

张书萍, 祝从文, 周秀骥. 2014. 华北水资源年代际变化及其与全球变暖之间的关联 [J]. 大气科学, 38 (5): 1005–1016, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13231. Zhang Shuping, Zhu Congwen, Zhou Xiuji. 2014. Decadal variability of water resources in North China and its linkage to the global warming [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (5): 1005–1016.

华北水资源年代际变化及其与全球变暖之间的关联

张书萍 祝从文 周秀骥

中国气象科学研究院, 北京 100081

摘 要 本文利用 1951~2011 年期间中国台站资料、东亚地区的探空资料、NCEP/NCAR 和 ERA40 等大气再分析资料, 通过对水分平衡方程诊断探讨了华北地区过去 60 年中水资源和可利用降水量的变化特征及其与大尺度环流变化之间的关系。结果发现, 华北地区 69% 的降水量被蒸发, 可利用降水仅仅为降水量的 31%。夏季可利用降水是华北水资源的主要来源, 华北夏季可利用降水量在 80 年代初发生突变减少, 进入 21 世纪初, 伴随蒸发量的增加该地区可利用降水量进一步减少。西风带水汽与东亚夏季风水汽是华北可利用降水的主要来源。NCAR/NCEP 和 ERA40 再分析资料的结果均显示贝加尔湖一带的位势高度偏低和西太平洋高压的偏强有利于该地区降水增多。利用探空资料进一步证明, 蒙古以及贝加尔湖地区的温度在对流层低层变暖和位势高度场的加强导致了过去几十年华北可利用降水量减少。由于贝加尔湖地区温度变化与全球变暖存在密切关联, 监测该地区温度的变化对预测华北水资源和东亚夏季风的长期变化具有重要的意义。

关键词 华北水资源 可利用降水 年代际变化 全球变暖

文章编号 1006-9895(2014)05-1005-12

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1401.13231

Decadal Variability of Water Resources in North China and Its Linkage to Global Warming

ZHANG Shuping, ZHU Congwen, and ZHOU Xiuji

Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract On the basis of the water budget equation, we discuss the decadal variability of water resources and available precipitation in North China, and address its link to boreal large-scale circulation and global warming between 1951 and 2011. The data sets utilized include monthly station-observed surface air temperature and precipitation, sounding-observed air temperature and geopotential height, and NCEP/NCAR and ERA40 reanalyzed atmospheric components. Our results suggest that annual average evaporation accounts for 69% of the total water resource in contrast to 31% by the available precipitation in North China. Most of North China's water resources come from the East Asian summer monsoon (EASM) season. The water resources in this region exhibit an obvious decadal decrease around the 1980s, and drops further in the first decade of 21st century with the increase of local evaporation. Analysis suggests that westerly winds and the EASM jointly supply the water resources in North China, and the lower and higher geopotential height (GPH) around Lake Baikal and the western North Pacific may enhance water resources in this region. This is clearly supported by the NCEP/NCAR and ERA40 reanalyzed data sets, but also by the atmospheric sounding over East

收稿日期 2013-07-30, 2014-01-24 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金项目 41221064, 中国气象科学研究院基本科研业务项目 Z2010Z001、Z2010Z003、2013Z002, 中国科学院碳专项 XDA05090408

作者简介 张书萍, 女, 1986 年出生, 硕士研究生, 主要从事气候变化及东亚季风研究。E-mail: zsp_1986@126.com

通讯作者 祝从文, E-mail: tomzhu@cma.cma.gov.cn

Asia. Evidence indicates that the global warming-related low-level warming that caused an anomalous anti-cyclone around Lake Baikal resulted in a decrease in water resources in North China. Therefore monitoring the surface air temperature around Lake Baikal may provide a good indicator for long-term forecasting of water resources and the EASM.

Keywords Water resource in North China, Available precipitation, Decadal variability, Global warming

1 引言

中国水资源的变化与东亚季风的变化密切相关。大量的证据表明,伴随全球变暖,东亚季风发生了显著的年代际调整,与此同时中国水资源在空间分布上也发生了明显改变,这一改变不仅加剧了中国南涝北旱的空间格局,也引起了一系列社会和科学问题并受到各领域的科学家的广泛关注。我国水资源系统对气候变化的承受能力十分脆弱,多数河流的径流对大气降水变化非常敏感(任国玉等, 2008)。水资源的重新分配将对我国农业、牧业、渔业、航运、水力发电等其他部门产生进一步的影响。事实表明,全球变化加剧我国水资源南北不平衡的现状,华北大部、华东北部和东北东部降水均呈减少趋势,干旱化严重,观测显示海河流域入海流量逐年减少,黄河在 20 世纪 90 年代后发生持续的严重断流(叶柏生, 2004)。而长江中下游地区及东南沿海一带洪涝灾害出现频繁,长江流域出现 1998 年特大洪涝灾害等(丁一汇和胡国权, 2003)。这些灾害给人民的生命财产都带来巨大威胁。中国水资源主要来自东亚夏季风降水,而东亚季风变异所引起降水的空间分布改变直接导致了水资源空间配置状态的变化。华北地区是我国水资源十分贫乏的地区之一,夏季降水异常引起该地干旱化的问题一直是气象学者们关注的焦点。研究表明,华北地区夏季降水在 1960 年之后发生了持续性的减少,并且具有显著的年际和年代际变率,其转折性的干湿变化发生在上世纪 70 年代末,与东亚夏季风的持续减弱存在紧密联系(黄荣辉等, 1999; 周连童和黄荣辉, 2003; 徐桂玉等, 2005; 马柱国和符淙斌, 2006; 徐康等, 2011a; Zhu et al., 2012)。

天然降水中的一部分会通过蒸发的形式返回到大气中,剩余的部分通过地表径流的形式补充地下水。因此,天然降水虽然是水资源主要的补给来源,却并不能等同于当地的可利用水资源。由于蒸发的水分进入大气之后难以加以利用,因此降水中

只有减去蒸发的部分才是可利用的水资源,也称可利用降水量。宋正山等(1999)研究了华北的可利用降水量变化,发现华北地区年平均的 80%左右的降水被蒸发掉,仅有 20% 左右的降水滞留在土壤、湖泊中或者可以成为河流的径流中加以利用。研究发现,近几十年来华北地区一方面降水急剧减少,另一方面由于气温不断上升,潜在蒸发量明显加大。特别是 20 世纪 80 年代以来,华北地区持续干旱导致该地区的水资源供需矛盾更加严重。

区域降水的长期变化与大尺度环流背景下的水汽输送特征和局地不稳定性密切相连。大气水汽含量的异常和水汽输送的多寡是造成降水异常的重要因素之一。东亚季风区是全球大气含水量最高的地区之一,东亚季风在全球大气水分循环中起到了重要的作用。研究表明,中国东部地区夏季降水不仅受到来自低纬热带地区的印度西南季风及南海季风的影响,还受到西太平洋副热带西南季风的影响。并且研究发现降水异常年对应的水汽来源和正常年对应的水汽来源明显不同(Zhou and Yu, 2005),其中华北降水异常偏多年对应中纬度西风带异常输送与副高西北侧的西南气流异常输送在华北上空的辐合(田红等, 2002)。大尺度环流场在降水异常年中也有明显的特征,有证据表明,旱涝过程主要发生在异常环流具有明显持续性和稳定性的时期,特别是干旱,常常是某种状态的异常环流持续发展和长期稳定的结果。张庆云等(1999)研究表明,华北降水的年际和年代际变化始于夏季东亚—西太平洋地区上空 500 hPa 位势高度场以及西太平洋副热带高压脊线位置的年际和年代际变化。Wang (2001)揭示了 1970 年代末对流层温度和风场发生的转变,在这次转变之后亚洲和非洲的季风环流减弱,降水也发生了相应的变化。郭其蕴等(2003)研究了东亚夏季风的年代际变率对中国气候的影响,指出了东亚夏季风在 1970 年代中期发生了年代际减弱,华北的降水也随之由多变少。宇如聪(2008)等指出,华北干旱和长江流域多雨的趋势是东亚对流层高层变冷造成的,变冷与对流

层和平流层相互作用相关。最近的研究结果发现, 中国夏季降水南涝北旱格局的长期变化与温室气体导致的贝加尔湖地区地表增温存在密切联系 (Zhu et al., 2012)。

华北地区地处东亚夏季风的北缘地带, 东亚季风水汽对其水资源的变化起着重要的作用。在最近几十年全球变暖长期变化背景下, 华北地区的可用水资源发生了怎样的变化? 导致这种变化的环流特征是什么? 为此, 本文首先利用中国台站观测的降水和温度资料, 结合现有的大气再分析资料和台站探空资料, 通过分析华北地区空中水资源的垂直分量即降水与蒸发的变化特征, 揭示出华北地区可用水资源的变化特征及其与全球变暖之间的关联。

2 资料与方法

本文用到的资料有 1951~2011 年的 NCEP/NCAR 再分析月平均资料 (Kalnay et al., 1996)、欧洲数值预报中心的大气再分析资料 (Uppala et al., 2005)。两套资料的水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ 。除此之外, 本文还用到了国家信息中心提供的 1951~2011 年台站观测的逐日降水和温度资料以及亚洲地区 1951~2007 年月平均探空资料集。本文利用 1971~2000 年 30 年的平均值代表气候态特征。显著性检验采用 t 检验方法。

我们利用探空资料计算了大气的水汽通量。水汽平衡方程表示如下:

$$\partial \bar{W} / \partial t + \nabla \cdot \mathbf{Q} = \bar{E} - \bar{P}, \quad (1)$$

其中, $\bar{W}$ 为大气可降水量, $\mathbf{Q}$ 为水汽通量, $\bar{E}$ 为表面蒸发项, $\bar{P}$ 为降水项。水汽平衡方程表示单位气柱内的水汽含量的变化与该气柱内水汽的辐合 (辐散)、从气柱下垫面蒸发而来的水汽以及向气柱下垫面落下的降水有关。大气中水汽含量 (或可降水量) 定义为: $\bar{W} = 1/g \int_{p_t}^{p_s} q dp$, 其中 q 为比湿, p_s 、 p_t 分别为地面气压和大气顶气压。 $\bar{W}$ 称为大气的可降水量, 它代表着假设整个空气柱中的水汽凝结时所能得到的液态水量。单位气柱整层大气水平输送通量矢量通过下式计算:

$$\mathbf{Q} = 1/g \int_{p_t}^{p_s} q \cdot \mathbf{V} dp. \quad (2)$$

纬向和经向水汽输送矢量 Q_λ 与 Q_ϕ 的计算公式分别表示为

$$Q_\lambda = 1/g \int_{p_t}^{p_s} u q dp, \quad (3)$$

$$Q_\phi = 1/g \int_{p_t}^{p_s} v q dp, \quad (4)$$

其中, $\mathbf{V}$ 为该单位气柱各层大气的风速矢量, u 和 v 分别为东西风和南北风分量, q 是该单位气柱各层大气的比湿, p_s 为地面气压。

整层大气的水汽输送通量的散度计算公式表示为

$$\nabla \cdot \mathbf{Q} = 1/g \int_{p_t}^{p_s} \nabla \cdot (\mathbf{V} q) dp. \quad (5)$$

将水汽通量辐合项进行离散化, 则局地的水汽收支可以通过如下公式计算得出:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot (\mathbf{V} q) = & 1/\sigma \cdot C \int v_n q dl = 1/\sigma \cdot \left(\sum_{i=1}^m (-\bar{v}_i \bar{q}_i) \cdot \Delta l_s + \right. \\ & \left. \sum_{j=1}^n (\bar{u}_j \bar{q}_j) \cdot \Delta l_e + \sum_{i=1}^m (\bar{v}_i \bar{q}_i) \cdot \Delta l_n + \sum_{j=1}^n (-\bar{u}_j \bar{q}_j) \cdot \Delta l_w \right), \end{aligned} \quad (6)$$

其中, σ 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。由于水汽在 300 hPa 以上含量很小可以忽略, 因此在本文中计算和水汽相关的物理量整层累加值, $p_t=300$ hPa。

对于较长时间 (月、年), 较大范围的平均状况而言, 大气的局地水汽储存率 $\partial \bar{W} / \partial t$ 非常小, 较之其他项要小一个量级, 可以忽略不计, 因此水汽方程可以简化为

$$\bar{E} - \bar{P} = \nabla \cdot \mathbf{Q}, \quad (7)$$

上式说明了某个地区某一个季节或者某一个月内的降水主要来源为同季节时段中流经该区水汽的辐合以及在此地区的蒸发而来的水汽的总和。

蒸发是一个很难估算的分量, 由于其在实际观测中很难得到, 很多学者都用经验公式来估算实际蒸发量。研究发现, 高桥浩一郎经验公式在干旱与半干旱地区对蒸发的估算较为准确 (宋正山等, 1999)。因此, 本文采用高桥浩一郎的经验公式来计算实际蒸散发 (高桥浩一郎, 1979), 公式表示如下:

$$\bar{E} = 3100 \bar{P} / \{3100 + 1.8 \bar{P}^2 \exp[-34.4 \bar{T} / (235 + \bar{T})]\},$$

其中, $\bar{E}$ 为月地面实际蒸散发 (mm), $\bar{P}$ 为月平均降水 (mm), $\bar{T}$ 为月平均温度 ($^\circ\text{C}$)。

3 华北气候和空中水资源的季节变化特征

为了对华北地区全区的水资源的气候演变特征有一个整体的认识, 我们首先对华北地区全区平

均的年平均气温、年降水量、年蒸发量以及年可利用降水量的变化特征进行分析讨论。本文利用全国 722 个台站降水、温度资料数据集, 选取的华北地区范围及降水站点 (见图 1)。其中, 华北地区的范围定义为 ($35^{\circ}\sim 42.5^{\circ}\text{N}$, $110^{\circ}\sim 120^{\circ}\text{E}$) 区域, 利用该区域平均降水代表华北降水量, 计算华北降水量同全国其他站点降水量的相关, 发现华北降水量

的变化同内蒙古中东部、东北西部及华北地区的降水变化为正相关, 相关性超过显著性检验, 表明所选范围降水量变化的一致。

由于可利用水资源为降水量与蒸发量之差, 而蒸发量又受到温度变化的影响, 因此, 对可利用水资源的各分量的研究也至关重要。图 2 表示可利用水资源及其各分量的季节变化, 表 1 为各个分量季

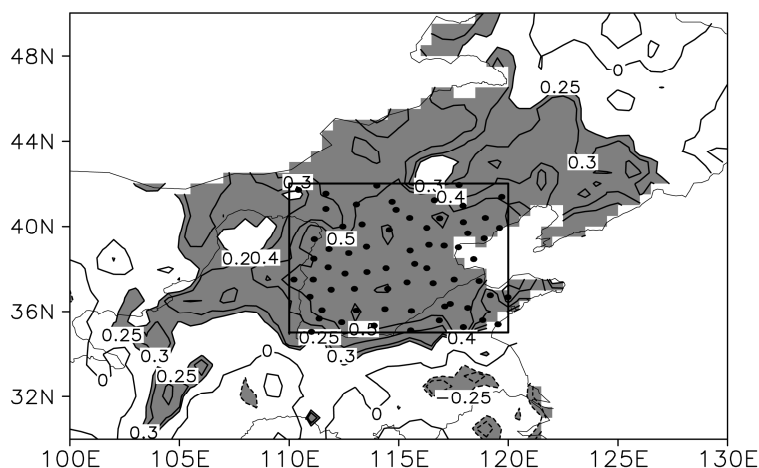


图 1 华北全区平均降水量与周边台站观测的降水量的相关系数分布。阴影部分为通过 95% 显著性检验

Fig. 1 Distribution of correlation coefficients between the averaged rainfall over North China and the counterpart of each station. Shading indicates the area where the correlation is exceeding 95% confidence level

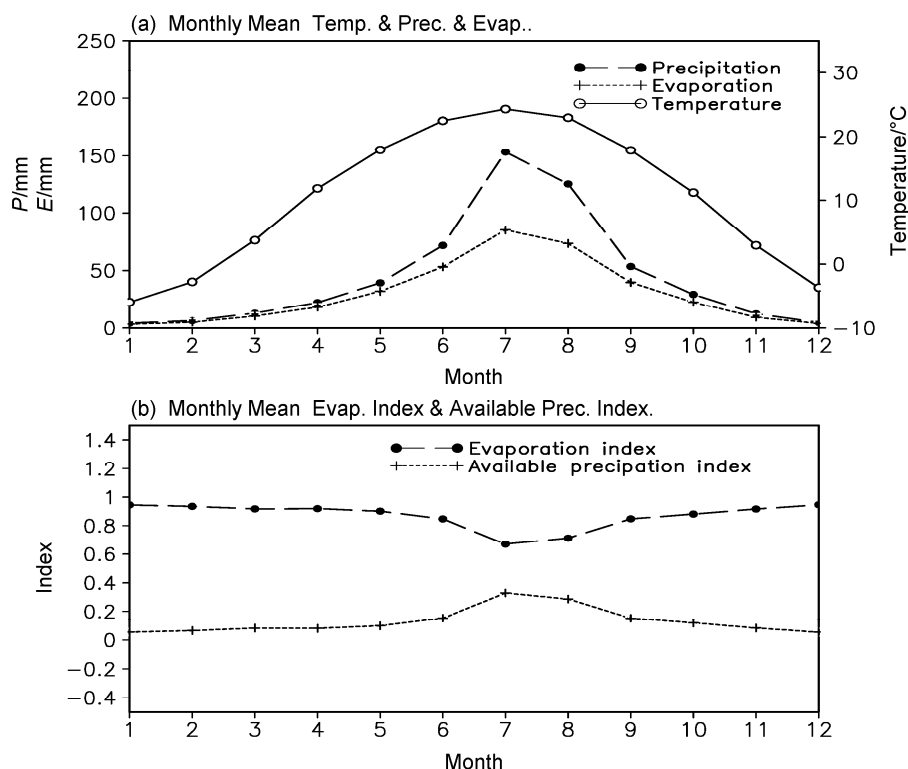


图 2 华北全区 1971~2000 年气候平均 (a) 温度、降水量、蒸发量以及 (b) 蒸发系数和可利用降水系数逐月变化

Fig. 2 Seasonal variation of monthly means of (a) surface air temperature, precipitation, evaporation, and (b) evaporation index and available precipitation index averaged over 1971–2000 in North China

节平均的统计量。华北地区全区气候的平均状况是：气候平均温度为 10.3℃，并具有显著的夏高冬低季节分布特征。平均降水量为 552 mm，夏季占全年降水量的 65%，为 358 mm；随后依次为秋季 101 mm，占全年 18%；春季 77 mm，占全年 14%；冬季降水量最小，为 16 mm，仅占全年的 3%。显而易见，华北地区夏季降水是全年降水量的主要来源。

表 1 1951~2010 年华北地区季节和年平均降水量 (P)、蒸发量 (E)、可利用降水量 ($P-E$)、蒸发系数 (α) 和可利用降水系数 (β)

Table 1 The seasonal and annual averages of precipitation (P), evaporation (E), available precipitation ($P-E$), evaporation index (α), and the available precipitation index (β) in North China during 1951–2000

	P/mm	E/mm	$P-E/\text{mm}$	α	β
春 (3~5 月)	77 (14%)	62 (16%)	15 (9%)	0.81	0.19
夏 (6~8 月)	358 (65%)	231 (61%)	127 (73%)	0.65	0.35
秋 (9~11 月)	101 (18%)	73 (19%)	28 (16%)	0.72	0.28
冬 (12~2 月)	16 (3%)	13 (3%)	3 (2%)	0.81	0.19
全年平均	552	379	173	0.69	0.31

本文利用蒸发和可利用降水系数分别表示大气蒸发量和可利用降水相对于大气降水量的大小。其中，蒸发系数定义为： $\alpha = \bar{E} / \bar{P}$ ；可利用降水系数定义为： $\beta = (\bar{P} - \bar{E}) / \bar{P}$ （宋正山等，1999）。因此，蒸发愈多，可利用的降水资源愈少。

分析可以发现：华北地区区域平均的蒸发量总量为 379 mm，冬夏季节差异较大，7 月为最大蒸发月份。从季节平均来看，其夏季蒸发量为 231 mm，占全年蒸发总量的 61%，其次为秋季 73 mm，占全年 19%；春季 62 mm，占全年 16%；冬季蒸发最小，为 13 mm，占全年 3%。夏季蒸发最多，为主要蒸发季节。

多年气候平均来看，华北地区区域平均的蒸发系数为 0.69，可利用降水系数为 0.31，表明华北地区全年降水量中有 69% 被蒸发返还到大气中，可利用降水量仅为全年降水的 31%。因此华北地区当地降水量的一多半用于蒸发消耗，而无法被人们使用。而从蒸发系数的季节变化中可以发现，华北地区最小的蒸发系数发生在夏季，仅为 0.65，冬季、春季反而较高，最高为 0.81。这一数据表明，夏季降水较多，伴随的蒸发量也较高，但是对可利用降水的影响却是最小。相反，在春、秋季虽然是蒸发总量不高的季节，但是蒸发的影响反而更大。也就

是说：降水少的季节，蒸发的损失也就大。华北地区地面蒸发这一特征恰好加剧水资源的供需矛盾，特别是当地春季正是当地牧草返青、作物生长的时节，春灌等农事活动又非常需要水资源，较大的蒸发量引发可利用降水减少，引起更加严重的干旱灾害（宋正山等，1999）。

由上可知，蒸发量损失占当地降水量中的比例极大，单凭当地降水量来描述华北水资源的整体变化并不十分恰当。本文用可利用降水量表示华北水资源的变化，可利用降水量为降水与蒸发之差计算得到，在水分平衡公式（公式 7）中，可利用降水量代表水资源的垂直分量，其变化特征具有很大的研究价值。分析发现，华北地区的全区年平均可利用降水量为 173 mm，其中夏季可利用降水量占全年的 73%；依次为秋季、春季分别占全年的 16% 与 9%；冬季最小，可利用降水量仅有 3 mm，占全年的 2%。由此可见，受到蒸发的影响，华北地区的可利用降水进一步集中在夏季，夏季可利用降水量已成为华北地区水资源的主要来源。然而，伴随全球变暖和东亚夏季风的持续减弱，华北夏季潜在蒸发量不断增加，与之相反的是华北夏季降水量持续减少，这一反向变化直接导致华北地区可利用降水量进一步减少，也使得水资源不平衡状况更加明显。

我们注意到，华北全区降水量、蒸发量以及可利用降水量的区域分布并不一致。由于夏季可利用降水是华北地区可利用降水量的主要来源，因此本文重点分析夏季的可利用水资源分布特征。图 3 表示的是华北地区多年平均夏季蒸发、降水、可利用降水量以及蒸发系数等分量的区域分布特征。如图所示，华北地区夏季降水明显具有西北—东南的阶梯分布特征，其分布的水平梯度并不均匀，东南部梯度大，西北部梯度小，但是在京津唐地区却有一个高值中心。华北地区夏季蒸发的分布特征同降水相似，但纬向分布性比降水量区域分布均匀，这同蒸发量是选取经验公式计算值有关，因此同实际情况必然存在一定误差。华北可利用降水量也显示出东南—西北递减的分布形式，同降水量的分布比较一致，表明华北东南地区的蒸发虽然较多，但是其降水量也同样偏多，可利用降水量相对于西北地区仍然充足。华北西北地区，特别是内蒙古中部的可利用降水量不足 50 mm，蒸发系数却能达到 0.8 以上，可利用降水量稀少，水资源十分匮乏。

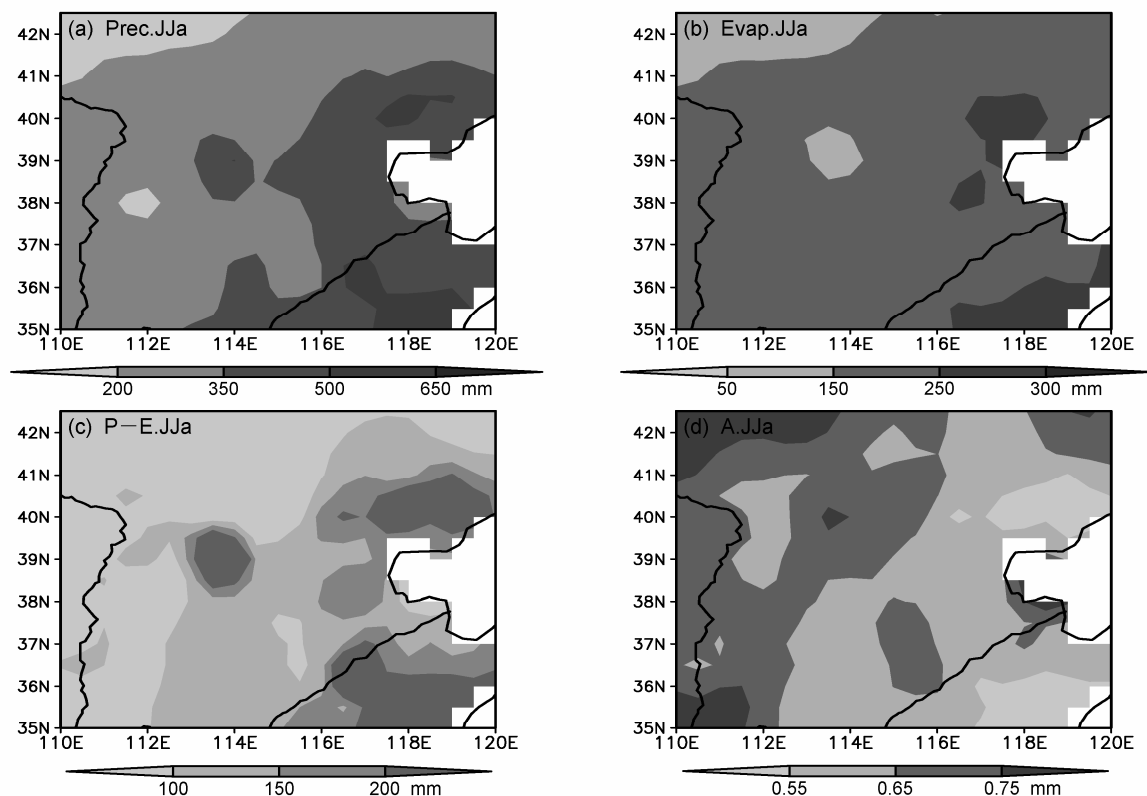


图3 华北地区1971~2010年夏季平均:(a)降水量;(b)蒸发量;(c)可利用降水量;(d)蒸发系数的区域分布

Fig. 3 Spatial distribution of summer mean (a) precipitation, (b) evaporation, (c) available precipitation, and (d) evaporation index in North China during 1971–2010

4 华北气候和水资源年代际变化特征

众多研究表明,华北地区年平均温度持续升高,同全球气候变暖一致,降水量持续减少,并具有显著的年代际变化。为了更清楚理解华北地区的可利用水资源在全球变暖背景下的年代际变化特征,本文分别计算了每10年间各分量的统计平均值,并结合气温、降水、蒸发以及可利用降水的逐年变化讨论华北气候和空中水资源年代际变化特征。图4a表示的是华北地区不同季节区域平均气温的年代际变化。如图所示,华北年平均气温波动升高,1950~1980年代均低于气候平均值。然而1990年代,华北气温骤然升高,10年平均气温升高 0.76°C ,高于气候平均值,转为正距平。21世纪初华北气温继续攀升,达到1960年来历史最高值。M-K突变检验显示,华北地区温度出现突变升高,突变发生在1995年左右(图略)。我们注意到,华北地区温度变化在各个季节表现不尽相同。春季增温发生在1980年代,持续到21世纪初达到最大,

其升温幅度为四个季节中最大。夏季增温发生在1990年代,1980年代反而出现气温降低趋势同其他季节表现不同,似乎有先抑后扬的现象。秋季增温自1960年代起出现,升温平稳缓慢,并无大起大落的现象。冬季华北温度自1960年代后也持续平稳上升,增幅高于秋季,而在1990年代起增温明显。综上所述,华北地区全区年平均温度逐年升高由春、秋、冬三季贡献,其中1950~1960年代温度除春季外各季节均有一定程度的下降趋势,温度变化最大的转折发生在1980年代。1960年代的增温,冬季增暖为主要的贡献,1980~1990年代的增温为四个季节同时温度变暖,冬季增温幅度最大,其次为夏季、春季、秋季。这次四季同时变化的形势很可能是一次气候的突变情况。而在1990年代到21世纪初的增暖主要是由于春季增暖而引起的,这进一步加剧了春季水资源的矛盾需求。

伴随华北温度变暖,该地区的年平均降水量持续减少,与温度的变化趋势恰好相反(见图4b)。如图所示,全年平均降水量1950~1970年代均高

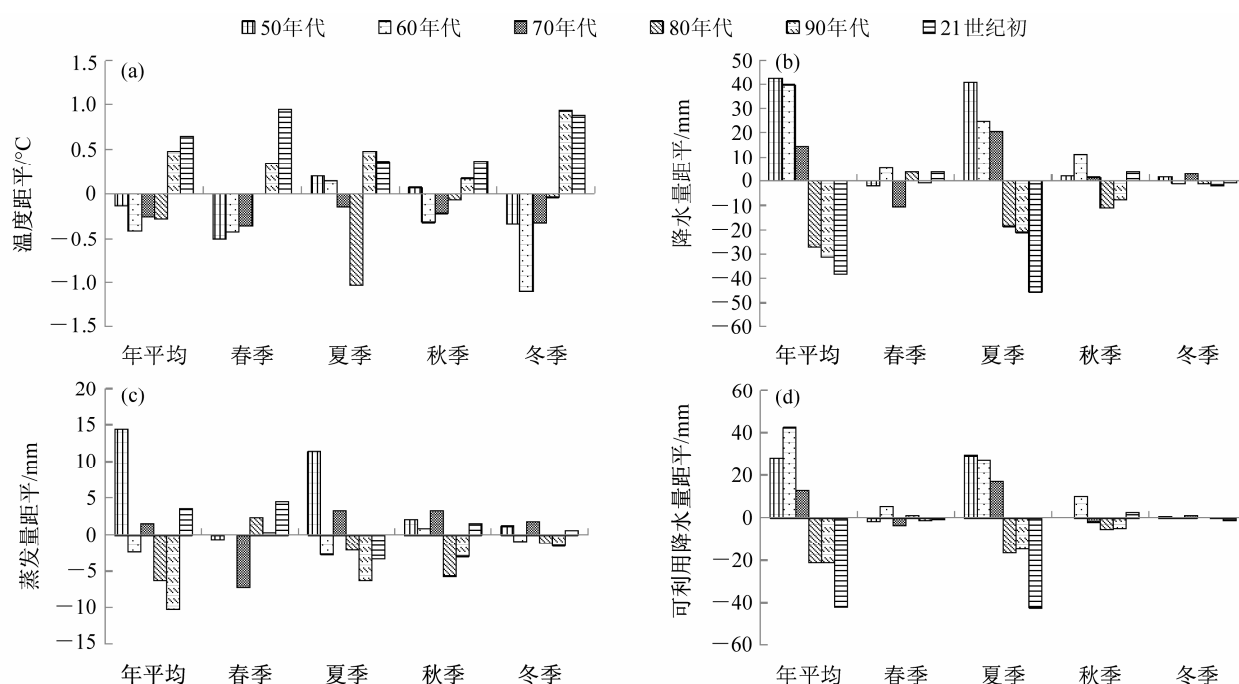


图4 华北区域平均的气候要素每10年距平变化：(a) 温度；(b) 降水量；(c) 蒸发量；(d) 可利用降水量

Fig. 4 Decadal variability of anomalies of (a) surface air temperature, (b) precipitation, (c) evaporation, and (d) available precipitation in North China during 1951–2011

于气候平均值，1980年代突然减少转为负距平，10年平均减少了41.7 mm。伴随降水量持续减少，21世纪初达到降水量的气候最低值。M-K突变检验显示，华北地区降水量持续减少，突变发生在上世纪1970年代末和1980年代初。同样，华北降水变化各个季节表现不尽相同。春季降水波动变化，并未有较大减少现象，1970年代为降水量最低时期。夏季降水量变化同全年基本一致，1980年代突变减少为负距平，此后持续降低，并在21世纪初进一步减少。秋季降水波动减少，趋势并不明显。冬季降水量值最小，相对其他季节变化并不明显。由此可见，华北地区全区夏季降水量逐年减少对年降水的影响至关重要。从全年降水变化来看，1970年代降水量的减少主要是由于春季降水大幅度减少导致，全年降水在21世纪初减少主要由于夏季降水大幅度减少的贡献，而春、秋季降水反而有所增加。

蒸发受到降水量和温度的共同影响，其年代际变化表现出独有的特征（见图4c）。从10年平均来看，1950年代蒸发量最高，1960年代发生急剧减少，1970年代略增，1980年代蒸发再一次剧减至负距平，而21世纪初蒸发反而增加，同降水量的变化趋势相反，同温度变化趋势相同。除此之外，我们发现，华北蒸发变化各个季节表现不尽相同。

春季蒸发量自1970年代剧减后一直波动增加。夏季蒸发量波动减少，而在21世纪初不降反增。秋季蒸发在1950~1970年代高于气候平均值，1980年代剧减9 mm，低于气候平均值，随后又持续增加，21世纪初达到正距平。冬季蒸发波动变化，21世纪略有增加转为正距平。由此可见，蒸发量的量值小于降水量，其变化趋势同降水量有相似之处，但是并非完全一致。由于夏、秋、冬季蒸发的共同减少导致了蒸发量在1980年代的大幅度减少，但是同时期的春季蒸发却有增多的趋势。在21世纪初，蒸发量具有显著增多的变化，同降水量的变化趋势相反，这一增多趋势在四个季节均有体现，最大的增多贡献是春季的蒸发量的增加。蒸发量的增加会导致可利用降水量进一步减少。分析可利用降水的变化可以发现（图4d），华北地区1950~1960年代增加了14.1 mm，从1960年代开始，可利用降水量持续减少，分别在1960~1970年代减少了29.4 mm，1970~1980年代减少了33 mm，1990年代至21世纪初减少了20.7 mm。可利用降水量的各个季节的年代际变化趋势特征同降水量非常一致，并且夏季的可利用降水量的变化几乎决定了全年的整体变化特征，其他季节的可利用降水量的贡献基本可以忽略不计。夏季的可利用降水量从1950

年代开始持续减少,其减少量最大的两个阶段分别是 1970~1980 年代,减少 33.6 mm,以及 1990 年代至 21 世纪初,减少 27.6 mm。其他季节的可利用降水量的年代际变化特征并不明显。可以看出,华北水资源的严重减少主要是由于其夏季可利用水资源的年代际减少而引起的。

5 影响夏季华北水资源的水汽和环流特征

从大气水分平衡公式中可以发现,空中水资源的垂直分量需要其水平分量的补偿。因此,华北地区夏季可利用降水量与同期水汽输送有着密切的关系。为了描述这种关系,本文利用华北地区夏季可利用降水量与同期的水汽通量合成矢量进行了相关计算(见图 5)。由于 NCEP/NCAR 资料显示上世纪 70 年代以前水汽输送存在异常偏大情况(图略),本文的资料选取 1971~2010 年,此处限于 ERA-40 的资料长度,下图相关选取了两套资料的共同长度 1971~2000 年。

图 5a 表示的是利用 NCEP/NCAR 大气再分析资料计算结果,图中发现同华北地区夏季可利用降水量相关的水汽输送矢量显著相关有两部分:一部分为以蒙古高原为中心的逆时针水汽输送通量相关系数,表示当华北夏季可利用降水量增加时,蒙古地区出现一个逆时针水汽输送环流,显著的相关系数分布表明西风带水汽从新疆等西北地区向华北地区输送的水汽通量增加;另一部分显著相关的地区是由孟加拉湾北上的水汽,汇合了西太平洋副热带高压西北侧的水汽输送通量,共同由南向北输

送到华北,同样对应了华北地区的夏季可利用降水量偏多时期。图 5b 表示的是基于 ERA-40 大气再分析资料计算结果,对比 NCEP/NCAR 资料所得到的结果,我们发现:ERA-40 结果同样出现了西风带上从新疆经内蒙古到达华北的西风带水汽输送的高相关系数区,表明华北夏季可利用降水量增大同这一带状区域中的水汽输送通量增大相关,但是其在蒙古以北地区的相关并不显著。与 NCEP 资料比较一致,华北南部出现了由南向北的高水汽输送相关区,但是其孟加拉湾水汽的相关也没有 NCEP 资料计算结果显著。

图 6 表示的是 1971~2010 华北夏季可利用降水量与同期大气环流之间的相关系数。从 500 hPa 位势高度的相关系数场发现:显著的负相关中心位于贝加尔湖西南部的蒙古地区,与之对应的为北极地区以泰梅尔半岛为中心的正相关中心。同时超过显著性检验的负相关系数区覆盖低纬度的大部分地区,而在日本南部出现了正相关中心,但是未通过显著性检验。这一相关分布表明,影响华北地区最主要的是以蒙古为中心的位势高度异常,当华北地区水资源增加时,以蒙古地区为中心的位势高度偏低。反之,这一带的位势高度偏高对应同期华北可利用降水量偏少。

分析 200 hPa 纬向风场的相关系数场发现,纬向风场表示高空西风急流对华北地区降水的影响,从相关系数场中看到,环贝加尔湖地区的风场表现为显著的负相关,在里海到新疆地区风场表现出显著的正相关,这种特征还表现在东北地区。而在日本南部海域则表现出显著的负相关区。从相关系数

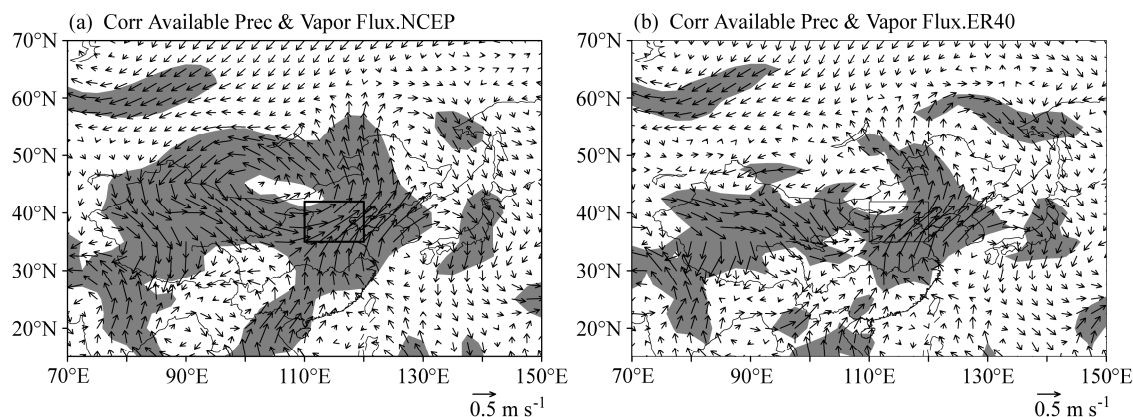


图 5 1971~2000 年华北全区夏季可利用降水量与同期水汽输送通量相关系数矢量:(a) NCEP/NCAR 计算结果;(b) ERA-40 计算结果。阴影为通过显著性检验的区域

Fig. 5 Vectors of correlation coefficient between summer available precipitation and water vapor flux during 1971–2000: (a) NCEP/NCAR data; (b) ERA-40 data. The shading denotes the areas exceeding the 95% confidence level

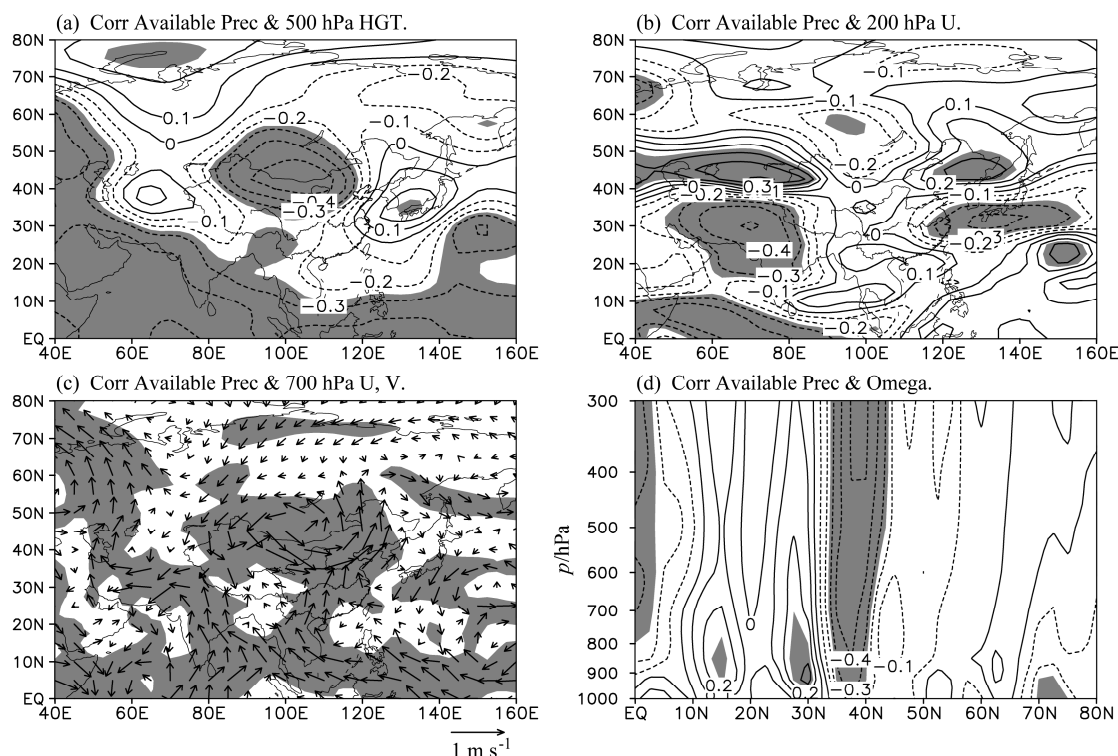


图6 1971~2010 华北夏季可利用降水量与同期 (a) 500 hPa 位势高度场、(b) 200 hPa 纬向风场、(c) 700 hPa 风矢量场、(d) 110°E~120°E 平均的垂直速度场的相关系数。阴影部分为通过显著性检验

Fig. 6 Correlation coefficients between summer available precipitation in North China and the corresponding (a) 500-hPa geopotential height, (b) 200-hPa zonal wind, (c) 700-hPa horizontal wind vector, (d) 110°E~120°E averaged vertical wind during 1971~2010. The shading denotes the areas exceeding the 95% confidence level

分布可以推断,当华北降水偏多时,位于中国北方地区的西风带增强,其南边与北边的西风带均减弱,对应于 500 hPa 位势高度场出现的低位势高度,华北降水偏少时对应的纬向风场特征与之相反。分析 700 hPa 风矢量场的相关系数场发现:风速相关矢量场显示出同位势高度场一致的特征。即在以贝加尔湖西南为中心的区域出现逆时针风场相关,表示当以贝加尔湖西南为中心的区域出现逆时针风场时候,其携带的西风带水汽也向华北地区输送增多,夏季华北降水偏多。同时显著相关风场还包括由南海向北输送的分量,表明当华北可利用降水偏多时,东亚夏季风增强,夏季风水汽输送也偏强。华北地区夏季可利用降水偏少时,风场反之。分析华北夏季可利用降水同 110°E~120°E 平均的垂直速度的相关系数场发现:对应华北地区可利用降水偏多,华北地区垂直速度场出现整层的垂直上升的增加,同时其南部出现垂直上升减弱。

研究发现,以贝加尔湖南部为中心的区域位势高度异常对华北地区的降水存在较强的影响(徐康

等, 2011a, 2011b)。因此,我们利用华北可利用降水同垂直的温度以及环流特征相关来研究垂直环流与华北可利用降水之间的关系。图 7 表示的是基于 NCEP/NCAR 大气再分析资料计算的华北可利用降水指数与 110°E~120°E 平均的大气环流场的相关系数,阴影为通过显著性检验的部分。分析可以发现,华北可利用降水同华北及其以北地区的低层温度为负相关,而在同样纬度的 700 hPa 以上高层为正相关(图 7a),并且这一正相关区域随高度的降低而南偏,在低层覆盖我国江南地区。这一特征表明,高纬度温度变化具有高低层反向变化的特征,高纬度蒙古以及贝加尔湖地区低层温度升高,同华北可利用降水变化反向,而在高层温度降低,同华北可利用降水变化一致。图 7b 为同一区域的位势高度的相关关系,从图中看到,华北可利用降水同高度场呈现负相关,负相关区域在华北北部地区从低层到 300 hPa 层,而在华北当地上空 300 hPa 为中心出现正相关关系,表明这一地区的位势高度同降水变化相一致,为降低趋势。图 7c 为同纬向

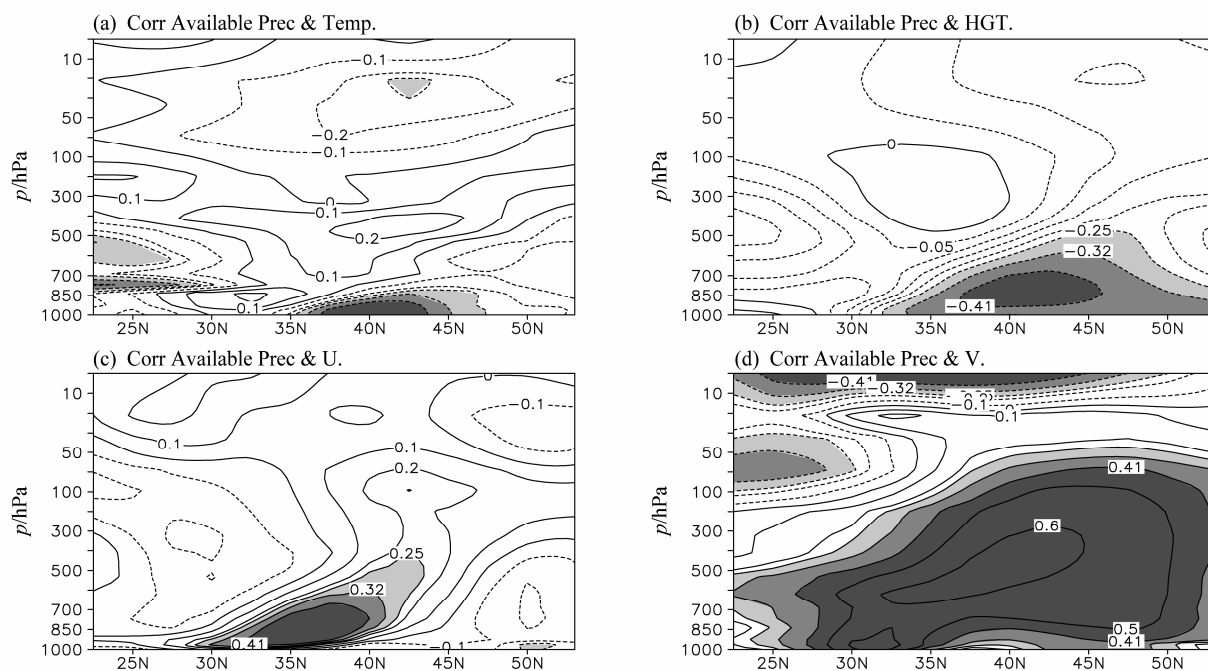


图 7 基于 NCEP/NCAR 大气再分析资料计算的华北夏季可利用降水与 110°E–120°E 平均的 (a) 温度场、(b) 位势高度场、(c) 纬向风场、(d) 经向风场相关的纬度—高度剖面。阴影为通过 95% 显著性检验的区域

Fig. 7 Latitude–height cross sections of correlation coefficients between summer available precipitation in North China and 110°E–120°E averaged (a) temperature, (b) geopotential height, (c) zonal wind, and (d) meridional wind based on NCEP/NCAR reanalysis datasets. The shading denotes the areas exceeding the 95% confidence level

风场的相关, 从图中看到, 纬向风场出现了和位势高度场相应一致的变化, 在位势高度场的最大相关中心的南、北两侧, 分别出现了西风的正相关与负相关区域, 表明当华北降水减少, 位势高度升高, 在变化的最大中心南部出现纬向风的加速, 在其北部出现纬向风的减弱。图 7d 为同经向风场的相关关系, 图中看到, 华北可利用降水同经向风的相关关系从 21°N 以北全部为负相关, 并且通过显著性检验, 表明经向风由南向北均为减弱趋势。

我们注意到, 大气再分析资料的可靠性一直以来存在争议 (李建等, 2010)。为了检验 NCEP/NCAR 资料的准确性, 我们利用中国台站探空资料进行了类似的分析 (见图 8)。由于探空资料对风速的观测是在 1980 年之后, 因此风场相关的时段为 1980~2007 年。如图 8 所示, 探空资料出现了同 NCEP 资料几乎一致的变化, 因此, 采用 NCEP/NCAR 大气再分析资料所描述的影响华北的环流和水汽特征具有较高的可信度。

6 结论和讨论

本文利用 1951~2010 年中国华北地区台站降

水、温度资料、NCEP/NCAR 和 ERA-40 再分析格点资料等, 根据高桥浩一郎 (1979) 给出蒸发计算的公式, 计算和分析了近几十年华北地区气候和水资源年代际变化, 揭示了影响华北可利用降水的水汽输送和环流变化。主要结论如下:

(1) 华北地区降水量 69% 被蒸发损耗, 可利用降水仅占全年降水的 31%。近 60 年以来华北空中水资源表现出明显的减少趋势。虽然最近 10 年该地区春季以及秋季降水增加, 但全年降水依然表现出减少趋势。华北地区蒸发量与降水量变化趋势基本一致, 蒸发在夏、秋、冬季均表现出显著减少趋势, 但 1980 年代之后春季的蒸发却有所增多。进入 21 世纪, 该地区的大气蒸发量显著增多。其中, 春季蒸发量的增加是对这一趋势的最大贡献。

(2) 华北夏季可利用降水量基本代表全年可利用降水量的变化特征。夏季及年平均的可利用降水量自 1950 年代起便持续减少, 减少量最大的两个阶段是 70~80 年代 (减少 33.6 mm) 以及 90 年代到 21 世纪初 (减少 27.6 mm)。华北水资源的严重减少主要是由于夏季可利用水资源的年代际减少

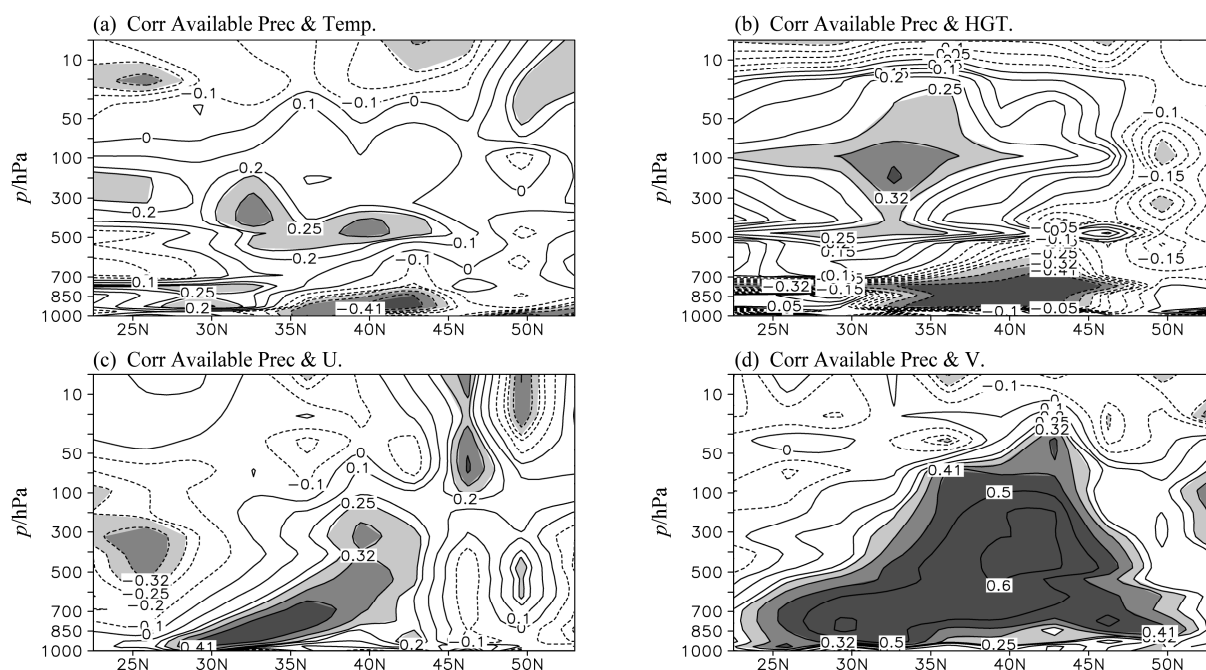


图 8 探空资料计算华北夏季可利用降水与 110°E~120°E 平均的 (a) 温度场、(b) 位势高度场、(c) 纬向风场、(d) 经向风场相关的纬度—高度剖面。阴影为通过 95% 显著性检验的区域

Fig. 8 Latitude-height cross sections of correlation coefficients between summer available precipitation in North China and 110°E–120°E averaged (a) temperature, (b) geopotential height, (c) zonal wind, and (d) meridional wind based on sounding datasets. The shading denotes the areas exceeding the 95% confidence level

而引起的。

(3) 西风带水汽与东亚夏季风水汽是华北可利用降水的主要来源，其中蒙古地区的东亚高纬度环流异常对华北夏季降水具有重要的影响。当华北地区可利用降水减少时，以蒙古地区为中心的位势高度场异常偏强，西风急流在华北地区减弱，低纬度风场出现顺时针环流特征，垂直速度场也出现下沉气流。反之，当该地区位势高度异常偏弱时，西风急流在华北地区增强，低纬度风场出现逆时针环流，垂直速度场表现为上升运动增强，对应同期华北可利用降水量增多。

已有研究表明，蒙古以及贝加尔湖地区的温度在低层变暖与全球变暖存在密切关联。我们注意到，该地区 700 hPa 以上出现变冷趋势，且变冷趋势一致延伸到我国江南地区。同样，位势高度场在蒙古以及贝加尔湖地区增高，但是在华北上空 300 hPa 为中心出现位势高度场的降低。纬向风场出现同位势高度一致的变化，在位势高度升高中心的南北两侧分别出现了东风异常和西风异常，而经向风表现出南北一致的减弱趋势。因此，监测该地区温度的变化对预测华北水资源和东亚夏季风的长期

趋势具有重要的意义。

参考文献 (References)

- 丁一汇, 胡国权. 2003. 1998 年中国大洪水时期的水汽收支研究 [J]. 气象学报, 61 (2): 129–145. Ding Yihui, Hu Guoquan. 2003. A study on water vapor budget over China during the 1998 severe flood periods [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61 (2): 129–145.
- 高桥浩一郎. 1979. 月平均温度月降水量以及蒸发量的推定方式 [J]. 天气 (日本), 26 (12): 759–763. Gaoqiaohaoyilang. 1979. Evaporation estimating method based on monthly average temperature and precipitation [J]. Weather (Japan), 26 (12): 759–763.
- 郭其蕴, 蔡静宁, 邵雪梅, 等. 2003. 东亚夏季风的年代际变率对中国气候的影响 [J]. 地理学报, 58 (4): 569–576. Guo Qiyun, Cai Jingning, Shao Xuemei, et al. 2003. Interdecadal variability of East-Asian summer monsoon and its impact on the climate of China [J]. Acta Geographica Sinica, 58(4): 569–576.
- 黄荣辉, 徐予红, 周连童. 1999. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势 [J]. 高原气象, 18 (4): 465–476. Huang Ronghui, Xu Yuhong, Zhou Liantong. 1999. The interdecadal variation of summer precipitations in China and the drought trend in North China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 18 (4): 465–476.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77 (3): 437–472.
- 李建, 宇如聪, 陈昊明, 等. 2010. 对三套再分析资料中国大陆地区夏季

- 降水量的评估分析 [J]. 气象, 36 (12): 1–9. Li Jian, Yu Rucong, Chen Haoming, et al. 2010. Evaluation and analyses of summer rainfall over mainland China in three reanalysis datasets [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 36 (12): 1–9.
- 马柱国, 符淙斌. 2006. 1951~2004 年中国北方干旱化的基本事实 [J]. 科学通报, 51 (20): 2429–2439. Ma Zhuguo, Fu Congbin. 2006. 1951–2004 basic fact of drought in northern China [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 51 (20): 2429–2439.
- 任国玉, 姜彤, 李维京, 等. 2008. 气候变化对中国水资源情势影响综合分析 [J]. 水科学进展, 19 (6): 772–779. Ren Guoyu, Jiang Tong, Li Weijing, et al. 2008. An integrated assessment of climate change impacts on China's water resources [J]. Advanced in Water Science (in Chinese), 19 (6): 772–779.
- 宋正山, 杨辉, 张庆云. 1999. 华北地区水资源各分量的时空变化特征 [J]. 高原气象, 18 (4): 552–566. Song Zhengshan, Yang Hui, Zhang Qingyun. 1999. The characteristics of temporal and spatial variation of water resource components over North China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 18 (4): 552–566.
- 田红, 郭品文, 陆维松. 2002. 夏季水汽输送特征及其与中国降水异常的关系 [J]. 南京气象学院学报, 25 (4): 498–502. Tian Hong, Guo Pingwen, Lu Weisong. 2002. Features of water vapor transfer by summer monsoon and their relations to rainfall anomalies over China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 25 (4): 498–502.
- Uppala S M, Kållberg P W, Simmons A J, et al. 2005. The ERA-40 re-analysis [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 131 (612): 2961–3012.
- Wang H J. 2001. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's [J]. Adv. Atmos. Sci., 18: 376–386.
- 徐桂玉, 杨修群, 孙旭光. 2005. 华北降水年代际、年际变化特征与北半球大气环流的联系 [J]. 地球物理学报, 48 (3): 511–518. Xu Guiyu, Yang Xiuqun, Sun Xuguang. 2005. Interdecadal and interannual variation characteristics of rainfall in North China and its relation with the Northern Hemisphere atmospheric circulations [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 48 (3): 511–518.
- 徐康, 何金海, 祝从文. 2011a. 近 50 年中国东部夏季降水与贝加尔湖地表气温年代际变化的关系 [J]. 气象学报, 69 (4): 570–580. Xu Kang, He Jinhai, Zhu Congwen. 2011a. The interdecadal linkage of the summer precipitation in eastern China with the surface air temperature over Lake Baikal in the past 50 years [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese), 69 (4): 570–580.
- 徐康, 祝从文, 何金海. 2011b. 近 50 年环贝加尔湖区变暖对中国华北夏季降水的影响机理 [J]. 高原气象, 30 (2): 309–317. Xu Kang, Zhu Congwen, He Jinhai. 2011b. Impact of the surface air temperature warming around Lake Baikal on trend of summer precipitation in North China in the past 50 years [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 30 (2): 309–317.
- 叶柏生, 杨大庆, 丁永建, 等. 2004. 我国过去 50 年来降水变化趋势及其对水资源的影响 (I): 年系列 [J]. 冰川冻土, 26 (5): 587–594. Ye Bosheng, Yang Daqing, Ding Yongjian, et al. 2004. Variation trend of precipitation and its impact on water resources in China during last 50 years (I): Annual variation [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 26 (5): 587–594.
- 宇如聪, 周天军, 李建, 等. 2008. 中国东部气候年代际变化三维特征的研究进展 [J]. 大气科学, 32 (4): 893–905. Yu Rucong, Zhou Tianjun, Li Jian, et al. 2008. Progress in the studies of three-dimensional structure of interdecadal climate change over eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (4): 893–905.
- 张庆云. 1999. 1880 年以来华北降水及水资源的变化 [J]. 高原气象, 18 (4): 486–495. Zhang Qingyun. 1999. The variations of the precipitation and water resources in North China since 1880 [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 18 (4): 486–495.
- Zhou Tianjun, Yu Rucong. 2005. Atmospheric water vapor transport associated with typical anomalous summer rainfall patterns in China [J]. Journal of Geophysical Research, 110: D08104, doi: 10.1029/2004JD005413.
- 周连童, 黄荣辉. 2003. 关于我国夏季气候年代际变化特征及其可能成因的研究 [J]. 气候与环境研究, 8 (3): 274–290. Zhou Liantong, Huang Ronghui. 2003. Research on the characteristics of interdecadal variability of summer climate in China and its possible cause [J]. Climate and Environmental Research (in Chinese), 8 (3): 274–290.
- Zhu C W, Wang B, Qian W H, et al. 2012. Recent weakening of northern East Asian summer monsoon: A possible response to global warming [J]. Geophys. Res. Lett., 39: L09701, doi: 10.1029/2012GL051155.