

邢峰, 韩荣青, 李维京, 2018. 夏季黄河流域降水气候特征及其与大气环流的关系[J]. 气象, 44(10): 1295-1305.

夏季黄河流域降水气候特征及其 与大气环流的关系*

邢 峰¹ 韩荣青² 李维京²

1 泸州机场有限责任公司气象台, 四川泸州 646000

2 国家气候中心, 北京 100081

提 要: 本文基于 1958—2015 年夏季黄河流域 55 个观测站降水量和 NCEP/NCAR 再分析 1 高度场等资料, 使用 Mann-Kendall 突变检验、合成分析和 Monte Carlo 检验等气候统计方法, 分析了黄河流域 58 年夏季降水量的气候变化特征, 以及导致其变化的大气环流成因。58 年期间, 黄河流域夏季降水量总体呈减少趋势, 尤其在河套北部有显著性减少趋势, 其主要原因是欧亚中高纬度等压面升高、西风带减弱所致; 1975 年和 1996 年是黄河流域夏季降水的两个明显年代际气候变化转折点, 在 1958—1975 年期间, 黄河流域夏季降水量年际变化大, 异常偏多和偏少年出现频次较高, 期间欧亚中高纬度及其以南包括黄河流域地区高度场偏低, 主要受高空低压系统和较强冷空气影响; 在 1976—1995 年期间, 黄河流域大部降水偏多, 其主要环流成因为乌拉尔山阻塞高压发展、贝加尔湖到东北亚一带受负高度距平控制高空槽加深, 同时, 来自南方的暖湿气流输送增强; 到 1996—2015 年最近 20 年间, 乌拉尔山北部环流高度场偏低、里海至贝加尔湖再到东北亚一带高度场一致偏高, 黄河流域一带西风带强度和冷空气势力均较弱, 流域受高压影响导致大部区域降水偏少。不同时期黄河各流域段降水量与中高纬度阻塞高压以及与西北太平洋副热带高压的相关关系分析进一步说明了上述结论。

关键词: 黄河流域夏季降水量, 年际变化, 阻塞高压, 西北太平洋副热带高压

中图分类号: P461

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.10.006

Spatio-Temporal Variations of Summer Rainfall over Yellow River Valley and Its Association with Atmospheric Circulation

XING Feng¹ HAN Rongqing² LI Weijing²

1 Meteorological Observatory of Luzhou Airport, Sichuan, Luzhou 646000

2 National Climate Centre, Beijing 100081

Abstract: With the recent 58 summers data from 1958—2015, including precipitation from 55 observing stations over the Yellow River Valley and height field of NCEP/NCAR reanalysis 1 data etc., the characteristics of interannual variations for the summer rainfall in the Yellow River Valley and their causes associated with the synchronous variations of atmospheric circulations are analyzed by Mann-Kendall test, composite analysis and Monte-Carlo test methods in this paper. The results show that the reasons why the summer rainfall in the Yellow River Valley has been decreasing since 1958, in particular, significantly decreasing trend in the northern bend of Yellow River, are derived from the rising isobaric surface and weakened westerlies over the mid-high latitude of Eurasia. The climatic changes of the 58-year rainfall in Yellow River Valley is divided into three different periods by two abrupt points in 1975 and 1996 according to

* 国家科技支撑计划项目(2015BAC03B04)、国家自然科学基金重点项目(91437215)及国家自然科学基金面上项目(41275073 和 41575070)共同资助

2018 年 1 月 12 日收稿; 2018 年 9 月 17 日收修定稿

第一作者: 邢峰, 从事短期天气预报工作和短期气候诊断研究. Email: x_ingfeng@aliyun.com

通信作者: 韩荣青, 从事气候预测及其研究工作. Email: hrq@cma.gov.cn

natural changes in itself. During the period of 1958—1975, the low pressure circulations with stronger cold air dominated the Yellow River Valley and led to the larger interannual variations of anomalous precipitation whatever the above and below normal. In the phase 1976—1995, the reasons why the above normal rainfall happened to most sections of Yellow River Valley, are the development of Ural blocking high, and the negative height anomalies in troposphere dominated the regions from Baikal to Okhotsk, creating a deep trough over the Yellow River Valley. In addition, the warm and moist flow from South became stronger. In the recent 20 years, 1996—2015, most regions of Yellow River Valley suffered less rainfall, mainly due to the decreased heights of circulations over the northern Ural, and meanwhile the isobaric surface rising together over the areas from Caspian Sea to Baikal and to Okhotsk accompanied with weakened westerlies, which resulted in the weakened cold air and enhanced high pressure circulations controlling the Yellow River Valley. Moreover, the correlation analyses of rainfall in four basins of the Yellow River Valley with mid-high latitude blocking highs and the subtropical high in three different decades evidence the above conclusion further.

Key words: summer rainfall over Yellow River Valley, interannual variation, blocking high, subtropical high over the western North Pacific

引 言

黄河流域是中华民族古文明的发源地之一,其自西向东盘亘于中纬度带,流域东西向跨度大,涵盖高原、山地、平原和丘陵,各流域段间气候差异较大,黄河流域大部恰好处于我国西部干旱半干旱地区与东部湿润半湿润地区的分界线(杨建平等,2003;王浩等,2005),全国 90%左右的耕地和人口分布在该分界线以东地区(王浩等,2005),黄河流域降水的气候变化成为研究的焦点(刘晓东等,2002;邵晓梅等,2006;庞爱萍等,2008;王记芳等,2009;常军等,2014),它代表我国淡水资源的多少分布、深刻影响着社会各方面的发展。因此研究黄河流域最近几十年降水的气候变化特征及其直接的大气环流变化成因不仅具有流域自身的意义,而且对于理解中国整个北方干湿气候变化成因也具有一定的参考价值。

伴随全球变暖,尤其是 20 世纪 80 年代以来,升温尤为迅速(符淙斌和王强,1991;衣育红和王绍武,1992;沙万英等,2002),黄河流域气候包括降水量也发生了变化,最突出的问题是黄河流域的黄土高原(河套北部)和下游地区变得更加干旱(王浩等,2005;刘晓东等,2002;邵晓梅等,2006;庞爱萍等,2008),黄河流域干旱和湿润分界线向东向南移动显著(王浩等,2005),全球升温与黄河流域干旱有一致变化关系(刘晓东等,2002),从大气环流气候变化的角度,杨建平等(2003)分析了我国近 50 年干湿气候

界线波动的原因,指出东亚季风系统(西北太平洋副热带高压、孟加拉湾西南季风、青藏高原环流系统)以及中高纬度西风带系统的异常变化与中国干湿分界线波动变化一致。其实,全球变暖背景下,全球大气环流乃至全球气候都发生了深刻变化,20 世纪下半叶,沃克环流明显减弱,厄尔尼诺现象发生频繁(Vecchi et al,2006;王东阡等,2016)。在变暖背景下,东亚夏季风在 20 世纪 70 年代末之后显著减弱,对应降水在我国华北、黄河流域减少,在长江流域增多(Wang,2001;王会军和范可,2013)。

2000 年以来最近十几年黄河流域降水量的年际变化特征还缺少研究;已有研究给出了黄河流域降水量年代际异常变化可能的大气外强迫成因(王春学和李栋梁,2012;李春晖和杨志峰,2005),但其直接影响因素即大气环流的气候异常变化还不清晰,杨建平等(2003)尽管指出了副热带高压、欧亚中高纬度西风带等系统的年代际变化影响着中国湿润到干旱过渡带的气候,但仍然缺少定量分析,而且这种影响关系的年际变化也不清楚。

1 数据和方法

1.1 数据

使用 1958—2015 年共 58 年夏季(6—8 月)黄河流域内 55 个地面气象观测站点逐月降水资料,和同期的 NCEP/NCAR 再分析数据集 1 逐月高度场

资料(Kalnay et al, 1996),本文所有要素导出变量要用到的气候平均期均指 1958—2015 年平均。基于 Mann-Kendall 趋势突变检验方法(魏凤英, 2007)的分析,将 58 年黄河夏季降水量演变序列,分为 3 个变化时段,即 1958—1975、1976—1995、1996—2015 年;同时,按照目前国家气候中心黄河流域夏季降水量预测业务划分的流域区间(参考了 55 站降水量 EOF 分解空间模态,图略),将黄河流域分为 4 个地理区域段,即兰州以上的上游、河套北部(宁夏固原—甘肃庆阳北—陕西宜川一线以北)、河套南部(泾渭洛河流域、山陕间南部和三门峡至花园口流域段)以及下游(郑州以东)流域段,来进一步分析黄河流域夏季降水量的年际变化及其大气环流变化成因。分析涉及中高纬度阻塞高压(以下简称阻高)环流形势包括乌拉尔山($50^{\circ}\sim 70^{\circ}\text{N}$ 、 $40^{\circ}\sim 70^{\circ}\text{E}$)(李双林和纪立人,2001)、贝加尔湖($50^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 、 $80^{\circ}\sim 110^{\circ}\text{E}$)和鄂霍次克海($50^{\circ}\sim 60^{\circ}\text{N}$ 、 $120^{\circ}\sim 150^{\circ}\text{E}$)阻高,夏季阻高指数是计算夏季(6—8 月平均)500 hPa 高度场阻高区域平均的标准化值(赵振国,1999)。本文涉及的夏季西北太平洋副热带高压(以下简称副高)特征指数包括强度、北界和西伸脊点,数据使用刘芸芸等(2012)用 NCEP/NCAR 再分析数据重建的月副高指数,与 74 项环流指数中的副高指数相比,该副高指数具有源数据空间水平分辨率高、与我国东部夏季风地区降水量关系更为密切、刻画实际副高气候变化特征更为客观等优点。

1.2 方法

使用 Mann-Kendall 法来检测黄河流域降水量趋势的突变点,它是一种非参数统计检验方法。对于一个原始序列 $X_i (i=1, \dots, n)$,按照 X_1, X_2, \dots, X_n 的顺序构造一个秩序列,计算出秩序列的标准正态分布 $UF_i (i=1, \dots, n)$, UF_i 的正负大小变化即反映了 X_i 的趋势变化;类似地,将 X_i 按照逆序排列 $X_n, X_{n-1}, \dots, X_2, X_1$,构造另一个秩序列,其标准正态分布为 $UB_i (i=1, \dots, n)$,使 $UB_i = -UF_i$,如果 UF_i 和 UB_i 两条曲线出现交点,且交点在正态分布统计检验临界直线之间(本文使用 $\alpha=0.05$ 显著性水平做统计显著性检验),那么交点对应的的时间就是突变开始的时间(魏凤英,2007)。

本文中多年线性变化趋势值指线性拟合 $y=a+bx$ 中的系数 b ,其由最小二乘法确定。高度场距平合成和多年线性变化趋势的统计检验用蒙特卡洛方

法(Storch and Zwiers,1999)。即将分析对象原序列重新随机排列很多次(本文是 1000 次),并对每一次排列分别做相应分析(本文指高度场距平合成或线性趋势),得到一个参考数据组,如果原序列分析结果的正值(或负值)大于(或小于)等于参考数据组最大(或小)的 5%,即认为分析结果通过了 0.05 的显著性水平检验。

2 结果分析

2.1 黄河流域夏季降水量时空特征

将 1958—2015 年 58 年来黄河流域 55 站平均夏季降水量标准化,如图 1a,从其中分别挑出标准化降水量最大(≥ 1.3 个标准差)和最小(≤ -1.4 个标准差)的各 6 年,6 个降水最多年份按从大到小依次是 1958、1964、1979、1961、1959、2003 年,它们主要分布在 20 世纪 50、60 年代,而 20 世纪 80、90 年代流域降水偏多年没有入围最多的 6 年,2000 年以来,只有 2003 年降水偏多进入这最多的 6 年,按照美国 NCEP/NOAA 气候预测中心对 ENSO 事件的标准(http://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php,下同),这降水最多的 6 年中有 3 个厄尔尼诺结束年(1958、1959、2003 年)、2 个 ENSO 中性正常年(1979、1961 年)以及 1 个拉尼娜发展年(1964 年),表明黄河流域夏季降水异常偏多年份都不在厄尔尼诺发展位相;降水量最少的 6 年从小到大依次是 1997、2015、1965、1991、1974、1969 年,其中除了 1974 年是拉尼娜事件发展次年外,其余偏少年份均是厄尔尼诺发展年份,尤其是两个最偏少年(1997、2015 年)均是历史上极强厄尔尼诺事件发展年份。

58 年平均的夏季降水量空间分布(图 1b)表明,降水量最大的区域包括黄河上游四川段、甘肃南部、青海东南部局部、泾渭洛河区间东南部、三门峡至花园口区间、以及郑州以东区间,量值达到 300 mm 以上,局部达到 400~500 mm;其次是山陕区间、泾渭洛河西段和兰州附近等区域,量值在 200~300 mm,黄河流域夏季降水量最小的区域包括,兰州至鄂托克旗区间和上游青海部分地区,降水量只有 100~200 mm,局部 50~100 mm。

先将 58 年黄河流域 55 站平均夏季降水量做 5 年滑动平均处理(前后各丢失两年数据),然后对滑

动数据再做 Mann-Kendall 趋势突变检验(图 2),结果表明在 1960—2013 年期间,降水量正反时间序列构建的标准正态分布函数 UF 和 UB 有两个时间间距较大的交叉点,即在 1975 和 1996 年的两个交叉点表示了黄河流域夏季降水的两个年代际气候变化转折点。在 1960—1975 年期间,UF 和 UB 逐年走低,值在 0 以下,表明降水量有减少趋势,而且在 1967—1976 年时段降水偏少具有统计显著性;在 1976—1995 年期间,UF 和 UB 逐年走高,部分年份 UF 值甚至 >0 ,表明降水量呈年际增多的趋势;在 1996—2015 年期间,UF 和 UB 曲线逐年走低,大部分年份低于 0,表明黄河流域夏季降水量又开始回归到减少的趋势。通过以上突变检验分析,本文将 58 年黄河流域夏季降水量分为 3 个不同的变化时段,即 1958—1975、1976—1995、1996—2015 年。随后的部分内容将对这 3 个时段分别进行分析。

按照前面 Mann-Kendall 突变分析,黄河流域夏季降水量可分为 3 个不同气候变化时段(图 3)。在 1958—1975 年期间(图 3a),与气候平均相比,降水偏多的区域分布在上游西段、河套东北部、河套西南部以及下游地区,其中大部区域偏多 1%~10%(偏多约 0~20 mm,局部达 40 mm),局部偏多 10%~20%(偏多约 20~50 mm);降水偏少的落区分布在上游东段、河套西北部、河套东南部以及下游西段,偏少约 1%~10%(偏少约 0~20 mm)。然而,到了 1976—1995 年期间(图 3b),整个河套地区降水明显增多,尤其河套北部偏多 5%~20%(偏多约 10~30 mm),而上游西段和下游东段有所减少,偏少约 1%~10%(偏少约 0~40 mm)。在最近的时段 1996—2015 年(图 3c),黄河流域夏季降水量全流域性偏少,尤其河套北部和下游降水偏少最多,约 1%~20%(减少 10~40 mm),而河套南部部分地区(三花区间的东部)和上游青海段降水量偏多约 5%左右(增加 10~20 mm)。

纵观 58 年,黄河流域夏季降水量一个突出的变化特征是在河套地区变化起伏多,在早期 1958—1975 年期间河套部分地区偏多或偏少 5%左右,到 1976—1995 年期间河套地区整体偏多,尤其是河套北部偏多 5%~20%,再到最近 1996—2015 年期间河套呈现大部地区偏少 5%~20%。3 个时段期间,上下游地区降水也经历了一定变化,下游地区降水

量经历了由早前大部偏多(1%~15%)到大部偏少(1%~10%)再到最近一个时期的大部偏少加重(1%~15%);而上游东、西段地区降水量经历了几乎是反向的 10%以内的起伏变化(图 3a~3c)。

2.2 环流成因分析

首先分析与黄河流域夏季降水量异常变化相联系的大气环流成因,理清关键影响环流系统。参考图 1a 挑出黄河流域标准化夏季降水量最大的 6 个偏多年份(1958、1964、1979、1961、1959、2003 年),标准化值 ≥ 1.3 ;以及最小的 6 个偏少年(1997、2015、1965、1991、1974、1969 年),标准化值 ≤ -1.4 。分别将上述典型降水偏多和偏少年夏季 500 hPa 高度场距平进行合成,可以得到降水异常变化特征所对应的大气环流异常特征(图 4)。

500 hPa 高度场距平合成(图 4a)表明,在黄河流域降水异常偏多年,欧亚中高纬度 60°N 以南为负距平控制,从里海到巴尔喀什湖再到贝加尔湖直到东北亚鄂霍次克海附近一带为负距平中心,黄河流域也为负距平控制,以上区域高度场异常合成均通过 0.05 显著性水平检验(白色细线包围),中高纬度 500 hPa 高度场负距平表示对流层中层受低层上升气流控制而低层受冷高压控制,低层暖湿气流遇冷高压会产生抬升运动,从而导致流域降水偏多。此外,图 4a 显示在近极地地区受正高度距平控制其外围达到乌拉尔山,正高度距平中心通过 0.05 显著性水平检验,欧亚中纬度至高纬度高度距平场呈现北高南低的偶极形态。

黄河流域降水异常偏少年份高度场距平合成(图 4b),与降水偏多年形势不同,欧亚中高纬度经向上呈正负正形态,即乌拉尔山一带高度为负距平,从里海到巴尔喀什湖再到贝加尔湖直到鄂霍次克海一线为高度正距平,以贝加尔湖为中心的正高度距平外围控制河套北部地区,表明黄河流域及其以北受暖高压控制,空气以下沉运动为主,因此降水偏少。需要指出的是,黄河下游代表站仅有 5 个,对于全流域降水异常贡献较少,因此图 4 更多地展示了河套和上游地区降水异常的环流成因。

图 3 说明了 3 个不同时段黄河流域降水异常的空间分布特征,下面来分析这 3 个不同时段对应的大气环流异常(图 5)。在 1958—1975 年期间,黄河

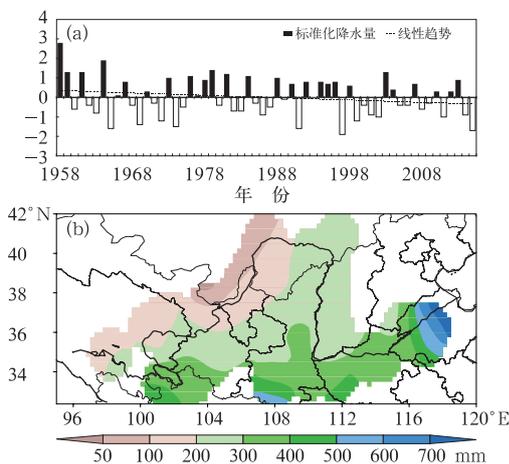


图 1 1958—2015 年黄河流域夏季
降水量时空特征

(a) 标准化的 55 站平均降水量,
(b) 55 站夏季降水量气候平均空间分布

Fig. 1 Spatio-temporal characteristics
of summer rainfall at 55 stations over
the Yellow River Valley
from 1958 to 2015

(a) annual variation of standardized summer
rainfall averaged with 55 stations,
(b) spatial distribution of climatological
mean summer rainfall at 55 stations

流域降水在河套北部大部偏多,河套南部偏少,在上游和下游部分地区偏多(图 3a),对应地,欧亚中高纬度从乌拉尔山至贝加尔湖再到鄂霍茨克海一带及其以南的地区由负高度距平控制,并通过 Monte-Carlo 检验水平,表明黄河流域受较冷低压系统控制,对流层中层为低压而近地面为高压,大气容易产生较强的对流运动,58 年中降水最多的 6 年有 4 年在这一时期(图 1a),但另一方面也可看出,低纬度西北太平洋副高体较弱,表明西南暖湿气流较弱,因此此时段尽管黄河流域不缺乏冷空气但缺乏水汽,所以并未出现全流域的降水偏多;在 1976—1995 年期间,黄河流域大部降水偏多尤其河套北部偏多 5%~20%,仅在上游西部和下游东部略偏少(图 3b),对应地,500 hPa 高度距平场中(图 5b),乌拉尔山及其东侧为正高度距平,贝加尔湖至鄂霍茨克海一带为负高度距平控制,黄河流域大部处在中高纬度高压脊东南侧高空槽底部,同时,东亚副高体面积偏大、强度偏强、位置偏西,有利于暖湿气流抵达偏北偏西的黄河流域,因此这样的环流异常形势造成了黄河流域大部降水偏多。在 1996—2015 年期间,与前一时段形势完全不同,黄河流域大部降水偏少尤其河套北部偏少 5%~20%(图 3c),对应地,500 hPa 高度距平场中(图 5c),欧亚中高纬度里海、

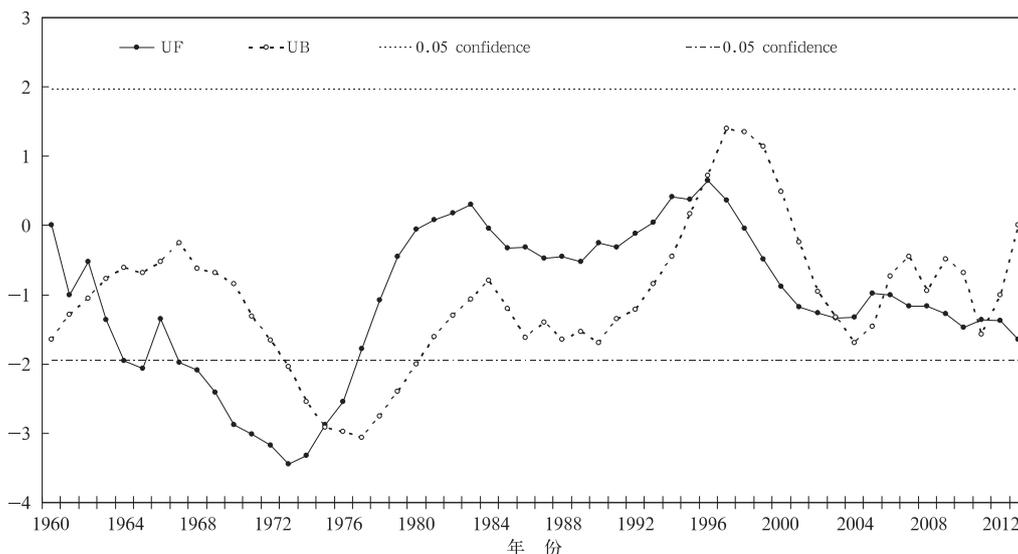


图 2 1960—2013 年黄河流域 55 站点平均夏季降水量 Mann-Kendall 突变检验
(降水量预先经过 5 年滑动平均处理)

Fig. 2 Mann-Kendall test for the evolution of summer rainfall averaged
at 55 stations over the Yellow River Valley during 1960—2013
(the rainfall dealt with 5 a running mean before Mann-Kendall analysis)

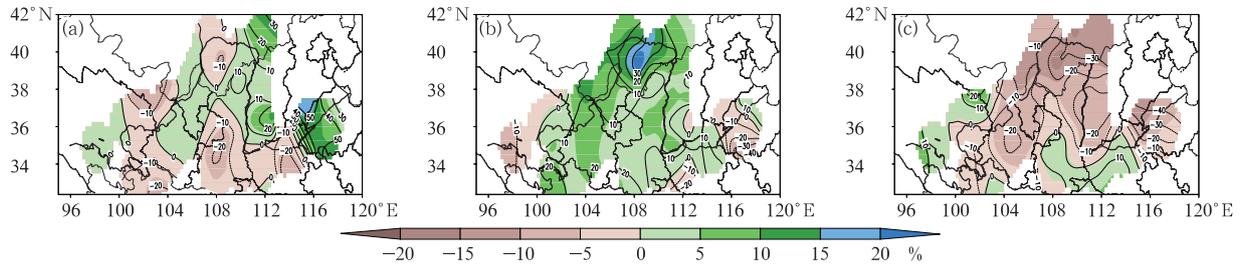


图 3 黄河流域 55 测站夏季降水量距平(等值线,单位:mm)及其距平百分率(填色)
 (a)1958—1975 年平均,(b)1976—1995 年平均,(c)1996—2015 年平均
 (图中所有变量都经过 9 点平滑)

Fig. 3 Anomalies (contours, unit: mm) and anomaly percentage (shadowed)
 of summer rainfall at 55 stations over the Yellow River Valley
 (a) averaged in 1958—1975, (b) averaged in 1976—1995, (c) averaged in 1996—2015
 (All variables are smoothed by 9 points)

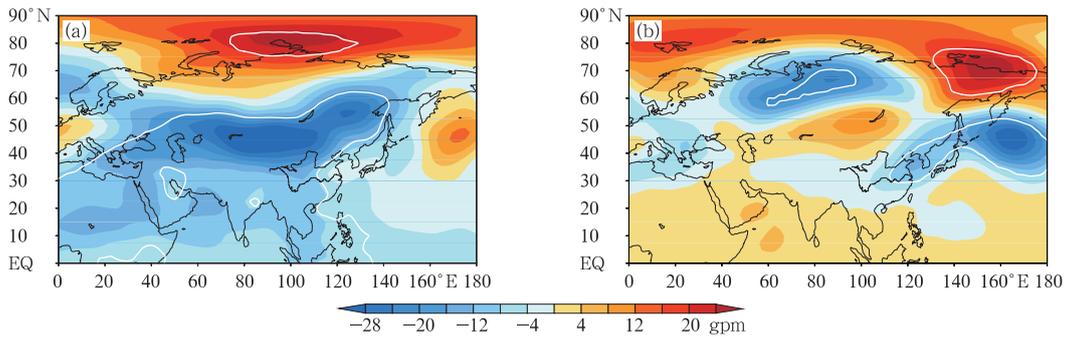


图 4 黄河流域夏季降水典型异常年 500 hPa 高度场距平合成
 (a)最偏多的 6 年(1958、1959、1961、1964、1979、2003 年)合成;
 (b)最偏少的 6 年(1965、1969、1974、1991、1997、2015 年)合成
 (彩色阴影区表示高度场距平合成,间隔 4 gpm;细白色等值线包围区域表示
 合成通过 Monte-Carlo 0.05 显著性水平检验)

Fig. 4 Composites of height anomalies at 500 hPa for the typical dry and wet summers
 (a) composite of the 6 top rainfall summers separately in 1958, 1959, 1961, 1964, 1979, and 2003,
 (b) composite of the 6 least rainfall summers separately in 1965, 1969, 1974, 1991, 1997, and 2015
 (Composites of height anomalies are shown by color shadows with 4 gpm interval; regions surrounded by
 light white contours represent the 0.05 significance level estimated by the Monte-Carlo test)

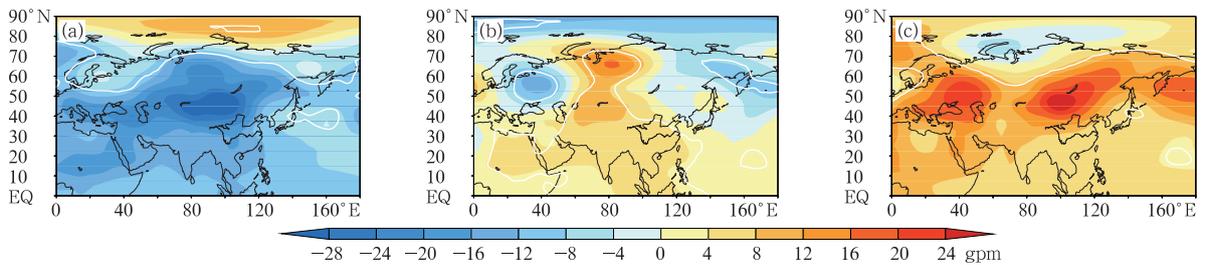


图 5 不同年代夏季 500 hPa 高度场距平
 (a)1958—1975 年平均,(b)1976—1995 年平均,(c)1996—2015 年平均
 (彩色阴影区表示高度场距平,细白色等值线包围区域表示合成通过 Monte-Carlo 检验 0.05 显著性水平)

Fig. 5 The 500 hPa height anomalies averaged in three decades
 (a) 1958—1975, (b) 1976—1995, (c) 1996—2015
 (Height anomalies are shown by color shadows; regions surrounded by the light white
 contours represent the 0.05 significance level estimated by the Monte-Carlo test)

贝加尔湖、鄂霍茨克海分别是高度异常偏高的中心地带,正高度距平控制着这 3 个中心一带及其以南的中低纬度地区,且大部地区正高度距平通过 0.05 显著性水平检验,而乌拉尔山北部为高度负距平控制,表明尽管东亚副高体进一步加强西伸,但是我国北方中纬度西风带减弱、像前两个时期一样强的北方冷空气条件不存在了,黄河流域主要受层结稳定的高压下沉气流控制,因此导致黄河流域大部降水偏少。

以上分析表明,黄河流域夏季降水不仅与中高纬度阻高有一定关系,在一定程度上还与副热带系统有一定关系(杨建平等,2003),西太平洋副高是东亚副热带夏季风的重要系统,因此下面分析了黄河不同流域段夏季降水量分别与欧亚中高纬度阻高指数(图 6)以及与西太平洋副高特征指数的关系(图 7),并计算了不同降水时期里它们的相关系数(表 1)。

首先,经过计算黄河流域各区段夏季降水量与乌拉尔山、贝加尔湖和鄂霍茨克海阻高分别在 3 个年代的相关关系发现,在 1958—1975 年期间,仅有河套南部与乌拉尔山阻高呈显著性负相关(图 6a),达到 -0.42 (表 1);在 1976—1995 年期间,黄河流域夏季降水偏多(图 3b),其与中高纬度阻高有密切联系,其中贝加尔湖阻高与黄河下游降水有显著性负相关(-0.48)(图 6b,表 1),鄂霍茨克海阻高与黄河流域上游、河套北部和下游降水量分别有 -0.37 、 -0.55 、 -0.56 的显著性相关(图 6c,6d,表 1);在 1996—2015 年期间,随着全流域降水减少(图 3c),仅有上游降水量与鄂霍茨克海阻高有显著性相关达 -0.38 (图 6d,表 1)。可以看出,流域各区段降水量变化与欧亚中高纬度阻高有密切的关系,而且无论在哪一时期它们均呈负相关关系,所以 1996—2015 年夏季黄河流域大部地区降水减少可能是全球变暖效应,因为随着变暖对流层中高层等压面升高、西风带减弱了(Wang, 2001)。

用同样方法计算了黄河流域各段夏季降水量与副高强度、北界和西伸脊点在不同时期的相关关系。结果表明,在 3 个时期的仅后两个时段里,黄河流域降水与副高特征指数有显著性的相关关系。在 1976—1995 年期间,上游降水量与副高北界指数相关达 0.47 (图 7a,表 1),河套北部降水量与副高强度指数相关达到 -0.39 (表 1),下游降水量与副高北界指数相关达到 0.4 (图 7c,表 1);在 1996—2015

年期间,上游降水量与副高西伸脊点指数相关达到 -0.43 (图 7a,表 1),河套南部降水量与副高西伸脊点指数相关为 -0.54 (图 7b,表 1)。

综合以上相关分析不难看出,全球变暖热带外大气等压面升高(Wang, 2001),一方面使得中高纬度西风带和冷空气势力减弱;另一方面,势必会使得副高体增强,从而使得其加强了对黄河流域气候的影响。

表 2 是前述欧亚中高纬度 3 个阻高所在空间范围的 500 hPa 高度场平均值、副高指数以及黄河流域各段降水量的线性趋势。结果表明,欧亚中高纬度 3 个阻高区域高度场在 1958—1975 年期间均呈显著性增强趋势,其中乌拉山、贝加尔湖和鄂霍茨克海高度场分别增加 1.58 、 2.29 、 $1.39 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$;在 1976—1995 年期间仅有鄂霍茨克海高度有显著性增加趋势,为 $0.78 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$;在 1996—2015 年时段,3 个阻高区域高度均没有显著性变化趋势;3 个阻高区域高度场 58 年总体趋势显著增强,乌拉山、贝加尔湖和鄂霍茨克海高度场分别增加了 0.27 、 0.52 、 $0.30 \text{ m} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

如表 2 所示,58 年线性趋势表明,西北太平洋副高强度显著性增强(2.82 a^{-1})而北界和西伸脊点无显著性趋势;在 3 个时段里,仅在最近时段 1996—2015 年期间,副高强度显著性增强(5.83 a^{-1}),副高西伸脊点显著性向西伸($-0.59^\circ \text{E} \cdot \text{a}^{-1}$),副高北界在各年代内均没有显著性变化趋势;在 1958—1975 年期间,副高强度和西伸脊点呈现减弱和东撤趋势,而在 1976—1995 年期间,副高强度和西伸脊点又有所增强和西伸趋势,虽然在这两个时段的趋势变化均不显著,但可以看出副高增强开始于 20 世纪 70 年代中期,与东亚夏季风在 20 世纪 70 年代中期变弱相一致(黄荣辉等,1999)。

黄河流域各段夏季降水量只在河套地区有显著的年际线性变化趋势(表 2),其中河套北部降水量在 1958—1975 年期间显著性减少趋势($-4.9 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$),58 年也呈显著性减少($-0.67 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$),而在最近的两个时段变化趋势不显著;河套南部降水量仅在 1958—1975 年有呈显著性减少趋势($-6.70 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$)。

在 1958—1975 年期间,河套南、北部地区降水与乌拉尔山阻高有较好的负相关(表 1),与贝加尔湖阻高也呈负相关(但不显著),这一时期河套地区降水呈显著性减少趋势的直接大气成因可能就是中

高纬度等压面升高(表 2),冷空气势力有减弱趋势所致。在 1976 年以来的两个时段,副高才与黄河流

域降水有了显著性关系,在 1976—1995 年期间,主要体现副高的强度和南北位置(北界)对河套北部和

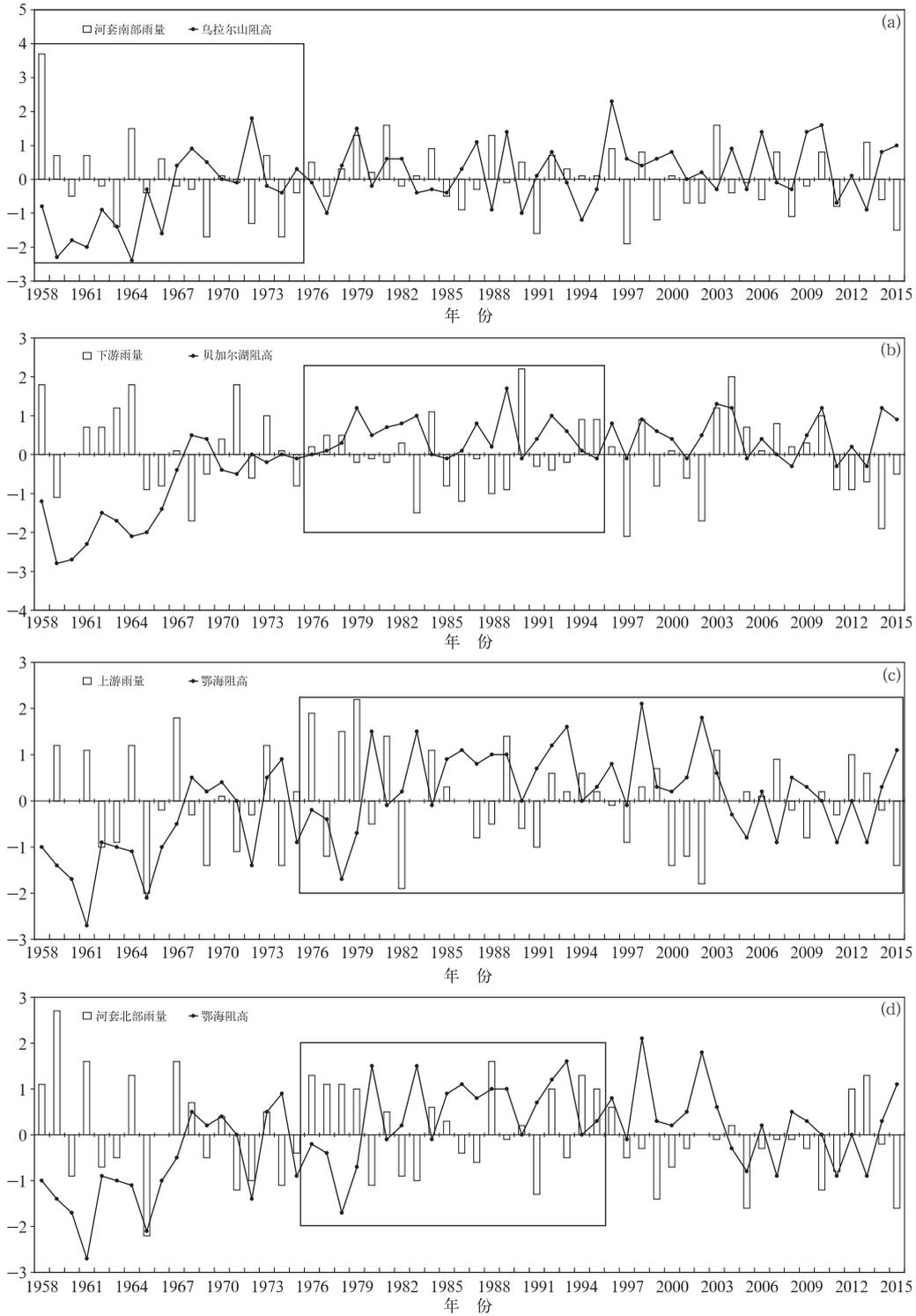


图 6 黄河流域各段夏季降水量与欧亚中高纬度阻高形势的变化关系 (所有变量均经过标准化处理,矩形框内表示显著性相关时段)

Fig. 6 Evolutions of summer blocking highs and rainfall in different sections of Yellow River Valley (All variables are normalized, rectangles denote the periods with significant correlation)

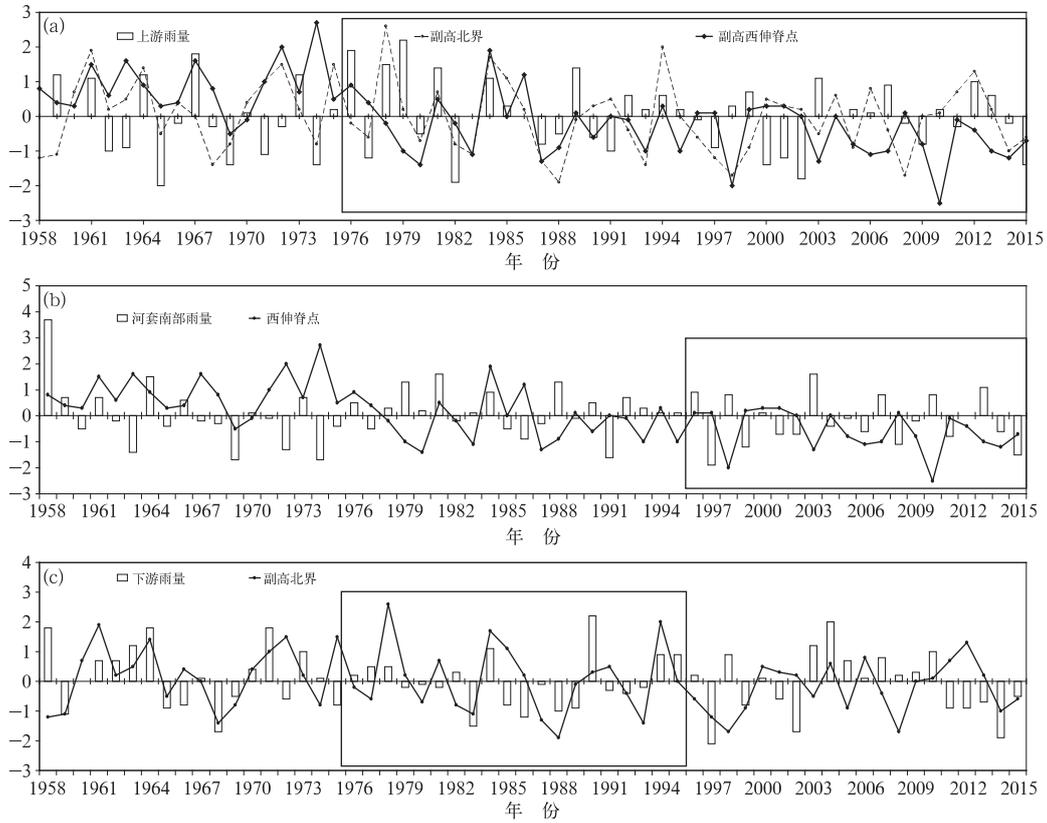


图 7 同图 6, 但为与西太平洋副高特征指数(强度、北界和西伸脊点)的变化关系
 Fig. 7 Same as the Fig. 6, but the indices (intensity, north boundary, and extreme longitude of stretching westward) of subtropical high in the western North Pacific instead of the blocking high indices

表 1 黄河流域分段夏季降水量与环流指数的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between summer rainfall for different sections of Yellow River Valley and atmospheric circulation indices in three decadal phases

时段		乌拉尔山 阻高	贝加尔湖 阻高	鄂霍次克海 阻高	副高强度	副高北界	副高西伸 脊点
1958—1975 年	上游降水量	-0.28	-0.21	-0.16	-0.06	0.26	0.06
	河套北部降水量	-0.38	-0.23	-0.08	0.00	-0.11	-0.03
	河套南部降水量	-0.42*	-0.35	-0.24	0.34	-0.08	-0.19
	下游降水量	-0.33	-0.19	0.02	-0.02	0.32	0.20
1976—1995 年	上游降水量	0.35	0.19	-0.37*	-0.28	0.47**	0.28
	河套北部降水量	-0.23	-0.32	-0.55**	-0.39*	0.30	0.26
	河套南部降水量	0.07	0.14	-0.25	0.06	-0.02	-0.07
	下游降水量	-0.35	-0.48**	-0.56**	-0.30	0.40*	0.13
1996—2015 年	上游降水量	-0.23	0.08	-0.38*	0.15	-0.04	-0.43*
	河套北部降水量	-0.14	-0.13	-0.04	-0.31	0.30	0.09
	河套南部降水量	-0.04	0.27	-0.06	0.32	0.11	-0.54**
	下游降水量	0.14	0.34	-0.08	0.23	0.01	-0.36

注:星号**和*分别表示通过 t 检验 0.05 和 0.10 显著性水平的相关系数

Note: Asterisks ** and * mean significant in statistics for 0.05 and 0.10 confidential levels of student's t test, respectively.

上下游地区降水有显著性影响,而在最近时段(1996—2015 年期间),副高强度和西伸脊点呈显著

性增强和西伸趋势(表 2),它的影响主要体现在西伸脊点分别与上游和河套南部地区降水有显著性相

表 2 环流指数和黄河流域夏季降水量年际线性变化趋势

Table 2 Trends for indices of atmospheric circulation and summer rainfall over Yellow River Valley

	1958—2015 年	1958—1975 年	1976—1995 年	1996—2015 年
乌拉尔山阻高/ $m \cdot a^{-1}$	0.27**	1.58**	0.21	-0.32
贝加尔湖阻高/ $m \cdot a^{-1}$	0.52**	2.29**	0.00	-0.07
鄂霍次克海阻高/ $m \cdot a^{-1}$	0.30**	1.39**	0.78*	-0.57
副高强度	2.82**	-1.04	1.47	5.83**
副高北界/ $^{\circ}N \cdot a^{-1}$	-0.01	0.04	-0.02	0.05
副高西伸脊点/ $^{\circ}E \cdot a^{-1}$	-0.45	0.37	-0.38	-0.59*
上游降水量/ $mm \cdot a^{-1}$	-0.15	-1.47	-1.54	0.68
河套北部降水量/ $mm \cdot a^{-1}$	-0.67*	-4.90*	-0.68	0.28
河套南部降水量/ $mm \cdot a^{-1}$	-0.51	-6.70**	-1.38	-0.35
下游降水量/ $mm \cdot a^{-1}$	-0.99	-4.46	1.58	-2.39

注:用 Monte-Carlo 方法做统计显著性水平检验,标识方法同表 1。

Note: The significant test for trends is conducted by the Monte-Carlo method and signed in the way same as in Table 1.

关(表 1)。

3 结 论

分析了 1958—2015 年共 58 年来黄河流域夏季降水量年际时空变化特征及其变化的大气环流成因,得到以下结论:

(1) 58 年来,黄河流域夏季降水量总体呈现减少趋势,但其中仅有河套北部降水量总体呈显著性减少趋势;河套北部地区降水的气候变化幅度较大,在 1976—1995 年期间偏多 5%~20%(10~300 mm),但到 1996—2015 年偏少 5%~20%(10~50 mm);黄河下游东段降水量 58 年来持续减少,期间,欧亚中高纬度阻高显著性增强,低纬度西太平洋副高强度显著性增强。

(2) 在 1958—1975 年较早时段,黄河流域降水在河套部分地区、下游东段和上游西段偏多,而在其余地区偏少,其中 58 年全流域降水极端年份多分布在这一时段,其降水特征主要是受中高纬度低压环流和较强冷空气影响所致,中高纬度欧亚阻高与低纬度西太平洋副高均偏弱,且都与黄河流域降水没有显著性相关,但中高纬度阻高呈现显著性增强趋势。

(3) 在 1976—1995 年中间时段,黄河流域大部降水偏多,其环流成因为乌拉尔山阻高发展、贝加尔湖到东北亚一带受负高度距平控制,黄河流域处于高空脊前与槽底部的气流交汇处;其中,鄂霍次克海和贝加尔湖阻高均较弱,它们与黄河流域降水有显著性负相关,西太平洋副高主要以强度和南北位置

变化显著影响流域降水。

(4) 在 1996—2015 年最近的 20 年期间,黄河全流域性降水偏少,中高纬度乌拉尔山北部环流高度偏低、里海至贝加尔湖再到东北亚一带高度场一致偏高,西风带减弱,是其主要大气环流成因。期间,西太平洋副高呈强度增强、西伸脊点偏西的显著性线性趋势,副高主要以西伸脊点变化影响黄河流域降水,而欧亚中高纬度阻高多与黄河流域降水没有显著性相关。

参 考 文 献

- 常军,王永光,赵宇,等,2014.近 50 年黄河流域降水量及雨日的气候变化特征[J].高原气象,33(1):43-54.
- 符淙斌,王强,1991.南亚夏季风长期变化中的突变现象及其与全球迅速增暖的同步性[J].中国科学 B 辑:化学,(6):662-672.
- 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.
- 李春晖,杨志峰,2005.太阳活动与黄河流域降水关系分析[J].气象,31(11):42-44.
- 李双林,纪立人,2001.夏季乌拉尔地区环流持续异常及其背景流特征[J].气象学报,59(3):280-293.
- 刘晓东,安芷生,方建刚,等,2002.全球气候变暖条件下黄河流域降水的可能变化[J].地理科学,22(5):513-519.
- 刘芸芸,李维京,艾锐秀,等,2012.月尺度西太平洋副热带高压指数的重建与应用[J].应用气象学报,23(4):414-423.
- 庞爱萍,李春晖,杨志峰,等,2008.近 50 年黄河流域降水变化的时空特征[J].北京师范大学学报(自然科学版),44(4):420-423.
- 沙万英,邵雪梅,黄玫,2002.20 世纪 80 年代以来中国的气候变暖及其对自然区域界线的影响[J].中国科学 D 辑:地球科学,32(4):317-326.
- 邵晓梅,严昌荣,魏红兵,2006.基于 Kriging 插值的黄河流域降水时空分布格局[J].中国农业气象,27(2):65-69,75.

- 王春学,李栋梁,2012. 基于 MTM-SVD 方法的黄河流域夏季降水年际变化及其主要影响因子分析[J]. 大气科学,36(4):823-834.
- 王东阡,王艳姣,崔童,等,2016. 2015 年夏季气候异常特征及其成因简析[J]. 气象,42(1):115-121.
- 王浩,严登华,秦大庸,等,2005. 近 50 年来黄河流域 400 mm 等雨量线空间变化研究[J]. 地球科学进展,20(6):649-655.
- 王会军,范可,2013. 东亚季风近几十年来的主要变化特征[J]. 大气科学,37(2):313-318.
- 王记芳,程炳岩,朱业玉,等,2009. 黄河中游“三花间”区气候变化特征[J]. 气象,35(3):99-106.
- 魏凤英,2007. 现代气候统计诊断与预测技术:第 2 版[M]. 北京:气象出版社:63-66.
- 杨建平,丁永建,陈仁升等,2003. 近 50 年中国干湿气候界线波动及其成因初探[J]. 气象学报,61(3):364-374.
- 衣育红,王绍武,1992. 80 年代全球气候突然变暖[J]. 科学通报,(6):528-531.
- 赵振国,1999. 中国夏季旱涝及环境场[M]. 北京:气象出版社:45, 75.
- 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.
- von Storch H, Zwiers F W, 1999. Statistical Analysis in Climate Research[M]. Cambridge: Cambridge University Press:104,176.
- Vecchi G A, Soden B J, Wittenberg A T, et al, 2006. Weakening of tropical Pacific atmospheric circulation due to anthropogenic forcing [J]. Nature, 441 (7089): 73-76. DOI: 10. 1038/nature04744.
- Wang Huijun, 2001. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's[J]. Adv Atmos Sci, 18(3):376-386.