中国西北东部地区春季降水及其水汽输送特征*

任宏利

(兰州大学资源环境学院, 兰州, 730000)

张培群　李维京

(中国气象局国家气候中心, 北京, 100081)

高　丽

(中国科学院大气物理研究所 LASG, 北京, 100029)

摘　要

文中使用 1962~ 2002 年逐日降水资料和 NCEP/ NCAR 再分析资料, 考察了中国西北东部地区春季降水及其水汽输送的气候特征和异常变化。分析表明, 该地区春季降水时段集中、变率较大, 具有明显的年际和年代际变化特征; 水汽主要来源于南部季风区, 输送路径集中于青藏高原和偏南方向, 偏东方向输送相对较弱, 而且西太平洋副高和高原对输送路径具有显著影响; 多雨年的异常水汽输送主要来源于偏东方向海洋上的异常向西输送和前期由菲律宾及其北部海区的向北输送; 对异常水汽通量进行分解后发现: 由环流异常引起的平均水汽输送在多数年份的降水正异常过程中起主导作用, 而平均环流对异常水汽的前期输送对于局地降水异常也有一定贡献; 多雨年的环流异常集中表现为高度场上位于中国东北地区的正异常中心, 这有利于偏东、偏南的异常水汽输送到西北东部。结果初步认为西北东部地区的空中水汽资源具有一定的补偿能力和利用潜力, 该地区是维系西北内陆地区空中水资源乃至水分循环过程的水汽输送关键区。

关键词: 春季降水, 水汽输送, 高原, 副热带高压, 空中水资源。

1　引　言

中国西北东部地区位于青藏高原东北侧, 包括中国境内 35°N 以北, 100~ 110°E 区域, 属温带大陆性气候, 并受到夏季风影响, 降水变率较大[1,2]。近年来, 由于沙尘暴频繁发生, 严重影响了社会生活的正常进行, 使得人们对沙尘暴问题的关注日益增强。该地区处于黄河中上游, 地表植被覆盖率低, 沙漠化趋势明显, 区域内的巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠和毛乌素沙漠等是直接影响中国东部地区的重要沙尘源区[3]。因此, 西北东部降水的异常变化不仅直接影响该地区, 而且对中国东部地区日益突出的生态环境和水资源问题也具有重要影响。

西北东部属干旱、半干旱地区, 存在资源性缺水问题, 春旱是制约该地区发展的最重要灾害之一。由于春季气温回升, 蒸发量增加, 农业生产以及植被返青等因素导致用水量剧增, 如何有效地开发和利用空中水资源问题变得尤为迫切。因此, 全面了解该地区降水特征、大气水的来源及水汽输送路径等基本问题是至关重要的, 但有关这方面的研究却很有限。以往很多工作把西北东部作为整个西北地区的一个气候分区, 考察降水时空变化等气候学特征[4~ 11], 对于与降水密切相关的水汽输送问题关注甚少, 而这是构成该地区水分循环过程, 特别是空中水资源状况的关键环节。因此, 研究西北东部地区春季降水及其水汽输送过程的气候特征和异常变化, 探讨空中水资源状况, 对于西部大开发和可持续发展都具有重要的理论价值和现实意义。

2002 年 4~ 5 月西北东部地区降水明显偏多, 是过去 40 a 中异常最为显著的年份之一(图 1 和 3), 本文将结合 2002 年春季个例和历史同期情况, 考察西北东部地区春季降水及其水汽输送的气候特

* 初稿时间: 2003 年 7 月 3 日; 修改稿时间: 2003 年 9 月 5 日。
资助课题: 国家自然科学基金项目(40135020 与 40375025) 和国家气象中心项目(ZK2002G-07)。

征,重点分析降水异常与水汽输送异常的关系以及多雨年水汽输送的异常特征,并初步探讨空中水资源问题。

2 降水特征

本文所用降水量为国家气象中心提供的 1962~2002 年逐日站点资料,后文中出现的旬和月平均都是基于逐日资料整理得到。分析显示,西北东部地区春季的多年平均降水量自东南向西北递减,最大降水中心出现在陕南、陇南一带,大于 200 mm,而沙漠地区降水最少,不足 10 mm。而且,该地区春季降水变率大,从图 1 中可以看出,2002 年 4,5 月份西北东部降水距平百分率(相对于 1962~2001 年的 40 a 平均)均为正,绝大部分地区降水偏多 1~2 倍,5 月甚至更多;而 3 月份大部分地区降水偏少 5~8 成(图略)。

以接近西北东部中心位置的银川站为例,春季平均降水量仅有 32.8 mm,而 2002 年降水量达到约 100 mm,少雨年份则只有几毫米。图 2 给出了银川站与全国其他站点 40 a 春季降水量的相关系数分

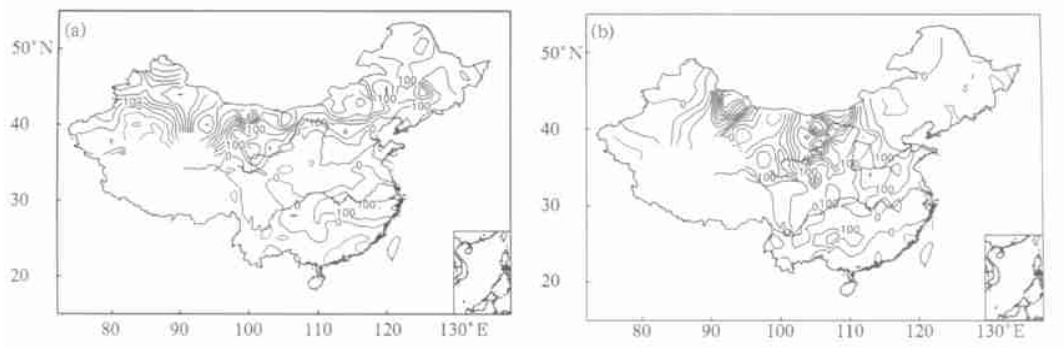


图 1 2002 年 4,5 月降水量距平百分率
(a. 4 月, b. 5 月;等值线间隔为 100)

Fig. 1 Precipitation anomalies percentage in April(a) and May (b) 2002
(The contour interval is 100)

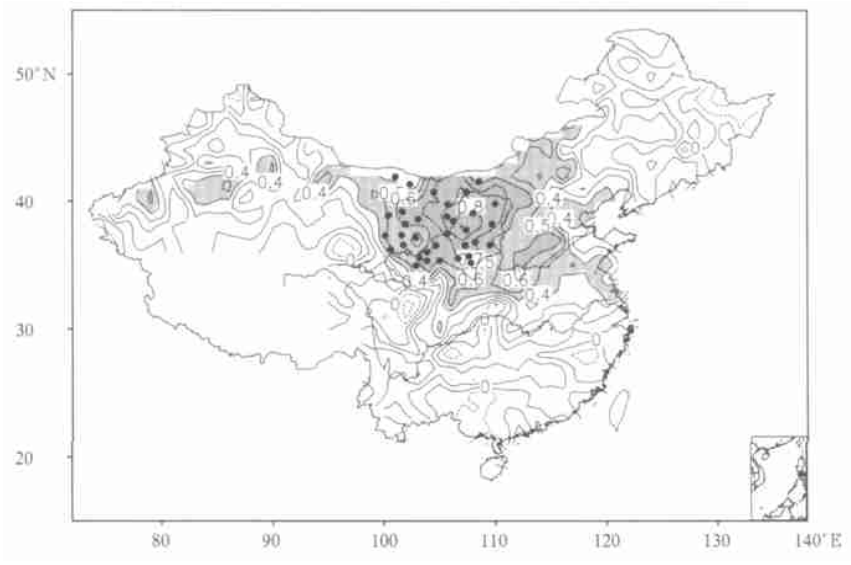


图 2 银川站与全国台站 1962~2001 年春季降水量的相关系数分布
(阴影区为达到 t 检验 99%信度水平的区域;等值线间隔 0.1;
粗实线代表 0.6;图中黑点代表选取的 34 个台站)

Fig. 2 Correlation map between the springtime precipitation anomalies in the Yinchuan station and those of the others over China (1962–2001). The contour interval is 0.1. The thick solid lines denotes 0.6. The grey shading indicates significant at the 99% confidence level with respect to t – test. The 34 stations selected are labeled as maculas

布, 可以看出, 银川站与周围大片地区存在显著相关(相关系数基本在 0.6 以上), 同时也看到, 西北东部与西北其他大部分地区的相关性并不显著, 这也在某种意义上反映出对西北东部单独进行考察的合理性。为了重点突出西北东部地区的整体特征, 本文选取分布比较均匀的 34 个台站(见图 2 中黑点所示), 使用区域平均的降水量序列, 来考察这一地区春季降水及水汽输送特征。

图 3 给出了 1962~ 2002 年区域平均的春季同期降水量异常, 距平是相对于同期气候值。可以看出, 年际变化特征明显, 降水正异常明显大于负异常, 但多雨年的次数较少, 干旱年出现的频率较高, 这也是西北地区降水的一个显著特色。另一方面, 春季降水距平呈现明显的年代际变化: 20 世纪 60 年代雨量偏多, 70 年代进入少雨期, 一直持续到 80 年代中期, 此后又进入多雨期, 90 年代中期雨量相对偏少, 与以往研究一致[6~ 8], 差别在于 1998 和 2002 年降水又异常偏多, 这可能与本文资料较新有关。同时, 应用小波分析[12]考察了春季降水频谱特征, 发现存在准 3~ 5 a 和准 6~ 8 a 周期的年际变化, 而其强度在 70 年代末之前并不明显, 80 年代以后变得较为显著(图略), 这从另一个角度反映了春季降水的年代际变化。

为突出体现降水偏多的时段, 本文把降水比较集中的 4 月下旬和 5 月上、中旬作为整体来考察, 从图 3 中可以看出, 各旬降水异常的贡献在少雨年比较平均, 而在多雨年则差别较大, 20 世纪 60 年代多雨期异常主要在 4 月下旬, 80 至 90 年代则是 5 月上中旬出现降水正异常; 3 旬降水总和的距平与整个春季降水距平的变化非常一致, 只在 1991 年前后差别较大, 相关系数显著达到 0.82, 而且均方差比约为0.61, 原始序列均值比约为 0.49, 这说明从 4 月下旬到 5 月中旬仅 1 个月的降水量是整个春季降水的主要部分, 而其降水异常的变化也较好地反映了春季降水异常的变化特征, 因此, 突出研究这一时段的降水变化及其水汽输送特征, 对于认识西北东部整个春季降水及水汽输送的特征将是非常关键的。

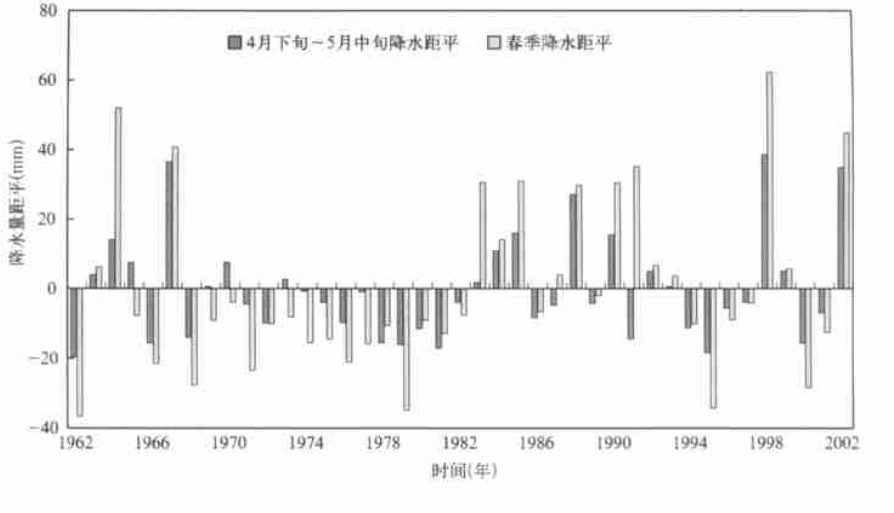


图 3　西北东部区域平均的降水量距平

Fig. 3　Precipitation departures averaged in the region of the Eastern Northwest China. (The black and grey columns denote precipitation departures from the third dekad of April to the second dekad of May and in the whole springtime, respectively)

3　降水与水汽输送的相关分析

以往研究倾向于寻找局地降水量与大气环流、海温和积雪等要素场的相关特征, 并通过外强迫的异常与环流场异常之间的关系, 探讨局地降水量的异常变化特征[1, 2, 4]。但近年来从水循环分量的角度, 考察水汽输送的源区、路径以及汇区特征的异常变化对局地降水的影响, 正逐步引起人们的重视[13~ 15]。水汽主要来源于海洋, 而海温异常在激发大气环流异常的同时, 也势必改变下垫面的水汽蒸发状况, 进而影响到水汽输送过程和水汽汇区降水的分布, 这可以称为"水汽强迫"的异常。局地降

水的变化主要由环流和水汽变化共同作用, 水汽通量综合反映了这两方面的影响, 其散度特征与降水分布则有很好的对应关系。以逐日的 NCEP/NCAR 再分析资料为基础, 图 4 中给出了 1962~2001 年 4 月下旬到 5 月中旬区域平均降水量与同期及前期 4 月份整层积分水汽通量的相关矢量场分布, 其数学形式为

$$\boldsymbol{R}(\lambda, \varphi) = R_{qu}(\lambda, \varphi)\boldsymbol{i} + R_{qv}(\lambda, \varphi)\boldsymbol{j}$$

其中 R_{qu}, R_{qv} 分别为降水量与整层积分水汽通量分量 Q_u 和 Q_v 之间的相关系数, 且二者分别对应向东、向北为正方向。Q_u 和 Q_v 定义为

$$Q_u(\lambda, \varphi, t) = \int_{p_s}^{p_t} q(\lambda, \varphi, p, t)u(\lambda, \varphi, p, t)\mathrm{d}p$$

$$Q_v(\lambda, \varphi, t) = \int_{p_s}^{p_t} q(\lambda, \varphi, p, t)v(\lambda, \varphi, p, t)\mathrm{d}p$$

其中, q, u, v 分别为比湿、纬向和经向风速; p_s 为表面气压, p_t 这里取 300 hPa。

图 4 中最明显的特征就是位于中国东部海洋上的大片负相关区, 无论在同期还是前期, 相关矢量均显著向西, 意味着向西的水汽输送加强时, 西北东部降水偏多, 说明这一区域的水汽输送的异常变化对西北东部春季降水的异常有重要影响; 经向输送相关场中比较显著的区域主要位于东海和贝加尔湖以东地区, 这在前期图上更为明显; 同时, 还应注意到位于菲律宾及其以东洋面上对应于前期向北输送的大片正相关区, 虽然达到显著性的范围较小, 但在后面的分析中将会看到, 这一区域水汽异常输送的作用对西北东部春季降水异常也很重要; 另外, 2 张图中赤道西太平洋暖池区的东风向西输送, 以及同期相关图上索马里急流区与越赤道气流对应的向北向东输送, 都与西北东部春季降水存在着显著相关, 这可能与作为水汽输送背景的大气环流的遥相关特征有关, 而这并不是本文讨论的重点。

由此可见, 与西北东部春季降水异常显著相关

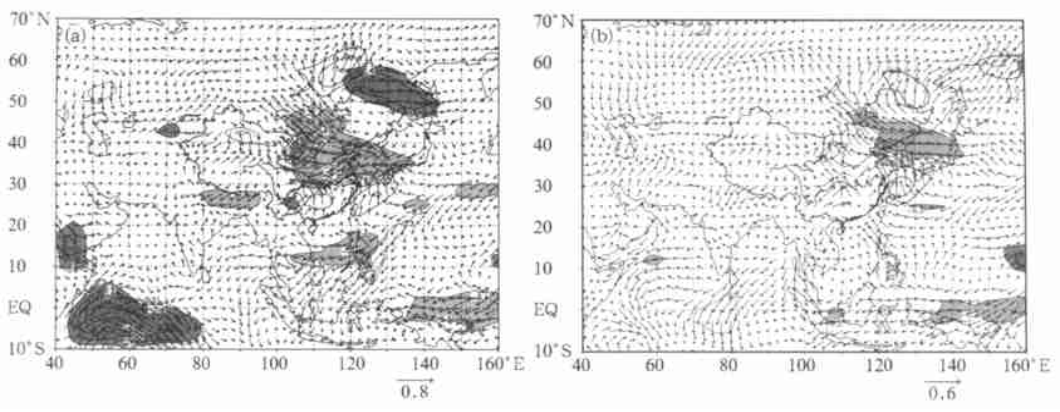


图 4 4 月下旬至 5 月中旬西北东部区域平均降水量与整层积分水汽通量的相关矢量场

(a. 同期, b. 前期 4 月份; 阴影区为 R_{qu} 达到 95% 信度区域; 粗等值线区为 R_{qv} 达到 95% 信度区域; 整层积分取地表至 300 hPa)

Fig. 4 Correlations between the precipitation anomalies averaged in the region of the eastern Northwest China from the third dekad of April to the second dekad of May and the moisture fluxes vertically integrated from surface up to 300 hPa in the same term(a), and the preceding April (b)

(The dark and light shadings, and the solid and dashed lines indicate significant R_{qu} and R_{qv} at the 95% confidence level, respectively)

的水汽输送主要位于大陆东面和南面海洋, 内陆地区也有明显相关, 体现了干冷空气水汽输送对局地降水的异常信号; 在同期相关图上, 西北东部地区纬向输送的显著负相关区与经向输送的显著正相关区相重叠, 且相关矢量呈现辐合特征, 这与降水对应于水汽通量辐合的特征相一致; 在高原南侧的印度季风区, 前期和同期的水汽输送与西北东部降水的相关不很显著。另外, 文中还考察了整个春季降水量与水汽通量的同期相关(图略), 发现主要显著相关区的分布特征与图 4 基本相似, 但在低纬度海洋的相关性偏弱。

4 水汽输送及其异常特征

春季是冬季环流向夏季环流的过渡季节, 4 月

下旬到 5 月中旬正处于大气环流的调整转型时期, 由前面分析可知, 这一时段降水量是整个春季降水的主体, 其变化特征具有代表性, 而本文所关心的又恰恰是与降水过程密切相关的水汽输送问题, 因此, 研究这一降水相对集中时段, 水汽输送的变化特征和物理意义将更加清晰、明确。

另外, 由图 3 可知, 与东部、南部湿润地区同期降水的年际变化特征明显不同, 西北东部春季干旱发生的频率非常高, 所对应的水汽输送偏弱, 输送特征不明显; 而多雨年, 降水的正异常明显大于负异常, 水汽输送过程增强, 特征相对明显; 而且, 除了少数明显的多雨年之外, 少雨年同正常年的界限模糊, 很难分类, 所以对于该地区水汽输送过程及其异常的研究, 将重点考察气候平均和多雨年的状况。

4.1　输送轨迹特征

根据图 3, 并结合 1962~ 2002 年逐年春季降水异常分布图, 挑选出西北东部地区的 10 个多雨年(见表 1)。文中使用一个后向轨迹模型计算了这 10 个多雨年 5 月上中旬到达银川站的二维气块输送轨迹(图 5a)。这里采用的后向轨迹计算方法来源于半拉格朗日积分方案中寻找上游点的思路[16], 即在给定风场演变的情况下, 迭代搜寻到达目标点的气块在上游时刻的出发点位置, 迭代公式如下:

$$\alpha_{ijk}^{n+1} = \Delta t(m^2 U)(X_i - \alpha_{ijk}^{n},\ Y_j - \beta_{ijk}^{n},\ \sigma_k,\ t)$$

$$\beta_{ijk}^{n+1} = \Delta t(m^2 V)(X_i - \alpha_{ijk}^{n},\ Y_j - \beta_{ijk}^{n},\ \sigma_k,\ t)$$

其中, α_{ijk}, β_{ijk} 分别为地图投影面上 x, y 坐标方向的位置变化, U, V 代表投影面风速的 x, y 方向分量, m 为地图放大系数, 投影面采用北半球的极射赤面投影。风场演变资料采用每日 4 次(00, 06, 12 和 18 时)的 NCEP 再分析资料, 其余时次由插值得到。为克服地形的影响, 轨迹模型建立在 σ 坐标系中, 考虑到水汽及其输送过程主要集中在低空, 因此本文使用 $\sigma_k = 0.9$ 层上的二维风场进行轨迹计算, 搜索时间间隔 Δt 取 1 h, n 为迭代步数。当确定上一时刻位置以后, 再针对这一点使用迭代公式继续向上游时刻搜寻, 如此反复进行, 就可得到某一时刻到达目标点的二维气块输送轨迹(图 5)。

图 5a 中共计有 10 a 的 800 条轨迹, 从每个多雨年的 5 月 1 日 00 时到 5 月 20 日 18 时(世界时), 每间隔 6 h 计算一条到达银川站的轨迹, 这样每年有 80 条, 轨迹的时间长度取为 10 d, 同一轨迹上点的间隔是 1 h。可以看出, 到达银川站的气块路径主要来自偏西、高原、偏南和偏东 4 个方向, 按轨迹出发和途经区域的干湿状况, 水汽输送主要集中在: 发源于印度洋及阿拉伯海的跨越高原气流、发源于孟加拉湾、南海和西太平洋海区的偏南气流和来自偏东海洋上的气流, 很明显, 偏南方向的输送更强, 高原和偏东方向则相对较弱; 而偏西气流则主要为局地降水提供冷空气条件。为突出主要路径, 文中计算了在 1° × 1°的网格内落入的轨迹点数, 得到了轨迹点的二维频数分布(图 5b), 对应图 5a 中的轨迹密集区域, 等值线表现为大值区, 并形成突起的"脊", 这在几个主要的输送路径上很明显(如箭头所示)。另外, 值得注意的是, 在陆地上输送轨迹表现出受山脉地形影响的显著特征, 例如, 孟加拉湾和南海水汽流受高原影响发生转向, 并沿高原东侧向北输送, 而

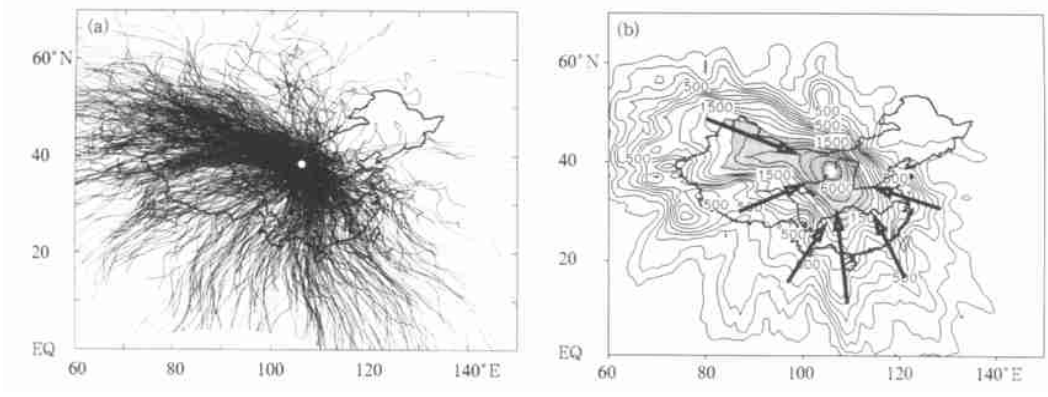


图 5　西北东部地区 10 个多雨年 5 月上中旬到达银川站的气块轨迹图

(a. 轨迹, b. 轨迹点频数)

Fig. 5　Traces map of air mass that arrived at the Yinchuan station during the first and second dekad of May in the 10 rainy years of the Eastern Northwest China

(a. Traces, b. Frequency of trace dots)

偏南和偏东气流轨迹在海洋上呈现出反气旋性弯曲,这与季风爆发过程中,副热带高压位置逐渐的向东向北移动有关。与东亚季风区相比,来自于南亚季风区的输送轨迹相对较少,这在图 5b 中轨迹等值线"脊"的分布可以明显看出,尤其以南海水汽输送最为突出,说明西北东部地区的水汽主要来自于东亚季风区的海洋上。

4.2 水汽通量分析

图 6a 是 4 月下旬至 5 月中旬 40 a 平均的整层积分水汽通量,图中阴影区可以看出,西北东部地区基本是水汽通量的辐合区,这与西北其他地区差别明显,同时也说明该地区的空中水资源具有一定补偿能力和利用潜力,东北和华北北部地区亦有同样的气候特征,为人工利用空中水资源、缓解北方春旱问题提供了事实依据;从印度洋阿拉伯海向东一直到菲律宾洋面存在向北的强水汽输送,这与夏季风有着紧密的联系,特别注意的是,大约在西太平洋副高的西侧存在着向北输送的极大值区;与图 5 相比的显著差别是孟加拉湾的水汽通量高值区和东部洋面较小的输送通量;水汽通量在孟加拉湾周边地区、高原东部的江河源头以及云贵高原上存在较强辐合,表现为水汽通量散度场几个大的负值中心,这说明从同期气候平均角度,与南亚和东亚季风相伴随的高水汽输送,只有较少的一部分能够继续向北输送到达西北东部地区。图 6b 是 2002 年同期水汽输送异常的分布情况,可以看出,与西北东部降水偏多相对应的异常水汽输送在该地区大部分形成辐合特征;广大南部季风区的水汽输送主要呈现出负异常特征,与图 6a 相比通量矢量反向,只有菲律宾及其偏北海区的异常输送与气候平均输送有明显的同向特征;而在图 5 和 6a 中输送较弱的东部海洋区域,其水汽异常通量则显著向西输送到达西北东部,并进一步影响到西北内陆地区。图 6b 的异常水汽输送分布特征,很好地对应了图 4 中与降水显著相关的海区,即东部海洋高相关区有异常纬向向西输送以及南部海洋高相关区有异常经向向北输送;另一方面,也证实了图 4 中印度至孟加拉湾季风区的水汽输送与西北东部降水异常的关系不显著。

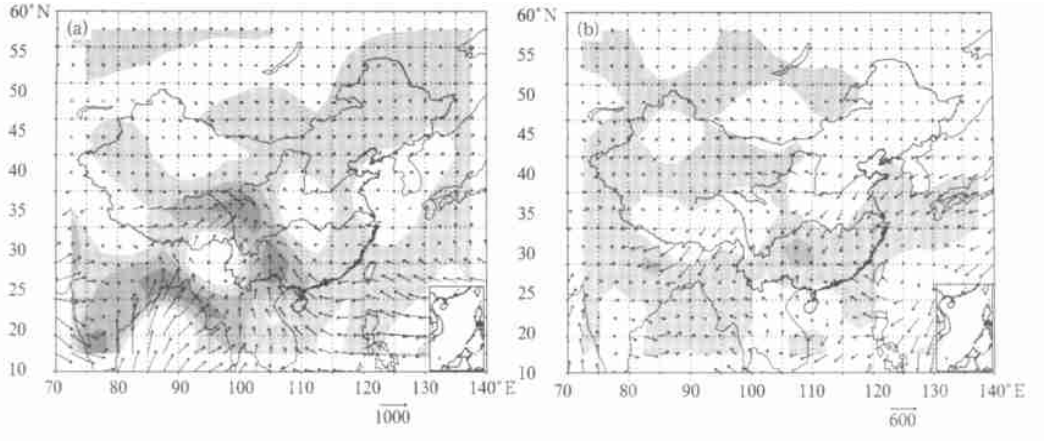


图 6 4 月下旬至 5 月中旬多年平均的整层积分水汽通量(a)和 2002 年异常水汽通量(b)
(阴影区表示水汽通量辐合;整层积分取地表至 300 hPa;单位:kg/ms)

Fig. 6 Multi- year mean moisture fluxes (a) and anomalous moisture fluxes (b) in 2002 vertically integrated from surface up to 300 hPa from the third dekad of April to the third dekad of May
(Convergent areas of moisture fluxes are shaded, unit: kg/ms)

由此可见,西北东部地区春季降水的水汽主要来源于南部季风区,路径集中于高原和偏南方向,东部海洋也有部分输送;广大南部季风区虽然在水汽输送总量上明显强于东面海洋的输送,但由于水汽输送在中途形成强辐合,所以能够到达西北东部的水汽只是很小一部分;值得注意的是,高原大地形和西太平洋副高对水汽输送路径有着极为重要的影响。而从异常输送角度看,2002 年引起该地区降水偏多的异常水汽输送,则主要来源于东部海洋的向西输送和前期菲律宾及其北部海区的向北输送,这两个海区也是影响西北东部降水年际变化的显著高相关区,这显然与多年平均的水汽输送状况有很大差别。

4.3 合成分析

为了综合考察引起西北东部降水偏多的异常水

汽输送特征, 本文对 4 月下旬至 5 月中旬 10 个年(表 1)进行了合成分析, 如图 7 所示, 500 hPa 高度场呈纬向型环流特征, 等值线比较平直, 中国北部为一脊一槽, 水汽通量场结构与图 6a 的多年平均状况非常相似, 最明显的差异是偏东方向发源于东部海洋的水汽输送显著增强, 并与西太平洋副高西侧的偏南水汽在西北东部形成辐合; 而从异常图来看, 东亚大陆 500 hPa 高度场基本为正异常覆盖, 中亚地区为负异常, 说明原始高度场中国北部的一脊一槽偏弱偏浅, 正异常中心位于中国东北地区, 其南面海洋上有很强的异常偏东水汽输送向西到达西北东部, 形成较强的异常水汽辐合, 并进一步影响西北内陆地区, 这与图 6b 中一致, 而且也很好地解释了图 4 中位于东部海洋上的显著高相关区的物理意义, 而菲律宾及其北部海区的异常输送则较弱, 可能与这里是同期合成有关; 长江流域以及中国东海亦有强辐合, 可见西北东部在春季多雨年的异常水汽输送特征与长江流域联系密切。另外, 图 6 中分析的南部季风区的原始输送与异常输送特征存在明显反差的情形, 在多雨年合成图上也有明显表现, 这进一步证实了前面分析的结果。我们同时还计算了 10 个多雨年中东风异常和北风异常的频次分布(图略), 发现东部海洋区域可以有 9 a 出现东风异常, 范围从海洋一直到西北东部, 菲律宾及其北部海区的北风异常发生也较多, 可达 7 a, 这从另一角度说明这两个地区与西北东部春季降水异常关系密切。

由此可见, 位于东部海洋的异常水汽输送向西直达西北东部, 形成较强的异常水汽辐合, 并进一步深入影响到西北内陆地区; 高原东侧至华南地区也有向北的异常水汽输送, 并与偏东异常水汽在西北东部汇合, 沿着高原东北侧一河西走廊进入西北内陆。因此, 由于青藏高原的地形作用, 使得西北东部地区成为海洋暖湿气流进入西北内陆的"门户"和水汽输送的关键区, 这对维系西北地区空中水资源乃至水分循环过程具有重要作用。

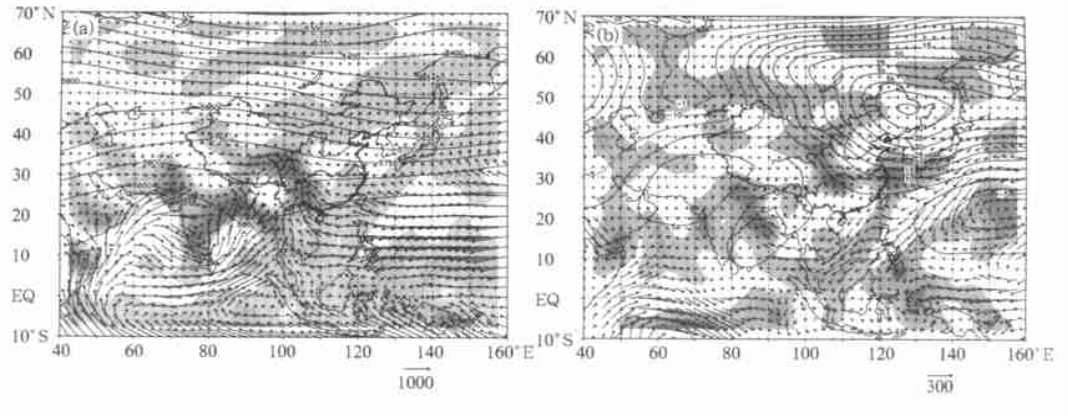


图 7　西北东部地区 4 月下旬至 5 月中旬 10 个多雨年的同期合成场

(a. 10 a 合成的 500 hPa 高度场(等值线, 单位: gpm)和整层积分水汽通量(矢量场, kg/ms), b. 10 a 合成的 500 hPa 高度场异常(等值线, 单位: gpm)和整层积分水汽通量异常(矢量场, kg/ms); 整层积分指从地面到 300 hPa)

Fig. 7　Simultaneous composite maps from the third dekad of April to the second dekad of May in the 10 rainy years of the eastern Northwest China: (a) 500 hPa height field (contours) and vertically integrated moisture fluxes (vectors), and (b) 500 hPa height anomalies (contours) and vertically integrated anomalous moisture fluxes (vectors).

5　异常水汽通量的分解

按照定义, 水汽通量异常应该包括由环流异常引起的和由水汽异常引起的两部分组成, 前面的讨论使我们对多雨年异常水汽输送的同期平均状况有了一定认识, 但对于环流或水汽异常部分对整个异常的贡献情况还有待于进一步考察。一般地, 水汽通量异常可以分解为两部分(忽略二阶小量):

$$(q\boldsymbol{V})' \approx \overline{q}\boldsymbol{V}' + q'\overline{\boldsymbol{V}}$$

右边第一项表示在气候干、湿区之间由异常环流引起的输送; 第二项表示平均环流对异常水汽的输送。前一项主要表征在环流发生异常时, 水汽从海洋输送到陆地、干区输送到湿区的过程, 这是在以往研究中被主要关注的输送问题, 但也容易将其与异常水

汽通量的整体相混淆; 而第二项在东亚地区主要表现在平均大气环流上, 如西风基本气流等, 因此在观念上常常被忽视, 特别是对西北东部干旱、半干旱地区而言。

为深入了解多雨年异常水汽输送的上述两部分的变化情况, 表 1 中列举了西北东部地区 4 月中旬至 5 月上旬 10 个多雨年在同期以及前期(4 月份) 的两种输送水汽通量的散度情况。可以看出, 在多数年份, 无论是前期还是同期, 由环流异常引起的平均水汽输送在西北东部地区以辐合特征为主, 与总输送异常的前期和同期进行比较, 发现散度符号完全一致, 这说明由环流异常引起的平均水汽输送在总的异常水汽输送中起主导作用, 它在多雨年的变化情况能够代表总异常输送的变化; 相比之下, 平均环流对异常水汽的输送则要复杂一些, 前期以辐合特征为主, 但有 4 个年份例外, 同期的输送主要表现为辐散特征, 这说明在西北东部盛行偏西风的情况下, 在其上游的干旱地区能否有异常水汽扰动出现并发展, 就成为这种输送对局地降水异常贡献大小的必要条件。另外, 还可看到, 大多数多雨年在前期和同期的总水汽通量异常均表现为辐合特征, 表明这些年份的异常环流形势以及相应的水汽输送状况会很相似, 接近于多雨年的合成形势(图 7) ; 而 1988 和 1990 年均表现为辐散特征, 1985 年同期为辐散, 这就启示这几年降水异常的成因可能比较特别, 与图 7 的差异会很大, 本文将这 3 a 和另外 7 a 分别进行合成分析, 结果验证了这种的推断, 后者与图 7 基本一致, 而前者几乎完全相反(图略) , 这有待于进一步分析。

表 1 西北东部地区 4 月下旬至 5 月中旬多雨年同期以及前期(4 月份) 水汽通量异常的区域平均散度

Table 1 Regional averaged divergences of simultaneous and preceding (April) anomalous moisture fluxes from the third dekad of April to the second dekad of May in the rainy years of the eastern Northwest China

		1964	1965	1967	1970	1984	1985	1988	1990	1998	2002
$\mathrm{div}(\bar{q}\boldsymbol{V}')$	前期	−	−	−	−	−	−	+	+	−	−
	同期	−	−	−	−	−	+	+	+	−	−
$\mathrm{div}(q'\bar{\boldsymbol{V}})$	前期	−	−	+	+	−	+	+	−	−	−
	同期	+	−	+	+	+	+	−	−	+	+
$\mathrm{div}(q\boldsymbol{V})'$	前期	−	−	−	−	−	−	+	+	−	−
	同期	−	−	−	−	−	+	+	+	−	−

注: 区域平均的范围是 35~ 42.5°N 和 100~ 110°E; div( ) 为散度算子;“ − ” 和“ + ” 分别指散度为负和正; 水汽通量异常为从地表到 300 hPa 的整层积分。

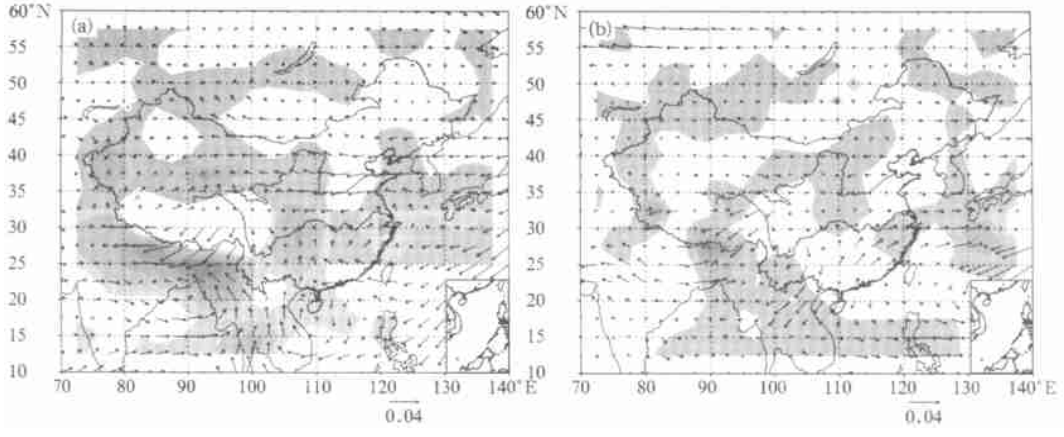


图 8 2002 年 4 月下旬至 5 月中旬 850 hPa 两种异常水汽通量矢量场

(a. 同期异常环流对平均水汽的输送, b. 前期(4 月份) 平均环流对异常水汽的输送; 阴影区表示异常水汽通量矢量的辐合; 单位: kgm/ (kgs))

Two kinds of anomalous moisture flux vector fields (unit: kgm/ (kgs)) at 850 hPa from the third dekad of April to the second dekad of May in 2002: (a) mean moistures transported by simultaneous anomalous circulation and (b) anomalous moistures transported by mean circulation in the preceding April. The shaded areas indicate the convergence of anomalous moisture flux vectors

为了对比上述结果, 以 2002 年两种异常水汽通量个例加以说明(图 8) , 两种异常水汽通量分别在同期和前期形成较强辐合; 在同一标尺下, 环流异常的平均水汽输送明显更强, 特别是图 8a 中, 东部海洋的异常水汽向西输送直达西北东部。

因此, 由环流异常引起的平均水汽输送在多数年份的降水正异常中起主导作用, 而平均环流对异常水汽的前期输送亦有一定贡献, 当然, 这两种输送之间不应是完全割裂的, 会存在着某种联系, 并相互影响; 另外, 从前期和同期两种异常输送情形在不同的多雨年所表现出的差异来看, 影响水汽输送出现异常的机制在某些年份会有明显不同, 同时也启示人们, 除了水汽输送异常之外, 还存在其他相关的影响因素, 对该地区的降水异常发挥重要作用, 这有待于进一步的认识和研究。

6　结　论

西北东部地区对中国东部的天气气候与环境变化有着重要影响, 研究季节转换时期的水汽输送特征及其异常变化与该地区降水异常的关系, 具有重要的理论价值和现实意义。为此, 本文着重分析了该地区春季降水和水汽输送的基本特征和异常变化, 考察了降水异常和水汽输送异常特征的关系, 并初步探讨了对西北空中水资源的影响。主要有以下结果:

春季降水变率较大, 4 月下旬至 5 月中旬这一时段降水量是整个春季降水的主要部分, 而其异常变化也能较好地反映春季降水异常的变化特征, 后文重点考察了这一时段降水及其水汽输送特征; 西北东部地区春季降水存在着明显的年际和年代际变化。

西北东部地区春季降水的水汽主要来源于南部季风区, 输送路径集中于高原和偏南方向, 偏东方向输送较弱, 南部季风区输送水汽在中途形成强辐合, 能够到达西北东部的水汽较少, 而且, 西太平洋副热带高压和青藏高原对输送路径具有显著影响。另一方面, 多雨年的异常水汽输送, 主要表现为东部海洋的向西输送和前期菲律宾及其北部海区的向北输送, 内陆和低纬海洋也有显著相关信号, 而与南亚季风区关系不显著。

对多雨年的合成分析更加表明偏东方向的水汽输送异常与西北东部降水异常之间关系密切, 其环流背景是, 中国东北地区高度场的正异常中心有利于偏东、偏南的异常输送。最后, 对异常水汽通量进行分解发现: 由环流异常引起的平均水汽输送在多数年份的降水正异常过程中起主导作用, 平均环流对异常水汽的前期输送对于局地降水异常也有一定贡献。

文中还初步探讨了有关空中水资源问题, 发现 4 月下旬至 5 月下旬西北东部连同华北北部和东北是气候平均的水汽辐合区, 春季空中水资源应具有一定的补偿能力和利用潜力; 高原大地形作用, 使得西北东部成为海洋暖湿气流进入西北内陆的“门户”, 是维系西北内陆地区空中水资源乃至水循环过程的水汽输送关键区。当然, 本文只是定性探讨, 有关西北东部乃至整个西北地区的空中水资源问题, 将在进一步的工作中重点考虑。

致谢: 感谢丑纪范院士提供的帮助。

参考文献

1　刘晓东. 中国西部区域气候变化及其相关问题的研究. 兰州: 兰州大学出版社, 1995. 1~ 10

2　孙国武. 中国西北干旱气候研究. 北京: 气象出版社, 1997. 384pp

3　张小曳. 亚洲粉尘的源区分布、释放、输送、沉降与黄土堆积. 第四纪研究, 2001, 21(1) : 19~ 29

4　Zhu Bingyuan, Li Dongliang. The relationship between tropical Pacific sea surface temperature and summer rainfall over northwest China. Acta Meteor Sinica, 1992, 6(4) : 470~ 478

5　李栋梁, 谢金南, 王文. 中国西北夏季降水特征及其异常研究. 大气科学, 1997, 21(3) : 331~ 340

6　蔡晓军, 李栋梁, 姚辉. 中国西北地区春末夏初降水异常的时空演变特征. 高原气象, 1998, 17(2) : 170~ 181

7　韦志刚, 董文杰等. 中国西北地区降水的演变趋势和年际变化. 气象学报, 2000, 58(2) : 234~ 243

8　王澄海等. 西北春季降水的基本和异常特征. 兰州大学学报, 2001, 37(3) : 104~ 111

9　董文杰, 韦志刚, 丑纪范. 一种改进我国汛期降水预测的新思路. 高原气象, 2001, 20(1) : 36~ 40

10　任宏利, 王澄海, 邱崇践等. 利用变分法计算西北典型干旱区地表通量的研究. 大气科学, 2004, 28(2) : 269~ 277

11　郑益群, 于革等. 植被变化对中国区域气候的影响 II: 机理分析. 气象学报, 2002, 60(1) : 17~ 30

12　Torrence C, Compo G P. A practical guide to wavelet analysis. Bull Amer Meteor Soc, 1998, 79: 61~ 78

13 黄荣辉, 张振洲等. 夏季东亚季风区水汽输送特征及其与南亚季风区水汽输送的差别. 大气科学, 1998, 22(4): 460~ 469
14 徐祥德, 陶诗言等. 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. 气象学报, 2002, 60(3): 257~ 266
15 徐祥德等. 长江流域梅雨带水循环过程"源—汇"结构. 科学通报, 2003, 48(21): 2288~ 2294
16 Robert A. A semi-Lagrangian and semi-implicit numerical integration scheme for the primitive meteorological equations. J Meteor Soc Japan, 1982, 60: 319~ 325

CHARACTERISTICS OF PRECIPITATION AND WATER VAPOR TRANSPORT DURING SPRINGTIME IN THE EASTERN NORTHWEST CHINA

Ren Hongli

(College of Resources and Environment, Lanzhou University, Lanzhou 730000)

Zhang Peiqun Li Weijing

(National Climate Centre, China Meteorological Administration, Beijing 100081)

Gao Li

(LASG, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract

The basic anomalous characteristics of the precipitation and water vapor transport during springtime in the eastern Northwest China (ENWC) were investigated by using daily precipitation data from NMC and NCEP/NCAR reanalysis data from 1962 to 2002. The analysed results show that, with the significant interannual and interdecadal variability features, the springtime precipitation in ENWC is comparatively concentrative and the water vapor is mostly from the southern monsoon region via three basic approaches including the Qinghai- Tibet Plateau, south, and east directions. Also, the anomalous water vapor is recognized by the westward transportation from eastern sea area, and the previous northward transport from the Philippines and its neighboring ocean. Furthermore, through decomposition of anomalous water vapor transport find that the averaged water vapor transport induced by general circulation anomaly plays an leading role in most positive precipitation anomaly years and the anomalous water vapor transported previously by the basic general circulation is important to local rainfall. The farther analysis shows that a positive anomaly center of general circulation in height field lying in the region of Northeast China helps to the easterly and southerly water vapor transport anomalies in rainy years. At the Rametiine, it's also found that air water resource in ENWC has certain petential of compensation and utility, and ENWC is a key region of water vapor transport which keeps air water resource and water cycle process in Northwest China.

Key words: Springtime precipitation, Water vapor transport, Plateau, Subtropical high, Air water resource.