

天山山区空中水汽含量及与气候因子的关系

姚俊强^{1,2,3}, 杨 青², 胡文峰⁴, 赵 玲², 刘志辉^{3,5,6},
韩雪云^{2,7}, 赵 丽^{2,7}, 孟现勇^{1,3}

(1.新疆大学资源与环境科学学院, 新疆 乌鲁木齐 830046; 2.中国气象局乌鲁木齐沙漠气象研究,
新疆 乌鲁木齐 830002; 3.新疆大学 绿洲生态教育部重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046;
4.兰州大学资源环境学院, 干旱区水循环与水资源研究中心, 甘肃 兰州 730000; 5.新疆大学
干旱生态环境研究所, 新疆 乌鲁木齐 830046; 6.干旱半干旱可持续发展国际研究中心,
新疆 乌鲁木齐 830046; 7.新疆师范大学地理科学与旅游学院, 新疆 乌鲁木齐 830054)

摘要: 利用建立的天山山区水汽含量与地面水汽压的经验关系式, 计算天山山区及周边44站1961~2009年的水汽含量值, 分析水汽含量的时空分布及其与气候变化因子的关系。结果表明: 天山北麓的河谷平原地带是水汽含量高值区, 中天山和东天山是低值区。水汽含量在近50 a内呈增加趋势, 夏、秋季增加明显。水汽含量是影响天山山区降水的最主要的因素之一, 水汽对全球变暖和气候变化可能有负反馈作用, 而冬季NAO和AO与水汽相关性最显著。这些研究对于揭示区域水分循环过程和全球变暖背景下的区域响应有重要意义。

关 键 词: 水汽含量; 气候变化; 降水; 气温; NAO/AO; 天山山区

中图分类号: 426.1⁺5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2013)07-0859-06

大气中的水汽含量(又称大气可降水量、大气含水量)直接关系到各地的降水天气及气候, 其变化深刻影响着全球气候系统和水资源系统的结构和演变, 也影响着人类社会的发展和生产活动^[1,2]。

新疆地处亚洲中部干旱区, 水资源是影响区域社会经济发展的主要因素之一, 对新疆水资源及降水的研究较多^[3-5]。而天山山区是新疆降水最多的地区, 山区的大气降水是新疆地表水和地下水体的主要补给源。在新疆天山山区水汽含量的研究中, 一些学者利用不同的资料和方法进行计算和分析^[6-8], 但NCEP/NCAR再分析资料在山区的适用信度还没有得到验证。本文依据建构的适合于天山山区的水汽含量和地面水汽压的关系式对其进行计算, 分析空间分布和变化趋势, 初步探讨水汽含量与降水、气温、NAO(北大西洋涛动)/AO(北极涛动)等区域气候变化因子的关系。这些研究对于揭示区域水分循环过程和全球变暖背景下的区域响应有重要意义。

1 研究区概况

天山山系是亚洲中部最大的山系, 东西长约2 500 km, 山脉横贯新疆全境, 在中国境内绵延1 700 km, 占总长度的2/3以上, 面积约为57×10⁴ km², 占全疆总面积的34.5%。天山山脉是南北疆分水岭, 是突起在新疆南北荒漠地面上的绿岛—山地系统, 形成新疆“三山夹两盆”的地貌特征。山体平均海拔4 000 m, 拦截了西风带来的大量水汽, 形成干旱区中的湿岛。山区降水丰富, 现代冰川发育, 成为众多河流的发源地^[9](图1)。

2 资料与方法

大气水汽含量(也称可降水量)表示整个空气柱中的水汽全部凝结时所得到的液态水量。理论计算公式^[1]为:

$$W = -\frac{1}{g} \int_{p_0}^0 q dp \quad (1)$$

收稿日期: 2012-09-24; **修订日期:** 2013-01-11

基金项目: 国家重点基础研究发展计划973项目(2010CB951001)、国家科技支撑计划项目(2012BAC23B01)、新疆维吾尔自治区自然科学基金(200821176)共同资助。

作者简介: 姚俊强(1987—), 男, 甘肃通渭人, 博士研究生, 主要研究方向为气候变化与水资源。E-mail: yaojq1987@126.com

通讯作者: 杨 青, 男, 研究员。E-mail: yangq@idm.cn

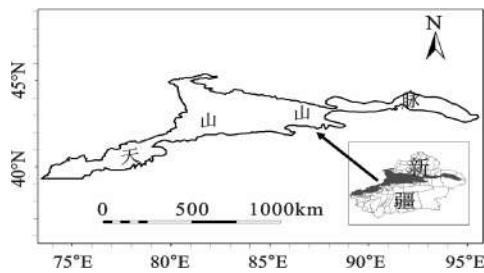


图1 研究区地理位置

Fig. 1 Location of the research area

实际工作中,一般是利用探空观测的各标准等压面上的比湿差分进行求和计算得到,即:

$$W = -\frac{1}{g} \sum_{p_0}^{p_h} q_i \cdot \Delta p_i \quad (2)$$

式中, W 为某地单位面积上整层大气的总水汽含量; q 为各层的比湿; dp 表示利用对流层各等压面上的比湿对大气压力进行垂直积分; P_0 、 P_h 分别为地面气压和大气顶气压, g 为重力加速度, i 代表等压面层次。选取 300 hPa 为大气顶层, 即 $P_h=300$ hPa。因此使用 1976~2009 年伊宁、乌鲁木齐和库车 3 个探空站一日两次的探空观测资料, 利用 (2) 式计算求得大气水汽含量。

天山山区地形复杂, 探空测站稀少, 主要分布在周边地区, 且没有进行过 GPS 水汽观测试验; 再分析资料的时空分辨率低, 在山区的适用性没有经过检验, 分析结果的正确性经常受到质疑, 所以利用探空观测数据计算的水汽含量与相应站点的地面水汽压建立 $W-e$ 模型。根据已有的研究成果^[10,11], 大气水汽含量 W 与地面水汽压 e 之间存在良好的线性关系, 公式为: $W=a+be$, 参数 a 、 b 因站点而异。考虑到地面水汽压为 0 时水汽含量也应该为 0 这一物理意义, 定义关系式为: $W=b \cdot e$, 即一元

线性模型, 其中 b 表示水汽含量的变化倾向率。

利用伊宁、乌鲁木齐和库车 3 个探空站逐月平均大气水汽含量数据与相应的地面水汽压数据建立相关关系, 进行 $W-e$ 一元模型拟合, 得出水汽含量与地面水汽压的关系式^[12]:

$$W=1.6571e, R^2=0.94 \quad (3)$$

其中, W 为水汽含量, 单位为 mm; e 为地面水汽压, 单位为 hPa。

利用天山山区及周边 44 个站的 1961~2009 年的月均水汽压数据, 通过 (3) 式计算空中水汽含量, 并与探空实测数据进行对比, 结果表明地面公式计算结果与探空计算结果非常接近, $W-e$ 一元模型计算的月水汽含量平均相对误差为 12.2%, 满足精度要求, 物理意义明确, 可用于天山及周边地区其他无探空观测站点的水汽计算。

3 结果与分析

3.1 水汽含量

利用地面水汽压与水汽含量关系式计算天山山区及周边 44 个站 1961~2009 年各月水汽含量值。图 2 看出, 天山山区及周边区域多年平均大气水汽含量高值区主要分布在天山周边的河谷、盆地和山麓地带, 中心水汽平均在 12~21 mm 之间。以上区域位于西风气流的迎风坡, 拦截西来的大量水汽, 水汽含量较高, 加之河谷平原地带是新疆主要城镇分布区, 绿洲农牧业发达, 水汽更加充足。而低值区一直稳居在中天山山区巴音布鲁克-天山大西沟-小渠子一带及东天山巴里坤、伊吾地区, 水汽含量 4~8 mm, 这主要与海拔高度有关, 水汽主要集中在大气 5 000 m 以下的近地层, 天山山体平均海拔高达 4 000 m 左右, 尽管山区水汽密度较大, 但大气厚度较薄, 水汽总量较少。

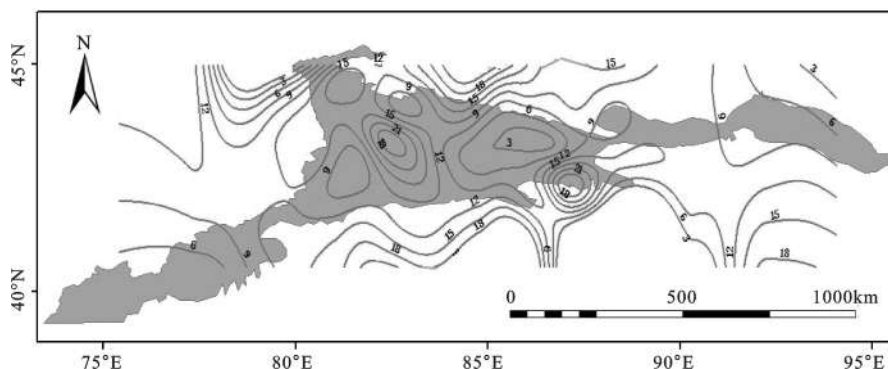


图2 天山山区水汽含量空间分布(mm)

Fig.2 Annual average water vapor content in the Tianshan Mountains (mm)

天山山区及周边区域春季平均大气水汽含量为 9.4 mm, 伊犁河谷和天山北坡平原区为高值区, 天山中部和南部高海拔地区依然是大气水汽含量低值区。春、秋季是过渡季节, 水汽空间分布特征相似, 秋季水汽含量略大于春季, 为 11.9 mm。春季降水量略大于秋季, 这是由大气环流决定的。秋季副热带急流稳居高原上空, 新疆脊和中西伯利亚脊稳定, 强度较弱, 加上东欧槽的形成, 使得影响系统在移动过程中减弱, 不利于降水; 而春季副热带急流中心强度减弱, 高原以北天山山脉北侧 500 hPa 锋区加强, 500 hPa 北支欧洲脊稳定建立, 西风气流加强, 随着新疆脊加强, 中亚到新疆携带暖湿空气的西南气流加强, 两种冷暖气流在天山及北疆地区汇合, 有利于降水发生。

夏季是一年水汽和降水最丰富的季节, 多年平均水汽含量为 19.2 mm, 伊犁河谷是高值中心, 最高值为 25.2 mm。吐鲁番盆地为另一高值中心, 中心水汽达 23 mm, 但与同纬度的华北、东北地区相比, 水汽含量依然较低。而冬季多年平均水汽含量仅为 3.6 mm, 天山西部上空水汽含量仅为夏季的 1/5, 天山中部不及夏季的 1/8, 为 1.5 mm 左右。

对水汽含量标准化场进行自然正交分解 (EOF) 表明, 空间场的变化主要由 3 种分布型态。第 1 分布型反映了水汽含量场具有一致性的变化特征, 占总方差的 60.9%; 第 2 分布型反映了大气水汽含量场在南-北方向上的分布差异, 占总方差的 7.6%; 第 3 分布型的特征向量占总方差的 6.5%。前 3 个特征向量的方差贡献占总方差的 74.9%, 收敛速度很快, 浓缩了原始场的主要空间分布信息, 代表原始场时空分布的主要特征。

3.2 水汽含量的年代际变化

天山山区及周边 1961~2009 年水汽含量年平均为 10.51 mm, 总体来看, 水汽含量在整个时段内呈增加趋势 (图 3), 增加率为 0.26 mm/10 a。水汽

的变化分为 3 个阶段, 20 世纪 60~80 年代中期水汽在 10 mm 上下波动变化; 1986 年水汽含量急剧增长, 至 1997 年一直维持在 10.7 mm 左右; 而 1998 年水汽含量急增到接近 12 mm, 达到近 50 a 的最高值, 而后出现波动下降趋势, 近年来下降趋势明显, 水汽含量接近第 1 阶段。

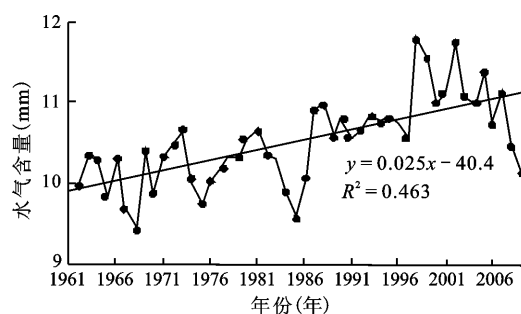


图3 年平均水汽含量趋势变化曲线

Fig. 3 The change curve of annual average water vapor content

四季水汽均呈增加趋势, 倾向率分别为 0.13、0.40、0.32 和 0.16 mm/10 a, 相关系数分别为 0.29、0.51、0.61 和 0.58, 通过 0.05 显著性水平检验, 说明夏、秋季水汽的增加明显, 春季增加不明显。

从年代际变化 (表 1) 可以看出: 20 世纪 90 年代以来, 水汽增长显著, 1991~2000 年平均降水增长幅度达 0.4 mm, 其中夏季增加最明显 (0.99 mm), 秋季次之。2000 年以后秋季增加幅度最大, 增加 0.71 mm, 而夏季较上 10 a 减少 0.68 mm。

3.3 水汽含量与气候变化因子的关系

新疆近 20 多年气候增暖变湿, 天山山区及周边地区变化最为明显, 区域水汽变化与气候变化因子有一定的内在联系。温度和降水是基本的气候变化因子, 水汽对温室效应和区域降水的贡献的研究有很大的现实意义; 同时, 天山位于北半球中纬度, 北大西洋涛动和北极涛动等因子也影响

表1 水汽含量年代际变化(mm)

Table 1 Interdecadal variation of water vapor content (mm)

	1971~2000	水汽含量距平值				
	年均值	1961~1970	1971~1980	1981~1990	1991~2000	2001~2009
年	10.6	-0.53	-0.28	-0.12	0.40	0.43
春季	9.3	-0.11	-0.11	-0.08	0.18	0.44
夏季	19.2	-0.94	-0.63	-0.35	0.99	0.31
秋季	10.1	-0.67	-0.19	-0.04	0.24	0.71
冬季	3.6	-0.39	-0.17	-0.01	0.18	0.24

区域的气候变化,与水汽的变化也有一定的对应关系。

1) 水汽含量与降水的关系。降水过程,充足的水汽、动力抬升作用和不稳定能量三者缺一不可。大气通过水平输送和动力抬升作用将落区周围对流层中低层水汽在落区上空汇集、抬升、凝结,降水量和水汽含量有密切的对应关系。

水汽与降水量有很显著的正相关关系,相关系数为 0.59,且在夏季两者相关最为显著,相关系数为 0.79,通过 0.01 的显著性水平检验,说明夏季大气水分与降水的关系最为密切。

对降水和水汽的标准化场进行自然正交分解(EOF)展开。通过标准化的降水和水汽两个要素 EOF 空间场和时间系数的相关系数,来分析降水和水汽的空间和时间上的相似程度。计算结果表明,降水和水汽 EOF 展开的前两种典型场空间分布的相似程度很高(图 4a),前两个时间序列年际变化的相似程度很显著(图 4b)。

2) 大气水汽含量与温度的关系。水汽从赤道到极地逐渐衰减,反应全球温度分布的特征。水汽既反射太阳辐射,也吸收地面长波辐射,是大气中含量最高的温室气体,产生的温室效应占有所有温室气体的 60%以上,远远超过臭氧和二氧化碳的总和^[13-15],但关于水汽增温的作用长期被忽略。从理论上讲,水汽的温室效应一方面导致地面温度升高,蒸发加剧,大气中的水汽含量增加;另一方面温度升高导致大气饱和水汽压增大,大气可容纳的水汽总量增加。增加了的水汽,可吸收更多的辐射,增强初始的增温效应,加剧气候变暖趋势^[16]。水汽对温度的这种正反馈机制有别于其它温室气体^[17]。

研究发现年及四季水汽与相应气温之间相关

系数分别为 0.55、0.42、0.23、0.73 和 0.84,除夏季通过 0.05 信度水平外,年及其余季节均通过 0.01 信度检验,说明水汽与气温的相关性冬季最高,夏季最小。两者的相关性与气温的高低呈反相关关系,而不是正相关。我们初步认为水汽对全球变暖和气候变化可能有负反馈作用,即水汽在一定的温度范围内具有温室效应,低于或者高于都会抑制增温效应。这个结论还需进一步论证。

3) 大气水汽含量与北大西洋涛动(NAO)的关系。长期以来,北大西洋涛动(NAO)被认为是影响北半球中高纬度气候变化的重要因子之一^[18-22],NAO 信号在北半球的冬半年最强。

研究发现只有冬季 NAO 与水汽有相关关系,其中与夏季、年水汽相关系数为 0.46 和 0.43,均通过了 0.01 的显著性水平。这说明冬季 NAO 与水汽有显著的相关关系,其余季节不显著。冬季 NAO 在 20 世纪 80 年代前在 0 上下波动,80 年代末 90 年代初达到最大值,而后再波动下降趋势,近年来下降趋势明显,这与夏季水汽趋势变化时期相近,有很好的对应关系(图 5)。

4) 大气水汽含量与北极涛动(AO)的关系。北极涛动(Arctic Oscillation,简称 AO)由 Thompson 和 Wallace 在 1998 年首次引入,它不仅影响着极地地区的气候,也影响着中、低纬度地区的气候,对北半球气候的变化具有重要而广泛的影响^[23-25]。

研究发现,冬季 AO 与年和夏、秋、冬季水汽有很好的相关性,通过 0.01 的显著性水平检验,说明冬季 AO 对夏季水汽相关性最显著。冬季 AO 在 20 世纪 80 年代前在 0 上下波动,80 年代末 90 年代初达到最大值,而后再波动下降趋势,近年来下降趋势明显,这与夏季水汽趋势变化时期相近,有很好的对应关系(图 5)。

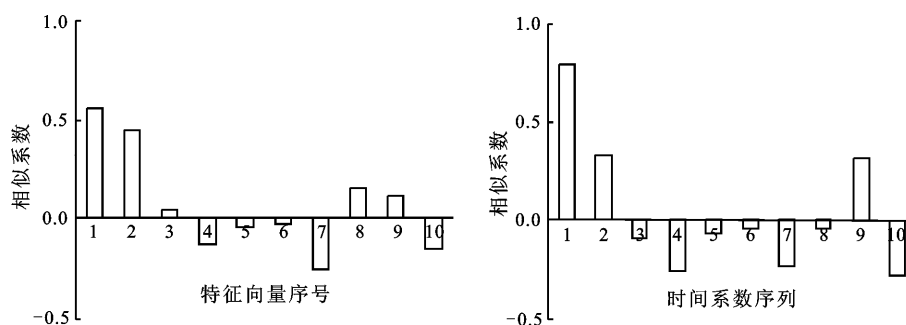


图4 降水和水汽第1,2向量场的相关系数

Fig.4 The correlation coefficient of the first and second vector fields of water vapor content and precipitation

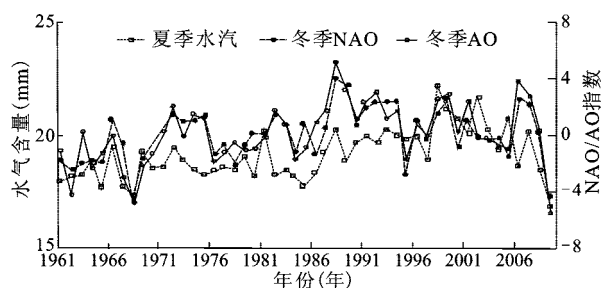


图5 夏季水汽与冬季NAO/AO指数的关系

Fig.5 Relationship between winter NAO/AO and summer water vapor content

4 结 论

本文利用建立的天山山区水汽含量与地面水汽压的经验关系式,计算天山山区及周边其他无探空测站1961~2009年的水汽含量值,分析水汽含量的时空分布及其与区域气候变化因子的关系,得出以下初步的结论:

1) 天山山区水汽含量高值区主要分布在天山北麓的河谷平原地带,中天山和东天山是低值区,春秋空间分布极为相似。水汽含量在近50 a内呈增加趋势,夏、秋季增加明显,春季增加不明显。水汽含量标准化场EOF分解表明,空间场的变化主要有全区一致性变化和南北坡的相反变化两种分布型态。

2) 水汽和降水的关系十分复杂,两者有显著的正相关关系,夏季相关最显著,说明水汽是影响天山山区降水量的因素之一,夏季大气水分与降水的关系最密切。降水和水汽标准化场EOF分解说明前两种向量场两者空间分布型的相似程度很高,两者时间系数年际变化的相似程度很显著。

3) 水汽与其他气候变化因子也有一定的关系。大气中水汽是最主要的温室气体之一,它对温室效应具有重要贡献,水汽与气温的相关系数冬季最高,夏季最小,两者的相关性与气温的高低呈反相关关系,即水汽对全球变暖和气候变化可能会有负反馈作用;冬季NAO与水汽有相关关系,其余季节不显著;冬季AO与年和夏、秋、冬季水汽有很好的相关性,对夏季水汽相关性最显著。

以上这些研究对于揭示区域水分循环过程和全球变暖背景下的区域响应有重要意义,对合理开发山区空中水资源奠定科学基础。

参考文献:

- [1] 刘国伟.水文循环的大气过程[M].北京:科学出版社,1997.
- [2] 陆桂华,何海.全球水循环研究进展[J].水科学进展,2006,17(3):419~424.
- [3] 靳立亚,符娇兰,陈发虎.近44年来中国西北降水量变化区域差异及对全球变暖的响应[J].地理科学,2005,25(5):567~572.
- [4] 孙佳丽,陈亚宁,李卫红.新疆极端水文事件年际变化及对气候变化的响应[J].地理科学,2011,31(11):1389~1395.
- [5] 张同文,王丽丽,袁玉江,等.利用树轮宽度资料重建天山中段南坡巴仑台地区过去645年来的降水变化[J].地理科学,2011,31(2):251~256.
- [6] 史玉光,孙照渤.新疆大气可降水量的气候特征及其变化[J].中国沙漠,2008,28(3):519~525.
- [7] 刘蕊,杨青,王敏仲.再分析资料与经验关系计算的新疆地区大气水汽含量比较分析[J].干旱区资源与环境,2010,24(4):77~85.
- [8] 李霞,张广兴.天山可降水量和降水转化率的研究[J].中国沙漠,2003,23(5):509~513.
- [9] 胡汝骥.中国天山自然地理[M].北京:中国环境科学出版社,2004.
- [10] 张学文.可降水量与地面水汽压力的关系[J].气象,2008,30(2):9~11.
- [11] 杨景梅,邱金恒.我国可降水量同地面水汽压关系的经验表达式[J].大气科学,1996,20(5):620~626.
- [12] 姚俊强,杨青,黄俊利.天山山区及周边水汽含量的计算与特征分析[J].干旱区研究,2012,29(4):567~573.
- [13] Held I M, B J Soden. Water vapor feedback and global warming, Annu[J]. Rev. Energy Environ, 2000, 25(2): 445~475.
- [14] Philipona R B, Diirr C, Marty A Ohmura, et al. Radiative forcing-measured at Earth's surface-corroborate the increasing greenhouse effect[J]. Geography Research Letter, 2004, 31, L03202. doi.10.1029/2003GL018765.
- [15] Philipona R, B Diirr, A Ohmura, et al. Ruckstuhl. Anthropogenic greenhouse forcing and strong water vapor feedback increase temperature in Europe[J]. Geography Research Letter, 2005, 32, L19809. doi.10.1029/2005 GL023624.
- [16] 李霞.西北半干旱区大气可降水量和气溶胶光学特性的反演与分析[M].北京:气象出版社,2012.
- [17] Ramanathan V, B R Barkstrom, E F Harrison. Climate and the Earth's radiation budget, Phys[J]. Today. 1989, 42(5):22~32.
- [18] Thompson D W J, Wallace J M, Gabriele C. Annular modes in the extratropical circulation, Part II: Trends[J]. Journal of Climate, 2000, 13(5):1018~1036.
- [19] Thompson D W J, Wallace J M. Regional climate impacts of the Northern Hemisphere annular mode[J]. Science, 2001, 29(3): 85~89.
- [20] ZHANG Lijuan, LIU Dong, YAN Xiaodong, et al. Analyzing and Forecasting Climate Change in Harbin City, Northeast China[J]. Chinese Geographical Science, 2011, 21(1):65~73.
- [21] 吴锦奎,陈军武,吴灏,等.疏勒河上游高寒草甸蒸散对比研

- 究[J].地理科学,2013,33(1):97~103
- [22] 郭元喜,龚道溢,汪文珊,等.中国东部夏季云量与日气温统计关系[J].地理科学,2013,33(1):104~119.
- [23] 俞永强,陈 文.海-气相互作用对我国气候变化的影响[M].北京:气象出版社,2005.
- [24] 薛红喜,孟 丹,吴东丽,等.1959~2009年宁夏极端温度阈值变化及其与AO指数相关分析[J].地理科学,2012,32(3): 380~385.

Characteristics Analysis of Water Vapor Contents Around Tianshan Mountains and the Relationships with Climate Factors

YAO Jun-qiang^{1,2,3}, YANG Qing², HU Wen-feng⁴, ZHAO Ling², LIU Zhi-hui^{3,5,6},
HAN Xue-yun^{2,7}, ZHAO Li^{2,7}, MENG Xian-yong^{1,3}

(1.College of Resources and Environment, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046,China;2. Institute of Desert Meteorology, China Meteorological Administration, Urumqi, Xinjiang 830002, China; 3.State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi, Xinjiang 830011,China; 4.College of Resources and Environment, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000,China; 5. Institute of Arid Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046,China; 6. International Center for Desert Affairs—Research on Sustainable Development in Arid and Semi-arid Lands, Urumqi, Xinjiang 830046,China; 7. Institute of Geographic Science and Tourism , Xinjiang Normal University, Urumqi, Xinjiang 830054,China)

Abstract: Relation formula was established between water vapor content and ground water vapor pressure, and the water vapor content of the Tianshan Mountains was calculated, the spatial and temporal distribution of the water vapor content characteristics and the relationship with the climate factors change was analyzed (i.e. temperature, precipitation, NAO/AO index). The following conclusion was drawn: the high value of the water vapor content area for Tianshan Mountains mainly distributed in the north Tianshan Plain region and the river valley in Turpan Basin, the water vapor content is in 12-20 mm. The east and middle area of Tianshan Mountains is a minimum part, the value is in 4-8 mm. In the past 50 years, the water vapor content in Tianshan Mountains exhibited an increasing trend with the rate of 0.26 mm per decade. However, the different seasons are different in the rates of water vapor content increase. Specifically, it increased most obviously in summer at a slope of 0.16 mm per decade and in autumn increased trend at a slope of 0.32 per decade. EOF decomposition of water vapor content showed the water vapor content distribution of has two types: consistency change in entire area under the background of regional climate change and the reverse change in north and south slope. It was showed that the regional climate change factors have impact on water vapor content. Specifically, precipitation in Tianshan Mountains was correlated significantly with water vapor content, especially atmospheric moisture and precipitation in summer, water vapor content is one of the factors that affect precipitation. The EOF decomposition of precipitation and water vapor content showed that the first two vector field of similarity high between the distribution of spatial and temporal distribution. Water vapor has negative feedback effect to regional temperature under the global change and climate change, through it is a major cause of greenhouse gas and also a cause of climate change in terms of global change. NAO or AO in winter has relevant relations with water vapor, and winter AO has the most significant correlation to summer water vapor. These works are important for discussing the regional water cycling process and regional response of climate change under the background of global change. The results lay scientific foundation for rational develop and utilize water vapor sources in Tianshan Mountains.

Key words: water vapor content; climate change; precipitation; temperature; NAO/AO; Tianshan Mountains