

青海高原夏季降水异常及其水汽输送特征分析

黄玉霞 王宝鉴 王鹏祥

(中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 730020)

提 要: 通过对青海高原夏季降水异常及其水汽输送特征的分析表明: (1) 青海高原夏季降水的年代际变化总体呈先增后减的抛物线型变化, 80年代中期以前没有明显的变化周期, 80年代末以后存在较稳定的3年周期, 目前正处于一相对多雨时期。(2) 青海高原夏季整层水汽通量在 $50\sim 150\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ 之间, 自西界向东界增加, 近43年空中水汽收支整体上呈增加趋势。(3) 早年青海高原空中水汽偏少 $10\sim 40\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, 水汽通量散度场除北部呈辐合加强外, 其余地区均为水汽通量辐散加强区。涝年青海高原水汽输送偏强 $10\sim 20\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$, 水汽通量散度场表现为整个区域的辐合加强。(4) 早年青海高原空中水汽收支呈“盈余”状态, 但比平均状况少 $2923.3\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$, 减幅为 21.88%; 涝年空中净水汽通量也呈“盈余”状态, 但比平均状况多 $7253.6\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$, 增幅达 53.99%。

关键词: 夏季降水 水汽输送 异常特征

Analysis of Summer Precipitation Anomaly and Water Vapor Transport in Qinghai Plateau

Huang Yuxia Wang Baojian Wang Pengxiang

(Lanzhou Institute of Arid Meteorology, CMA, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster, 730020)

Abstract: The analysis of summer precipitation anomaly and the feature of water vapor transport in Qinghai Plateau for the last 43 years is made. It shows that (1) The summer precipitation increased at first and then decreased. After the end of 1980's, precipitation has a steady cycle of three-year, and is in a rainy period now. (2) The content of water vapor flux

资助项目: “西部开发科技行动”重大项目“祁连山空中云水资源开发利用研究”(2004BA901A16) 资助。

收稿日期: 2005年4月20日; 修定稿日期: 2005年8月6日

in Qinghai plateau varies from 50 to 150 kg · m⁻¹ · s⁻¹, and it increases from west to east boundary. The net vapor flux has an increasing tendency in the last 43 years. (3) In a dry year, water vapor flux decreases about 10—40 kg · m⁻¹ · s⁻¹, and there is a increasing vapor flux divergence field. In a moist year, the water vapor flux increases about 10—20 kg · m⁻¹ · s⁻¹, and there is a increasing vapor flux convergence. (4) In a dry year, the net water vapor flux is positive always, but the content is low about 21.88% than average state, and it is high about 53.99% in a moist year.

Key Words: summer precipitation water vapor transport anomaly feature

引 言

青藏高原为全球最大与最高的高原大地形,是长江、黄河的发源地。青藏高原水循环及其强对流活动与亚洲季风系统相互作用对东亚地区旱涝异常,尤其高原与周边广阔地区的水份循环及其生态气候分布特征存在显著影响。汪青春等^[1]指出,虽然青海近年来夏半年降水量和雨日在减少,但降水强度在增大,夏半年降水量的减少主要是降水日数的减少造成的。苗秋菊等^[2]研究发现,青藏高原周边异常多雨中心与高原南侧强非均匀水汽“湿锋”及高原东南边缘地形动力强迫作用密切相关,高原大地形东南部水汽输送的多尺度辐合特征是高原东部周边“多雨中心”形成的重要因素。刘世祥等^[3]分析表明,甘肃夏季空中水汽含量和水汽输送较多,向甘肃输送的水汽来源于孟加拉湾及周边海域,南海和东海海域,青藏高原和四川盆地及周边湿润区;从水汽源地和输送路径看,高原水汽输送在对流层中层。马振锋等^[4]研究表明,高原季风偏弱、高原季风低压偏西时四川盆地容易发生初夏干旱,而多雨年则反之。赵声蓉等^[5]指出,夏季高原为热源和水汽汇区,它们的异常对华北地区降水有很大影响,当热源和水汽汇增强(减弱)时,华北地区降水偏少(偏多)。不难看出,众多学者将青藏高原动力及热力作用

对我国水汽输送及降水的影响研究主要集中在长江、华北、四川盆地等区域,对高原自身水汽输送特征的研究却比较少。此外,受全球气候变暖和人类活动的共同影响,青海高原出现了诸如青海湖水位下降和三江源地区草场退化、湖泊萎缩、河流流量减少、土壤沙化和水土流失等生态环境退化问题^[6],这都与青海高原水资源的短缺密切相关。一地的水资源主要来源于降水,水汽是降水的物质基础,而且大气中的水分含量和水汽输送对区域水分平衡起着重要作用。由于夏季是青海高原降水最集中的季节,约占年降水总量的 55%~75%,因此下文将以 32~40°N、90~105°E 区域为研究对象,分析青海高原夏季降水及水汽输送的特征。

1 资料和方法

利用青海 24 个测站 1961~2003 年 6~8 月降水资料和 NECP/NCAR1961~2003 年月平均再分析资料(u , v , q , P , 水平格距为 2.5°×2.5°),运用了小波分析、合成分析等诊断方法。

其中,水汽通量:在 P 坐标系中单位时间通过垂直于风向的底边为单位长度,高为整层大气柱的面积上的总的水汽通量(垂直积分的水汽通量)的计算方式如下:

$$q_u = \frac{1}{g} \int_{p_s}^p q u d p \quad (1)$$

$$q_v = \frac{1}{g} \int_{p_s}^p q_v dp \quad (2)$$

水汽通量散度

$$Q = \frac{\partial q_u}{a \cos \varphi \partial \lambda} + \frac{\partial q_v}{a \partial \varphi} \quad (3)$$

说明：水汽通量单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ，水汽通量散度单位为 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ， p_s 为地表面气压， p 取为 300hPa， g 为重力加速度， a 为地球半径， φ 和 λ 分别为纬度和经度。

净水汽通量：净水汽通量定义为某个区域流入和流出水汽通量之差，其中：

$$\Delta q_u = (q_{u西} - q_{u东})l \quad (4)$$

若 $v_{南} < 0$ 和 $v_{北} < 0$ 时：

$$\Delta q_v = q_{v北} l \cos \varphi_2 - q_{v南} l \cos \varphi_1 \quad (5)$$

若 $v_{南} > 0$ 时：

$$\Delta q_v = q_{v南} l \cos \varphi_1 - q_{v北} l \cos \varphi_2 \quad (6)$$

说明：净水汽通量单位为 $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$ ， φ_1 和 φ_2 分别是某个区域的南、北边界的纬度， $l = 111.133 \times 2.5 \text{ km}$ 。

2 青海高原夏季降水分布及演变特征

青海高原近 43 年夏季降水量自西北部的柴达木盆地向东南递增，其等值线呈倒“Ω”分布（图 1），其中柴达木盆地—格尔木—诺木洪—都兰—玛多为一相对少雨带，降水量最大、夏季降水最集中的地区主要位于高原南部，值得注意的是在祁连山东中段迎风坡存在一降水次大中心，降水在 200~275mm 之间。郭金兰等^[7]对北京一次地形作用产生的强降水过程分析发现，太行山脉东侧（山前）的偏东风气流、山后中低层的偏西风气流受地形抬升作用，使两层位势不稳定能量释放，形成中、低两层云系的云雾物理雨滴捕获增大机制。崔春光等^[8]研究了局地中尺度地形对“98.7”鄂东大暴雨过程的影响及其机理，结果表明，暴雨盛期，由

于暴雨带南侧有中尺度低空急流出现并正好位于幕阜山区，因地形而抬高的摩擦层内的 Ekman 风矢偏转直指暴雨区，加强了暴雨区水汽的辐合。由此可见，祁连山东中段迎风坡的有利地形条件导致该区域降水较其它地区多，形成一个降水次大中心。

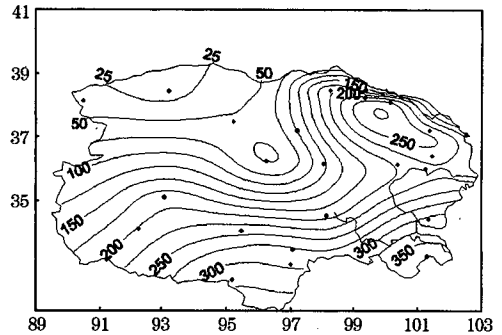


图 1 青海高原夏季降水分布（单位：mm）
1961~2003 年平均

青海高原夏季降水的年代际变化总体呈先增后减的抛物线型（图 2a），70 年代中~80 年代中为一相对多雨时期，而其余时期则降水偏少。其中 60、70 年代处于上升阶段，80、90 年代处于下降阶段，尤其 90 年代以后下降较明显，但近两年有增加趋势。对青海高原区夏季降水的 Marr 小波分析表明（图 2b），80 年代中期以前青海高原夏季降水没有明显的周期，80 年代末以后存在较稳定的 3 年周期，目前正处于一相对多雨时期，但年代际背景仍是少雨期。

3 青海高原夏季水汽场异常特征

3.1 近 43 年净水汽通量演变

夏季是我国空中水汽输送最强盛的季节，来自孟加拉湾的暖湿气流在东亚夏季风的驱动下向东北方向输送，与沿中纬度西风环流输送的水汽在青海高原汇合，但受高原

大地形阻挡，到达该区的水汽含量较源区大大减小，平均整层水汽通量在 $50 \sim 150 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间（图略），占年水汽通量的四分之一到三分之一。水汽通量自西界向东界增加，高值区基本分布在青海东部的边坡地带。地面降水的大值区与空中水汽的高值区分布除高原北部外，其它区域基本一致。由于高原的动力作用而在其北侧形成的反气旋型环流，环境风场不利于水汽的辐合，因此，虽然青海高原北部空中为水汽通量高值区，但夏季降水却最少，说明该区域空中水汽多为“过路水汽”。

$0 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间，呈“亏损”状态；二是净经向风水汽通量在过去的43年中一直维持正值，水汽收支在 $0 \sim 1.0 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间。说明夏季经向的水汽输送常年在青海高原上空形成“水汽汇”，水汽呈“盈余”状态。此外，尽管净经向风水汽通量一直为正，但由于净纬向风水汽通量的负贡献，1961~2003年间青海高原空中水汽收支有正有负，整体上呈增加趋势，尤其是80年代中期以后净纬向水汽“亏损”的减少，青海空中水汽收支转为持续“盈余”。

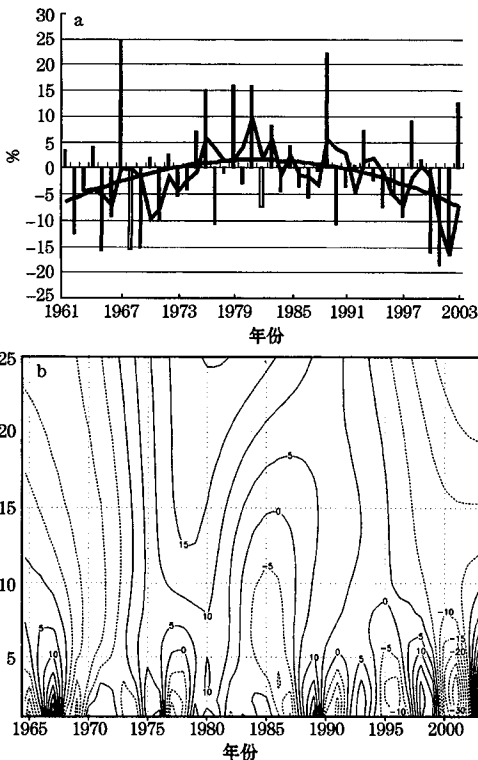


图2 夏季降水距平百分率及3年滑动、2阶拟合趋势 (a)，小波分析 (b)

青海高原上空净水汽通量的变化有以下特点 (图3)：一是近43年中净纬向风水汽通量一直为负，水汽收支在 $-1.5 \times 10^5 \sim$

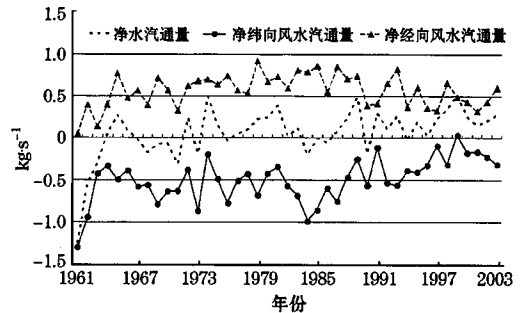


图3 净水汽通量时间演变 (单位: $10^5 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$)

3.2 旱涝年青海高原水汽的异常分布特征

胡国权等^[9]对1991年5~7月的降水期间水汽收支分析得出：从梅雨期前到梅雨期，暴雨区的水汽含量不断增加，在梅雨期后，暴雨区的水汽含量是减少的；另外，在梅雨期前，暴雨区的水汽是辐散的，其大气中的水汽的维持是靠地表蒸发，在梅雨期暴雨区的水汽是辐合的，其水汽主要来自其他地区的水汽输送。王宝鉴等^[10]对东亚夏季风西北影响区水汽收支的分析表明，强夏季风年降水偏多，流入该区域净水汽通量为正，弱夏季风年降水偏少，空中净水汽通量为负，呈“亏损”状况。上述分析说明一地空中水汽的“盈余”有利于降水的形成。那么，青海高原夏季降水发生在怎样的水汽收支背景下？为了研究典型旱涝年青海高原夏

季空中水汽的异常分布特征,本文选取夏季降水偏少的2001、2000、1965、1968、1969和2002年等6年为典型早年(降水距平百分率 $\leq -15\%$),降水偏多的1967、1989、1979、1981和1976年等5年为典型涝年(降水距平百分率 $\geq 15\%$),诊断分析了降水异常时空中水汽的分布特征。

3.2.1 早、涝年水汽通量场及其散度场特征

用早年水汽通量及其散度场与1971~2000年30年平均水汽通量及其散度场之差定义水汽通量及其散度距平场(下同),其特点为包括青海高原在内的整个中国大陆空中水汽通量都明显比平均状况偏少(图略),其中青海高原空中水汽减少 $10\sim 40\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$;早年水汽通量散度场表现为,除北部呈辐合加强外,其余地区均为水汽通量辐散加强区,散度较平均状况增加 $0\sim 3\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。涝年水汽通量场与早年呈反位相变化(图4a),其显著特征是沿孟加拉湾—中南半岛—云贵高原—四川盆地—华北平原路径输送水汽在涝年显著加强,在这支水汽输送带上存在两个正距平中心(华北和孟加拉湾),青海高原位于华北中心的西侧,水汽输送偏强 $10\sim 20\text{ kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$;涝年水汽通量散度场表现为整个青海高原区域的辐合加强(图4b),在高原东部的祁连山东段和高原南部更显著,散度较平均状况增加 $-5\sim -2\text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

3.2.2 早、涝年水汽通量收支特征

由表1可见,早年青海高原净纬向水汽通量为 $-40219.6\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$,净经向风水汽通量为 $50715.7\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$,其空中水汽收支呈“盈余”状态,但比平均状况减少 $2923.3\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$,减幅为 21.88% 。涝年纬向净水汽收支为 $-52774.7\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$,经向为 $73463.7\text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$,空中水汽整体上也呈“盈余”状态,但比平均状况增加 7253.6

$\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$,增幅达 53.99% 。上述分析中不难看出,无论旱涝年,青海高原空中水汽收支均有“盈余”,因此有较好的开发潜力。

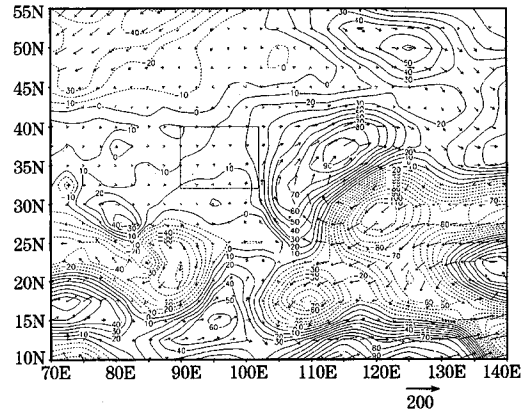


图4a 涝年水汽通量距平场 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)

(图中方框为青海高原)

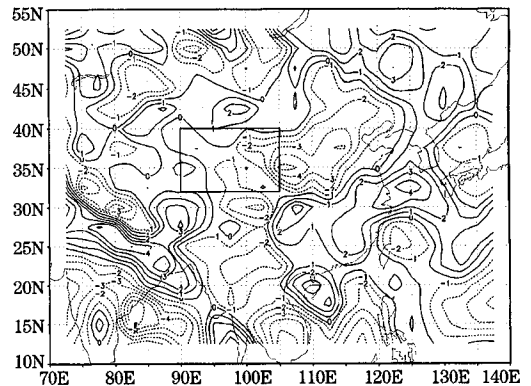


图4b 涝年水汽通量散度距平场 ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

(图中方框为青海高原)

表1 典型旱涝年青海高原水汽通量收支

单位: $\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$	早年	涝年
西边界水汽通量	39373.7	53745.1
东边界水汽通量	79593.4	106519.9
南边界水汽通量	13160.5	46076.1
北边界水汽通量	-37555.2	-27387.6
净水汽通量	10496.1	20689.0
与平均状况偏差	-2939.3 (-21.88%)	7253.6 (53.99%)

4 小结

(1) 青海高原夏季降水的年代际变化总体呈先增后减的抛物线型变化, 对降水的小波分析表明, 80年代中期以前没有明显的周期, 80年代末以后存在较稳定的3年周期, 目前正处于一相对多雨时期, 但年代际背景仍是少雨期。

(2) 青海高原夏季整层水汽通量在 $50 \sim 150 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 之间, 占年水汽通量的 $\frac{1}{4} \sim \frac{1}{3}$, 自西界向东界增加。近43年中, 空中净水汽收支有正有负, 整体上呈增加趋势, 尤其是80年代中期以后由于净纬向水汽“亏损”的减少, 水汽收支转为持续“盈余”。

(3) 早年青海高原空中水汽减少 $10 \sim 40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 水汽通量散度场除北部呈辐合加强外, 其余地区均为水汽通量辐散加强区, 散度较平均状况增加 $0 \sim 3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。涝年青海高原水汽输送偏强 $10 \sim 20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 水汽通量散度场表现为整个区域的辐合加强, 辐合加强在高原东部的祁连山中东段和高原南部更显著, 散度较平均状况增加 $-5 \sim -2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(4) 早年青海高原空中水汽收支呈“盈

余”状态, 但比平均状况减少 $2923.3 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, 减幅为 21.88%; 涝年空中净水汽通量也呈“盈余”状态, 但比平均状况增加 $7253.6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$, 增幅达 53.99%。

参考文献

- 1 汪青春, 李林, 刘蓓等. 青海省近40年雨日、雨强气候变化特征. 气象, 2005, 31(3): 69—73.
- 2 苗秋菊, 徐祥德, 施小英. 青藏高原周边异常多雨中心及其水汽输送通道. 气象, 2004, 30(12): 44—46.
- 3 刘世祥, 杨建才, 陈学君等. 甘肃省空中水汽含量、水汽输送的时空分布特征. 气象, 2005, 31(1): 50—54.
- 4 马振锋, 高文良, 刘富明等. 青藏高原东侧初夏旱涝的季风环流分析. 高原气象, 2003, 22(增刊): 1—7.
- 5 赵声蓉, 宋正山, 纪立人. 青藏高原热力异常与华北汛期降水关系的研究. 大气科学, 2003, 27(5): 881—893.
- 6 李林, 朱西德, 周陆生等. 三江源地区气候变化及其对生态环境的影响. 气象, 2004, 30(8): 18—22.
- 7 郭金兰, 刘凤辉, 杜辉等. 一次地形作用产生的强降水过程分析. 气象, 2004, 30(7): 12—17.
- 8 崔春光, 闵爱荣, 胡伯威. 中尺度地形对“98.7”鄂东特大暴雨的动力作用. 气象学报, 2002, 60(5): 602—612.
- 9 胡国权, 丁一汇. 对1991年江淮暴雨时期的能量和水汽循环研究. 气象学报, 2003, 61(2): 146—163.
- 10 王宝鉴, 黄玉霞, 何金海等. 东亚夏季风期间水汽输送与西北干旱的关系. 高原气象, 2004, 23(6): 912—918.