

谢启玉, 巩远发, 杨蓉. 冬季青藏高原湿中心区域水汽收支及其与中国降水的关系[J]. 干旱气象, 2015, 33(5): 732-739, [XIE Qiyu, GONG Yuanfa, YANG Rong. Water Vapor Budget of High Water Vapor Content Region over Tibet Plateau in Winter and Its Relationship with Precipitation of China[J]. Journal of Arid Meteorology, 2015, 33(5): 732-739], doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2015)-05-0732

冬季青藏高原湿中心区域水汽收支 及其与中国降水的关系

谢启玉^{1,2}, 巩远发¹, 杨蓉¹

(1. 成都信息工程大学高原大气与环境四川省重点实验室, 四川 成都 610225;
2. 青海省海北州气象台, 青海 西海 810200)

摘要:利用 ERA-Interim 再分析资料(0.5°×0.5°)、探空观测资料及中国降水月值格点数据分析了冬季青藏高原(以下简称高原)大气水汽含量平均特征、高原湿中心区域的水汽收支特征及其与中国降水的关系。结果发现:冬季高原东南部地区存在湿中心,对应着水汽含量标准差大值中心;高原湿中心区域的水汽从西、南边界输入,东、北边界输出,净水汽收支多年平均为水汽“盈余”;该区域冬季净水汽收入、支出 34 a 总趋势是增加的,而净水汽收支是减少的,但三者均存在 4~6 a 左右的周期;冬季该区域净水汽收入对南疆、高原东部—四川盆地及云贵高原的降水有较好的指示性,净水汽支出对西南—华南的我国南方大部分地区降水有较好的指示性,净水汽收支则可表征高原东部及邻近地区、长江中游地区的降水;冬季该区域异常多(少)水汽支出年时,我国南方大部分地区的降水偏少(多),水汽输送场不(有)利于水汽向我国南方的输送及辐合,即其水汽支出的强弱反映了水汽输送的强弱和我国降水的分布,体现出水汽收支通过环流对降水产生重要影响。

关键词:冬季高原湿中心区域;水汽收支;降水;相关

文章编号:1006-7639(2015)-05-0732-08 doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2015)-05-0732

中图分类号:P426

文献标识码:A

引言

早在 1970 年代末叶笃正^[1]就提出高原上空特别是高原东南部上空为高湿区,并存在几个高湿中心。此后的许多研究发现夏季高原对流层中上层水汽含量远高于同纬度、同高度地区,高原东南部、南部、西南部及西北部为高湿中心^[2-8],形成了高原“湿池”^[9]。冬季大气水汽含量在 35°N 以南沿纬圈特别是高原南侧地形存在密集带^[10-11],梁宏等^[12-13]利用 2001 年地基 GPS 获得的大气总水汽量资料发现高原东南侧的雅鲁藏布江是冬季大气水汽高值中心。夏季亚洲季风区总体为水汽汇^[14],中国大陆的主要水汽来源于孟加拉湾、南海及西太平洋地区;高原水汽主要来自印度洋上的孟加拉湾和阿拉伯海,水汽进入高原的路径分别有东南、南、西

南及西 4 条,对应着 4 个高湿中心^[9,12-13,15-16]。冬季高原及附近地区有 2 条水汽输送带^[17],即由高原地形分支西风带在高原南、北两侧各形成水汽输送通道,高原南侧绕流的水汽通道是整个东亚地区水汽主要输送路径。夏季亚洲季风水汽输送与水汽收支有明显的年代际变化^[18-21],对我国西北^[22-24]、华南^[25]、华北^[26]及西南^[27]等不同地区的降水均有重大影响,是上述地区旱涝形成的重要机制之一;以高原、菲律宾以东及索马里为顶构成水汽输送的大三角地区,是影响中国区域及其下游降水的偏南水汽输送关键区,高原是东亚季风区域水汽输送的“转运站”^[28-29],高原尤其是高原东南部的水汽收支对我国降水有重要影响^[30-31]。冬季亚洲季风区水汽收支具有明显的长期气候变化特征^[32],指示出海洋水汽输送与季风区降水的变化;高原东部及邻近地

收稿日期:2014-11-26;改回日期:2015-01-08

基金项目:国家自然科学基金项目(41275080)、公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306022)及成都信息工程学院引进人才项目(KYTZ201205)共同资助

作者简介:谢启玉(1979-),女,青海人,高级工程师,研究方向为高原气象学及亚洲季风系统。E-mail:xiexiyu_aa@sina.com

通讯作者:巩远发,E-mail:gyfa@cuit.edu.cn

区 1958 ~ 2001 年冬季水汽收入呈微弱的增加趋势, 而年平均水汽总收入呈减少趋势^[11]。

上述研究大多集中于夏季水汽输送、水汽收支及对我国降水的影响, 对于冬季高原湿中心区域特征, 尤其是湿中心区域水汽输送、水汽收支变化特征的研究较少, 与我国降水的关系尚不明确。本文分析旨在得出一些关于冬季高原湿中心区域水汽输送、水汽收支特征及对我国降水影响方面的初步结论, 为冬季高原水汽的研究提供参考。

1 资料和方法

选取的资料是 1979 ~ 2012 年冬季 (12 月至次年 2 月) ERA - Interim 再分析资料中的逐月平均比湿场、地面气压场及经向风和纬向风场数据, 分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, 1 000 ~ 100 hPa 共 27 层; 降水场取自国家气象信息中心对全国地面 2 472 个台站降水资料经过插值处理成的水平分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的中国降水月值格点数据; 探空观测资料为 2009 ~ 2012 年冬季每日 08 时、20 时的温度露点差 ($T - T_d$) 数据。

某地上空单位面积内整层大气水汽含量 (也称大气可降水量) 表示为:

$$PW = \frac{1}{g} \int_{P_T}^{P_S} q dp \quad (1)$$

整层水汽通量计算采用如下公式:

$$Q = Q_\lambda \vec{i} + Q_\varphi \vec{j} = \frac{1}{g} \int_{P_T}^{P_S} qu dp + \frac{1}{g} \int_{P_T}^{P_S} qv dp \quad (2)$$

区域净水汽收支通量:

$$Q_{\lambda\varphi} = Q_{\lambda E}(\lambda, t) + Q_{\lambda W}(\lambda, t) + Q_{\varphi S}(\varphi, t) + Q_{\varphi N}(\varphi, t) \quad (3)$$

其中:

东边界水汽输送量:

$$Q_{\lambda E}(\lambda, t) = - \int_{\varphi_S}^{\varphi_N} Q_\lambda(\lambda, \varphi, t) \cdot a \cdot d\varphi \quad (4)$$

西边界水汽输送量:

$$Q_{\lambda W}(\lambda, t) = \int_{\varphi_S}^{\varphi_N} Q_\lambda(\lambda, \varphi, t) \cdot a \cdot d\varphi \quad (5)$$

南边界水汽输送量:

$$Q_{\varphi S}(\varphi, t) = \int_{\lambda_W}^{\lambda_E} Q_\varphi(\lambda, \varphi, t) \cdot a \cos\varphi \cdot d\lambda \quad (6)$$

北边界水汽输送量:

$$Q_{\varphi N}(\varphi, t) = - \int_{\lambda_W}^{\lambda_E} Q_\varphi(\lambda, \varphi, t) \cdot a \cos\varphi \cdot d\lambda \quad (7)$$

上面各式中, g 为重力加速度, q 为比湿, u 与 v 分别为经向、纬向风, P_S 为地面气压, P_T 为大气层顶处的气压, 本文取 $P_T = 100$ hPa, Q_λ 与 Q_φ 分别表示经

向、纬向的水汽通量, a 为地球平均半径, φ 为纬度, φ_S 与 φ_N 分别为东、西边界的起始与终止纬度, λ_W 与 λ_E 分别为南、北边界的起始与终止经度; 为突出反映高原地区对流层中上层水汽特征, 对式 (1) 中地面气压 P_S 的处理采用文献^[6]的方法, 即当 $P_S > 600$ hPa 时, 取 $P_S = 600$ hPa, 当 $P_S < 600$ hPa 时, 取 P_S 为实际值。对于各个边界水汽输送量的计算 (4 ~ 7 式), 根据北半球风的方向规定东、北边界计算结果取负值, 西、南边界计算结果取正值。

2 冬季高原平均水汽含量及湿中心区域水汽输送特征

2.1 冬季高原平均水汽含量

图 1 给出了 1979 ~ 2012 年冬季对流层中上层整层平均水汽含量、500 hPa 温度露点差 ($T - T_d$) 及整层水汽含量标准差分布。从图 1a 可以看到, 以 1.5 mm 为特征线, 冬季沿高原南部存在一个高湿带, 最强湿中心位于高原东南部的藏南谷地, 高湿中心值为 2.7 mm 左右, 该中心呈舌状向西北方向延伸至高原西北侧边缘地带, 并向东北方向伸至 $35^\circ N$ 附近。探空观测资料 500 hPa 上 (图 1b), 冬季高原东南部以林芝为中心存在 $T - T_d$ 的小值区域, 即水汽含量高值区, 中心值为 $8^\circ C$ 左右; 400 hPa (图略) 上, 高原东南部同样存在温度露点差的小值区域, 形成了林芝一达日的小值带, 中心值为 $9 \sim 11^\circ C$ 左右。这说明不仅夏季高原上有高湿中心^[2-9], 冬季高原上也存在明显的高湿中心, 与梁宏等^[12-13] 的 GPS 探测结果较一致, 但在过去研究高原水汽时并未关注这一现象。从整层水汽含量的标准差分布 (图 1c) 可以看到, 冬季高原东南部存在水汽含量变化标准差的大值中心, 标准差与图 1a 中的水汽含量分布一致, > 0.15 mm/a 的标准差大值中心对应着高原东南部的湿中心, 表明该地区水汽含量越大其年际变化也越大。

2.2 湿中心区域平均水汽输送特征

为分析冬季高原湿中心的水汽来源, 即水汽输送特征, 选取水汽含量最大且标准差也最大的区域 ($92.5^\circ E \sim 100^\circ E$, $27.5^\circ N \sim 31^\circ N$) 为高原湿中心区域, 计算 1979 ~ 2012 年冬季平均整层水汽通量和 4 个边界的水汽输送量, 结果见图 2。

从 1979 ~ 2012 年平均整层水汽通量 (图 2a) 看到, 冬季亚洲季风区有 2 条水汽输送带, 一条在赤道北侧的 $0^\circ \sim 15^\circ N$ 之间, 自西太平洋经中国南海和中南半岛进入孟加拉湾的强东风输送带, 另一条在

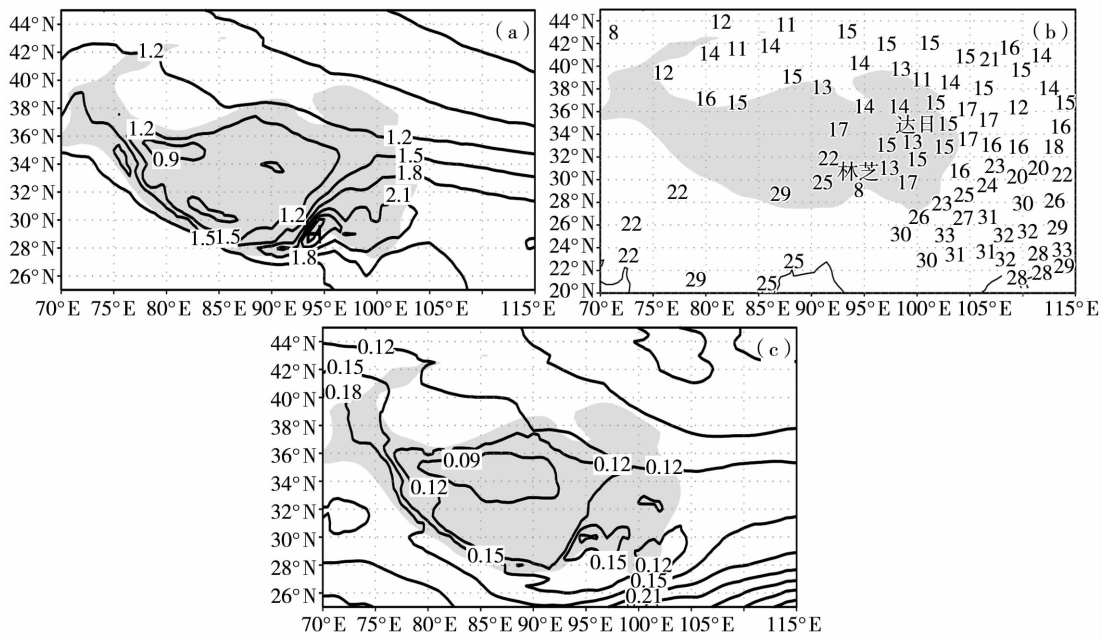


图 1 1979 ~ 2012 年高原冬季平均整层大气水汽含量(a, 单位: mm)、探空观测资料 2009 ~ 2012 年冬季平均 500 hPa 温度露点差(b, 单位: °C)和整层水汽含量标准差分布(c, 单位: mm/a) (阴影区表示青藏高原地区)

Fig. 1 Distribution of mean precipitable water vapor content over the Tibet Plateau in winter from 1979 to 2012 (a, Unit: mm), $T - T_d$ on 500 hPa of sounding data in winter from 2009 to 2012 (b, Unit: °C) and precipitable water vapor content standard deviation in winter from 1979 to 2012 (c, Unit: mm/a) (Shaded area for the Tibet Plateau)

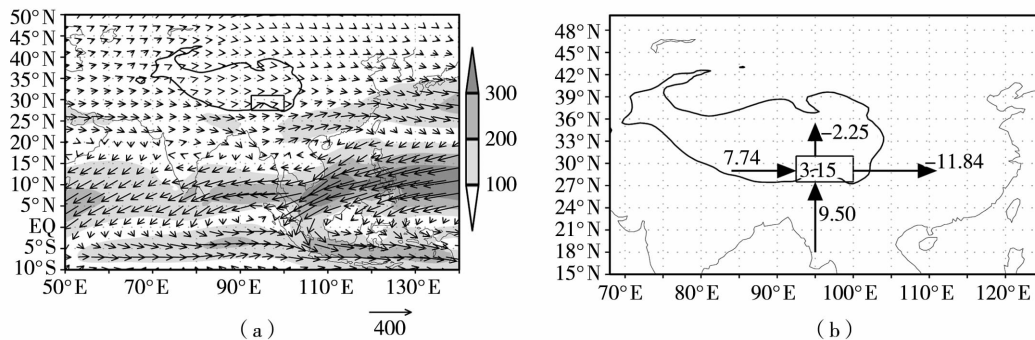


图 2 1979 ~ 2012 年冬季平均整层水汽通量(a, 单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)和 4 个边界水汽输送量(b, 单位: $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$) (方框为高原湿中心区域)

Fig. 2 The mean vertically integrated water vapor flux (a, Unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) and water vapor transportation of the four borders (b, Unit: $10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$) in winter from 1979 to 2012 (Square frame for the high water vapor content region)

20°N ~ 30°N 之间, 经高原南侧进入我国东南地区的较强西风输送带。冬季高原湿中心区域的水汽来源主要是西风带在高原西侧分支后其南支气流分为北部与南部从 2 个方向进入高原, 一个是分支后的北部, 由湿中心区域西边界携带水汽进入, 另一个是分

支后的南部, 在孟加拉湾转向成为西南风将水汽从南边界带入。可见, 正如研究指出^[17,33], 由于高原的存在, 冬季西风带在高原西侧分支并形成稳定的偏西风和西南气流, 成为我国冬半年主要的水汽通道。

图 2b 是上述水汽路径进入高原湿中心区域的

4个边界水汽输入、输出的气候平均。可以看到,高原湿中心区域多年平均净水汽收支为 $3.15 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$,表明冬季为水汽“盈余”,其中西边界处于西风带的迎风面,水汽从西边界输入到该地区,34 a 冬季气候平均水汽通量为 $7.74 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$;南边界是孟加拉湾转向西南风的水汽输送,冬季气候平均的水汽通量为 $9.50 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$;东边界是西风带的下风面,水汽从这里输出后分别向其下游的我国东部地区输送,冬季气候平均水汽通量为 $-11.84 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ 。相对于其他3个边界,北边界的气候平均值较小,为 $-2.25 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$,也为水汽输出。由此可见,冬季高原湿中心区域的水汽分别从西边界、南边界输入,其中南边界的水汽输入占有水汽输入量的55.10%,略多于西边界的输入量;东、北2个边界为水汽输出,东边界输出量占有水汽输出量的84.03%,是整个区域水汽输出的绝大部分。

3 冬季高原湿中心区域水汽收支变化特征

如前所述,冬季高原湿中心区域从西、南2个边界输入水汽,从东、北边界输出水汽,为进一步了解其水汽收支变化,分别计算净水汽收支、净水汽收入

及净水汽支出,结果如图3。

由图3a看到,高原湿中心区域净水汽收支1979~2012年冬季平均值为 $3.15 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$,呈水汽“盈余”状态;34 a 总趋势是减少的,减少率为 $0.14 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}/10 \text{ a}$;对净水汽收支作功率谱分析发现存在4~6 a 周期。净水汽收入(图3b)34 a 平均为 $17.24 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$,34 a 来呈现增加趋势,增加率为 $0.33 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}/10 \text{ a}$;对净水汽收入作功率谱分析发现,从西、南边界进入的净水汽收入呈现4~6 a 周期变化。由图3c看到净水汽支出34 a 平均值为 $-14.09 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$,由于净水汽支出值在坐标轴上的减小意味着绝对值的增大,也就是净水汽支出量增加,因此其34 a 总趋势是增加的,增加率为 $0.47 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}/10 \text{ a}$ 。对净水汽支出作功率谱分析,发现也存在4~6 a 的周期。

此外,比较图3b与图3c发现,净水汽支出与净水汽收入呈反相变化,两者的相关系数高达-0.83,远远超过显著性水平为0.001的信度检验。如前所述,由于净水汽支出是负值,净水汽收入与支出呈现的几乎完全相反的相关关系表明:当高原湿中心区域冬季来自西、南边界的净水汽收入增加(减少)时,从东、北边界输出的净水汽支出也增加(减少)。

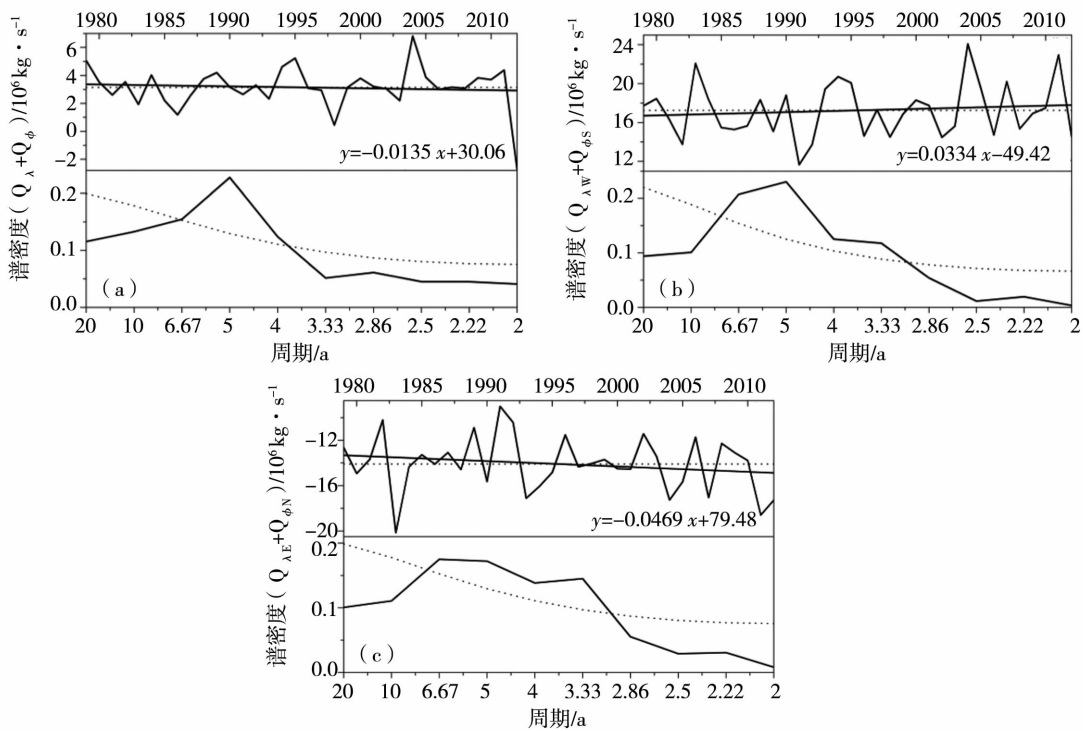


图3 1979~2012年冬季高原湿中心区域净水汽收支(a)、净水汽收入(b)、净水汽支出(c)及周期(虚线分别为平均值和95%的红噪音标准谱)

Fig. 3 Net water vapor budget(a), net water vapor input (b) and net water vapor output (c) of the high water vapor content region in winter from 1979 to 2012 and their cycles (Dot line for the average and 95% red noise standard spectrum)

综上所述,高原湿中心区域冬季净水汽收入、支出 34 a 总趋势在增加,而净水汽收支在减少,这是由于净水汽支出的增加率超过净收入的增加率所致,但三者均存在 4~6 a 左右的周期。

4 冬季高原湿中心区域水汽收支与我国降水的关系

4.1 水汽收支与我国同期降水的相关

由于冬季高原湿中心区域多年平均净水汽收支处于“盈余”状态,为了分析水汽收支与我国降水的关系,将该区域冬季平均净水汽收入、净水汽支出和净水汽收支分别与我国同期降水作相关,结果见图 4。

由图 4a 可以看出,冬季高原湿中心区域净水汽收入与我国同期降水正相关性大的主要 2 个区域:南疆、高原东部—四川盆地,而云贵高原一带出现负相关区,相关系数均达到 0.4 以上,通过 0.01 信度检验,表明冬季高原湿中心区域净水汽收入增加时,南疆、高原东部—四川盆地的降水增加而云贵高原的降水减少。

图 4b(由于净水汽支出为负,图中符号取反)中,高原湿中心区域冬季净水汽支出与我国同期降水相关关系和净水汽收入与我国降水相关关系的很

大不同在于正相关区已不明显,而负相关区域较净水汽收入时有很大的扩展,从西藏高原—云贵高原—华南地区整个我国南方大部分地区均为明显的负相关区域,相关系数超过 0.4,通过了 0.01 的信度检验,表明高原湿中心区域净水汽支出增加时,对我国南方降水的影响增强。

高原湿中心区域冬季净水汽收支与我国同期降水的相关与净水汽收入、支出有很大不同(图 4c),其与我国黄河以南大部分地区降水均呈正相关,正相关性大的区域主要位于高原东部—四川盆地、长江中游地区,相关系数超过 0.4,通过了 0.01 的信度检验。冬季高原湿中心区域净水汽收支与我国降水的正相关关系表明当该区域净水汽收支增加时,由于其多年平均为水汽“盈余”状态,多余的水汽通过漫溢向下游输送,使得我国黄河以南大部分地区的水汽量增加,从而降水也增多。

以上相关分析表明,高原湿中心区域冬季净水汽收入对南疆、高原东部—四川盆地及云贵高原降水有较好的指示性;净水汽支出对西南—华南的我国南方大部分地区降水有较好的指示性;净水汽收支则可表征高原东部及邻近地区、长江中游地区的降水。

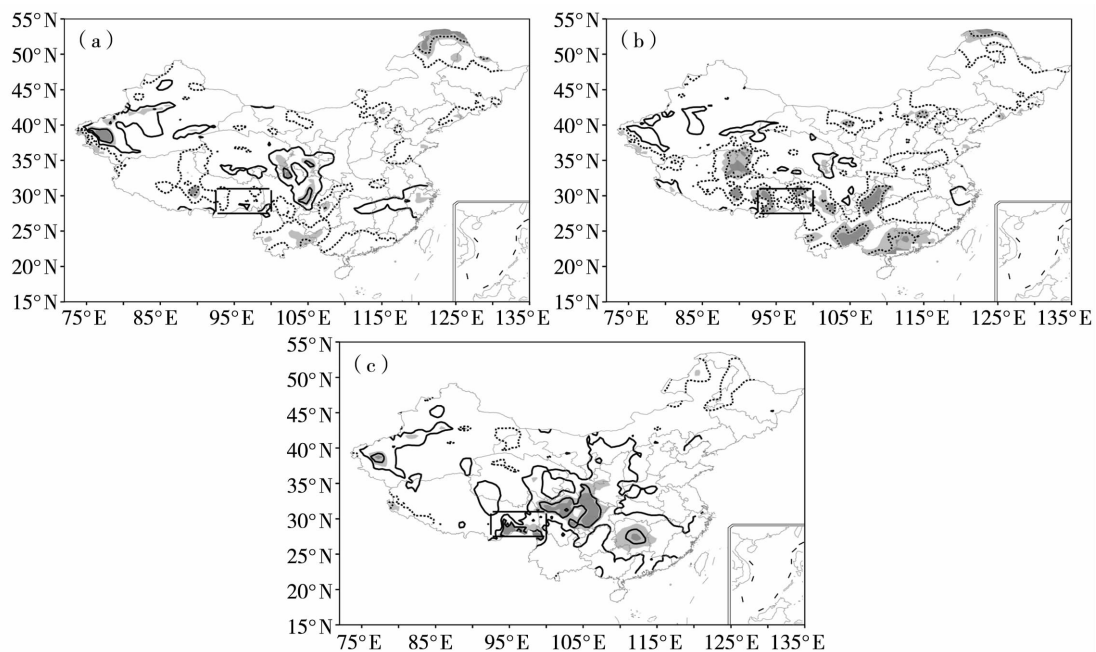


图 4 冬季净水汽收入(a)、净水汽支出(b,符号取反)、净水汽收支(c)与我国同期降水相关(阴影区表示通过 0.05(浅)、0.01(深)的信度检验,等值线间隔为 0.2;方框为高原湿中心区域)

Fig. 4 Correlation between net water vapor input (a), net water vapor output (b, opposite symbol) and net water vapor budget (c) and precipitation in winter of China (Shaded area is over 0.05 (shallow), 0.01 (deep) significance test, respectively, contour interval is 0.2. Square frame for the high water vapor content region)

4.2 水汽收支异常时我国降水及水汽输送差异

研究表明^[2,10]环流是影响某地水汽含量 3 个因子(地理纬度、海拔高度、环流)中唯一变化的,而水汽输送则是环流因子的重要体现。为了进一步讨论冬季高原湿中心区域水汽收支对我国降水影响的环流机制,以净水汽支出为例,分析水汽收支异常时我

国降水及水汽输送差异。对净水汽支出进行标准化处理,超过标准化距平 ± 1.0 确定为异常年,34 a 中水汽支出异常多年为 1983、1993、2004、2007、2011、2012 年,水汽支出异常少年为 1982、1989、1991、1992、1996、2002 年,分别将异常多、少水汽支出年时我国冬季降水距平场、整层水汽通量距平场合成,结果见图 5。

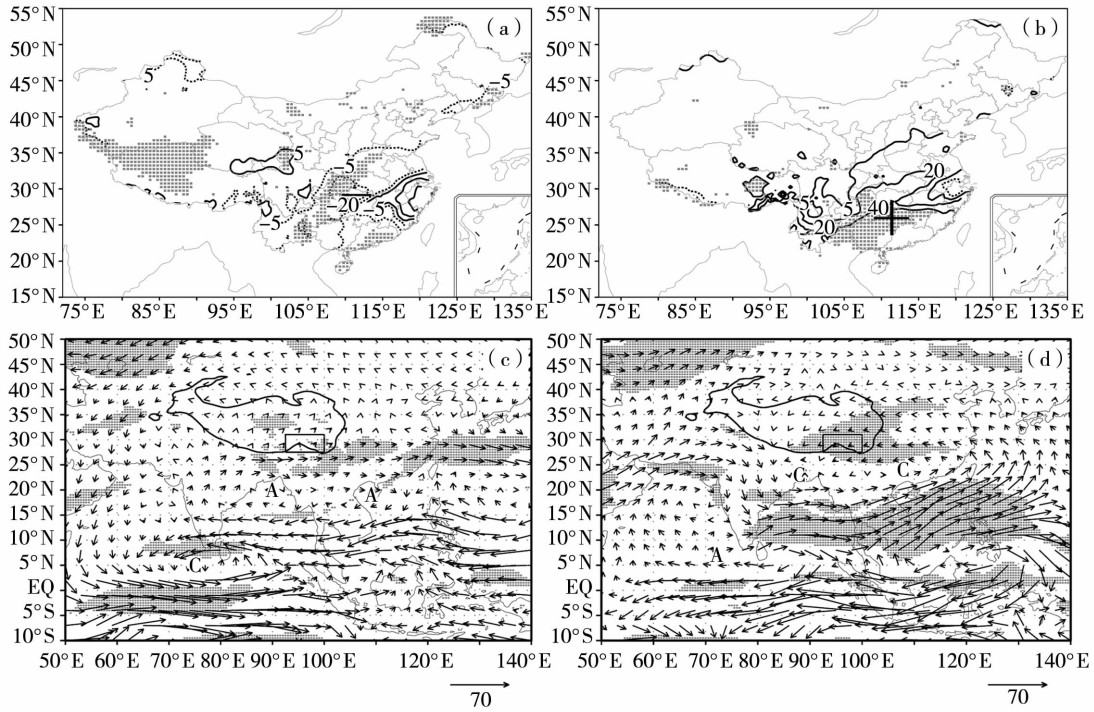


图 5 冬季高原湿中心区域异常多(a,c)、少(b,d)水汽支出年时我国降水距平(a,b,单位:mm)、整层水汽通量距平场(c,d,单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) (打点区表示通过 0.05 的信度检验,方框为高原湿中心区域)

Fig. 5 The anomalous field of precipitation of China (a,b, Unit:mm) and vertically integrated water vapor flux(c,d, Unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

in winter in abnormal more(a,c) and less(b,d) net water vapor output years

(Dotted areas is over 0.05 confidence test, square frame for the high water vapor content region)

由图 5a 看出,高原湿中心区域冬季异常多水汽支出年时,我国南方大部分地区的降水为负距平,降水量均偏少,降水距平的这种分布区域与图 4b 中的负相关区域基本一致。相反,异常少水汽支出年时(图 5b),我国南方大部分地区降水均为正距平,降水量偏多,与图 4b 中的负相关区域也基本一致。

水汽通量距平场上,冬季异常多水汽支出年时(图 5c),阿拉伯海南部存在气旋式环流,25°N 以南的孟加拉湾和我国南海上空存在反气旋式距平环流,这样,从阿拉伯海—孟加拉湾—南海均为偏东风距平,南支槽不明显,不利于水汽从我国冬季水汽主要源地经孟加拉湾向我国南方输送;中纬度 20°N ~ 35°N 的高原及以东地区均为偏西风距平,冬季风偏

强,水汽由强冬季风带到更偏低的纬度;同时,孟加拉湾和南海的辐散水汽输送场不利于降水形成,从而造成我国南方大部分地区降水偏少。相反,异常少水汽支出年时(图 5d),阿拉伯海南部为反气旋式环流,孟加拉湾和我国华南上空为气旋式环流,这样阿拉伯海西北部的西南风距平在高原西侧分支后,其南部经高原南侧在孟加拉湾转为西南风距平,南支槽明显加强,水汽输送通过南支气流也得到加强,此西南风距平持续向东至西太平洋后转向为东南风距平,从而使水汽从源地经孟加拉湾向我国南方输送;中纬度 25°N ~ 40°N 的高原及以东地区均为偏东风距平,冬季风偏弱,使得水汽能够从西太平洋转向后深入输送至我国南方大部分地区;同时,孟加拉

湾和南海的辐合水汽输送场有利于降水形成,因此造成我国南方大部分地区降水偏多。

此外,从图 5c 还可以看到,由于孟加拉湾反气旋式环流左侧西南风距平增强,进入高原湿中心区域的分支后的南支气流北部与南部的偏西风、西南风距平也增强,即该区域的净水汽收入是增加的,相应地净水汽支出也是增加的,表明向下游地区可输送的水汽是增多的,但由于增强的冬季风将水汽带到更偏低的纬度,从而我国南方大部分地区降水偏少,这是净水汽支出与我国南方降水呈负相关的原因,图 5d 则从相反的一面反映了净水汽支出与我国南方降水呈负相关的原因。

综上所述,冬季高原湿中心区域异常多、少水汽支出年时我国降水距平与水汽输送距平场均呈相反分布形式,即水汽支出的强弱反映了水汽输送的强弱及我国降水的分布,体现出水汽收支通过环流对降水产生重要影响。

5 结 论

(1) 冬季在对流层中上层,高原东南部有大气水汽含量的大值区,即湿中心存在。水汽分别从湿中心区域的西边界、南边界输入,且 2 个边界的输入量相当;从东、北 2 个边界输出,且以东边界的输出为主。

(2) 高原湿中心区域冬季净水汽收支多年平均为“盈余”状态,34 a 总趋势是减少的;净水汽收入与支出 34 a 总趋势是增加的,且净水汽支出的增加率超过了净水汽收入的增加率;三者均存在 4~6 a 左右的周期。

(3) 高原湿中心区域冬季净水汽收入与南疆、高原东部—四川盆地的降水呈正相关,与云贵高原的降水呈负相关,即净水汽收入对南疆、高原东部—四川盆地及云贵高原的降水有较好的指示性;净水汽支出的正相关区域不明显,与西藏—云贵—华南的我国南方大部分地区的降水为负相关,即净水汽支出对西南—华南的我国南方大部分地区降水有较好的指示性;净水汽收支则与高原东部及邻近地区、长江中游地区的降水均为正相关,即净水汽收支可表征高原东部及邻近地区、长江中游地区的降水。

(4) 高原湿中心区域冬季异常多(少)水汽支出年时,我国南方大部分地区的降水偏少(多),水汽输送场不(有)利于水汽向我国南方的输送及辐合,即水汽支出的强弱反映了水汽输送的强弱和我国降水的分布,体现出水汽收支通过环流对降水产生重要影响。

参考文献:

- [1] 叶笃正, 高由禧. 青藏高原气象学[M]. 北京: 科学出版社, 1979. 10-42.
- [2] 邹进上, 刘惠兰. 我国平均水汽含量分布的基本特点及其控制因子[J]. 地理学报, 1981, 36(4): 377-391.
- [3] 季国良, 江灏, 柳艳香. 青藏高原及邻近地区的水汽分布特征[J]. 干旱区地理, 1989, 12(1): 16-24.
- [4] 占瑞芬, 李建平. 青藏高原地区大气红外探测器(AIRS)资料质量检验及揭示的上对流层水汽特征[J]. 大气科学, 2008, 32(2): 242-260.
- [5] Shuanggen Jin, Z Li, Cho J. Integrated Water Vapor Field and Multiscale Variation over China from GPS Measurements[J]. J App Meteorol, 2008, 47: 3008-3015.
- [6] 王霄, 巩远发, 岑思弦. 夏半年青藏高原“湿池”的水汽分布及水汽输送特征[J]. 地理学报, 2009, 64(5): 601-608.
- [7] 周顺武, 吴萍, 王传辉, 等. 青藏高原夏季上空水汽含量演变特征及其与降水的关系[J]. 地理学报, 2011, 66(11): 1466-1478.
- [8] 韩军彩, 周顺武, 吴萍, 等. 青藏高原上空夏季水汽含量的时空分布特征[J]. 干旱区研究, 2012, 29(3): 457-462.
- [9] 朱福康. 高原湿池. 陶诗言, 等主编. 第二次青藏高原大气科学试验理论研究进展(二)[M]. 北京: 气象出版社, 2000. 106-112.
- [10] 蔡英, 钱正安, 吴统文, 等. 青藏高原及周围地区大气可降水量的分布、变化与各地多变的降水气候[J]. 高原气象, 2004, 23(1): 1-10.
- [11] 周长艳, 蒋兴文, 李跃清, 等. 高原东部及邻近地区空中水汽资源的气候变化特征[J]. 高原气象, 2009, 28(1): 55-63.
- [12] 梁宏, 刘晶森, 章建成, 等. 青藏高原大气总水汽量的反演研究[J]. 高原气象, 2006, 25(6): 1055-1063.
- [13] 梁宏, 刘晶森, 李世奎. 青藏高原及周边地区大气水汽资源分布和季节变化特征分析[J]. 自然资源学报, 2006, 21(4): 526-534.
- [14] 周长艳, 何金海, 李薇, 等. 夏季东亚地区水汽输送的气候特征[J]. 南京气象学院学报, 2005, 28(1): 18-26.
- [15] 黄福均, 沈如金. 夏季风时期青藏高原地区水汽来源及水汽收支分析[A]. 见: 青藏高原气象科学实验文集编辑组编. 青藏高原气象科学实验文集(二)[C]. 北京: 科学出版社, 1984. 215-224.
- [16] 林振耀, 吴祥定. 青藏高原水汽输送路径的探讨[J]. 地理研究, 1990, 9(3): 33-40.
- [17] 周长艳, 李跃清, 李薇, 等. 青藏高原东部及邻近地区水汽输送的气候特征[J]. 高原气象, 2005, 24(6): 880-887.
- [18] 廖荣伟, 赵平. 季风湿润区夏季水汽收支的年代际变化特征[J]. 应用气象学报, 2013, 24(1): 12-21.
- [19] 陈际龙, 黄荣辉. 亚洲夏季风水汽输送的年际年代际变化与中国旱涝的关系[J]. 地球物理学报, 2008, 51(2): 325-395.
- [20] 周晓霞, 丁一汇, 王盘兴. 夏季亚洲季风区的水汽输送及其对中国降水的影响[J]. 气象学报, 2008, 66(1): 59-70.
- [21] 施小英, 施晓晖, 毛嘉富. 夏季东亚地区水汽输送年代际变化特征及其对中国东部降水的影响[J]. 地理学报, 2009, 64(7): 861-870.
- [22] 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[J]. 高原气象, 2004, 23(6): 912-917.
- [23] 王秀荣, 徐祥德, 王维国. 西北地区春、夏季降水的水汽输送特

- 征[J]. 干旱气象, 2007, 26(4): 749 - 757.
- [24] 何金海, 刘芸芸, 常越. 西北地区夏季降水异常及其水汽输送和环流特征分析[J]. 干旱气象, 2005, 23(1): 10 - 16.
- [25] 李秀珍, 梁卫, 温之平. 华南秋、冬、春季水汽输送特征及其与降水异常的联系[J]. 热带气象学报, 2010, 26(5): 626 - 631.
- [26] 谢坤, 任雪娟. 华北夏季大气水汽输送特征及其与夏季旱涝的关系[J]. 气象科学, 2008, 28(5): 508 - 514.
- [27] 李永华, 徐海明, 高阳华, 等. 西南地区东部夏季旱涝的水汽输送特征[J]. 气象学报, 2010, 68(6): 932 - 943.
- [28] 徐祥德, 陶诗言, 王继志, 等. 青藏高原季风水汽输送“大三角扇型”影响域特征与中国区域旱涝异常的关系[J]. 气象学报, 2002, 60(3): 257 - 267.
- [29] 苗秋菊, 徐祥德, 张胜军. 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, 2005, 63(1): 93 - 99.
- [30] 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[J]. 气象, 2004, 30(12): 44 - 46.
- [31] 施小英, 施晓晖. 夏季青藏高原东南部水汽收支气候特征及其影响[J]. 应用气象学报, 2008, 19(1): 41 - 45.
- [32] 廖荣伟, 赵平. 季风湿润区冬季水汽收支年际及年代际变化特征[J]. 应用气象学报, 2011, 22(6): 641 - 652.
- [33] 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文, 等. 天气学原理和方法(第四版)[M]. 北京: 气象出版社, 2007. 200 - 201.

Water Vapor Budget of High Water Vapor Content Region over Tibet Plateau in Winter and Its Relationship with Precipitation of China

XIE Qiyu^{1,2}, GONG Yuanfa¹, YANG Rong¹

(1. Chengdu University of Technology Information, Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610225, China;
2. Haibei State Observatory of Qinghai Province, Xihai 810200, China)

Abstract: Mean characteristic of atmospheric water vapor content over Tibet Plateau in winter, water vapor budget characteristics of the high water vapor content region and its relationship with precipitation of China were analyzed by using ERA - Interim reanalysis data ($0.5^\circ \times 0.5^\circ$), sonde observation data and monthly mean China rainfall grid data, the results show that the high water vapor content center existed in southeastern area over the Tibet Plateau in winter, which corresponded to the high water vapor content standard deviation center. Water vapor inputed from the south and west boundary and outputed from the east and north boundary of high water vapor content region. Net water vapor budget was “surplus” in the high water vapor content region on average from 1979 to 2012. The trend of net water vapor input as well as net water vapor output was increasing and the trend of net water vapor budget was decreasing, but they all had about 4 - 6 years cycle. Net water vapor input of the high water vapor content region in winter could instruct the precipitation of southern Xinjiang, from eastern Plateau to Sichuan basin and Yunnan - Guizhou Plateau, net water vapor output could instruct the precipitation from southwestern China to south China, while net water vapor budget could reflect the precipitation of eastern Plateau and its adjacent areas, middle reaches of the Yangtze river basin. The precipitation in most regions of southern China was less (more) than normal during anomaly more (less) water vapor output years in the high water vapor content region, and water vapor transmission wasn't (was) favorable to be transported to southern China and converged, this showed that the strength of the water vapor output in this region reflected the strength of water vapor transportation and distribution of precipitation in south China, and it also indicated the way how the water vapor budget effected the precipitation by means of circulating.

Key words: high water vapor content region in winter; water vapor budget; precipitation in China; correlation