

# Atmospheric Water Transport Characteristic over the Haihe River Basin during 1961-2010

Fan Ping<sup>1</sup>, Qiang Liu<sup>1\*</sup>, Binghao Jia<sup>2</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing

<sup>2</sup>Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing

Email: [pingfan19930525@sina.com](mailto:pingfan19930525@sina.com), [liuqiang@bnu.edu.cn](mailto:liuqiang@bnu.edu.cn)

Received: Jun. 9<sup>th</sup>, 2015; accepted: Jun. 27<sup>th</sup>, 2015; published: Jun. 30<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## Abstract

Based on NCEP/NCAR monthly reanalyzed data, the variability of water vapor content, water vapor flux and water budget in Haihe River basin was analyzed, which used to reflect changes of the source of atmospheric water. The water vapor content exhibited a decreasing trend during 1961-2010, and annual water vapor content reached its lowest level at 2009. The water vapor content of Haihe River basin is most abundant in summer. The zonal and meridional water vapor presented decreasing trends during 1961-2010. Unexpectedly, the zonal water vapor transported from west to east at whole years; while meridional water vapor flux varied with season, transported from north to south in winter and from south to north in summer. The water vapor content was input and presented decreasing trends at decade scale. The water vapor budget for Haihe River basin maintained positive value at seasonal scale, especially it presented higher value in summer than that in other seasons. The vapor budget is mainly controlled by meridional water vapor transport. Influenced by the East Asian monsoon and mid-latitude westerlies, water vapor mainly imported from west and south.

## Keywords

Water Vapor Content, Water Vapor Flux, Water Vapor Budget, Haihe River Basin

# 1961~2010年海河流域水汽输送与变化特征分析

平凡<sup>1</sup>, 刘强<sup>1\*</sup>, 贾炳浩<sup>2</sup>

<sup>1</sup>北京师范大学环境学院, 水环境模拟国家重点实验室, 北京

作者简介: 平凡(1993-), 男, 北京人, 硕士研究生, 主要从事气候变化与水资源综合研究。

\*通讯作者。

<sup>2</sup>中国科学院大气物理研究所, 北京

Email: [pingsfan19930525@sina.com](mailto:pingsfan19930525@sina.com), [liuqiang@bnu.edu.cn](mailto:liuqiang@bnu.edu.cn)

收稿日期: 2015年6月9日; 录用日期: 2015年6月27日; 发布日期: 2015年6月30日

## 摘要

本文运用NCEP/NCAR再分析数据, 计算分析了海河流域整层大气水汽含量即可降水量、纬向输送水汽通量、经向输送水汽通量以及流域的四个边界水汽通量的季节变化和年代际变化特征。结果表明: 近50年来海河流域整层大气可降水量呈减小趋势, 并于2009年降到近50年的最低值, 夏季大气可降水量高于其他季节; 经向和纬向水汽输送通量年际变化均呈减小趋势, 但纬向水汽输送方向全年由西向东, 而经向水汽输送方向冬半年为由北向南, 夏半年由南向北; 海河流域的水汽收支代际变化均为输入, 但总体上呈下降趋势, 且夏季水汽输入多于其他季节, 水汽收支主要受经向水汽输送的影响, 且受到东亚夏季风和中纬度西风带自西向东的水汽输送控制。

## 关键词

水汽含量, 水汽通量, 水汽收支, 海河流域

## 1. 引言

20世纪以来以气温升高为主要特征的气候变化改变了区域水循环过程, 有预测表明未来干的地区愈干而湿的地方愈湿[1][2]。尤其是近年来旱涝灾害的频发发生, 使得水资源开发利用和社会经济发展需求难以兼容。海河流域是我国水资源开发利用程度较高的流域之一, 气候变化进一步加剧了流域水资源供需矛盾, 使得流域内面临一系列的生态、社会和经济用水的问题[3]-[5]。研究流域水汽输送和变化特征有助于理解气候变化背景下流域内水循环变化特征, 了解水分来源和变化规律, 服务于流域未来水资源规划与管理。

针对华北地区海河流域大气中的水份输送过程和水汽来源等问题的研究, 已经取得了一些重要的研究成果[6]-[10], 研究表明海河流域大气水汽含量和水汽输送存在显著的年代际变化特征[11], 近50年来水汽含量持续减少[12], 其夏季水汽输送主要受到中纬度西风带的水汽输送、来自孟加拉湾的水汽以及来自我国南海和西太平洋的水汽影响, 并且具有明显的年代际变化[13][14]。但由于过去的研究受到资料年代较短的限制, 很少将大气可降水量、水汽输送通量和水汽收支作为一个整体全面分析。本文通过对NCEP/NCAR再资料进行计算, 对近50年来海河流域大气中水汽含量即可降水量, 整层大气纬向水汽输送通量、经向水汽输送通量的年际变化和季节变化, 以及东南西北四个边界的大气水汽收支代际变化和季节变化特征进行了详细分析, 以期加深对海河流域的水循环机理的理解和认识, 为进一步研究和合理利用大气水资源提供一定的科学依据。

## 2. 资料及方法

本文所用再分析资料为美国国家环境预测中心/国家大气研究中心(NCEP/NCAR)再分析气候资料集。选取时间从1961年1月至2010年12月共50年, 格点为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 的逐月风场、水汽场和地面气压场资料, 包括比湿( $q$ )、纬向风( $u$ )、经向风( $v$ )以及地面气压( $P_s$ )等要素。计算了海河流域整层大气水汽含量, 水汽水平输送通量以及流域的东南西北四个边界的水汽收支。将水汽水平输送矢量分解为经向输送和纬向输送两个分量, 并规定: 向东的纬向输送通量为正, 向西的纬向输送通量为负; 向北的经向输送为正, 向南的经向输送为负。在流域的四个边界的水汽收支计算中由于海河流域的边界不规则, 本文选取该流域的计算范围为东经 $112.5^{\circ} \sim 120^{\circ}$ , 北纬

35°~45°，具体计算公式如下。

整层大气水汽含量即可降水量  $W$  [15]:

$$W = -\frac{1}{g} \int_{P_S}^{P_T} q(x, y, p, t) dp$$

垂直积分的水汽水平输送通量  $Q$  [16]:

$$Q_u = -\frac{1}{g} \int_{P_S}^{P_T} q(x, y, p, t) u(x, y, p, t) dp$$

$$Q_v = -\frac{1}{g} \int_{P_S}^{P_T} q(x, y, p, t) v(x, y, p, t) dp$$

局地水汽收支[7]:

$$\nabla \cdot vq = \frac{1}{\sigma} C \int v_n q dl = \frac{1}{\sigma} \cdot \sum_{i=1}^m (-\bar{v}_i \bar{q}_i) \cdot \Delta l_s + \sum_{j=1}^n (\bar{v}_j \bar{q}_j) \cdot \Delta l_e + \sum_{i=1}^m (\bar{v}_i \bar{q}_i) \cdot \Delta l_n + \sum_{j=1}^n (-\bar{v}_j \bar{q}_j) \cdot \Delta l_w$$

式中:  $q$  为比湿(g/kg);  $g$  为重力加速度(9.8 m/s<sup>2</sup>);  $P_S$  为地面气压(hPa), 一般取  $P_S = 1000$  hPa;  $P_T$  为大气顶处的气压, 考虑到更高层水汽含量少, 水汽资料也不很准确, 故本文中取  $P_T$  为 300 hPa;  $x$ ,  $y$  和  $t$  分别为格点经度、纬度和时间;  $Q_u$ ,  $Q_v$  分别为纬向和经向水汽通量;  $u$  为纬向风(m/s);  $v$  为经向风(m/s);  $\sigma$  为单位面积;  $l_s$ ,  $l_n$ ,  $l_e$ ,  $l_w$  分别代表南边界, 北边界, 东边界, 西边界的格距长度。

### 3. 海河流域大气可降水量和水汽水平输送通量特征

#### 3.1. 大气可降水量和水汽输送通量年际变化特征

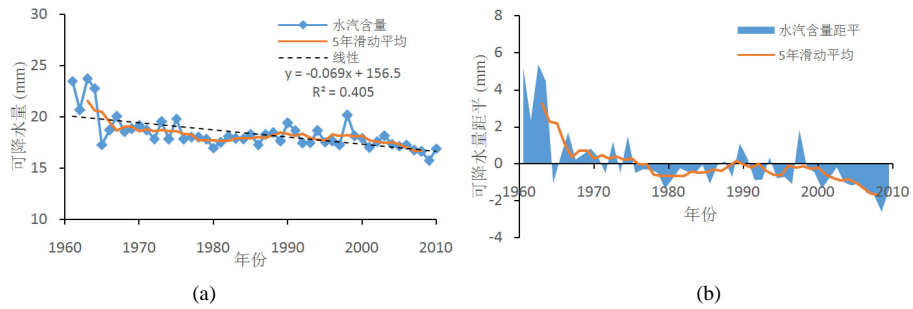
海河流域大气水汽含量存在显著的年际变化, 总体呈现下降趋势其线性倾向率为 $-0.07 \text{ mm a}^{-1}$  (图 1(a))。20 世纪 60 年代初期水汽含量高, 从 60 年代中期开始水汽含量逐渐减少并于 70 年代后期开始处于负距平(图 1(b)), 在 90 年代初略有增加随后又持续减少直至大约 2009 年达到近 50 年来最低值。水汽含量即可降水量总体呈现减少趋势, 影响到区域降水量的变化。海河流域近 50 年来降水量整体上呈减少趋势[17] [18], 有文献分析表明降水量减少与东亚夏季风减弱和环流异常引起的水汽输送变化密切相关[19]-[21]。

纬向水汽输送通量年际变化整体呈下降趋势, 其线性倾向率为 $-0.76 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)a}^{-1}$  (图 2(a)), 纬向水汽输送方向始终为由西向东。20 世纪 60 年代至 70 年代中期纬向水汽输送通量持续减小但均处于正距平(图 2(b)), 70 年代末期到 80 年代纬向水汽输送较稳定, 从 90 年代开始一直到 21 世纪初逐渐减少并连续处于负距平, 约在 2005~2010 年纬向水汽输送通量达到近 50 年来的最小值。

经向水汽输送通量年际变化整体也呈下降趋势倾向率为 $-1.05 \text{ kg/(m}\cdot\text{s)a}^{-1}$  (图 2(c)), 并且其下降趋势比纬向水汽输送通量更明显。20 世纪 60 年代中期之前 NCEP/NCAR 再分析材料的计算结果数值很高, 随后一直至 70 年代初期持续减小, 但都处于正距平(图 2(d))且方向为由南向北。从 70 年代中后期开始一直到 21 世纪初经向水汽输送通量较稳定并且均处于负距平, 其方向转变为由北向南。

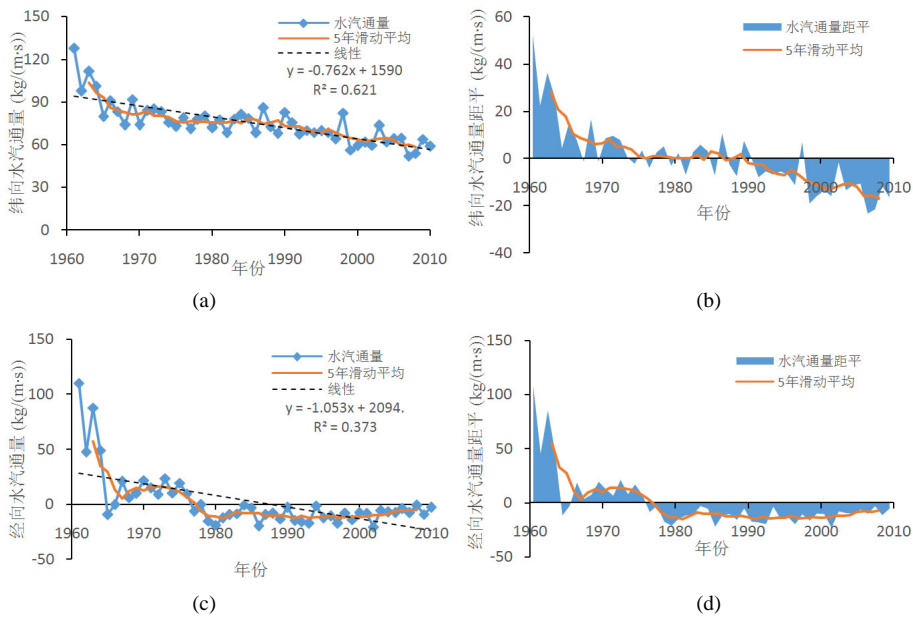
#### 3.2. 大气可降水量和水汽水平输送通量季节变化特征

从海河流域上空的大气水汽含量季节变化(图 3)呈现单峰变化特征。夏季大气水汽含量高于其他季节, 最高值出现在 7 月份, 冬季较低, 最低值出现在 1 月份。海河流域整层大气水汽含量的年平均值(表 1)为 18.34 mm, 夏季平均值则达到 37.46 mm, 远高于秋季(16.80 mm)、春季(14.16 mm)与冬季(5.56 mm)。夏季的水汽输送对海河流域整层大气水汽含量即可降水量贡献最大。



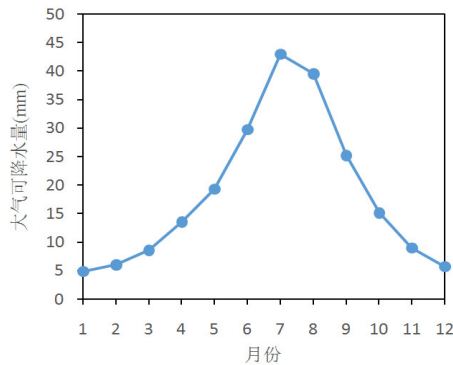
**Figure 1.** Variation of water vapor content in the Haihe River basin during 1961-2010. (a) Annual vapor content; (b) Vapor content anomaly

**图 1.** 1961~2010 年海河流域整层大气水汽含量的年代际变化。(a) 年际变化; (b) 水汽含量距平



**Figure 2.** Variation of water vapor flux in the Haihe River basin (a) Annual vapor flux-u; (b) Vapor flux-u anomaly; (c) Annual vapor flux-v; (d) Vapor flux-v anomaly

**图 2.** 海河流域水平水汽输送通量 (a) 纬向水汽输送通量年际变化; (b) 纬向水汽输送通量距平; (c) 经向水汽输送通量年际变化; (d) 经向水汽输送通量距平



**Figure 3.** Monthly variation of water vapor content in the Haihe River basin

**图 3.** 海河流域整层大气水汽含量月变化特征

纬向水汽输送通量的NCEP/NCAR再分析数据的计算结果(表1)年平均75.37 kg/(m·s)即年均水汽输送方向为由西向东,其季节变化中夏季最高,然后依次为秋季、春季、冬季;经向水汽输送通量年平均值为2.16 kg/(m·s)即年均水汽输送方向为由南向北,但全年中仅在夏季水汽输送方向为由南向北,其他季节水汽均为由北向南输送。

纬向水汽输送通量全年均为正值(图4),即水汽输送方向均为由西向东,其季节变化具有单峰特征,由冬季1月份的最低值逐步增加,到7月份达最高值后减少,9月份略有回升后又逐渐下降;经向水汽的输送年尺度上具有南北向的冬夏转换,即冬半年水汽输送方向为由北向南而到夏半年方向转为由南向北,且逐月变化呈单峰特征,经向水汽输送方向转换分别发生在5月份和9月份,冬半年经向水汽输送通量稳定其方向由北向南,夏半年在5月其方向转变为由南向北并在输送通量陡增到7月达极大值之后迅速减小,到9月水汽输送方向从由南向北再次转变为由北向南输送并渐趋平稳。

## 4. 海河流域水汽收支特征

### 4.1. 海河流域水汽收支的代际变化特征

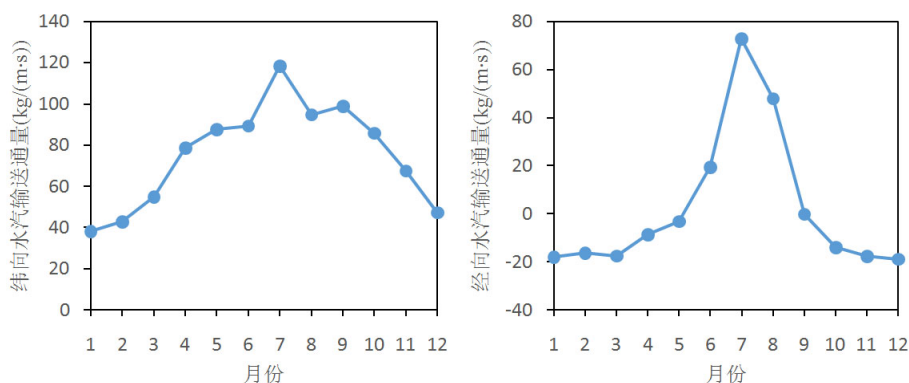
海河流域水汽收支的代际变化大体呈下降趋势且均为输入(图5)。从20世纪60年代开始水汽输入量持续减少,但在21世纪初水汽输入量略有上升;北边界60年代为输出,之后从70年代开始转为输入并输入量逐渐增多;南边界60年代输入量大,随后减小并于90年代和21世纪初水汽转为输出但输出量少;西边界从60年代开始始终表现为输入且输入量逐渐减少;东边界始终表现为水汽输出,其输出量从60年代开始持续减少。

### 4.2. 海河流域水汽收支的季节变化特征

海河流域的整层水汽总收支全年为输入,并且夏季水汽输入多于其他季节(如图6)。海河流域东边界全年输出,在夏季显著增多在7月有一个输出高峰;西边界全年输入,逐月变率较小且冬季输送量较少;南北边界冬

**Table 1.** Seasonal variation of water vapor content and water vapor flux in the Haihe River basin  
**表 1.** 海河流域整层大气水汽含量与水汽输送通量的季节变化

参量	年平均	春季	夏季	秋季	冬季
水汽含量 Q (mm)	18.34	13.86	37.46	16.49	5.56
纬向水汽输送量 $Q_v$ (kg/(m·s))	75.37	73.77	100.83	84.10	42.78
经向水汽输送量 $Q_e$ (kg/(m·s))	2.16	-9.78	46.76	-10.57	-17.75



**Figure 4.** Monthly variation of zonal vapor flux (left) and meridional vapor flux (right) in the Haihe River basin

**图 4.** 海河流域整层大气纬向(左图)和经向水汽输送通量(右图)的月变化特征

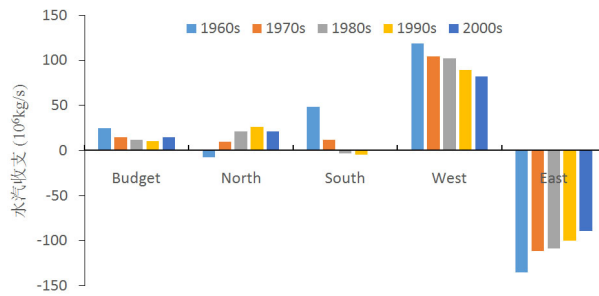


Figure 5. Variation of vapor budget in the Haihe River basin during 1961-2010

图 5. 1961~2010 海河流域水汽收支的代际变化

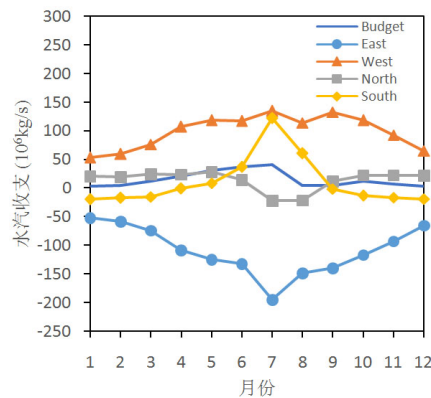


Figure 6. Monthly variation of water vapor flux and vapor budget in the four boundaries of Haihe River basin

图 6. 海河流域四个边界水汽输送量及水汽收支的月变化特征

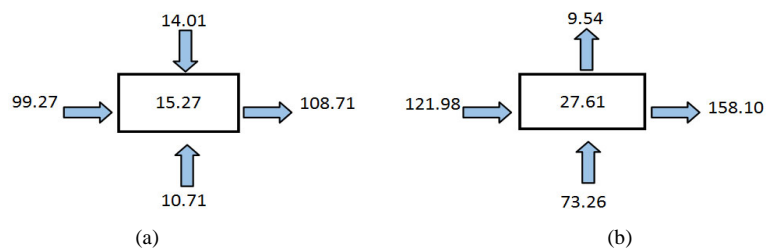


Figure 7. Vapor budget in the Haihe River basin (a) Annual vapor budget; (b) Summer vapor budget

图 7. 海河流域水汽收支 (a) 年平均水汽收支; (b) 夏季水汽收支

夏反向，南边界水汽输送在 4 月份之前一直为输出，到 5 月份明显增大且转变为输入，在 7 月输入量达到极大值后持续减少到 9 月份又转变为输出；而北边界除在夏季 7、8 两月为输出外，其他月份均为水汽输入。

受经向水汽输送的影响，海河流域在 1961~2010 的年平均整层大气水汽收支为输入(如图 7)。海河流域的水汽收支随季节变化显著，夏季是空中水汽资源收入的主要季节，主要受到东亚夏季风和中纬度西风带自西向东的水汽输送影响[13] [19] [22]，夏季西、南边界为水汽输入，东、北边界水汽输出。

## 5. 小结

1) 近 50 年来，海河流域整层大气可降水量年际变化总体呈现减小趋势，并且在 21 世纪之后连续 10 年出

现负距平, 在 2009 年降到近 50 年的最低值; 降水量的季节变化具有单峰结构, 夏季大气水汽含量高于其他季节。

2) 经、纬向水汽输送通量年际变化整体均呈现下降趋势, 并且近十年均连续处于负距平; 两者季节变化也都具有单峰结构, 并在 7 月份达到极大值; 但纬向水汽输送方向全年均为由西向东, 而经向水汽输送方向均有冬夏季转换特征, 冬半年输送方向为由北向南, 夏半年水汽输送方向为由南向北。

3) 海河流域水汽收支代际变化大体呈下降趋势且均为输入。受经向输送的影响, 海河流域的整层水汽收支全年为输入; 并且夏季水汽输入多于其他季节, 夏季西、南边界为水汽输入, 东、北边界水汽输出主要受到东亚夏季风和中纬度西风带自西向东的水汽输送影响。

## 基金项目

国家自然科学基金创新研究群体科学基金资助项目(51421065)、北京高等学校青年英才计划项目(YETP0259)资助、环境模拟与污染控制国家重点联合实验室专项经费资助(14L01ESPC)。

## 参考文献 (References)

- [1] HELD, I. M., SODEN, B. J. Robust responses of the hydrological cycle to global warming. *Journal of Climate*, 2006, 19(21): 5686-5699.
- [2] WENTZ, F. J., RICCIARDULLI, L., HILBURN, K., et al. How much more rain will global warming bring? *Science*, 2007, 317(5835): 233-235.
- [3] 夏军, 黄浩. 海河流域水污染及水资源短缺对经济发展的影响[J]. *资源科学*, 2006, 28(2): 2-7.  
XIA Jun, HUANG Hao. Impacts of water pollution and shortage on economic development of the Haihe River basin. *Resources Science*, 2006, 28(2): 2-7. (in Chinese)
- [4] 江波, 欧阳志云, 苗鸿, 等. 海河流域湿地生态系统服务功能价值评价[J]. *生态学报*, 2011, 31(8): 2236-2244.  
JIANG Bo, OUYANG Zhiyun, MIAO Hong, et al. Ecosystem services valuation of the Haihe River basin wetlands. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(8): 2236-2244. (in Chinese)
- [5] LIU, J. H., QIN, D. Y., WANG, H., et al. Dualistic water cycle pattern and its evolution in Haihe River basin. *Chinese Science Bulletin*, 2010, 55(16): 1688-1697.
- [6] 王宁, 徐祥德, 徐洪雄, 等. 一次东北冷涡暴雨的水汽输送特征和位涡分析[J]. *地理科学*, 2014, 34(2): 211-219.  
WANG Ning, XU Xiangde, XU Hongxiong, et al. Water vapor transport features and potential vortices analysis of a northeast cold vortex rainstorm. *Geographical Science*, 2014, 34(2): 211-219. (in Chinese)
- [7] 张书萍. 华北空中水资源年代际变化及其与大尺度海—陆温度变化的关系[D]. 中国气象科学研究院, 2011.  
ZHANG Shuping. Decadal variations of air water resources in North China and its linkage to the large-scale land-sea surface temperature. *Chinese Academy of Meteorological Sciences*, 2011. (in Chinese)
- [8] 郭志梅, 缪启龙, 李雄. 中国北方地区近 50 年来气温变化特征的研究[J]. *地理科学*, 2005, 25(4): 448-454.  
GUO Zhimei, MIAO Qilong, LI Xiong. Variation characteristics of temperature over Northern China in recent 50 years. *Geographical Science*, 2005, 25(4): 448-454. (in Chinese)
- [9] ZHANG, Z., ZHANG, Q., CHEN, X., et al. Statistical properties of moisture transport in East Asia and their impacts on wetness/dryness variations in North China. *Theoretical and Applied Climatology*, 2011, 104(3-4): 337-347.
- [10] SUN, L., SHEN, B., SUI, B. A study on water vapor transport and budget of heavy rain in Northeast China. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2010, 27(6): 1399-1414.
- [11] 张利平, 夏军, 林朝晖, 等. 海河流域大气水资源变化与输送特征研究[J]. *水利学报*, 2008, 39(2): 206-211.  
ZHANG Liping, XIA Jun, LIN Zhaohui, et al. Variation and transport feature of atmospheric water resources in Haihe River basin. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2008, 39(2): 206-211. (in Chinese)
- [12] 严登华, 袁喆, 杨志勇, 等. 1961 年以来海河流域干旱时空变化特征分析[J]. *水科学进展*, 2013, 24(1): 2-7.  
YAN Denghua, YUAN Zhe, YANG Zhiyong, et al. Spatial and temporal changes in drought since 1961 in Haihe River basin. *Advances in Water Science*, 2013, 24(1): 2-7. (in Chinese)
- [13] 叶敏, 吴永萍, 周杰, 等. 影响华北盛夏降水的水汽路径客观定量化的研究[J]. *物理学报*, 2014, 63(12): 129201.

- YE Min, WU Yongping, ZHOU Jie, et al. Objective quantification of the water vapor path influencing precipitation in North China in summer. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(12): 129201. (in Chinese)
- [14] 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.  
XIE Kun, REN Xuejuan. Climatological characteristics of atmospheric water vapor transport and its relation with rainfall over North China in summer. *Meteorological Science*, 2008, 28(5): 508-514. (in Chinese)
- [15] ZHOU, T., YU, R. Atmospheric water vapor transport associated with typical anomalous summer rainfall patterns in China. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 2005, 110(D8): 211.
- [16] WU, Y., SHEN, Y., LI, B. L. Possible physical mechanism of water vapor transport over Tarim River Basin. *Ecological Complexity*, 2012, 9(2): 63-70.
- [17] 褚健婷, 夏军, 许崇育, 等. 海河流域气象和水文降水资料对比分析及时空变异[J]. *地理学报*, 2009, 64(9): 1083-1092.  
CHU Jianting, XIA Jun, XU Chongyu, et al. Comparison and spatial-temporal variability of daily precipitation data of weather stations and rain gauges in Haihe River basin. *Acta Geographical Science*, 2009, 64(9): 1083-1092. (in Chinese)
- [18] 房巧敏, 龚道溢, 毛睿. 中国近 46 年来冬半年日降水变化特征分析[J]. *地理科学*, 2007, 27(5): 711-717.  
FANG Qiaomin, GONG Daoyi, MAO Rui. Changes of daily precipitation of China in wintertime during the last 46 years. *Geographical Science*, 2007, 27(5): 711-717. (in Chinese)
- [19] 马京津, 于波, 高晓清, 等. 大尺度环流变化对华北地区夏季水汽输送的影响[J]. *高原气象*, 2008, 27(3): 517-523.  
MA Jingjin, YU Bo, GAO Xiaqing, et al. Change of large scale circulation and its impact on the water vapor over North China. *Plateau Meteorology*, 2008, 27(3): 517-523. (in Chinese)
- [20] 杜银, 张耀存, 谢志清. 东亚副热带西风急流位置变化及其对中国东部夏季降水异常分布的影响[J]. *大气科学*, 2009, 33(3): 581-592.  
DU Yin, ZHANG Yaocun, XIE Zhiqing. Location variation of the East Asia subtropical westerly jet and its effect on the summer precipitation anomaly over Eastern China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2009, 33(3): 581-592. (in Chinese)
- [21] YU, R., WANG, B., ZHOU, T. Tropospheric cooling and summer monsoon weakening trend over East Asia. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(22): 217-244.
- [22] 朱玲, 柳艳香, 左洪超, 等. 海河流域水汽输送及其变化特征分析[J]. *气候变化研究进展*, 2011, 7(3): 184-188.  
ZHU Ling, LIU Yanxiang, ZUO Hongchao, et al. Water vapor transport characteristics over the Haihe River basin. *Advances in Climate Change Research*, 2011, 7(3): 184-188. (in Chinese)