水资源及可持续利用 [M]. 北 京:中国水利水电出版社, 150–167. Deng Mingjiang, Wang Shijiang, Dong Xinguang, et al. 2005. Water Resources and Sustainable Utilization in Xinjiang Uygur Autonomous Region [M] (in Chinese). Beijing: China Water Power Press, 150–167.
- 丁一汇. 2005. 高等天气学 [M]. 北京: 气象出版社, 138-149. Ding Yihui. 2005. Advanced Synoptic Meteorology [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 138-149.
- 丁一汇, 胡国权. 2003. 1998 年中国大洪水时期的水汽收支研究 [J]. 气 象学报, 61 (2): 129–145. Ding Yihui, Hu Guoquan. 2003. A study on water vapor budget over China during the 1998 severe flood periods [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61 (2): 129–145.

- 龚晓雪,赵思雄. 2007. 麦莎台风登陆后能量过程与水汽供应的诊断研究 [J]. 气候与环境研究, 12 (3): 437–452. Gong Xiaoxue, Zhao Sixiong. 2007. Diagnosis on energy budget and moisture supply of Matsa after landfall [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (3): 437–452.
- Hewitson B C, Crane R G. 2005. Gridded area-averaged daily precipitation via conditional interpolation [J]. J. Climate, 18 (1): 41–57.
- 江志红,梁卓然,刘征宇,等. 2011. 2007 年淮河流域强降水过程的水汽 输送特征分析 [J]. 大气科学, 35 (2): 361–372. Jiang Zhihong, Liang Zhuoran, Liu Zhengyu, et al. 2011. A diagnostic study of water vapor transport and budget during heavy precipitation over the Huaihe River basin in 2007 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (2): 361–372.
- 李霞, 张广兴. 2003. 天山可降水量和降水转化率的研究 [J]. 中国沙漠, 23 (5): 509–513. Li Xia, Zhang Guangxing. 2003. Research on precipitable water and precipitation conversion efficiency around Tian Shan mountain area [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 23 (5): 509–513.
- 李香淑, 郭学良, 付丹红. 2008. 南海季风爆发期间大气环流结构与对 流热量、水汽输送特征 [J]. 气候与环境研究, 13 (1): 93–101. Li Xiangshu, Guo Xueliang, Fa Danhong. 2008. Atmospheric structure and characteristics of convection transport of heat and moisture during monsoon onset over South China Sea [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 13 (1): 93–101.
- 刘国纬. 1997. 水文循环的大气过程 [M]. 北京: 科学出版社, 1–245. Liu Guowei. 1997. Atmosphere Process in Hydrologic Cycle (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 1–245.
- 刘蕊,杨青. 2010. 新疆大气水汽通量及其净收支的计算和分析 [J].中国沙漠, 30 (5): 1221–1228. Liu Rui, Yang Qin. 2010. Calculation and analysis of water vapor transportation and its net income in Xinjiang [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 30 (5): 1221–1228.
- 苗秋菊, 徐祥德, 张胜军. 2005. 长江流域水汽收支与高原水汽输送分量 "转换"特征 [J]. 气象学报, 63 (1): 93–99. Miao Qiuju, Xu Xiangde, Zhang Shengjun. 2005. Whole layer water vapor budget of Yangtze River valley and moisture flux components transform in the key areas of the plateau [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 63 (1): 93–99.
- Revercomb H E, Turner D D, Tobin D C, et al. 2003. The ARM program's water vapor intensive observation periods — Overview, initial accomplishments, and future challenges [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 84: 217–236.
- 史玉光,孙照渤. 2008. 新疆水汽输送的气候特征及其变化 [J]. 高原气象, 27 (2): 82–91. Shi Yuguang, Sun Zhaobo. 2008. Climate characteristics of water vapor transportation and its variation over Xinjiang [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 27 (2): 82–91.
- 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, (3): 326–332. Shi Yuguang, Sun Zhaobo, Yang Qing. 2008. Characteristics of area precipitation in Xinjiang region with its variations [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), (3): 326–332.

- 徐晶,林建,姚学祥,等. 2001. 七大江河流域面雨量计算方法及应用 [J]. 气象, 27 (11): 3–16. Xu Jing, Lin Jian, Yao Xuexiang, et al. 2001. Calculating method of area rainfall over seven river valleys and its application [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 27 (11): 3–16.
- 徐淑英. 1958. 我国的水汽输送和水分平衡 [J]. 气象学报, 29 (1): 33-43. Xu Shuying. 1958. Water-vapour transfer and water balance over the eastern China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 29 (1): 33-43.
- 谢义炳, 戴武杰. 1959. 中国东部地区夏季水汽输送个例计算 [J]. 气象 学报, 30 (2): 173–185. Xie Yibing, Dai Wujie. 1959. Certain computational results of water vapour transport over eastern China for a selected synoptic case [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 30 (2): 173–185.
- 杨莲梅, 张庆云. 2007. 新疆北部汛期降水年际和年代际异常的环流特 征 [J]. 地球物理学报, 50 (2): 412–419. Yang Liangmei, Zhang Qinyun. 2007. Circulation characteristics of interannual and interdecadal anomalies of summer rainfall in north Xinjiang [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 50 (2): 412–419.
- 杨莲梅, 张庆云. 2008. 新疆夏季降水年际变化与亚洲副热带西风急流 [J]. 应用气象学报, 19 (2): 171–178. Yang Lianmei, Zhang Qingyun. 2008. Interannual variation of summer precipitation in Xinjiang and Asian subtropical westerly jet stream [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 19 (2): 171–178.
- 杨莲梅, 史玉光, 汤浩. 2010a. 新疆北部冬季降水异常成因分析 [J]. 应 用气象学报, 21 (4): 491–499. Yang Lianmei, Shi Yuguang, Tang Hao. 2010a. Causes of winter precipitation anomalies in northern Xinjiang [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 21 (4): 491–499.
- 杨莲梅, 史玉光, 汤浩. 2010b. 新疆春季降水异常的环流和水汽特征 [J]. 高原气象, 29 (6): 1464–1473. Yang Lianmei, Shi Yuguang, Tang Hao. 2010b. Characteristics of atmospheric circulation and water vapor for spring precipitation anomalies in Xinjiang [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 29 (6): 1464–1473.
- 杨莲梅, 张云惠, 汤浩. 2012. 2007 年 7 月新疆三次暴雨过程的水汽特征 分析 [J]. 高原气象, 31 (4): 963–973. Yang Lianmei, Zhang Yunhui, Tang Hao. 2012. Characteristics of water vapor associated with 3 heavy rainfall processes in Xinjiang in July 2007 [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 31 (4): 963–973.
- 翟盘茂,周琴芳. 1997. 中国大气水分气候变化研究 [J]. 应用气象学报, 8(3): 342–351. Zhai Panmao, Zhou Qinfang. 1997. A study of climate changes of atmospheric water vapor in China [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 8 (3): 342–351.
- 张家宝, 邓子风. 1987. 新疆降水概论 [M]. 北京: 气象出版社, 1-400. Zhang Jiabao, Deng Zifeng. 1987. A Generality of Rainfall in Xinjiang (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1-400.
- 周玉淑,高守亭,邓国. 2005. 江淮流域 2003 年强梅雨期的水汽输送特 征分析 [J]. 大气科学, 29 (2): 195–204. Zhou Yushu, Gao Shouting, Deng Guo. 2005. A diagnostic study of water vapor transport and budget during heavy precipitation over the Changjiang River and the Huaihe River basins in 2003 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (2): 195–204.