

文章编号: 1000-0240(2012)02-0311-08

北大西洋涛动对青藏高原夏季降水的影响

刘焕才, 段克勤*

(中国科学院 冰冻圈科学国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 利用青藏高原中东部 1961—2004 年 60 个气象台站夏季(6—8 月)降水资料, 通过旋转经验正交函数分解发现青藏高原夏季降水存在南北反向变化的空间模态, 分析表明这种变化模态与北大西洋涛动(NAO)密切相关. 利用 NCEP/NCAR 再分析资料进行环流场分析, 探讨了 NAO 对青藏高原这种降水空间变化模态的影响机制. 结果表明: 强 NAO 年份时, 高原北部水汽输送通量强度增强, 水汽辐合增强, 而高原南部水汽输送通量强度减弱, 此时高原切变线位置明显偏北, 正是在这种水汽输送和环流形式配置下使得高原北部降水偏多而高原南部降水偏少; 在弱 NAO 年份, 上述情况基本相反.

关键词: 青藏高原; 降水; 北大西洋涛动

中图分类号: P461+.2 **文献标识码:** A

0 引言

降水是青藏高原上水分循环最重要的因素, 它的多寡不仅直接决定着长江、黄河上游的径流, 而且对当地的生态景观和生态系统变化起决定性作用. 因而青藏高原降水变化受到人们的广泛关注, 有关青藏高原降水的空间变化趋势及变化机理的研究已经做了不少, 相关研究成果极大地扩展和丰富了对青藏高原降水变化的认识^[1-15].

西风带和季风是影响青藏高原气候最主要的两大环流系统, 这两大环流相互作用, 通过环流调整影响青藏高原降水的变化, 西风带和季风的强弱变化直接控制其各自影响的范围. 影响西风带强弱变化的一个重要因素是北大西洋地区的气压场, 而大西洋地区大气活动的主要模态是冰岛低压与亚速尔高压之间气压变化的反相关现象, 这一现象被称为北大西洋涛动(North Atlantic Oscillation, NAO). 当亚速尔气压偏高时, 冰岛气压偏低, 此时北大西洋涛动变强, 中纬度西风带加强; 而当亚速尔气压偏低时, 冰岛气压偏高, 此时北大西洋涛动变弱, 中纬度西风带偏弱^[16-17]. 冰岛低压与亚速尔高压

之间翘翘板形式的变化, 直接控制西风带的强弱, 进而影响到下游青藏高原地区的气候变化. 早期对 NAO 的研究主要集中于北大西洋地区^[17-23], 研究发现 NAO 对北半球的气候变化都有重要影响^[24-25]. 近年发现 NAO 对中国气候变化也有重要作用^[26-30]. 但在青藏高原地区, 至今仍然缺乏诸如 NAO 与青藏高原夏季降水之间存在什么样的关系, NAO 的变化对青藏高原夏季降水会产生什么作用, 而这方面的研究恰恰是认识青藏高原降水变化机理及其预测的重要基础.

本文的目的是首先利用青藏高原台站降水资料, 分析青藏高原降水变化的主要空间模态, 进而探讨 NAO 对高原降水的空间模态的关联性, 最后利用 NCEP/NCAR 再分析资料, 从大气环流角度来探讨 NAO 对青藏高原夏季降水的影响.

1 资料与方法

1.1 资料

(1) NCEP/NCAR 再分析月平均资料, 空间分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$. 考虑到 300 hPa 以上的水汽含量已经很少, 故采用 1961—2004 年 1000、925、

收稿日期: 2011-09-16; 修订日期: 2012-02-08

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2010CB951703); 国家自然科学基金项目(40971290); 中国科学院西部之光项目(O928701001)资助

作者简介: 刘焕才(1986—), 男, 山东潍坊人, 2009 年毕业于山东师范大学, 现为在读硕士研究生, 主要从事全球变化研究.

E-mail: liuhuancai123@163.com

* 通讯作者: 段克勤, E-mail: kqduan@lzb.ac.cn

850、700、600、500、400、300 hPa 共 8 个气压层的逐月比湿 ($g \cdot kg^{-1}$)、纬向风速 ($m \cdot s^{-1}$)、经向风速 ($m \cdot s^{-1}$)、垂直风速 ($m \cdot s^{-1}$) 以及地表气压 (hPa) 资料^[31]。NCEP/NCAR 再分析资料在研究青藏高原大气环流场变化方面已得到广泛应用^[32-39]。

(2) 青藏高原中东部的 60 个国家标准气象台的逐月降水资料。图 1 为台站分布及所研究的区域, 图中气象台站分布相对比较均匀。

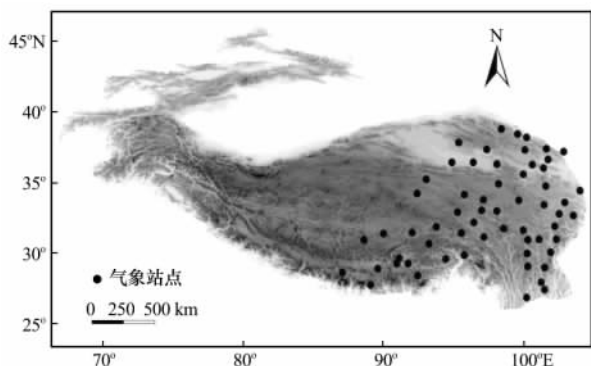


图 1 青藏高原中东部气象台站分布

Fig. 1 Map showing the locations of the meteorological stations on the Tibetan Plateau

1.2 方法

1.2.1 水汽输送通量

水平输送通量表示单位时间内流经单位垂直截面积的水汽质量, 水汽输送通量越大越有利于降水。由下式计算水汽输送通量:

纬向计算公式,

$$Q_u = 1/g \int_{p_z}^{p_s} q u dp \quad (1)$$

经向计算公式,

$$Q_v = 1/g \int_{p_z}^{p_s} q v dp \quad (2)$$

式中: u 和 v 为纬向风分量和经向风分量; p_s 为地面气压; p_z 为高 z 处的气压; g 为重力加速度; q 为比湿。

1.2.2 水汽输送通量散度

水汽输送通量散度表示水汽在某一地区辐合或辐散状态的物理量。正值表示水汽辐散, 不利于降水, 并且绝对值越大越不利于降水; 负值表示水汽辐合, 有利于降水, 并且绝对值越大越有利于降水。由下式计算:

$$D = \partial Q_u / a \cos \phi \partial \lambda + \partial Q_v / a \partial \phi \quad (3)$$

式中: D 水汽输送通量散度; a 为地球半径; ϕ 和 λ

分别为纬度和经度。

2 青藏高原夏季降水空间变化模态

如图 1 所示, 青藏高原绝大多数台站位于高原中东部, 而西部台站极为稀少, 为了便于对高原降水做时空分析, 选择 $90^\circ E$ 以东分布相对均匀、记录比较连续的 60 个台站为研究对象。已有研究利用经验正交函数分解 (EOF) 探讨了青藏高原降水的空间变化^[11], 但在进行 EOF 展开时, 因所取研究区域不同, 而得到的特征向量也不同; 另一方面, 取样长度不同, 对反映真实分布结构的相似度也会不同。而 EOF 的上述局限性在使用旋转经验正交函数分解 (REOF) 时可以避免^[40]。因此本文利用 REOF 分析来确定高原夏季降水的空间变化模态。

根据 North 等^[41]提出的特征值误差范围确定方法, 对青藏高原夏季降水进行 EOF 分析, 再对其前 3 个特征向量进行 REOF 分析 (表 1, 图 2), 从表 1 可以看出前 3 个 REOF 特征向量累计方差贡献已达 44.66%, 已明显反映出青藏高原降水的局地变化特征。

表 1 青藏高原夏季降水 REOF 分析后的旋转特征向量方差贡献及累计方差

Table 1 The cumulative variances of the REOF analysis

名称	REOF1	REOF2	REOF3
方差贡献%	18.35	15.41	10.90
累计方差贡献%	18.35	33.76	44.66

第一旋转特征向量占总方差的 18.35%, 显著区大致位于唐古拉山以南, 显示唐古拉山以南地区降水在空间变化上一致 (图 2a)。第二旋转特征向量占总方差的 15.41%, 显著区大致位于唐古拉山与昆仑山之间 (图 2b)。第三旋转特征向量占总方差的 10.9%, 显著区位于昆仑山以北地区 (图 2c)。由此, 根据降水空间变化特征, 把青藏高原中东部划分为三类降水空间分布型: 高原南部型、高原中部型和高原北部型。

由于台站分布比较均匀, 对位于各显著区内的台站降水进行平均, 得到各分布型区内平均降水的曲线 (图 3)。为了强调年际时间尺度上不同分区降水的空间变化, 对三个典型区内的降水曲线去除线性趋势后求相关, 从图 3 和表 2 可以看出, 高原南北部降水存在明显的反相位变化关系 ($r = -0.46$, 达到 99.9% 的信度)。由此可见高原南北部降水反

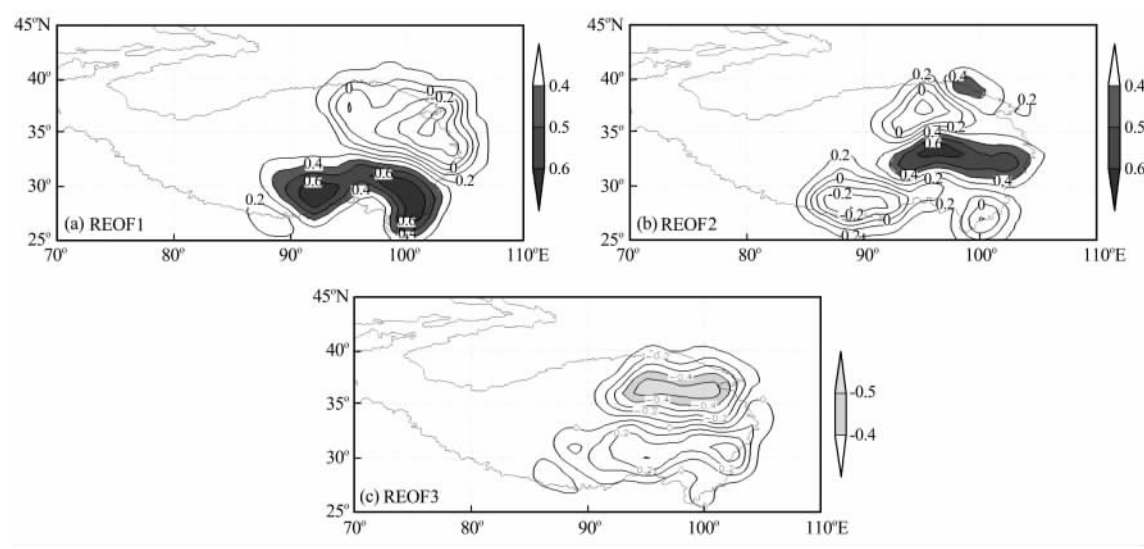


图 2 青藏高原夏季降水 REOF 分解后的第一旋转特征向量场 (REOF1)(a)、第二旋转特征向量场 (REOF2)(b)、第三旋转特征向量场 (REOF3)(c)
图中阴影部分为信度达到 99% 的降水异常区域

Fig. 2 The first three REOFs of summer precipitation on the Tibetan Plateau

表 2 年际时间尺度上青藏高原三个典型区降水之间的相关性系数

Table 2 Correlation coefficients among the precipitation time series in the three typical regions

	高原南部	高原中部
高原中部	0.28	
高原北部	-0.46 *	0.11

注：* 表示达到了 99.9% 的信度。

表 3 三类降水分布型与西南季风指数、东南季风指数及北大西洋涛动指数去除趋势化的相关系数

Table 3 Correlation coefficients of the three precipitation series with the South Asian summer monsoon index (SASMI), the East Asian summer monsoon index (EASMI) and the North Atlantic Oscillation index (NAOI), detrended

	高原南部降水	高原中部降水	高原北部降水
SASMI	-0.22	-0.30	0.10
EASMI	-0.22	-0.28	0.05
NAOI	-0.64 *	-0.26	0.44 *

注：* 表示达到了 99.9% 的信度。

相位变化是高原夏季降水变化的最主要空间模态。

3 NAO 对青藏高原夏季降水南北差异的影响

西南季风、东南季风和西风带是影响青藏高原

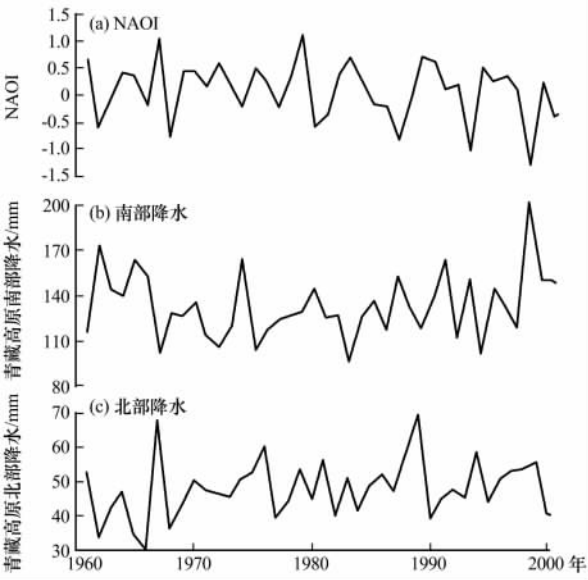


图 3 高原南北区夏季降水及 NAOI 变化

Fig. 3 The time series of the southern and northern summer precipitation and NAOI

夏季降水的主要环流系统^[42-45, 13]，将上述 3 条降水曲线去除线性趋势并与去除线性趋势后的夏季西南季风指数 (SASMI)、东南季风指数 (EASMI)^[46]和 NAO 指数 (NAOI)^[47]进行相关分析 (表 3)，从中可见在年际尺度上，同季风指数相比，NAOI 与高原南北部降水之间存在更为显著的相关性，NAOI 与高原南北部降水之间的相关系数分别为 -0.64 和 0.44，均达到 99.9% 的信度。这点从图 3

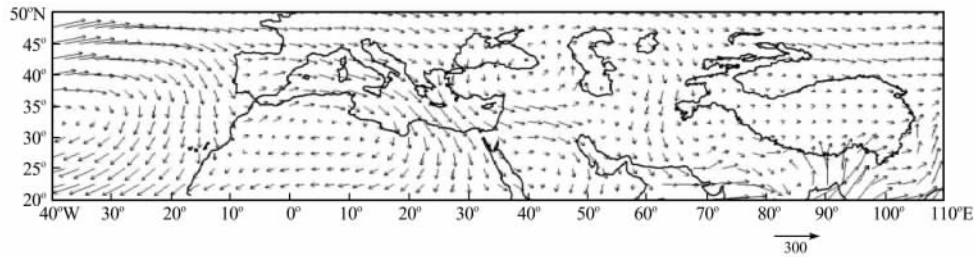


图 4 夏季(6–8)多年平均(1961–2004)整层大气水汽输送通量流场(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 4 The distribution of summer mean water vapor flux, averaged over 1961–2004 (unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

能更直观的表现出来,即当 NAO 为高指数年时,高原北部降水偏多,而高原南部降水偏少;当 NAO 为低指数年时,高原北部降水偏少,而高原南部降水偏多.因此 NAO 与高原降水南北差异的空间变化模态有着密切联系,探求 NAO 与青藏高原降水之间的关系,有助于认识青藏高原降水的空间变化机理.

3.1 青藏高原夏季多年平均水汽输送特征

图 4 为多年夏季平均整层大气水汽输送通量图,由图可以发现从北大西洋到青藏高原的西风带路径上水汽的运移特点.首先水汽在北大西洋上空含量最大,量值为 $240 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,然后在欧非沿岸产生了 3 个路径上的分流,南支沿加纳利寒流路径向赤道方向运移,中支沿西风带向东运移,北支沿岸北上进入北冰洋区域.中支在经过地中海时水汽得到了补给,然后继续向东输送,由于遇到西北-东南方向的高大的伊朗高原的阻挡,中支又产生了分流,一支沿高原边缘向赤道流去,量值较大;而另一支由伊朗高原上空和北边继续东行,可以看出水汽通量值已很小.量值已经降到了 $40 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 左右,这支气流在青藏高原西部一部分翻越青藏高原;另一部分分成南北两支,南支与西南季风气流在青藏高原南部相遇,进而共同对青藏高原的降水产生影响.由此可见,北大西洋气候区与青藏高原气候变化通过西风带相联系起来,NAO 通过影响西风带而间接影响了青藏高原上的环流变化和水汽输送.

3.2 青藏高原夏季 NAO 强、弱年份水汽输送特征对

由上面的分析可知,NAO 与青藏高原降水的空间分布密切相关.为了进一步分析 NAO 对青藏高原降水的影响机理,选取 NAOI 典型高值年和低值年做合成分析,对青藏高原上的水汽输送通量、水汽输送通量散度及切变线的变化进行讨论,探讨 NAO 对青藏高原夏季降水的影响.

定义 NAOI 大于一个标准差的年份为北大西洋涛动强年,而小于一个标准差的年份为北大西洋涛动弱年.北大西洋涛动强年为 1967、1972、1976、1979、1983、1994、1996 年;而北大西洋涛动弱年为 1962、1980、1987、1993、1998 年.

在青藏高原地区对 NAO 强年份和弱年份水汽输送通量求距平(图 5),由图可见,在北大西洋涛动强年份(图 5a),高原北部水汽输送通量强度增强,而高原南部水汽输送通量强度减弱;而在北大西洋涛动弱年份(图 5b),情况基本相反,高原北部水汽输送通量强度减弱,而高原南部水汽输送通量强度增强.同时可以发现北大西洋涛动强年水汽输送通量的变化程度明显没有北大西洋涛动弱年水汽输送通量的变化程度剧烈.

水汽输送通量散度表征水汽的辐合辐散情况.

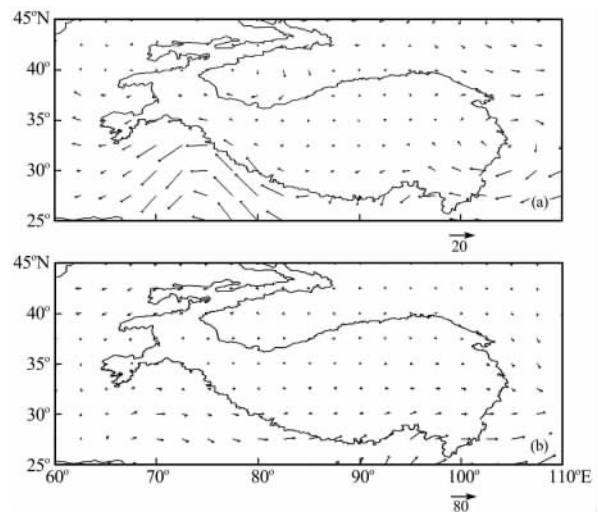


图 5 夏季整层大气水汽输送通量距平图

- a. 北大西洋涛动强年份与多年平均(1961–2004)之差;
 - b. 北大西洋涛动弱年份与多年平均(1961–2004)之差
- (单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 5 The departures of high (a) and low (b) NAO index years' summer mean water vapor flux, 1961–2004 (unit: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$)

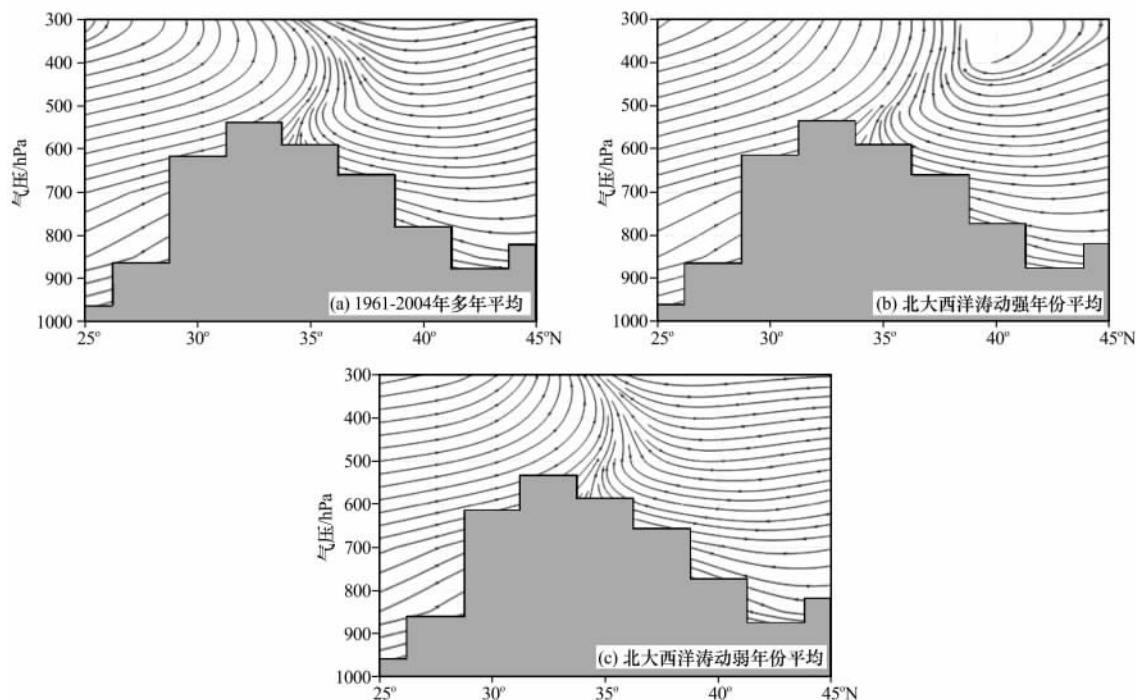


图 6 夏季(6—8月)平均沿 95°E 经向环流圈(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

Fig. 6 The meridional cross-section of integrated summer mean v-wind and w-wind along 95°E(a. average during 1961—2004; b. average of high NAO index years; c. average of low NAO index years) (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

对青藏高原地区 NAO 强年份和弱年份水汽输送通量散度求距平(图略),发现当北大西洋涛动处于强年份时,高原北部的水汽辐合上升增强,而在高原南部地区,西南部水汽辐散增强,东南部水汽辐合增强.当处于北大西洋涛动弱年份时,高原北部的水汽辐合减弱,而在高原南部地区,除东南部一部分呈现水汽辐散增强外,其余地区均呈现水汽有辐合增强.

切变线是青藏高原上主要的降水系统^[48],是大气环流在高原上影响降水的具体形式.分析青藏高原经向剖面(95°E)上切变线在北大西洋涛动强、弱年份的变化(图 6),有助于对青藏高原降水空间变化的原因有更具体的认识.高原切变线平均位置大致在 35°N 左右(图 6a).但是在北大西洋涛动强年份(图 6b)时,切变线位置向北偏移,高原北部对流加强,降水增加;在北大西洋涛动弱年份(图 6c)时,切变线位置向南轻微偏移,造成高原北部对流减弱,降水偏少.

4 结论

本文首先利用青藏高原中东部地区台站降水资料,分析了青藏高原降水变化的主要空间模态,进而探讨了 NAO 对高原降水的空间模态的关联性,

最后利用 NCEP/NCAR 再分析资料,从水汽输送和大气环流角度来探讨了 NAO 对青藏高原夏季降水空间模态变化的影响.主要结论如下:青藏高原夏季降水存在南北变化相反的空间模态,从相关分析看,NAO 与这种空间模态的变化密切相关. NA O 通过影响西风带,进而通过环流调整影响高原上空水汽输送和辐合、辐散场的分布,最终对青藏高原的降水产生影响.在 NAO 强年份,高原北部水汽输送通量强度增强,高原切变线位置向北偏移,水汽辐合增强,造成高原北部降水偏多,南部偏少;在 NAO 弱年份,上述情形基本相反.

参考文献(References):

- [1] Duan Keqin, Yao Tandong, Wang Ninglian, *et al.* The difference in precipitation variability between the north and south Tibetan Plateaus [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, **30**(5): 726—732. [段克勤,姚檀栋,王宁练,等.青藏高原南北降水变化差异研究[J]. *冰川冻土*, 2008, **30**(5): 726—732.]
- [2] Hao Zhenchun, Jiang Weijuan, Ju Qin, *et al.* The features of climate changes in the five river source regions of the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, **32**(6): 1130—1135. [郝振纯,江微娟,鞠琴,等.青藏高原河源区气候变化特征分析[J]. *冰川冻土*, 2010, **32**(6): 1130—1135.]
- [3] Nie Ning, Zhang Wanchang, Deng Cai. Spatial and temporal

- climate variations from 1978 to 2009 and their trend projection over the Yarlung Zangbu River basin [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **34**(1): 64—71. [聂宁, 张万昌, 邓财. 雅鲁藏布江流域 1978—2009 年气候时空变化及未来趋势研究[J]. 冰川冻土, 2012, **34**(1): 64—71.]
- [4] Tan Chunping, Yang Jianping, Mi Rui. Analysis of the climatic change characteristics in the southern Tibetan plateau from 1971 to 2007[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, **32**(6): 1111—1120. [谭春萍, 杨建平, 米睿. 1971—2007 年青藏高原南部气候变化特征分析[J]. 冰川冻土, 2010, **32**(6): 1111—1120.]
- [5] Ma Xiaobo, Hu Zeyong. Precipitation variation characteristics and abrupt change over Qinghai-Xizang Plateau in recent 40 years [J]. *Journal of Desert Research*, 2005, **25**(1): 137—139. [马晓波, 胡泽勇. 青藏高原 40 年来降水变化趋势及突变分析[J]. 中国沙漠, 2005, **25**(1): 137—139.]
- [6] Zhang Lei, Miao Qilong. Precipitation changes in the Tibetan Plateau during the last four decades [J]. *Arid Land Geography*, 2007, **30**(2): 240—246. [张磊, 缪启龙. 青藏高原近 40 年来的降水变化特征[J]. 干旱区地理, 2007, **30**(2): 240—246.]
- [7] Huang Tao, Liu Zhiguo, Deng Zhenyong. Change characteristics and climate return periods calculation of heavy precipitation in the northeast side of Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2009, **27**(4): 314—319. [黄涛, 刘治国, 邓振镛. 青藏高原东北侧强降水变化特征及其气候重现期计算[J]. 干旱气象, 2009, **27**(4): 314—319.]
- [8] Feng Song. Synthetical Analysis of Qinghai-Tibetan Climate Changes from Decade to Thousand Scale and Its Reasons [D]. Doctor's Degree Thesis. Lanzhou: Lanzhou Institute of Plateau Atmosphere Physics, CAS, 1999: 11—23. [冯松. 青藏高原十到千年尺度气候变化的综合分析及原因探讨[D]. 兰州: 中国科学院兰州高原大气物理研究所博士论文, 1999: 11—23.]
- [9] Lin Zhenyao, Zhao Xinyi. Spatial characteristics of changes in temperature and precipitation of the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau [J]. *Science in China (Series D)*, 1996, **39**(4): 442—448.
- [10] Li Shengchen, Xu Liang, Xu Yingxiang, *et al.* Change of annual precipitation over Qinghai-Xizang Plateau and sub-regions in recent 34 years[J]. *Journal of Desert Research*, 2007, **27**(2): 307—314. [李生辰, 徐亮, 郭英香, 等. 近 34 年青藏高原年降水变化及其分区[J]. 中国沙漠, 2007, **27**(2): 307—314.]
- [11] Lu Heli, Shao Quanqin, Liu Jiuyuan, *et al.* Temporo-spatial distribution of summer precipitation over Qinghai-Tibet Plateau during the last 44 years [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2007, **62**(9): 946—958. [卢鹤立, 邵全琴, 刘纪远, 等. 近 44 年来青藏高原夏季降水的时空分布特征[J]. 地理学报, 2007, **62**(9): 946—958.]
- [12] Wang Keli, Jiang Hao, Zhao Hongyan. Atmospheric water vapor transport from Westerly and monsoon over the Northwest China [J]. *Advances in Water Sciences*, 2005, **16**(3): 432—438. [王可丽, 江灏, 赵红岩. 西风带与季风对中国西北地区的水汽输送[J]. 水科学进展, 2005, **16**(3): 432—438.]
- [13] Xu H, Hou ZH, Ai L, *et al.* Precipitation at Lake Qinghai, NE Qinghai-Tibet Plateau, and its relation to Asian summer monsoons on decadal/interdecadal scales during the past 500 years[J]. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeogeology*, 2007, **254**: 541—549.
- [14] Gong Yuanfa, Xu Meiling, He Jinhai, *et al.* On the relationship between the eastern Tibet plateau rainfall and subtropical high shift in summer[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2006, **64**(1): 90—99. [巩远发, 许美玲, 何金海, 等. 夏季青藏高原东部降水变化与副热带高压带活动的研究[J]. 气象学报, 2006, **64**(1): 90—99.]
- [15] Liu Xiaodong, Hou Ping. Variation of summer rainfall over Qinghai-Xizang Plateau and its association with the North Atlantic Oscillation[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1999, **57**(5): 561—570. [刘晓东, 侯萍. 青藏高原中东部夏季降水变化及其与北大西洋涛动的联系[J]. 气象学报, 1999, **57**(5): 561—570.]
- [16] Barnston A G, Livezey R E. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns [J]. *Mon Weather Rev*, 1987, **115**: 1083—1126.
- [17] Hurrell J W. Decadal trends in the North Atlantic Oscillation: regional temperatures and precipitation [J]. *Science*, 1995, **269**: 676—679.
- [18] Barnston A G, He Y. Impacts of the NAO on U. S. and Canadian surface climate, implications for seasonal prediction[C]// *Proceedings of the 21st Annual Climate Diagnostics and Prediction Workshop*, Alabama USA, 1996: 34—37.
- [19] Jones P D, Conway D. Precipitation in the British Isles: An analysis of area-average data updated to 1995[J]. *Int. J. Climatol.*, 1997, **17**: 427—438.
- [20] Grundström M, Linderholm H W, Klingberg J, *et al.* Urban NO₂ and NO pollution in relation to the North Atlantic Oscillation NAO [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**: 883—888.
- [21] Brandimarte L, Baldassarre G D, Bruni G, *et al.* Relation between the North-Atlantic Oscillation and hydroclimatic conditions in Mediterranean areas [J]. *Water Resource Manage*, 2011, **25**: 1269—1279.
- [22] Andrade C, Santos J A, Pinto J G, *et al.* Large-scale atmospheric dynamics of the wet winter 2009/2010 and its impact on hydrology in Portugal[J]. *Climate Research*, 2011, **46**: 29—41.
- [23] Vicente-Serrano S M, Trigo R M, López-Moreno J I, *et al.* Extreme winter precipitation in the Iberian Peninsula in 2010: anomalies, driving mechanisms and future projections[J]. *Climate Research*, 2011, **46**: 51—65.
- [24] Hurrell J W, Van Loon H. Decadal changes in the circulation of the Northern Hemisphere: Relation to surface temperature [C]// *Proceedings of the 20th Annual Climate Diagnostics Workshop*, Seattle, Washington USA, 1995: 292—295.
- [25] Hurrell J W. Influence of variations in extratropical wintertime teleconnections on Northern Hemisphere temperature [J]. *Geophysical Research Letters*, 1996, **23**(6): 665—668.
- [26] Yu Rucong, Zhou Tianjun. Impacts of winter-NAO on March cooling trends over subtropical Eurasia continent in the recent half century [J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, **31**: L12204.
- [27] Wei Fengying, Xie Yu, Mann M E. Probabilistic trend of anomalous summer rainfall in Beijing: Role of interdecadal variability [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2008, **113**: D20106.

- [28] Gu Wei, Li Chongyin, Li Weijing, *et al.* Interdecadal unstationary relationship between NAO and east China's summer precipitation patterns [J]. *Geophysical Research Letters*, 2009, **36**: L13702.
- [29] Yang Lianmei, Zhang Qingyun. Effects of the North Atlantic Oscillation on the summer rainfall anomalies in Xinjiang[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2008, **32**(5): 1187—1196. [杨莲梅, 张庆云. 北大西洋涛动对新疆夏季降水异常的影响[J]. *大气科学*, 2008, **32**(5): 1187—1196.]
- [30] Wei Na, Gong Yuanfa, Sun Xian, *et al.* Variation of precipitation and water vapor transport over the northeast China from 1959 to 2005[J]. *Journal of Desert Research*, 2010, **30**(6): 1450—1457. [魏娜, 巩远发, 孙娴, 等. 西北地区近 50a 降水变化及水汽输送特征[J]. *中国沙漠*, 2010, **30**(6): 1450—1457.]
- [31] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, *et al.* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 1996, **77**: 437—470.
- [32] Li Shengchen, Li Dongliang, Zhao Ping, *et al.* The climatic characteristics of vapor transportation in rainy season of the origin area of three rivers in Qinghai-Xizang Plateau [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2009, **67**(4): 591—598. [李生辰, 李栋梁, 赵平, 等. 青藏高原“三江源地区”雨季水汽输送特征[J]. *气象科学*, 2009, **67**(4): 591—598.]
- [33] Ren Yu, Zhang Xueqin, Li Shengchen, *et al.* Precipitation anomalies in flood-season and atmospheric water vapor transport over the southern Qinghai Plateau [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, **30**(1): 35—42. [任雨, 张雪琴, 李生辰, 等. 青藏高原汛期降水异常与水汽输送[J]. *冰川冻土*, 2008, **30**(1): 35—42.]
- [34] Feng Lei, Wei Fengying. Regional Characteristics of summer precipitation on Tibetan Plateau and it's water vapor feature in neighboring areas [J]. *Plateau Meteorology*, 2008, **27**(3): 491—499. [冯蕾, 魏凤英. 青藏高原夏季降水的区域特征及其与周边地区水汽条件的配置[J]. *高原气象*, 2008, **27**(3): 491—499.]
- [35] Shi Xiaoying, Shi Xiaohui. Climatological characteristics of summertime moisture budget over the southeast part of Tibetan Plateau with their impacts [J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2008, **19**(1): 41—46. [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—46.]
- [36] Wang Keli, Cheng Guodong, Ding Yongjian, *et al.* Characteristics of water vapor transport and atmospheric circulation for precipitation over the source regions of the Yellow and Yangtze Rivers[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, **28**(1): 8—14. [王可丽, 程国栋, 丁永建, 等. 黄河、长江源区降水变化的水汽输送和环流特征[J]. *冰川冻土*, 2006, **28**(1): 8—14.]
- [37] Wen Lijuan, Lü Shihua, Wei Zhigang, *et al.* Analysis of water vapor characteristics of the precipitation in the south to north water transfer areas [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2006, **28**(2): 157—163. [文莉娟, 吕世华, 韦志刚, 等. 南水北调西线引水区与黄河上游降水过程的水汽特征分析[J]. *冰川冻土*, 2006, **28**(2): 157—163.]
- [38] Wang Pengxiang, Wang Baojian, Huang Yuxia, *et al.* Distribution and changing character of water vapor over Qinghai Plateau in summer in recent 43 years [J]. *Plateau Meteorology*, 2006, **25**(1): 60—65. [王鹏祥, 王宝鉴, 黄玉霞, 等. 青海高原近 43 年夏季水汽分布及演变特征, *高原气象*, 2006, **25**(1): 60—65.]
- [39] Zhou Changyan, Li Yueqing, Li Wei, *et al.* Climatological characteristics of water vapor transport over eastern part of Qinghai-Xizang Plateau and its surroundings [J]. *Plateau Meteorology*, 2005, **24**(6): 880—888. [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—888.]
- [40] Wei Fengying. Diagnosis and prediction of modern climate statistics[M]. Beijing: Meteorological Press, 2007: 105—142. [魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 105—142.]
- [41] North G R, Bell T, Cahalan R, *et al.* sampling errors in the estimation of empirical orthogonal function[J]. *Mon Weather Rev*, 1982, **115**: 393—399.
- [42] Yu Wusheng, Ma Yaoming, Sun Weizhen, *et al.* Climatic significance of $\delta^{18}\text{O}$ records from precipitation on the western Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, **54**: 2732—2741.
- [43] Yao Tandong, Zhou Hang, Yang Xiaoxin. Indian monsoon influences altitude effect of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation/river water on the Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2009, **54**: 2724—2731.
- [44] Li Zexia, Yao Tandong, Tian Lide, *et al.* Variation of $\delta^{18}\text{O}$ in precipitation in annual timescale with moisture transport in Delingha region [J]. *Earth Science Frontiers*, 2006, **13**(5): 330—334. [李泽霞, 姚檀栋, 田立德, 等. 德令哈降水中 $\delta^{18}\text{O}$ 年际变化与水汽输送[J]. *地学前沿*, 2006, **13**(5): 330—334.]
- [45] Tian Lide, Ma Linglong, Yu Wusheng, *et al.* Seasonal variations of stable isotope in precipitation and moisture transport at Yushu, eastern Tibetan Plateau [J]. *Science in China*, 2008, **51**(8): 1121—1128.
- [46] Li J, Zeng Q. A new monsoon index, its interannual variability and relation with monsoon precipitation [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2005, **10**(3): 351—365.
- [47] Chen W Y, van den Dool H. Sensitivity of teleconnection patterns to the sign of their primary action center [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 2003, **131**: 2885—2899.
- [48] Tu Nini, He Guangbi. Case analysis on two low vortexes induced by Tibetan Plateau shear line [J]. *Plateau Meteorology*, 2010, **29**(1): 90—98. [屠妮妮, 何光碧. 两次高原切变线诱发低涡活动的个例分析[J]. *高原气象*, 2010, **29**(1): 90—98.]

Effects of North Atlantic Oscillation on Summer Precipitation over the Tibetan Plateau

LIU Huan-cai, DUAN Ke-qin

(State Key Laboratory of Cryospheric Sciences, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: As the Third Pole, the Tibetan Plateau (TP) is the headwaters of the most important large rivers in the Asia and plays an important role in the Asia climate system and water cycle. Precipitation variation on the TP has a significant impact on the local human activities, ecosystems and water resources. The mechanism of precipitation change still need to be searched, although a lot of works have been done on the precipitation variation on the TP. Here a detailed analysis of the spatial and temporal changes in summer precipitation in the TP over the period of 1961 — 2004 is presented based on a developed daily precipitation dataset of 60 weather stations. The 60 stations in the central and eastern TP are selected for the rotated empirical orthogonal functions (REOF) analysis with a relatively uniform distribution of the station network. It is found that there is dramatically difference between the southern and northern TP, and

even reverse. Such dipole precipitation pattern over TP is believed correlating well with the North Atlantic Oscillation (NAO). The possible mechanism of the correlation is studied by using the NCEP/NCAR reanalysis data with analysis-by-synthesis and precipitation diagnosis approach. When NAO index is high, the moisture convergence strengthens with precipitable vapor and the water vapor flux increasing in the northern TP, but the precipitable vapor and the water vapor flux decreasing in the southern TP. However, the variation of water vapor flux divergence is relatively complex under the influence of the southwest monsoon. Meanwhile, the plateau shear line move northward obviously. As a result, the summer precipitation is usually above the normal in the northern TP but below the normal in the south TP. When NAO index is low, the above processes are almost opposite.

Key words: Tibetan Plateau; summer precipitation; North Atlantic Oscillation