

Multiple Time Scales Characteristic of Precipitation in Recent 50 Years of Upper and Middle Reach of Yellow River

Quan Xia^{1,2,3}, Fangrong Wu³, Shaoyong Chen^{1,3*}

¹Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou, Key laboratory of Arid Climatic Changing and Reducing Disaster of Gansu, Key laboratory of Arid Climatic Changing and Reducing Disaster of CMA, Lanzhou

²College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou

³Meteorological Bureau of Baiyin, Baiyin

Email: xiaquan20@126.com, csy505@tom.com

Received: May 24th, 2014; revised: Jun. 20th, 2014; accepted: Jul. 1st, 2014

Copyright © 2014 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 the yearly and monthly precipitation data of 45 stations from 1961 to 2011 over the upper and middle reach of Yellow River (UMRYR), by the method of climate tendency rate, precipitation index, concentration degree and period, the precipitation interannual variation and distribution characteristic and its evolution trend were analyzed. The results show that: 1) The annual precipitation rapidly declines from southeast to northwest, and there was a rain shadow area from Lanzhou to Huining of middle Gansu province. The two climate change sensitive areas were source area of the Yellow River and middle and east of Gansu loess plateau. The precipitation increased in source area of the Yellow River, mean value of climate tendency rate was 9.5 mm/10a. The drought trend was obvious in middle and east of Gansu loess plateau, average value of climate tendency rate was -23.4 mm/10a. 2) There were significant difference of mobile trend and track of 400 mm rainfall contour between source area and middle reach of the Yellow River. In source area of the Yellow River, the trend of 400 mm rainfall contour moved north, but in middle reach of the Yellow River the contour obvious moved southeast before 2000, and regressed to northwest after 2000. 3) The general variation trend of seasonal distribution of precipitation in UMRYP were that the precipitation reduced obviously in spring and summer but increased significantly in autumn, especially after 2000. The variation trend of precipitation in each season was inconsistent in different areas, and the area where seasonal distribution of precipitation was obvious was Guanzhong plain. 4) The precipitation concentration period of UMRYP was in July, but concentration period of source area was slightly earlier than middle reach of the Yellow River. The precipitation concentration degree increased from southeast to northwest, and the value was between 0.45 - 0.71.

*通讯作者。

Keywords

The Upper and Middle Reach of Yellow River, Precipitation, Climate Tendency Rate, Annual Distribution, Concentration Degree and Period

近50年黄河上中游降水多时间尺度特征分析

夏 权^{1,2,3}, 吴芙蓉³, 陈少勇^{1,3*}

¹中国气象局兰州干旱气象研究所/甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室/中国气象局干旱气候变化与减灾重点开放实验室, 兰州

²兰州大学大气科学学院, 兰州

³白银市气象局, 白银

Email: xiaquan20@126.com, csy505@tom.com

收稿日期: 2014年5月24日; 修回日期: 2014年6月20日; 录用日期: 2014年7月1日

摘 要

利用1961~2011年黄河上中游45站年、月降水量资料, 通过计算气候倾向率、降水指数 γ 、降水集中度和集中期等, 对该区降水年际变化和年内分配特征及其演变趋势进行诊断分析。结果表明: 1) 黄河上中游区年降水量自东南向西北迅速递减, 并且存在两个降水变化敏感区: 黄河源区和陇中-陇东黄土高原区。黄河源区年降水量呈增加趋势, 而陇中-陇东黄土高原区干旱化趋势明显。2) 400 mm等值线在黄河源区与黄河中游区的移动趋势和轨迹存在明显差异。黄河源区该线总体呈向北移动的趋势; 黄河中游区2000年以前该线向东南方向移动的趋势显著, 2000年以后则向西北方向回归。3) 黄河上中游降水季节分配变化趋势总体为春、夏季降水明显减少, 而秋季降水显著增多, 特别是2000年之后。而不同区域各季降水的变化趋势不尽相同, 关中平原是降水季节分配变化最明显的区域。4) 黄河上中游区降水集中期总体都在7月, 黄河源区集中期略早于黄河中游地区。降水集中度由东南向西北递增。全区集中度在1998年以前年际波动较大, 1998年以后趋于稳定且接近均值。

关键词

黄河上中游, 降水, 气候倾向率, 年内分配, 集中度和集中期

1. 引言

黄河上中游地处北半球中纬度, 位于中国三大气候区(青藏高原区、西北干旱区、东部季风区)的交汇地带, 气候影响因子复杂。作为半干旱区与半湿润区分界线的 400 mm 年降水量等值线正好贯穿该区, 同时这里又是夏季西南季风和东南季风的北界, 是对全球变化响应敏感的地区[1] [2], 从气候变化角度将黄河上中游当作一个整体进行研究具有一定的合理性和准确性[3] [4]。降水是黄河流域水资源最重要的决定因素, 也是响应全球变化最敏感的气象因子之一, 历来备受学者们的关注[5]-[7]。特殊的地理位置和气候特征使得黄河上中游降水具有年际变化大, 年内分配不均, 季节变化现象明显等特点, 这决定了对黄河流域降水年代际变化和年内分配研究的重要性。

国内学者曾采用不同方法对黄河流域降水的时空分布[8] [9]及演变趋势[10]-[12]进行了多角度分析,取得了很多研究成果。但之前关于河段的划分多依据地理位置及水文站[13]-[15],针对具有独特气候特征的黄河上中游地区的工作还比较少,关于黄河流域降水年内分配的研究也尚不多见,并且一些新事实需要用更新资料去揭示。为此,本文采用 1961~2011 年黄河上中游年、月降水资料,运用相关统计方法对该区域年、季降水的年代际变化特征、趋势和速率,年内分配的均匀性进行分析,以揭示该区降水响应全球变暖的新趋势,也为该区农业生产和水资源利用提供一些参考依据。

2. 数据来源与研究方法

2.1. 数据来源

本文所用资料为中国气象局整编的黄河上中游 45 个气象站 1961~2011 年实测地面年、月降水资料。这些台站沿黄河流域分布相对均匀,多数为国家基本站和基准站,这些站点在 1960 年前后都已建立了完整的观测数据。本文所指的黄河上中游区是 $31.8^{\circ}\sim 42.5^{\circ}\text{N}$ 、 $96^{\circ}\sim 114.5^{\circ}\text{E}$ 范围内的区域,包括黄河上中游的青海、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西和河南等 7 省,涵盖黄河流域 85% 以上的流域面积。另外,文中四季划分为:春季(3~5 月)、夏季(6~8 月)、秋季(9~11 月)、冬季(12~2 月),各季降水量为其所包含 3 个月的累计降水量。

2.2. 研究方法

1) 气候倾向率

气候要素的趋势变化一般用一次线性方程表示,即

$$\hat{x}_t = a_0 + a_1 t \quad t = 1, 2, \dots, n(\text{年}) \quad (1)$$

$$\frac{d\hat{x}_t}{dt} = a_1 \quad (2)$$

$a_1 \times 10$ 称为气候倾向率,单位为某要素单位/10a。

2) 降水指数 γ

考虑到黄河上中游地区降水空间分布不均,在分析各季降水量时间变化时采用了中国气象局国家气候中心气候预测室的区域降水指数 γ 计算法,该方法能够刻画区域整体降水的多寡,正常值为 150,其值越大,表示降水越多。具体见文献[16]。

3) 降水集中度和集中期

本文把一年内各月降水量均看作向量,一年 12 个月看作一个圆周(360°),将某月降水量作为该月降水矢量的模,该月月序与 30° 的积作为该月降水矢量的方向,引进采用 Zhang[17]等定义的表征单站降水年内时间分配特征的参数:降水集中度(PCD)和降水集中期(PCP),即

$$pcd_i = \sqrt{R_{xi}^2 + R_{yi}^2} / R_i \quad (3)$$

$$pcp_i = \arctan(R_{xi} / R_{yi}) \quad (4)$$

式中: pcd_i 和 pcp_i 分别表示第 i 年的降水集中度和集中期, $R_{xi} = \sum_{j=1}^N r_{ij} \times \sin \theta_j$, $R_{yi} = \sum_{j=1}^N r_{ij} \times \cos \theta_j$, R_i 为某测站第 i 年的总降水量, r_{ij} 为第 i 年第 j 月的总降水量, θ_j 为第 j 月对应的方位角, i 为年份($i = 1961, 1962, \dots, 2011$), j 为月序($j = 1, 2, \dots, 12$)。

由式(3)可知,PCD 能够反映研究时段内年降水量在各月的集中程度,如果在研究时段中,年降水集

中在某一个月, 则它们合成向量的模与总降水量之比为 1, 即 PCD 为极大值; 如果全年各月的降水量都相等, 则它们各个分量累加后为 0, 即 PCD 为极小值。可见 PCD 的取值在 0~1 之间, 其值越大, 表明降水越集中, 降水量年内分配越不均匀。由式(4)可知, PCP 就是合成向量的方位角, 也就是向量合成后重心所指示的角度, 反映了一年中最大月降水量出现在哪一个月内。

3. 年降水量的时空分布特征

3.1. 年降水量的空间分布及演变趋势

图 1a 为黄河上中游年降水量的空间分布。年雨量总的分布趋势是自东南向西北迅速递减。从青海高原东部到陇中 - 陇东一带, 降水等值线尤为密集, 由南向北梯度很大, 特别是在 400 mm 降水等值线附近, 说明这一带是由半湿润地区向半干旱地区的过渡区域, 而且过渡区很窄。从图中可看到兰州以西的黄河上游区域等值线基本呈东西走向, 多雨中心在久治, 年降水量达 746 mm。这是由于夏季偏南季风将南海及孟加拉湾的暖湿气流沿青藏高原东侧输送到这里, 同时北方冷空气又常沿青藏高原东北边缘南下, 在此交绥而形成多雨区, 而这里又是偏南季风的北界, 因而年降水量由南向北锐减。兰州以东的黄河中游区域降水等值线基本呈东北 - 西南走向, 是因为该区夏季受东南季风影响。值得注意的是, 在陇中的兰州 - 会宁一带有一个相对少雨区, 这是由于青藏高原地形动力作用, 使得高原东北侧出现小高压, 另外该区夏季处于六盘山的背风面, 六盘山走向与东南季风基本相垂直, 故形成背风雨影区。

从年降水量气候倾向率分布图(图 1b)可以看出, 年降水量显著增加的站点主要集中在黄河源区(通过了 $\alpha = 0.05$ 显著性水平检验), 最大增率中心在玛多, 达 14 mm/10a。河南以东的站点基本呈减少趋势, 其中陇中 - 陇东、宁夏南部至陕北一带减少趋势明显(通过了 $\alpha = 0.05$ 显著性水平检验), 高值中心位于会宁, 达 -30.6 mm/10a。除北部的临河站和东南部的卢氏站为孤立站点外(两站未通过显著性检验), 其余地区年降水量显著增加和减少的站点均能连成片, 而气候倾向率绝对值大于 8 mm/10a 的站点主要集中在黄河源区和陇中 - 陇东黄土高原, 黄河源区为显著增湿区, 陇中 - 陇东黄土高原为显著干旱化区, 这反映了不同区域降水响应全球变暖的趋势并不一致, 同时也说明这两个区域是降水响应气候变化的敏感区域。因此我们将重点讨论两个敏感区的降水时间变化特征。

3.2. 两个气候变化敏感区降水时间序列

上节我们得出两个气候变化敏感区, 由于两区域降水变化趋势呈反相位分布, 若整体讨论黄河上中游降水变化时这些区域信息就会被平滑掉, 为此, 我们选取黄河源区和陇中 - 陇东黄土高原分布相对集中

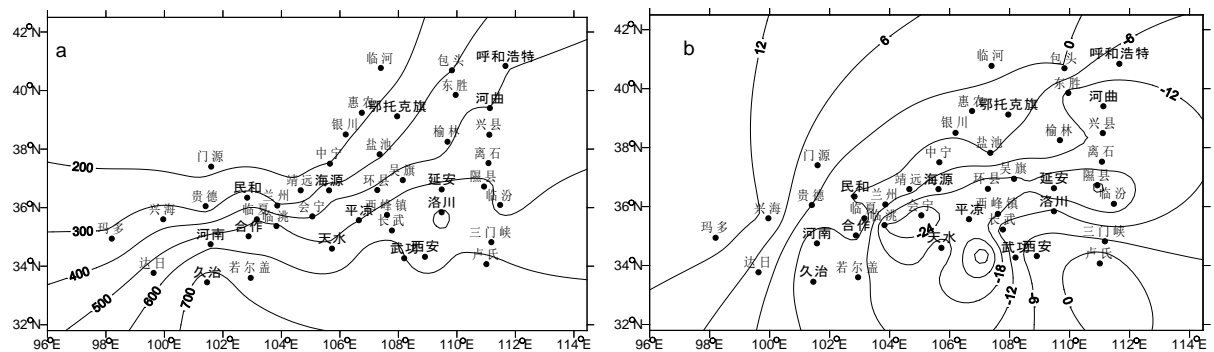


Figure 1. Spatial distribution of annual precipitation (a) (unit: mm) and its climate tendency rate (b) (unit: mm/10a) of UMRYSR

图 1. 黄河上中游区(a): 年降水量(单位: mm)和(b): 年降水量气候倾向率(单位: mm/10a)的空间分布

且变化趋势最为显著的站点(表 1), 分别取其平均, 得到两个气候变化敏感区的降水时间序列, 以讨论两个敏感区降水响应全球变暖的不同趋势。

图 2a 为黄河源区降水变化序列。该区降水总体呈增加趋势, 平均气候倾向率为+9.5 mm/10a。90 年代以前以年际变化为主; 1990~1999 年趋于稳定, 略高于多年均值; 2000 年以后呈明显的上升趋势。陇中 - 陇东黄土高原区(图 2b)则呈明显减少趋势, 平均气候倾向率为-23.4 mm/10a。该区 1960 年代处于多雨期; 1970~1990 年以年际波动为主; 1990 年以后, 除 2003 年为多雨年外, 其余年份雨量均低于多年平均值, 特别是 2000 年之后干旱化趋势更为明显。从 Cubic 曲线的升降趋势亦可以看出, 2000 年以后两个区域呈现出相反的干湿化趋势。由于黄河上中游降水主要来源于亚洲夏季风, 而该区域又受西南季风和东南季风的共同影响, 那么两个气候变化敏感区降水趋势的差异是否与不同季风的影响有关呢?

为验证这一事实, 我们利用国家气候中心提供的 74 项环流特征量资料, 选取同期夏季(6、7、8 月平均值)印缅槽指数表征西南季风强度, 以夏季西太平洋副高北界指数和脊线指数表征东南季风强度, 与两个敏感区降水序列做相关, 其结果如表 2 所示。副高北界指数和脊线指数与黄土高原区降水序列明显正相关, 通过了 0.05 的信度检验, 而与黄河源区降水序列的关系不明显。印缅槽指数与黄河源区降水序列的相关系数为 0.23, 达到 0.1 的信度检验, 而与黄土高原区降水序列的关系不大。说明黄河源区降水主要受西南季风影响, 而陇中 - 陇东黄土高原区降水则主要受东南季风影响, 两种季风强度的年代际自然波动及响应全球变暖的步调不一致, 从而导致两敏感区降水演变趋势的差异。

Table 1. Information of selected station of two climate change sensitive areas

表 1. 两个气候变化敏感区所选取的站点信息

显著变化区	站点	年降水量(mm)	气候倾向率(mm/10a)	通过的显著性检验水平
黄河源区	玛多	319.8	+14.0	0.01
	兴海	365.7	+11.1	0.05
	达日	552.1	+8.62	0.05
陇中 - 陇东黄土高原区	临洮	523.9	-25.3	0.01
	会宁	399.4	-30.6	0.01
	平凉	501.1	-19.4	0.05
	西峰镇	549.7	-18.6	0.05
	环县	426.5	-22.9	0.05

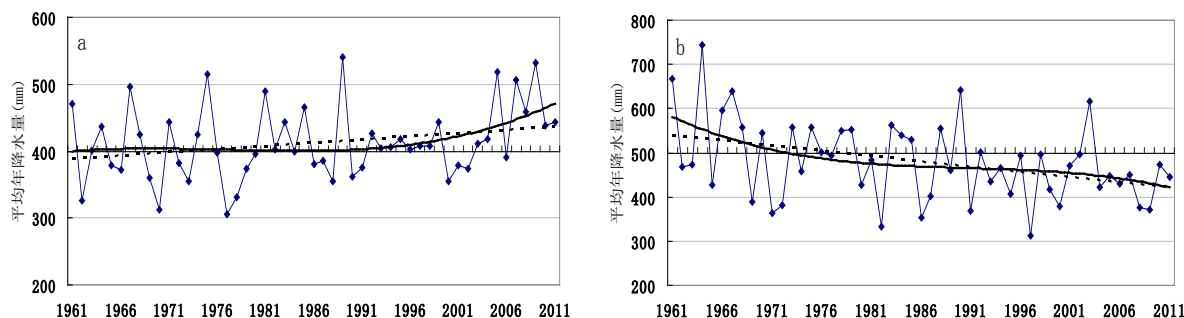


Figure 2. Precipitation time series of two climate change sensitive areas (a) source area of the Yellow River (b) middle and east of Gansu loess plateau (dotted line: climate tendency rate; black solid line: the three-order curve fitting)

图 2. 黄河上中游两个气候变化敏感区降水时间序列(a): 黄河源区; (b): 陇中 - 陇东黄土高原区(虚线: 气候倾向率; 黑实线: 三阶拟合曲线)

3.3. 年降水量 400 mm 等值线的年代际变化

从图 3 可以看出, 400 mm 等值线贯穿了黄河上中游年降水量变化趋势最显著的区域, 民和至兰州段各代际 400 mm 等值线基本重合, 民和以西的黄河源区和兰州以东黄河中游区表现为不同的代际变化趋势。黄河源区 20 世纪 60、70 年代该线位置相对偏南; 80 年代略微北抬; 90 年代位置与 80 年代大体相同, 走向略有所改变; 2000 年以后北移明显。黄河中游区该线各代际走向基本一致, 但位移幅度较大, 20 世纪 60 年代位置偏西偏北; 70、80 年代明显向东南方向移动; 90 年代该线再次东移南压, 位置最为偏东南; 2000 年以后又向西北方向回归, 位置与 70、80 年代接近。王浩[18]等研究认为“黄河流域 400 mm 等值线有向东和向南发生移动的趋势, 且向东移动的趋势显著”。从图 3 看, 2000 年以前在兰州以东的黄河中游区各代际该线变化趋势的确如此, 而 2000 年以后该线在黄河源区明显北移, 兰州以东区域则向西北方向移动。另外, 400 mm 等值线在黄河源区与黄河中游区的移动趋势和轨迹存在明显差异, 这与前人研究结论不太一致。

4. 各季降水量的时空分布特征

4.1. 各季降水量气候倾向率的空间分布

黄河上中游区降水季节分配很不均匀, 为分析不同季节降水的长期演变趋势, 通过计算所选站点各季气候倾向率, 给出了黄河上中游四季降水量气候倾向率空间分布(图 4)。

春季: 黄河上中游区呈现正趋势的站点主要在黄河源区及河套地区(图 4a), 其中黄河源区正趋势相对明显而河套地区较微弱, 正趋势中心在久治, 达 4.6 mm/10a; 其余地区为负趋势, 且由北向南负趋势增强, 负中心在武功, 为 -14.7 mm/10a。

夏季: 降水正、负趋势分布较为凌乱(图 4b), 黄河源区、陕西中北部、河南西部为正趋势, 正中心

Table 2. Correlation coefficient between Summer circulation index and precipitation series of two sensitive areas
表 2. 两个敏感区降水序列与夏季环流特征指数的相关系数

	夏季西太平洋副高北界指数	夏季西太平洋副高脊线指数	夏季印缅槽指数
黄河源区降水序列	0.07	0.09	0.23
黄土高原区降水序列	0.31	0.29	-0.05

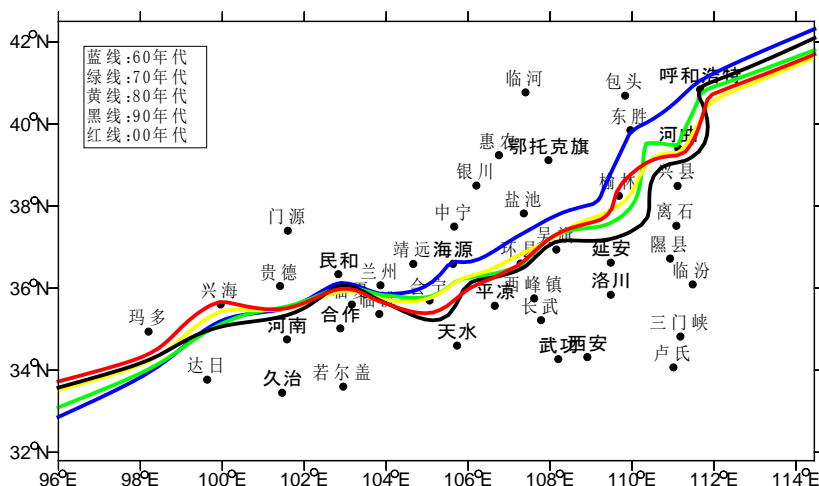


Figure 3. Spatial variation of 400 mm rainfall contour of each decadal in UMRYSR
图 3. 黄河上中游各年代 400 mm 等雨量线的空间变化

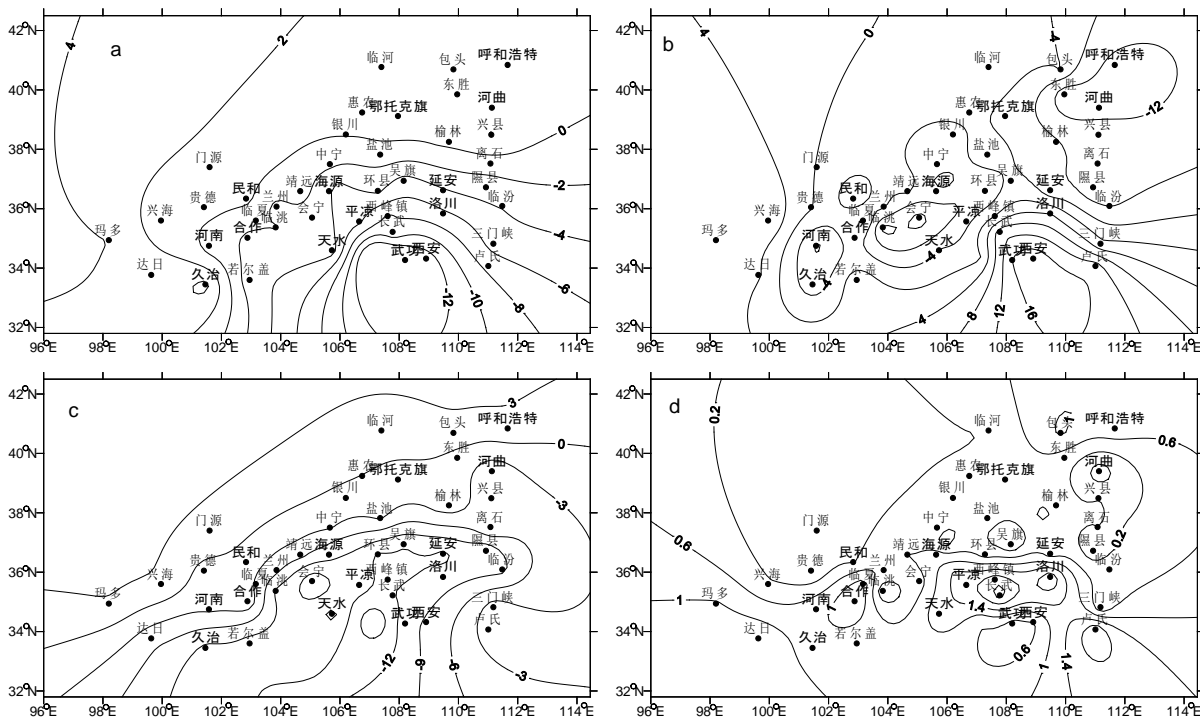


Figure 4. Spatial distribution of precipitation climate tendency rate in each season (unit: mm/10a): (a) spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter

图 4. 黄河上中游区春季(a)、夏季(b)、秋季(c)、冬季(d)降水量气候倾向率空间分布(单位: mm/10a)

在关中地区，其中西安增湿率为 18.6 mm/10a；青海高原东部、陇中南、陇东、宁夏至河套地区均为负趋势，两个负中心分别位于陇中南和河套地区东部，代表站会宁和东胜的干旱化率分别为 -13.6 mm/10a 和 -15.2 mm/10a，干旱化趋势极为显著。

秋季：除黄河源区的玛多、兴海以及河套北部的包头、呼和浩特、临河站呈微弱的正趋势外(图 4c)，其余地区均为负趋势。负值中心位于陇中、陇东至陕西中北部，其中干旱化率最大站在会宁，达 -14.6 mm/10a。说明秋季黄河上中游区整体变干趋势显著。

冬季：黄河上中游区整体均呈正趋势(图 4d)，由于冬季降水稀少，增率并不显著，平均增率为 0.69 mm/10a。在陇东南至陕西一带有个相对高值区，中心长武站增率为 2.37 mm/10a。

4.2. 各季降水量的时间变化

图 5 为黄河上中游区四季降水指数的变化情况，从春季降水指数的变化曲线上(图 5a)可以看到：春季降水的年代际变化特征明显，1961~1970 年为多雨期，1971~1982 年进入少雨期，1983~1991 年又为多雨时段，1992~2011 年间除个别年份(1998、2002、2003、2010 年)外，其余年份均为偏旱年，目前仍处于偏旱期。

从夏季图上(图 5b)看，1961~1996 年降水以年际振荡为主，1997 年降水突然减少，之后一直处于偏旱期。Cubic 曲线在 1997 年之后下降趋势明显，说明自 1997 年起，黄河上中游夏季干旱化趋势显著。

从秋季图上(图 5c)看，秋季降水在整个研究时段内呈现出先下降后上升的趋势，1961~1986 年下降趋势非常显著，1986~1998 年处在降水偏少期，1998 年以后降水逐渐增多。Cubic 曲线在 1990 年前后达到谷值，亦说明秋季降水先降后升的变化特征。

从冬季图上(图 5d)看，降水指数呈线性增加趋势，同时存在年代际变化特征。1961~1970 年、1978~1987

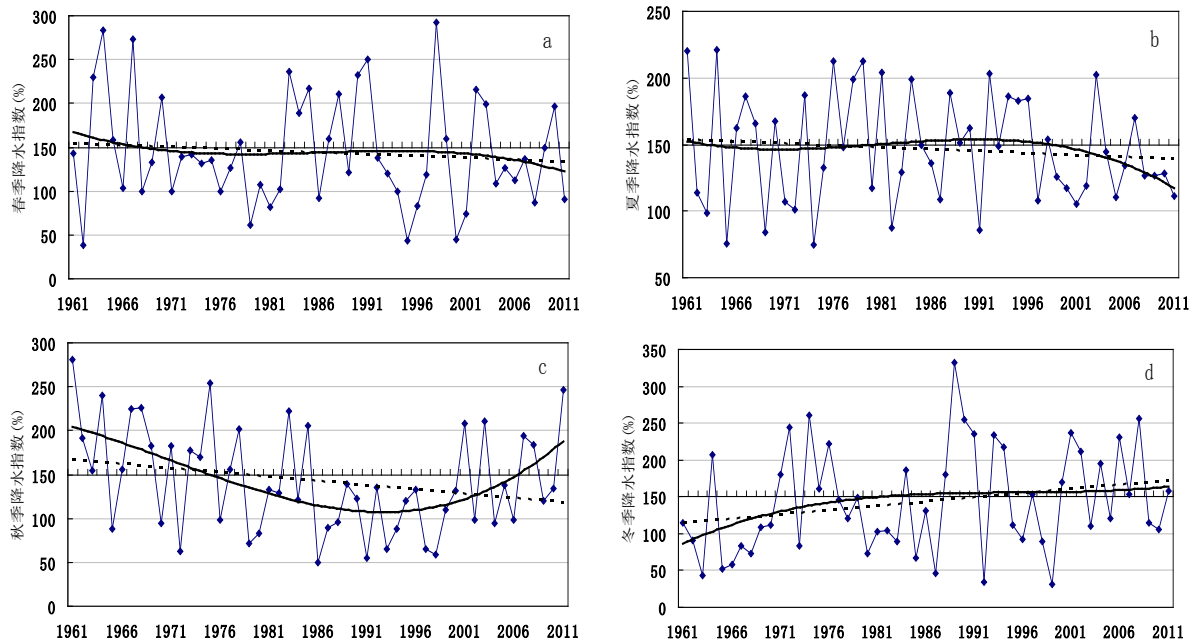


Figure 5. The Precipitation index time series of each season in UMRZR (a) spring; (b) summer; (c) autumn; (d) winter (dotted line: climate tendency rate; black solid line: the three-order curve fitting)

图 5. 黄河上中游区春季(a)、夏季(b)、秋季(c)、冬季(d)降水指数时间序列(虚线: 气候倾向率; 黑实线: 三阶拟合曲线)

年、1995~1999 年为降水偏少期, 其余时段降水偏多, 目前处于降水偏多期。从近 10 年曲线变化看, 黄河上中游春季、夏季降水减少, 秋季、冬季降水增多, 降水的季节分配较过去有所改变。

5. 降水集中度和集中期

图 6a 和图 6c 分别为黄河上中游区 1961~2011 年降水集中度和集中期(化为月)的多年平均空间分布, 由图 6a 可以看出, 黄河上中游区年降水集中度在 0.45~0.71 之间, 自东南向西北集中度明显递增, 说明该区东南部降水年内分配的均匀性好于西北部。将各站多年平均年降水量与降水集中度做相关, 其相关系数为-0.72, 说明年降水量越多的地方降水集中度越低, 降水年内分配的均匀性越好。集中度最低的地方在关中平原, 其中西安与武功站的集中度分别为 0.45 和 0.47, 这两站夏季降水占全年降水比重相对较低, 而春、秋季降水占比相对较高, 也就是说雨季开始较早, 结束较晚, 降水年内分配较均匀。而北部的临河站集中度达 0.71, 降水集中在 7、8 月, 年内其余时段降水很少, 造成分配极为不均。由图 6c 可以看出, 黄河上中游降水集中期(化为月)总体都在 7 月, 但略存在东西差异, 西部的黄河源区集中期略早于黄河中游地区, 黄河源区的兴海、达日一带集中期最早, 有的年份降水集中在 6 月, 而陕西中北部至山西集中期最晚, 很多年份降水集中在 8 月。

图 6b 和图 6d 为黄河上中游区降水集中度和集中期的年际变化曲线, 由图 6b 可知, 该区降水集中度多年均值为 0.6, 最大值为 0.71(1995 年), 最小值为 0.51(1965 年)。若令集中度大于 0.65 和小于 0.55 的年份分别为降水集中年份和不集中年份, 则降水集中年为: 1962、1966、1976、1979、1981、1984、1995 年, 降水不集中年有: 1965、1971、1972、1974、1989、1990、1991 年。值得注意的是, 这些年份均在 1998 年以前, 从图中也可直观看出, 1998 年以前降水集中度年际波动较大且偏离均值较远, 而其年后际变化很小, 集中度趋于稳定且接近均值, 说明自 1998 年以后黄河上中游区降水集中度处于常态。由图 6d 可以看出, 多数年份黄河上中游区降水集中期在 7 月, 个别年份(1965、1986、1991、1998、2002 年)

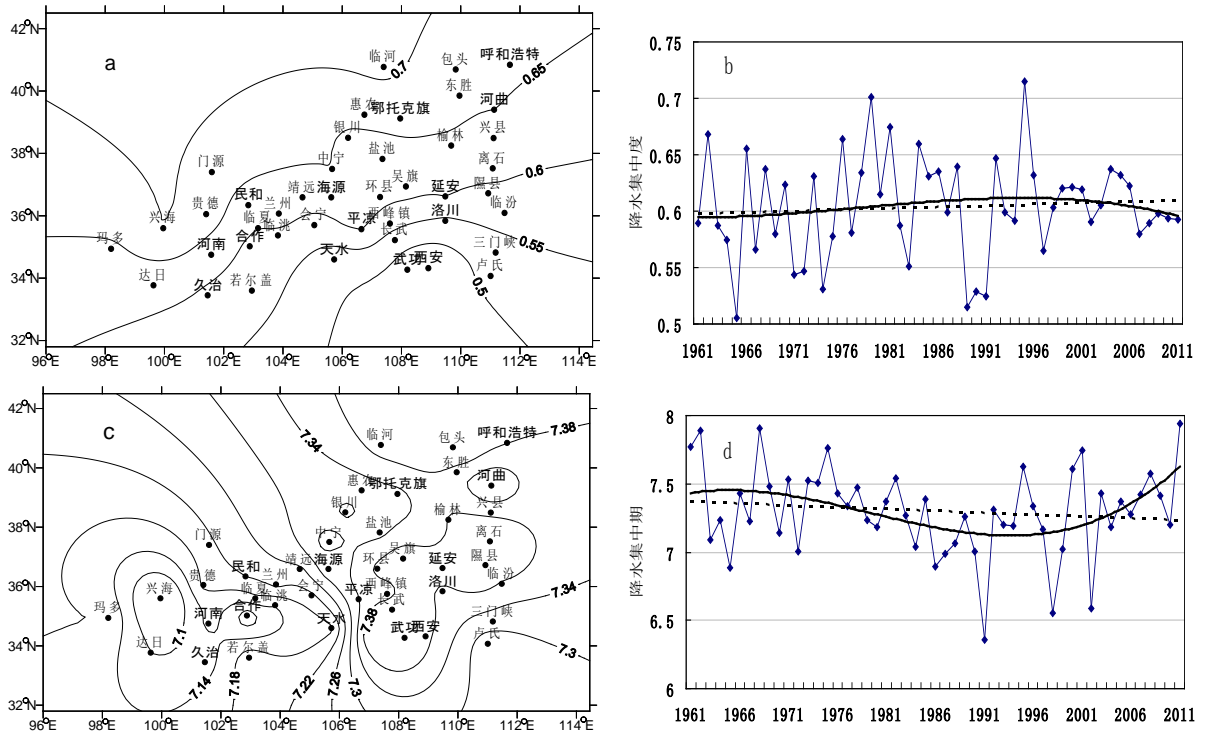


Figure 6. Spatial distribution and time variation of precipitation concentration degree (a), (b) and period (c), (d)
 图 6. 黄河上中游降水集中度(a), (b)和集中期(c), (d)空间分布及其时间变化

在 6 月，其中 1991 年是集中期最早的年份。Cubic 曲线在 1991 年达到谷值，之后开始上升，特别是 2002 年以后上升趋势明显，说明近些年该区降水集中期有推迟的趋势，这与上节中得出的“黄河上中游区夏季降水呈减少趋势，秋季降水呈增多趋势”的结论十分吻合。

6. 结论与讨论

1) 黄河上中游区年降水量自东南向西北迅速递减，陇中的兰州 - 会宁一带有一个背风雨影区。年降水量气候倾向率分布图上存在两个降水变化敏感区：黄河源区和陇中 - 陇东黄土高原区。黄河源区年降水量呈增加趋势，平均气候倾向率为 9.5 mm/10a；而陇中 - 陇东黄土高原区干旱化趋势显著，平均气候倾向率为 -23.4 mm/10a。

2) 400 mm 等值线在黄河源区与黄河中游区的移动趋势和轨迹存在明显差异。黄河源区该线总体呈向北移动的趋势；黄河中游区 2000 年以前该线向东南方向移动的趋势显著，2000 年以后则向西北方向回归。

3) 从各季气候倾向率分布看，黄河源区各季降水均呈增加趋势；陇中 - 陇东地区春、夏、秋三季降水呈明显减少趋势；陕西中北部特别是关中平原春、秋季降水显著减少，夏季显著增多；河套地区夏季降水显著减少。从各季降水指数序列看，自 2000 年以后，黄河上中游区春、夏季降水明显减少，而秋季降水显著增多。

4) 黄河上中游区年降水集中度在 0.45~0.71 之间，自东南向西北集中度明显递增。年降水量与降水集中度呈明显的负相关。降水集中期总体都在 7 月，西部的黄河源区集中期略早于黄河中游地区。1998 年以前降水集中度年际波动较大，而其后趋于稳定且接近均值，说明自 1998 年以后黄河上中游区降水集中度处于常态。

基金项目

国家重点基础研究发展计划项目(2013CB430206)、国家自然科学基金青年基金项目(41105109)、国家公益性行业专项基金(GYHY201006038-5-1)共同资助。

参考文献 (References)

- [1] 叶笃正 (主编) (1992) 中国的全球变化预研究. 气象出版社, 北京, 1-101.
- [2] 吴祥定, 钮仲勋, 王守春, 等 (1994) 历史时期黄河流域环境变迁与水沙变化. 气象出版社, 北京, 1-169.
- [3] 张善强 (2011) 黄河流域夏季旱涝变化及气候物理因素的影响. *气象与环境学报*, **3**, 40-44.
- [4] 王楠, 李栋梁, 张杰, 等 (2013) 黄河中上游季节内强降水的时间非均匀性特征及其对大气环流的响应. *中国沙漠*, **1**, 239-248.
- [5] Fu, G.B., Chen, S.L., Liu, C.M., et al. (2004) Hydro-climatic trends of the Yellow River basin for the last 50 years. *Climatic Change*, **65**, 149-178.
- [6] 黄嘉佑, 张镔 (1996) 黄河流域旱涝与水资源分析. *大气科学*, **6**, 673-678.
- [7] 夏权, 马敏劲, 李艳, 等 (2013) 黄河上中游降水正态性与稳定性分析. *资源科学*, **7**, 1455-1462.
- [8] 杨志峰, 李春晖 (2004) 黄河流域上游降水时空结构特征. *地理科学进展*, **2**, 27-33.
- [9] 祝青林, 张留柱, 于贵瑞, 等 (2005) 近 30 年黄河流域降水量的时空演变特征. *自然资源学报*, **4**, 477-482.
- [10] 徐宗学, 张楠 (2006) 黄河流域近 50 年降水变化趋势分析. *地理研究*, **1**, 27-34.
- [11] Lan, Y.C. and Kang, E.S. (2000) Trend and characteristics of variation on the runoff of the Upper Yellow River. *Journal of Desert Research*, **20**, 273-277.
- [12] 赵芳芳, 徐宗学 (2006) 黄河兰州以上气候要素长期变化趋势和突变特征分析. *气象学报*, **2**, 246-256.
- [13] 时兴合, 张国胜, 唐红玉 (1999) 黄河上游地区降水对水资源的响应. *气象*, **9**, 7-10.
- [14] 彭梅香, 薛玉杰, 王春青 (2002) 黄河中游山陕区间近 50a 降水分布特征及其变化特点分析. *山西气象*, **2**, 8-10.
- [15] 康铃铃, 王云璋, 王国庆, 等 (1999) 黄河中游河龙区间降水分布及其变化特点分析. *人民黄河*, **8**, 5-7.
- [16] 夏权, 陈少勇, 李艳, 等 (2012) 黄河上中游地区盛夏旱涝变化及其环流异常特征. *资源科学*, **11**, 2189-2196.
- [17] Zhang, L.J. and Qian, Y.F. (2003) Annual distribution features of precipitation in China and their interannual variations. *Acta Meteorological Sinica*, **17**, 146-163.
- [18] 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. *地球科学进展*, **6**, 649-655.