

Research on Time and Space Distribution of the Yellow River Basin of Extreme Weather Based on STARDEX Core Index*

Caihong Hu¹, Jijun Wang², Fuli He¹

¹School of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou

²Henan Provincial Climate Center, Zhengzhou

Email: hucaihong@zzu.edu.cn

Received: Sep. 30th, 2013; revised: Nov. 20th, 2013; accepted: Nov. 26th, 2013

Abstract: The daily rainfall and temperature data of 143 weather stations in the Yellow river are used for verifying the space-time distribution of extreme climate by using empirical orthogonal decomposition (EOF) and wavelet analysis method with STARDEX core index. The results show that the spatial distribution characteristics txq90, tnq10, tnfd and txhw90 are obvious, the entire basin shows distribution shape of north-south, east-west gradient and middle high both sides low or middle low both sides high. Increase tendency is shown for extreme temperature, that is to say, txq90, tnq10 and txhw90 show increase and tnfd shows decrease. Except for tnfd, the others three indexes happened abrupt change in 1990s. Analysis of precipitation suggests that the extreme precipitation events are relatively weak. The former three modal forms show gradient spatial change distribution pattern of the upper, middle and lower reaches and middle high both sides low or middle low both sides low. The time coefficient change of interannual and interdecadal shows that pq90, pn190, px5d and pint have no-significant increase and decrease change trend.

Keywords: Yellow River Basin; Extreme Climate; STARDEX Core Index; Time-Space Distribution Forms

基于 STARDEX 核心指数的 黄河流域极端气候时空分布形态研究*

胡彩虹¹, 王纪军², 何福力¹

¹郑州大学水利与环境学院, 郑州

²河南省气候中心, 郑州

Email: hucaihong@zzu.edu.cn

收稿日期: 2013 年 9 月 30 日; 修回日期: 2013 年 11 月 20 日; 录用日期: 2013 年 11 月 26 日

摘 要: 利用黄河流域 143 个气象站的逐日降水和气温资料, 应用经验正交分解法(EOF)、趋势及小波分析法对 STARDEX 极端气候核心指标进行时空分析, 结果表明, 时空间分布特征明显的是极端气温即暖日阈值、冷日阈值、霜冻日数和最长热浪天数, 整个流域呈现了南北或东西向的渐变和中间高两头低或相反的空间变化特征, 综合表现为流域中部极端气温事件呈现增多的趋势, 即暖日阈值、冷夜阈值和最长异常热浪天数增加, 霜冻日数减少, 且除霜冻日数外, 其他三个指数在 20 世纪 90 年代和 20 世纪末均有突变发生, 20 世纪末后加强。极端降水的分析表明极端降水事件相对较弱, 前 3 个模态形式表现为上、中、下游不同步的渐变和中高两头低或中低两头高的空间分布形态, 时间系数的

*基金项目: 国家自然科学基金(51079131)、国家十二五科技支撑计划(2012BAB02B04)、中国气象局气候变化专项(CCSF201312)和中国气象局河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室开放基金资助。

作者简介: 胡彩虹(1968-), 女, 山西平遥人, 博士, 教授, 主要从事水文学及水资源方面的教学和科研工作。

年际和年代际变化表明较强降水阈值、较强降水日数、最大 5 日降水量和日降水强度呈现不显著的增加和减少趋势。

关键词: 黄河流域; 极端气候; STARDEX 核心指数; 时空分布形态

1. 引言

极端天气气候事件是对人类社会危害最严重的自然灾害之一, 在气候变暖的背景下, 极端天气气候事件发生的频率不断增大, 给人类社会经济带来了巨大的负面影响, 直接威胁到人类赖以生存的生态环境, 因而引起了各国政府和国际机构的高度重视^[1,2]。如何减少极端天气气候事件脆弱性的问题, 不仅受到社会公众的普遍关注, 而且也是气候变化科学研究的前沿问题。国内外对极端气候事件的研究主要集中在极端气温(低温和高温)^[3,4]和极端降水(暴雨和干旱)^[3-5]两方面。在各种极端气候事件的研究中, 关于“极端”的定义主要有两种: 一种是采用绝对值阈值法^[2,3], 如定义日最高(低)气温高于 35℃(低于 0℃)的日数为高温(低温)日数, 定义日降水量大于 50 mm 为暴雨; 另一种采用百分比阈值法, 如规定所有日降水量的第 90、95 或 99 百分位值为极端强降水阈值^[5-8]。百分比阈值法不仅体现了极端气候事件因地区而异的特征, 而且有利于不同区域极端气候事件变化趋势的时空分析比较, 尤其适合于跨不同气候区的分析比较。黄河流域横贯我国中北部, 是我国的第二大河流, 黄河流域幅员辽阔, 山脉众多, 东西高差悬殊, 各区地貌差异也很大。又由于流域处于中纬度地带, 受大气环流和季风环流影响的情况比较复杂, 其中上游为温带半湿润、半干旱气候区, 河源属高原亚寒带湿润气候区, 中、下游基本上属于暖温带半湿润气候区。黄河水少沙多, 水沙异源, 水资源条件先天不足, 而且最近几十年受人类活动和气候变化的影响很大^[9]。作为我国西北和华北地区最大的供水水源, 黄河以其占全国 2% 的河川径流量承担着全流域与下游引黄灌区占全国 15% 的耕地面积的灌溉任务与 12% 的人口的供水任务, 黄河水资源的变化趋势直接关系到区域生态环境的改善与社会经济的健康发展。黄河流域的极端气候事件可能带来极端水文及其它事件的变化, 从而影响工农业生产和城市化发展。因此本文选择黄河流域 143 个气象站点的气温和降水数据、选用 STARDEX8

个核心指数采用 EOF 分析方法对黄河流域极端气候事件的空间分布特性进行分析, 以期揭示极端气候事件的区域差异及其形成机制, 制定因地制宜的应对气候变化和极端气候事件策略。

2. 资料与方法

2.1. 数据及极端气候指数

基础资料为黄河流域 143 个气象站 1961~2010 年 50 年间逐日平均气温、最高气温、最低气温和日降水量。世界气象组织规定, 大于 90% 分位点(或小于 10% 分位点)的事件为极端事件, 这样有利于增强少雨地区和多雨地区强降水事件变化趋势的空间可比性。文中采用这种方法定义日极端气候事件, 用于分析的气温和降水极端指标来自“欧洲地区极端事件统计和区域动力降尺度” STARDEX 项目, 该项目^[10]提出了 50 多个基于逐日温度和降水量观测资料的极端指数, 选取 8 个核心指数, 以分析日极端天气气候事件的变化, 这些指数反映了日气温和日降水量的强度、频率变化, 其说明和意义见表 1。

2.2. 分析方法

EOF 方法是一种分析矩阵数据中的结构特征和提取主要数据特征量的方法。Lorenz 在 20 世纪 50 年代首次将其引入气象和气候研究, 现在海洋和其他学科中得到了广泛的应用^[11]。分解出的经验正交函数究竟是有物理意义的信号还是毫无意义的噪音, 应该进行显著性检验, 特别是当变量场空间点数大于样本量时, 显著性检验尤其重要。本文采用 North 等^[12]提出的计算特征值误差范围来进行显著性检验。特征值 λ_j

误差范围为: $e_j = \lambda_j \left(\frac{2}{n} \right)^{\frac{1}{2}}$, 式中, n 为样本量。

当两相邻的特征值 λ_{j+1} 满足 $\lambda_j - \lambda_{j+1} \geq e_j$ 时, 就认为这 2 个特征值所对应的经验正交函数是有价值的信号。通过经验正交分解(EOF)法得到核心指数的主要

Table 1. Eight core indices of STARDEX plan
表 1. 选取 STARDEX 计划中的 8 个核心气象指数

序号	指数名称	代码	定义	单位
1	暖日阈值	txq90	日最高气温的第 90%分位值	℃
2	冷夜阈值	tnq10	日最低气温的第 10%分位值	℃
3	霜冻日数	tnfd	日最低气温≤0℃的全部日数	d
4	最长的异常热浪天数	txhw90	日最高气温 > 历史同期(气候基准期内逐年以该日为中点的连续 5 日)第 90%分位值的最长连续天数	d
5	较强降水阈值	pq90	有雨日降水量的第 90%分位值	mm
6	较强降水日数	pn190	日降水量大于有雨日第 90%分位点的降水量占总降水量的百分比	%
7	最大 5 日降水量	px5d	最大连续 5 日总降水量	mm
8	有雨日降水强度	pint	有雨日降水量/有雨日数	mm/d

注: 1) 第 90%分位值算法: 取当日及前后两天共 5d, 基准期为 30 年, 合计 150d 的日最高气温, 取第 90%分位值。2) 第 1、2、5 个指数的第 90%或 10%分位值计算与年份有关, 仅采用当年逐日气温或有雨日资料计算, 即不同年的结果不同。第 6、7 个指数用到的 90%分位值是基准期内所有有雨日资料的计算结果, 对某一站该分位点值是固定的。3) 日降水量 ≥ 1.0 mm 为有雨日, 否则为无雨日。

模态, 并用趋势法和小波分析法分析主要模态的年际和年代际变化特征。

3. 空间分布形态分析

3.1. 极端气温指标空间分布形态

极端气温指标 EOF 的前 3 个模态的方差贡献率见表 2, 可以看出极端气温指标前三个特征向量累积方差贡献率均在 67.48%以上, 第四特征以后的向量贡献显著减小, 同时前三个特征值也均能通过 North 显著性检验, 因此在此列出极端气温指标的前三个特征向量作分析。图 1(a)~(j)分别为 4 个指标前 3 个模态的特征向量分布形态及其对应的时间系数趋势和时间系数的小波分析结果图。表 3 为各种模态的分布形态及趋势和周期统计表。

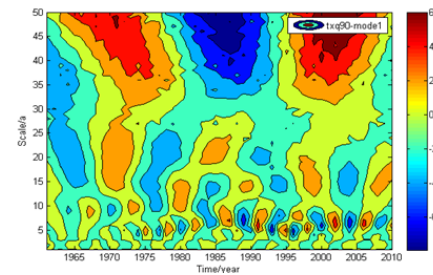
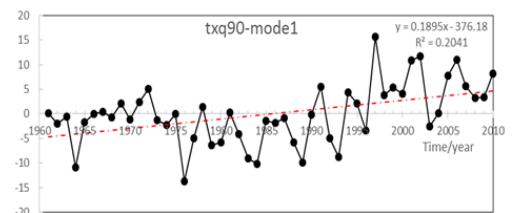
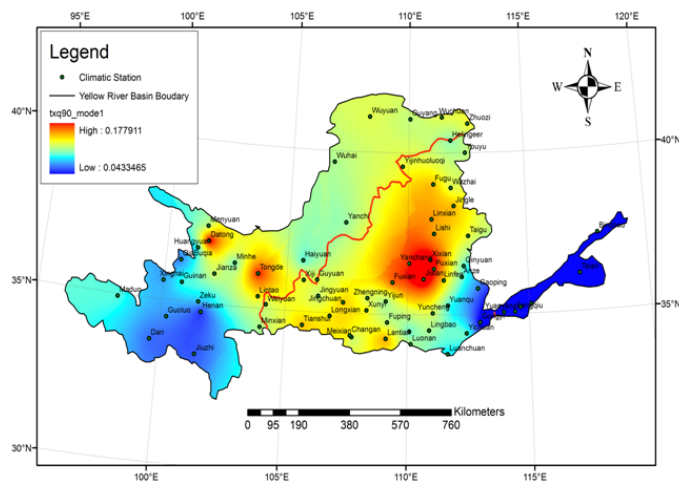
1) 暖日阈值(txq90)和冷夜阈值(tnq10)

EOF 分解得到 txq90 的前 3 个 EOF 模态的特征向量贡献率和空间结构分别见表 2 和图 1(a)~(c)所示, 其中第一模态占方差贡献率的 53.5%, 第二模态占方

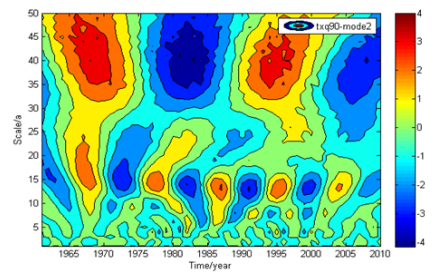
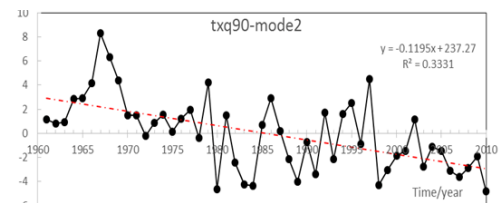
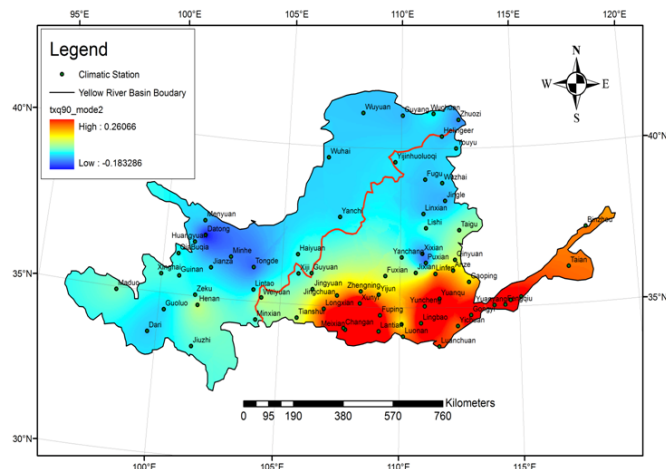
差贡献率的 13.04%, 累积方差 66.54%; 第三模态占方差贡献率的 9.05%, 累积方差率 75.59%, 通过了显著性检验, 说明空间分布形态显著。从图 1(a)中可以看出由 EOF 分解得到的第一模态特征为东西与中部反位相。第一模态表明暖日阈值在流域内呈现由中间向东西递减或由东西向中间递减的分布类型, 高值区(正值)分布在山西和陕西交界处的兴县和神木县以及陕西宝鸡一带, 这也说明这些地区也是高温脆弱区, 即暖日阈值变化幅度一般比较大。第二模态为东南 - 西北反相型, 即东南高时, 西北低, 反之亦然, 即由下游黄河流域东南部逐渐向上游流域西北地区逐渐变化。第三模态为东北 - 西南反相型, 即由流域东北的高值区(高值中心在山西内蒙交界处)逐渐向上游西南方向的低值区(低值中心在青海同德和兴海)逐渐变化。可见, 暖日阈值表现为明显的东西同位相与中间反位相、东南 - 西北和东北 - 西南反位相三种模态, 但以第一种模态为主。经验正交分解能够将变量场分解为某些互相独立的模态即特征向量场和时间系数, 这些模态可以代表变量场典型时空变化特征。前 3 个

Table 2. The variance explained by the EOFs for temperature extremes indices
表 2. 极端气温指标 EOF 的前 3 个模态的方差贡献率

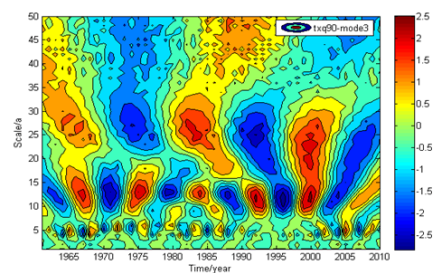
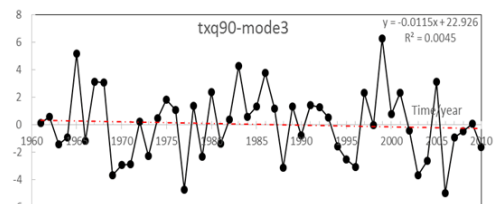
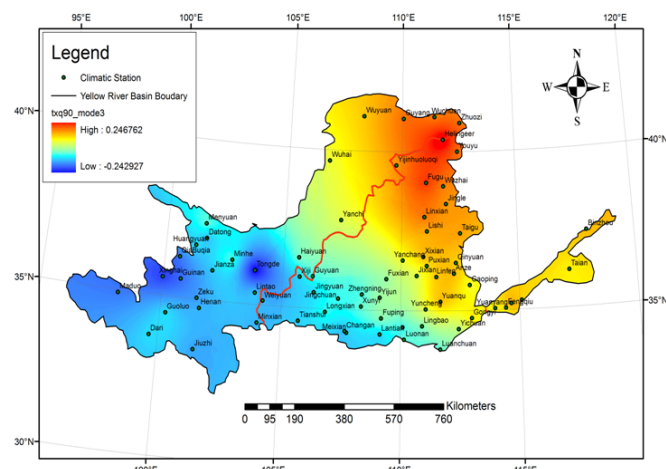
EOF No.	txq90		tnq10		tnfd		txhw90	
	方差贡献率(%)	累积方差贡献率(%)	方差贡献率(%)	累积方差贡献率(%)	方差贡献率(%)	累积方差贡献率(%)	方差贡献率(%)	累积方差贡献率(%)
EOF ₁	53.50	53.50	56.75	56.75	45.23	45.23	49.17	49.17
EOF ₂	13.04	66.54	13.23	69.98	14.86	60.09	11.89	61.06
EOF ₃	9.05	75.59	6.14	76.13	7.39	67.48	6.75	67.81



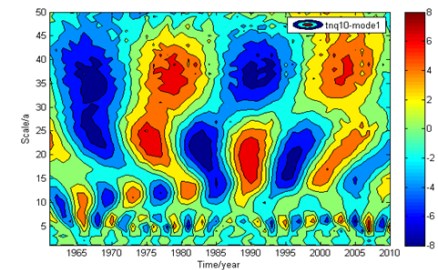
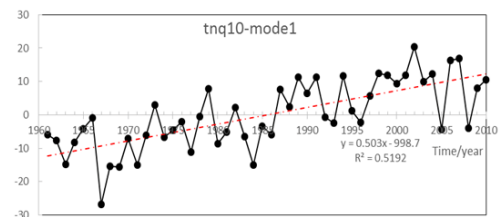
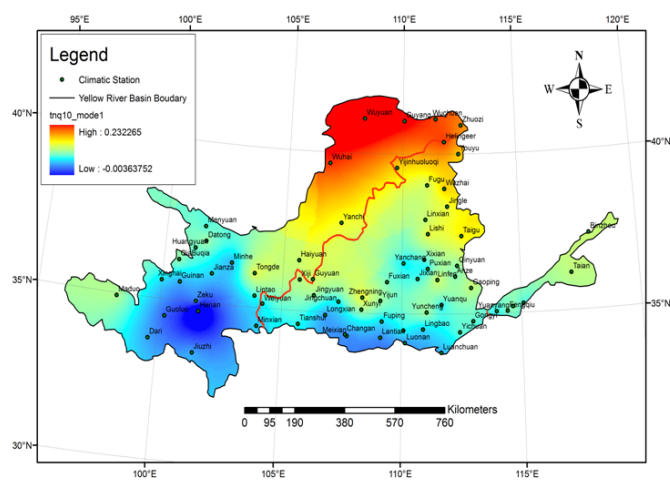
(a) txq90 EOF₁



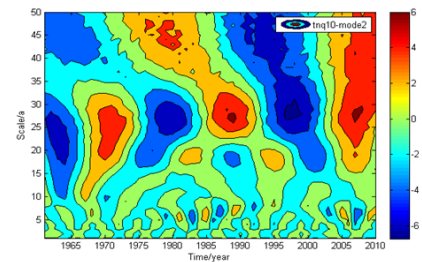
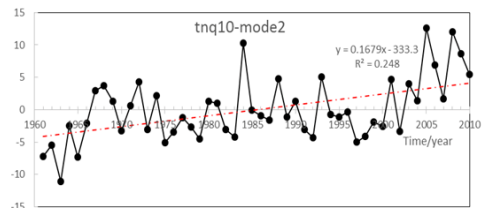
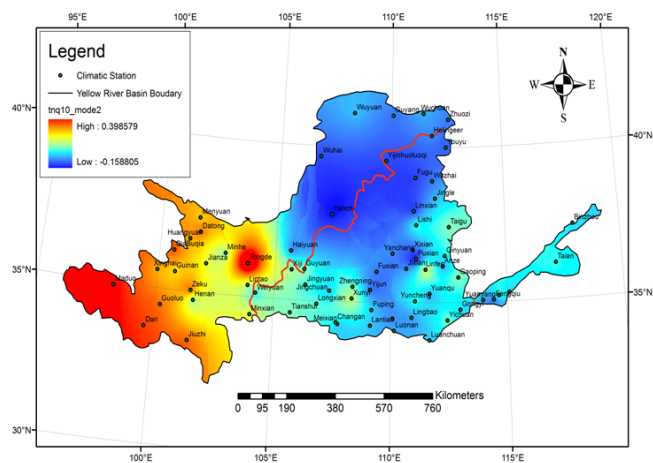
(b) txq90 EOF₂



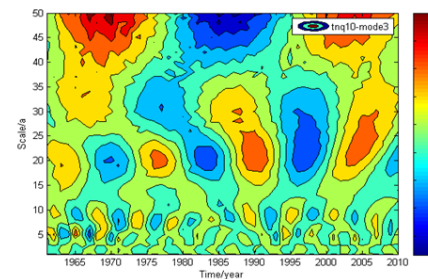
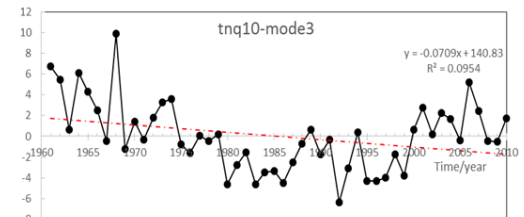
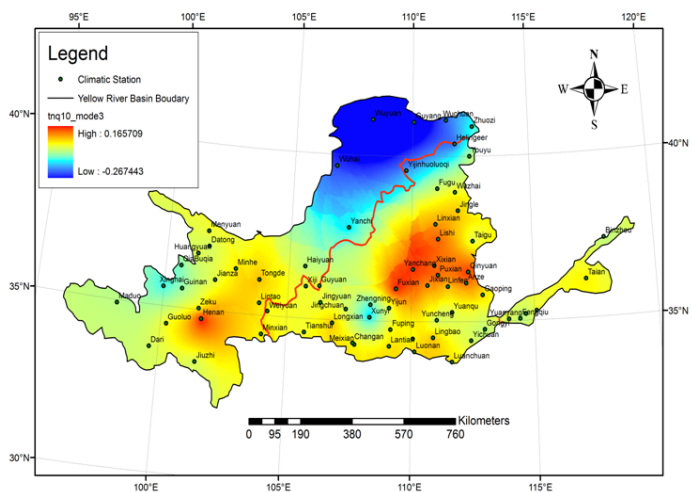
(c) txq90 EOF₃



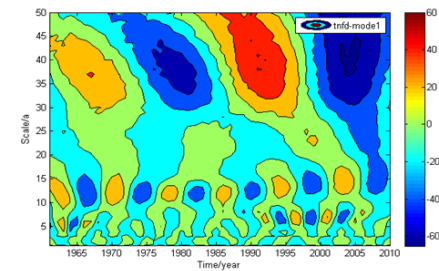
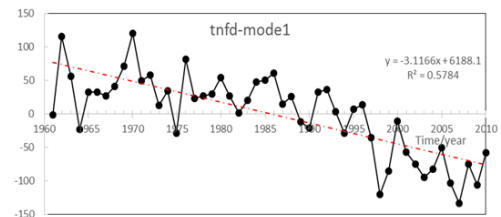
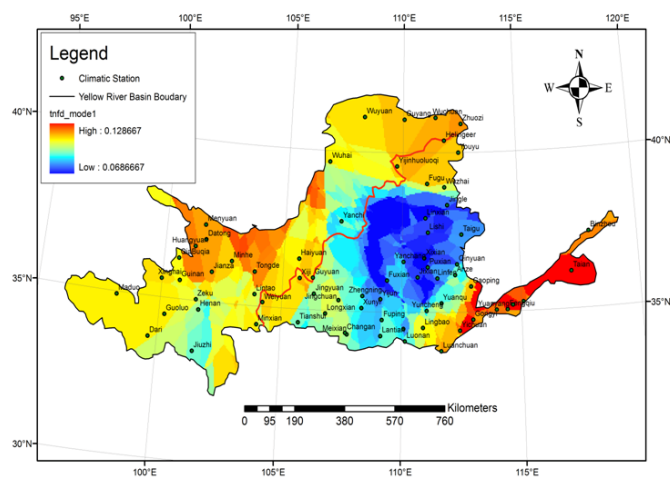
(d) tnq10 EOF₁



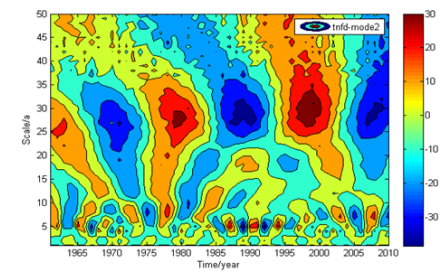
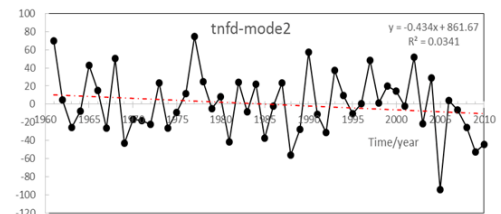
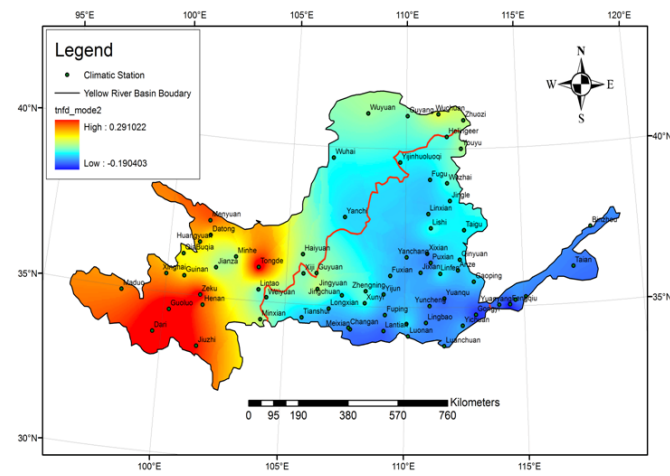
(e) tnq10 EOF₂



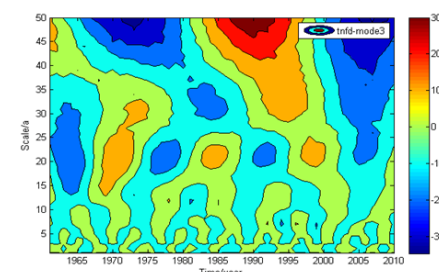
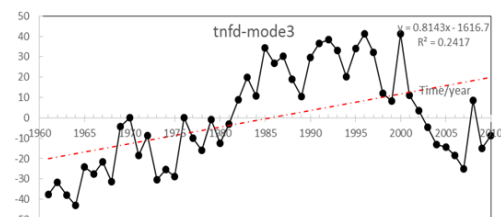
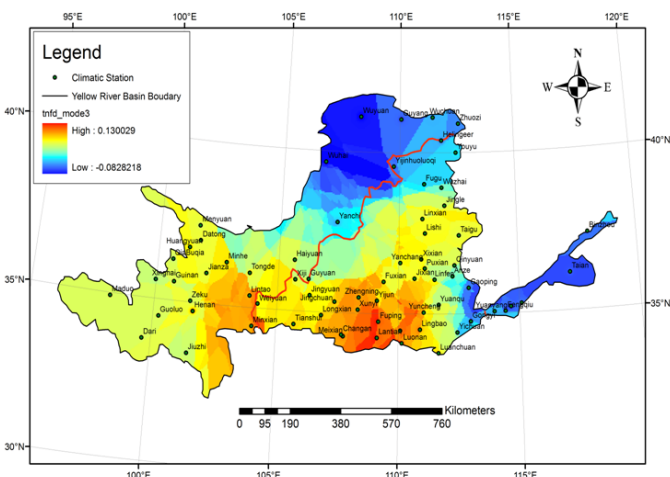
(f) tnq10 EOF₃



(g) tnfd EOF₁



(h) tnfd EOF₂



(i) tnfd EOF₃

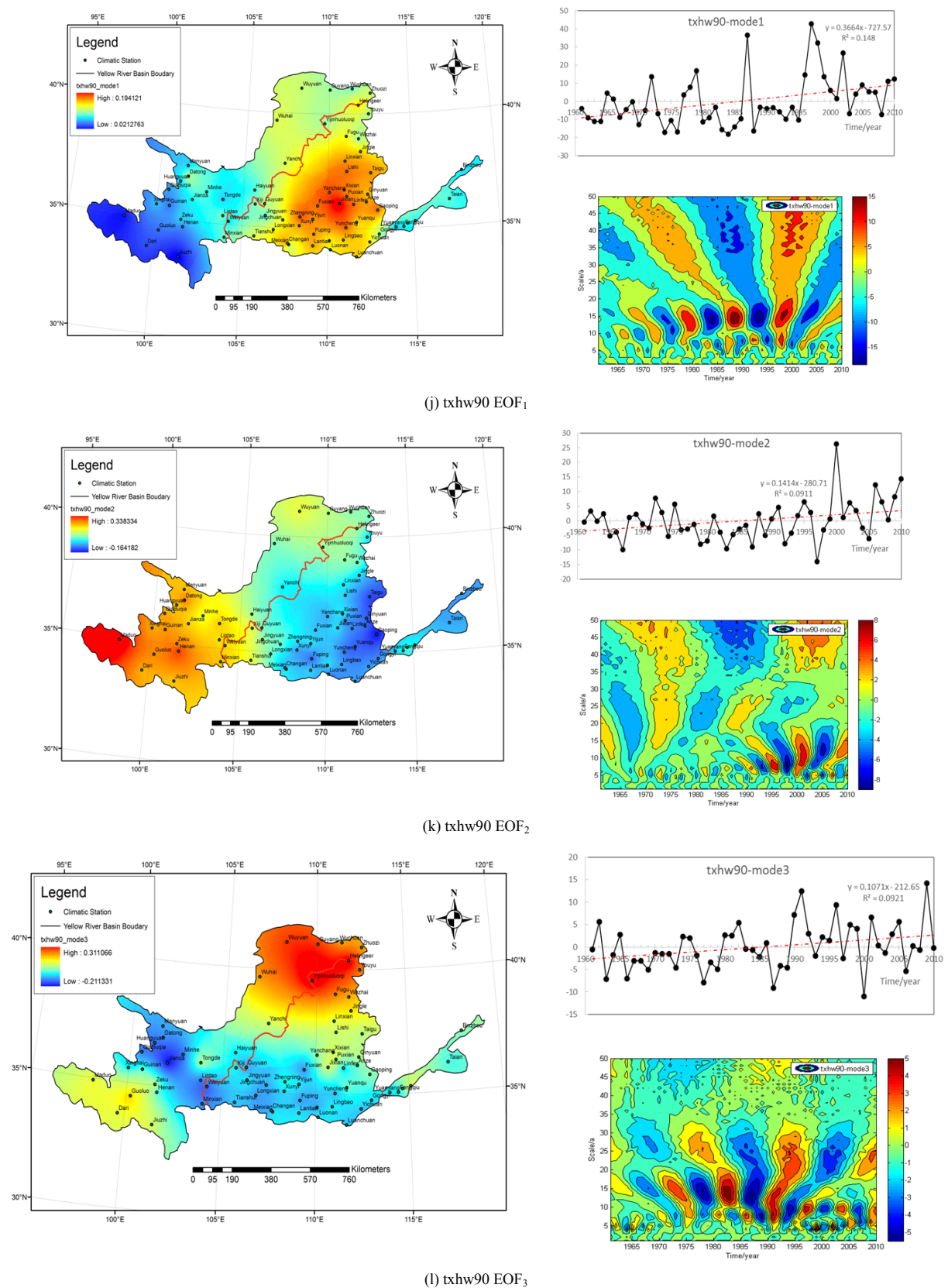


Figure 1. Spatial distribution of EOF1-3 for temperature extremes indices
图 1. 极端气温指标特征向量空间分布

Table 3. The variance explained by the EOFs for rainfall extremes indices
表 3. 极端降水指标 EOF 的前 3 个模态的方差贡献率

特征向量	pq90		pn190		px5d		pint	
	方差贡献率(%)	累积方差贡献率(%)	方差贡献率(%)	累积方差贡献率(%)	方差贡献率(%)	累积方差贡献率(%)	方差贡献率(%)	累积方差贡献率(%)
EOF ₁	16.83	16.83	21.21	21.21	17.23	17.23	17.50	17.50
EOF ₂	10.80	27.63	10.30	31.51	11.97	29.20	10.81	28.32
EOF ₃	7.75	35.38	7.34	38.86	7.60	36.80	9.19	37.50
EOF ₄	7.03*	42.41*	6.37	45.23	6.76*	43.56*	7.04	44.54
EOF ₅	6.26*	48.67*	4.92	50.15	6.07*	49.63*	6.08*	50.63*
EOF ₆	5.29*	53.96*	4.49*	54.64*	5.15*	54.78*	5.64*	56.26*
EOF ₇	4.95*	58.91*	4.28	58.92	4.42*	59.2*	4.58*	60.85*
EOF ₈	4.21	63.12	3.41	62.34	4.08*	63.28*	3.84	64.69
EOF ₉	3.20	66.31	3.22*	65.56*	3.42*	66.7*	2.98	67.67
EOF ₁₀	2.91*	69.22*	3.00	68.56	2.92*	69.62*	2.76*	70.43*

注: 表中右上角加 “*” 的模态表示未通过 North 显著性检验。

模态的年际和年代际变化特征的时间序列见图 1(a)~(c), 图中黑色实线为时间系数变化线, 红色虚直线为年际线性变化趋势, 可见, txq90 模态 1~3 分别表现为增加、减少和增加的趋势。第一模态时间系数以 1.895/10 年的速度增加, 且 1990 年前时间系数以负值为主之后以正值为主, 说明流域以 1990 作为一个分界点, 暖日阈值空间上由中间低 - 东西高向中间 - 高东西低的模态进行转变, 即说明进入 20 世纪 90 年代后, 中游地区暖日阈值增加明显。但总体上, 流域暖日阈值表现出向中部高 - 东西部低的演变趋势。第二模态时间系数以 -1.195/10 年的速度减少, 1990 年前为东南高 - 西北低, 1990 年后表现为东南低 - 西北高的模态, 表明第二模态中 1990 年后暖日阈值以东南低西北高为主的模态。但总体上向东南低西北高的趋势发展。第三模态时间系数以 0.115/10 年的速度增加。表明第三模态总体上向东北高西南低的方向发展。从小波分析的结果来看, 这三个模态分别具有 6a 和 14a、38a 以及 4a、25a 的周期特征。

冷夜阈值 tnq10 的第一模态占方差贡献率的 56.75%, 第二模态占方差贡献率的 13.23%, 累积方差 69.98%; 第三模态占方差贡献率的 6.14%, 累积方差率 76.13%, 说明前三个模态基本能够反应出冷夜阈值的空间分布形态。从图 1(d)~(f)中可以看出由 EOF 分解得到的第一、二和三模态分布形态特征分别表现为东北与西南反相、东西反相和南北反相的模态形

式, 其中第一模态为明显东北 - 西南反相格局, 即由流域东北部的高值区(高值中心在内蒙古五原)逐渐向西南部的低值区(中心在青海河南县)变化, 且时间系数以 5.03/10 年的速度增加, 1990 年前表现为北低南高, 1990 年后表现为北高南低, 说明 1990 年后流域北部冷夜阈值增加趋势明显, 同时北高南低是主要的发展趋势。第二模态为东西反相, 由高值区(中心在流域西南青海、玛多)向低值区(中心在流域东北内蒙伊金霍洛旗)变化, 时间系数以 1.697/10 年的速度增加, 且可以发现 2000 年前表现为东高西低, 2000 年后为西高东低, 说明 2000 年后西部地区冷夜阈值增加, 而东部地区有所减少。但流域总体上向西高东低方向发展。第三模态为南北反相型, 即流域北部的内蒙古乌海和武川一带的冷夜阈值与流域南部正值区变化相反。时间系数以 0.709/10 年的速度减少, 1970 年前和 2000 年后流域冷夜阈值表现为北低南高, 1970~2000 年为北高南低, 总体上向北高南低方向发展。此外, 小波分析发现这三个模态分别具有 6a、21a、37a 和 5a、26a 以及 24a 的年际变化周期。

2) 霜冻日数(tnfd)和最长异常热浪天数(txhw90)

EOF 分解得到 tnfd 和 txhw90 的前 3 个 EOF 模态的特征向量贡献率和空间结构分别见表 2 和图 1(g)~(k)所示, 霜冻日数和最长热浪天数第一模态分别占方差贡献率的 45.23%和 49.17%, 第二模态分别占方差贡献率的 14.86%和 11.89%, 累积方差分别为 60.09%和

61.06%, 第三模态分别占方差贡献率的 7.39% 和 6.75%, 累积方差率分别为 67.48% 和 67.81%, 通过显著性检验, 说明前三种模态基本能够反映流域霜冻日数的空间分布形态。

从图 1(g)~(k) 中可以看出, 由 EOF 分解得到的 $tnfd$ 第一模态空间结构为中部 - 西北和东南部反相型, 时间系数以 31.166/10 年的速度减少, 进入 20 世纪末期后, 霜冻日数中部高, 西北东南低。第二模态为东西反相型, 即东高西低或西高东低, 高值区(正值)在源区(青海玛多附近一带), 低值(负)区在中下游(山西垣曲附近一带)。第三模态表现为中部与东南和西北部反相型的变化特点, 同时, 第二和三模态分别表现为不明显减少和增加趋势, 分别以 -4.34/10 年的速度减少和 8.143/10 年的速度增加, 第二、三模态进入 2000 年后均以负值为主, 即表现为西高东低和中部高 - 西北东南低形态; 此外, 第一、二模态分别具有 37a、4a、10a 的周期性, 第三模态周期性变化特点不明显。霜冻日数的减少特点与我国北方大部分地区冬季气温明显上升的结论基本一致^[8]。

由图 1(i), (k) 中可知, $txhw90$ 第一特征向量方差贡献率为 57.82%, 且模态分布为中部与东西反相, 即表现为东西高中间低或者东西低中间高, 说明整个流域的最长异常热浪天数受大尺度天气系统影响较明显。高值出现在黄河流域中游地区(山西、陕西地区), 表明这些区域的最长热浪天数变化最明显。第二模态为西北与东南反位相, 即由青海、玛多向山西、河南一带逐渐变化。第三模态为中部与东北和西南反位相, 即呈现中部东北高西南低或西南高中部和东北低的空间变化特点。同时, 第一、二和三模态时间系数具有显著的增加趋势, 分别以 3.664/10 年、1.414/10 年和 1.071/10 年的速度增加, 说明这三个模态分别向中高东西低、西北高东南低和中低东北和西南高的趋势发展。此外, 小波分析发现这三个模态分别具有 15a、6a 和 14a 的变化周期。

3.2. 极端降水指标空间分布形态

EOF 分解得到的累积方差贡献率达到接近 70% 的 EOF 模态特征向量方差贡献率见表 3, 可见, 极端降水指标前 10 个 EOF 模态累积方差贡献率最高才达到 70.43%, 其中前 3 个指标通过了 North 等的检验, 前 3 个模态累积方差贡献率在 35.38%~38.86% 之间,

较强降水阈值 $pq90$ EOF 分解得到的前 3 个模态结构见图 2(a)~(c), 可见, 第一模态占方差贡献的 16.83%, 第二模态占方差贡献的 10.80%, 累积方差 27.63%, 之后模态方差贡献逐渐减小, 到第六模态时占方差贡献的 5.29%, 累积方差贡献 53.96%, 第十模态占方差贡献的 2.91%, 累积方差贡献 69.22%。其中前三个模态通过了 North 显著性检验, 说明前 3 个模态均具有物理意义, 其它指标情况类似。因此, 说明降水的极端指标的空间分布没有气温极端指标空间分布特征明显, 考虑到模态显著性检验结果及文章篇幅限制, 本文选取前 3 个模态做分析, EOF 模态空间结构如图 2 所示。

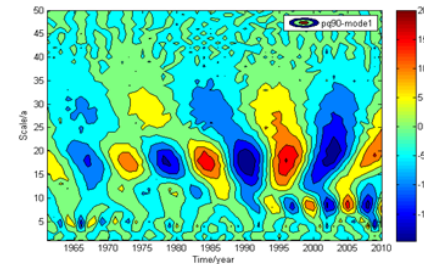
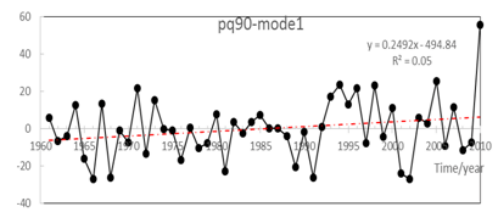
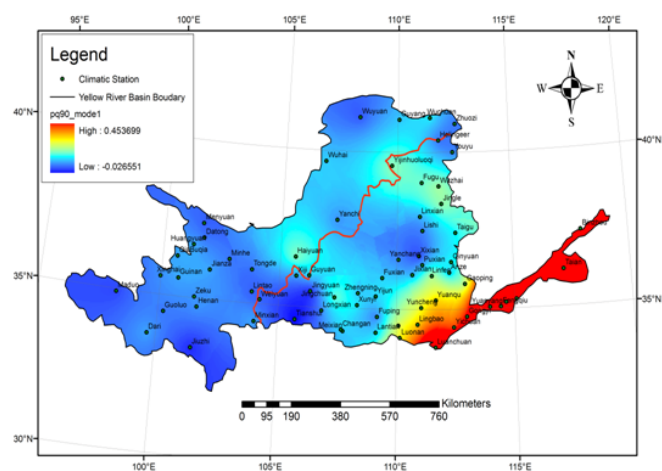
1) 较强降水阈值($pq90$)和较强降水日数($pnl90$)

由图 2(a)~(c) 可知 EOF 分解得到的 $pq90$ 前三个模态分别表现出东南 - 西北反相、中部与东西部反相和西北 - 东南反相的空间变化特性。第一模态由高值区(流域下游地区)向低值区(流域西北部)逐渐变化, 即东南向西北方向渐变。第二模态中游地区为低值区, 下游和上游为高值区。第三模态为由西北向东南的渐变形态, 也表明内蒙古地区与山西陕西以南河南以北地区反相变化形态。同时, $pq90$ 前三个模态时间系数均有增加趋势, 说明前三个模态强降水阈值分别向东南高西北低、东西高中部低和西北高东南低的方向发展。此外, 第一、二和三模态分别具有 18a、12a、30a 和 10a、26a 的周期性。

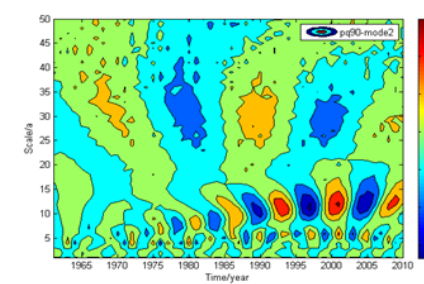
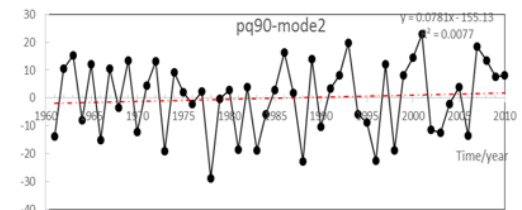
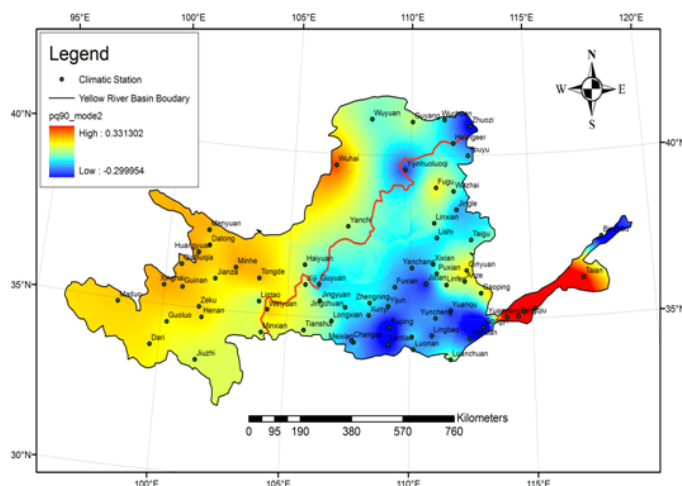
从图 2(d)~(f) 可知, $pnl90$ 前三个模态分别为南北反相、西北 - 东南反相和东北和西南反相型。第一模态以陕西、山西南部地区为中心, 向流域北部渐变, 可以看出该地区与内蒙古地区变化相反。第二模态反映出流域西北部与陕西以南、河南以北及山东地区强降水日数空间反相变化。第三模态可以看出内蒙古、山西大部分地区与河源及流域南部部分地区强降水日数变化规律相反。同时, 前三模态分别呈现减少、减少和增加趋势, 分别以 -0.914/10 年、-0.472/10 年和 1.118/10 年的速度减少和增加。小波分析发现, 这三种模态在时间上具有 5a、34a, 15a、22a 和 20a 的周期。

2) 最大 5 日降水量($px5d$)和有雨日降水强度($pint$)

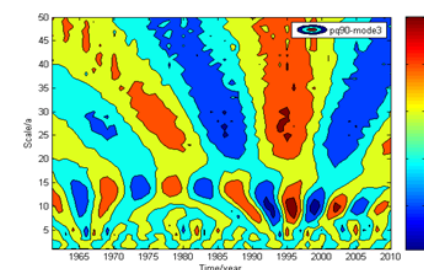
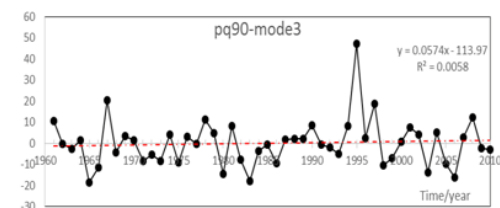
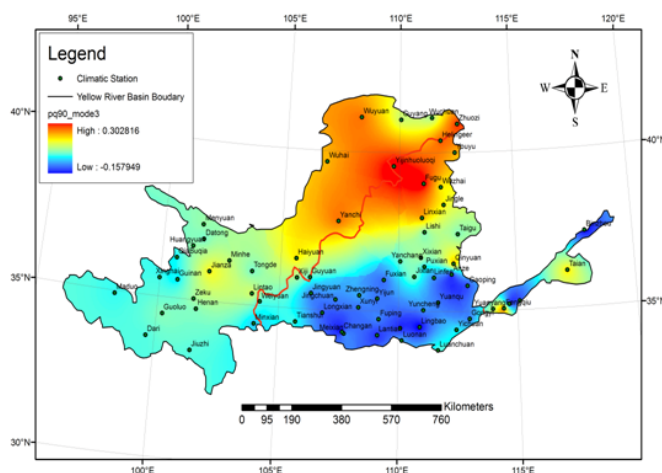
从图 2(g)~(i) 中可以看出, $px5d$ 前三个模态分别属于西北 - 东南反相、中部与西北和东南反相和中部与东西反相的空间变化形态。第一模态高值区集中在



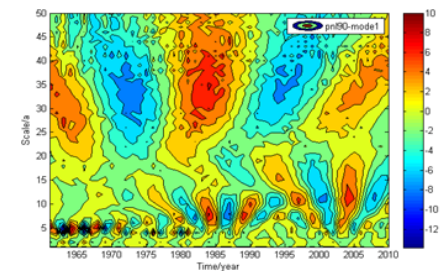
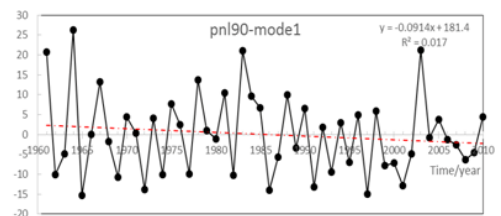
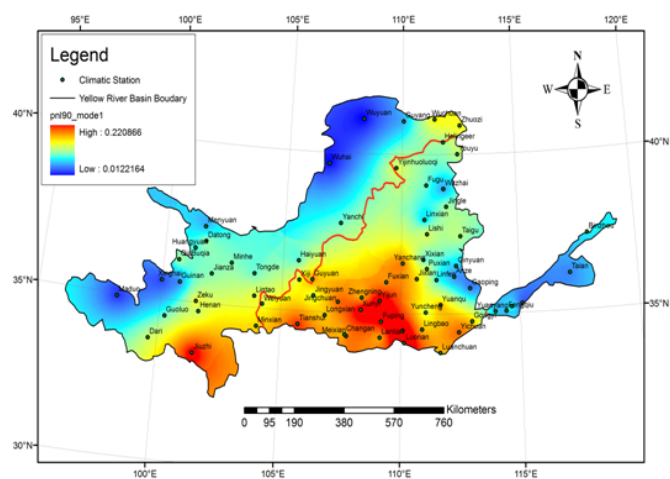
(a) pq90 EOF₁



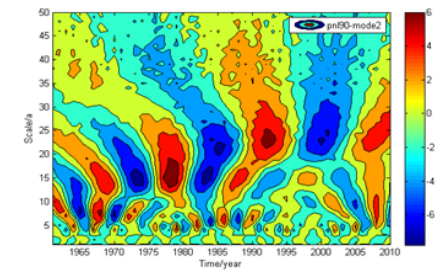
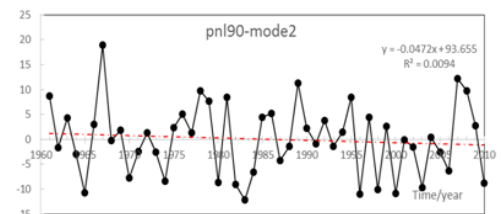
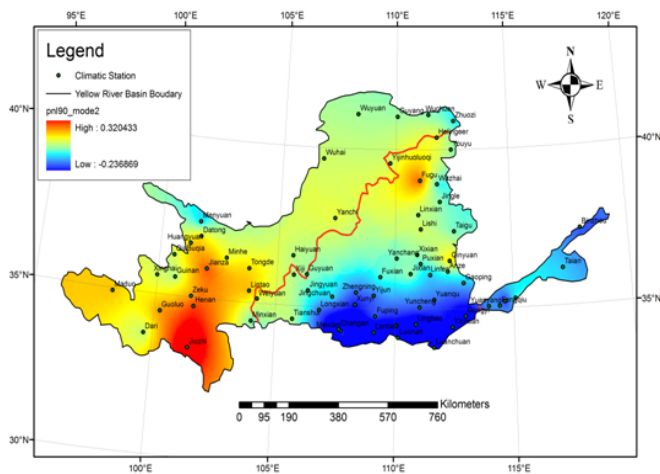
(b) pq90 EOF₂



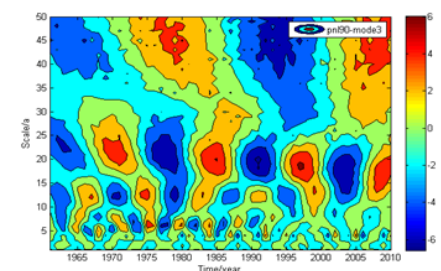
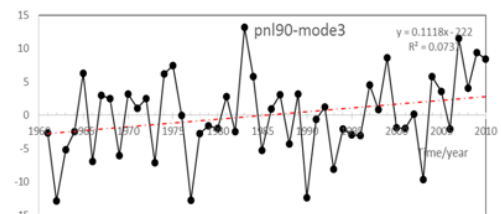
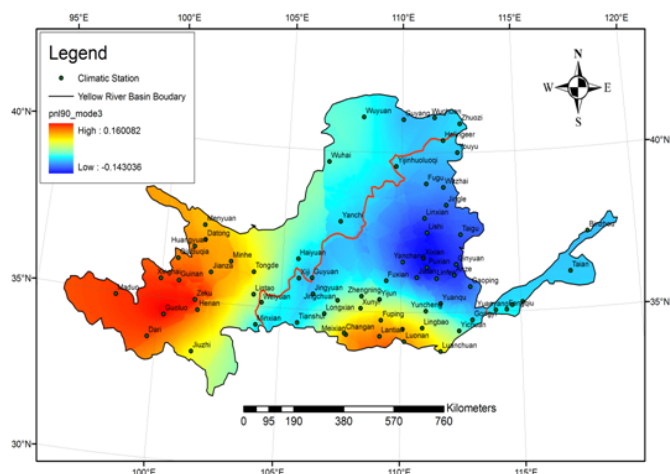
(c) pq90 EOF₃



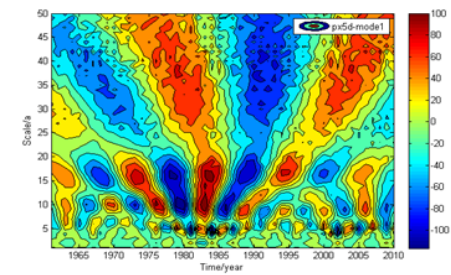
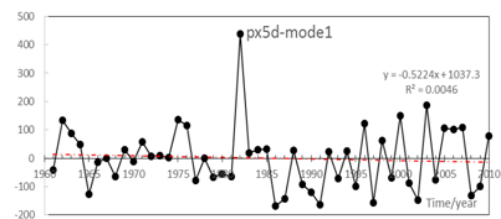
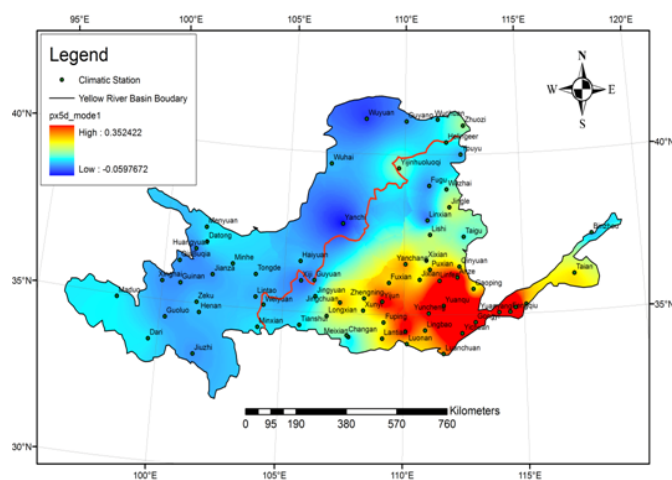
(d) pn190 EOF₁



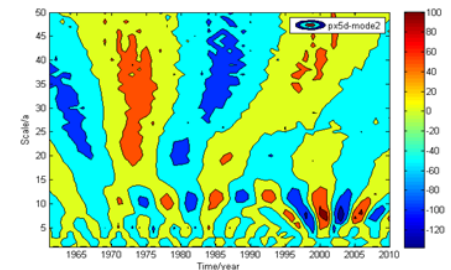
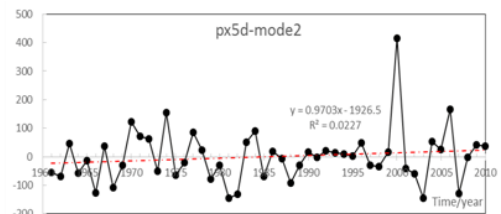
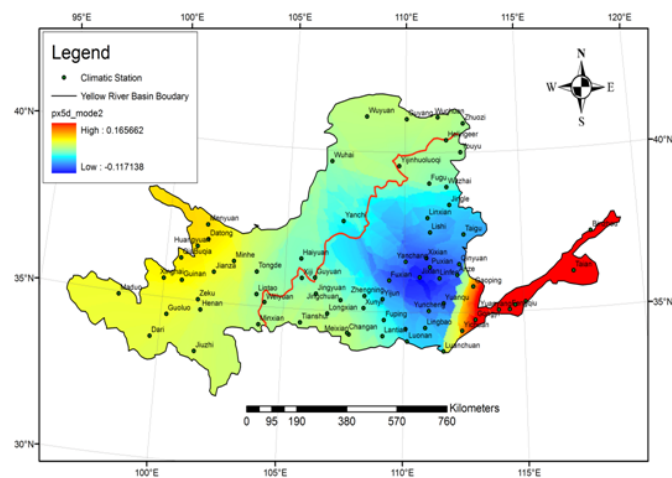
(e) pn190 EOF₂



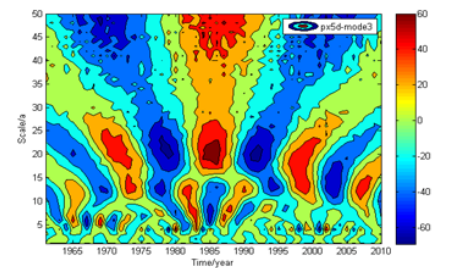
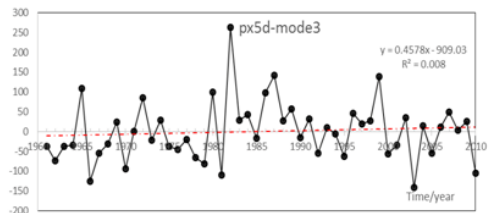
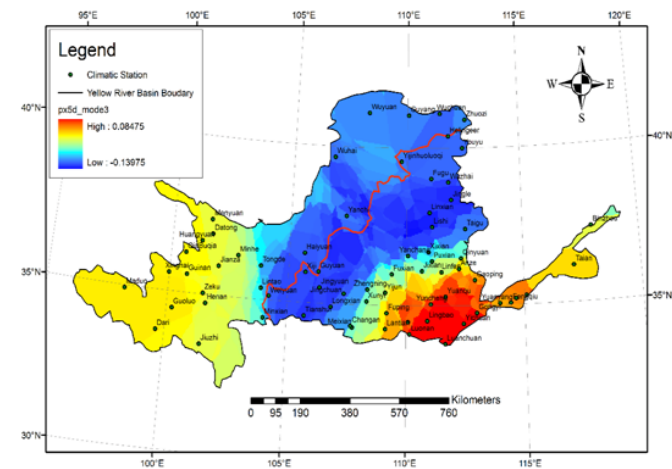
(f) pn190 EOF₃



(g) px5d EOF₁



(h) px5d EOF₂



(i) px5d EOF₃

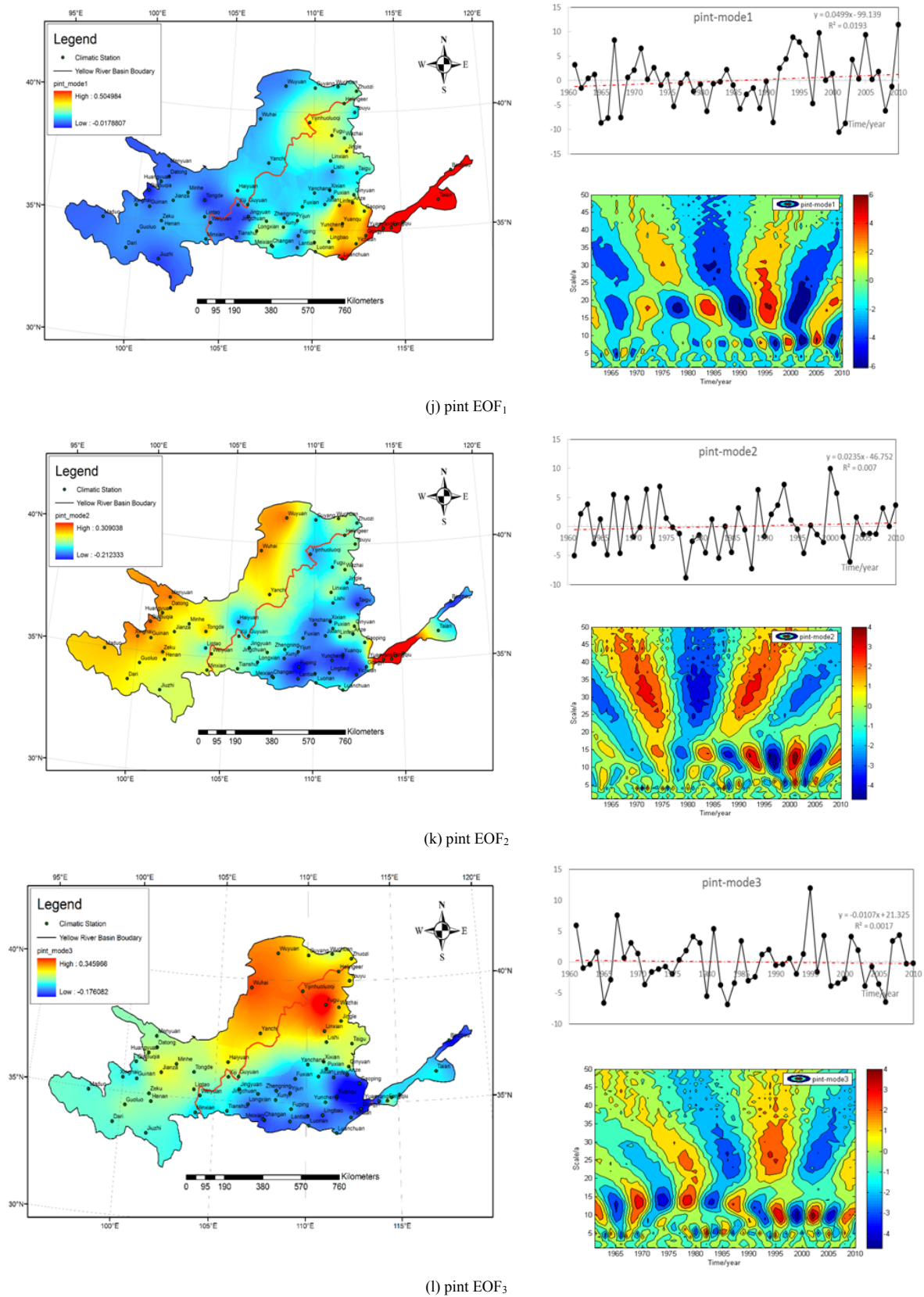


Figure 2. Spatial distribution of EOF1-3 for rainfall extremes indices
图 2. 极端降水指标特征向量空间分布

流域中游的山西、陕西以南、河南以北地区, 向流域上游(西北)逐渐变化。第二模态高值区集中在下游地区, 低值区集中在中游山西和陕西部分地区。第三模态的高值区在陕西、山西、河南交界地带, 低值区在宁夏、内蒙古与陕西和山西交界地区, 河源区特征

向量在零值附近, 表明变化不强烈。三个模态的时间系数呈现减少、增加、增加的变化趋势, 但反映出流域最大 5 日降水量在空间上主要向东南低西北高、中游低上下游高和中部低东西部高的趋势发展。第一、三模态分别具有 16a 和 20a 的周期, 第二模态周期性不明显。

从图 2(j)~(l)中可以看出由 EOF 分解得到的 pint 前三个模态分别属于东西反相、中部与西北和东南反相和南北反相型空间变化形态。其中第一模态高值区在流域下游地区, 向流域西部地区逐渐变化。第二模态高值中心有两个, 分别在流域上游和下游地区, 低值区在中游的山西以南河南以北地区。第三模态表现为南北渐变型, 即高值区在北纬 37°N~42°N 之间, 低值区主要分布在陕西、山西南部 and 河南交界的地区。三个模态时间系数年际变化趋势不明显。小波分析可知这三个模态分别具有(7a、17a、12a、31a、5a、14a)的变化周期。

4. 结语

本文根据黄河流域 143 个气象站气象资料, 在计算 STARDEX 8 个核心指标的基础上, 采用 EOF、趋势及小波分析方法分析了黄河流域极端气温和降水的时空分布形态。极端气温和极端降水指标的时空变化格局与相关研究^[13,14]基本一致。主要结论如下:

1) 通过对极端气温核心指数的 EOF 分析, 极端气温 4 个指标都能较好地揭示空间变化的主要结构, 暖日阈值(txq90)第一、二和三模态分别以中部与东西部反相、东南-西北反相型和东北-西南反相型, 表明极端高温整个流域空间变化形态不一, 但流域暖日阈值总体上呈现明显的增加趋势, 流域中游地区尤其明显。冷夜阈值呈现东北与西南反相、东西反相和南北反相的空间分布模态, 相应模态的时间系数变化趋势表明极端低温流域北部地区呈现明显增加趋势。霜冻日数和最长热浪天数空间变化分别以中部与西北和东南部反相型和中部与东西反相的空间分布格局

为主, 相应的时间系数变化趋势表明流域大部分地区霜冻日数呈现减少趋势而最长异常热浪天数以增加趋势为主。此外, 除了霜冻日数外, 其他三个指数在 20 世纪 90 年代和 20 世纪末均有突变发生, 20 世纪末期后出现增强趋势。

2) 极端降水核心指标的分析表明, 前 10 个模态方差贡献率达到 68.86%以上, 相对于极端气温变化, 极端降水变化趋势不明显。较强降水阈值、较强降水日数、最大 5 日降水量和有雨日降水强度空间上以东南-西北反相型、南北反相型、西北-东南反相型和东西反相型的空间分布格局, 极端降水表现出了空间分布的不均匀性, 从相应的时间系数的年际和年代际变化分析, 较强降水阈值、有雨日降水强度和较强降水日数和最大 5 日降水量在时间上分别呈现不显著的增加和减少趋势。

气候变化对黄河流域气候格局的影响致使极端气温和降水时空格局变化, 特别是从 2000 年后表现更为强烈些, 也致使天气极端化和持续程度的变化。本文仅对黄河流域极端气温和降水的时空变化特点进行了分析, 其产生原因涉及地形地势、大气环流和气候变化等方面, 极端气温和降水的变化直接影响径流的变化, 进而影响可利用的水资源量。极端气候的发生将会在不同的时空格局上加剧黄河流域水资源量的短缺。如何能在气候和极端气候事件变化的条件下合理配置水资源, 既能满足流域生态系统的健康发展, 也能满足流域内生活生产的用水需求。这些问题水利部门该给以足够的重视。

参考文献 (References)

- [1] IPCC. Summary of policy makers of climate change 2007: The Physical science basis contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 丁一汇, 任国玉, 石广玉等. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(1): 3-8.
DING Yihui, REN Guoyu, SHI Guangyu, et al. national assessment report of climate change (I): Climate change in China and its future trend. Advances in Climate Change Research, 2006, 2(1): 3-8. (in Chinese)
- [3] 陈晓光, Declan C., 郑广芬等. 1961~2004 年宁夏极端气温变化趋势分析[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(2): 73-77.
CHEN Xiaoguang, DECLAN Conway, ZHENG Guangfen, et al. Trends of extreme temperature in Ningxia during 1961-2004. Advances in Climate Change Research, 2008, 4(2): 73-77. (in Chinese)

- [4] 余卫东, 柳俊高, 常军等. 1957~2005 年河南省降水和温度极端事件变化[J]. 气候变化研究进展, 2008, 4(2): 78-83.
YU Weidong, LIU Jungao, CHANG Jun, et al. Changes in extreme temperature and precipitation in Henan province during 1957-2005. *Advances in Climate Change Research*, 2008, 4(2): 78-83. (in Chinese)
- [5] 翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近 50a 温度和降水极端事件变化[J]. 地理学报, 2003, 58(增刊): 1-10.
ZHAI Panmao, PAN Xiaohua. Change in extreme temperature and precipitation over northern china during the second half of the 20th century. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(Supplement): 1-10. (in Chinese)
- [6] 李树岩, 刘荣花, 师丽魁等. 基于 CI 指数的河南省近 40a 干旱特征分析[J]. 干旱气象, 2009, 27(2): 97-102.
LI Shuyan, LIU Ronghua, SHI Likui, et al. Analysis on drought characteristic of Henan in resent 40 years based on meteorological drought composite index. *Journal of Arid Meteorology*, 2009, 27(2): 97-102. (in Chinese)
- [7] PIAO, S.L., CIAIS, P., HUANG, Y., et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China. *Nature*, 2010, 467(9): 43-51.
- [8] 马柱国, 符淙斌, 任小波等. 中国北方年极端温度的变化趋势与区域增暖的联系[J]. 地理学报, 2003, 58(增刊): 11-20.
MA Zhuguo, FU Congbin, REN Xiaobo, et al. Trend of annual extreme temperature and its relationship to regional warming in northern China. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(Supplement): 11-20. (in Chinese)
- [9] 刘昌明等. 气候变化对水文水资源影响问题的探讨[J]. 科学对社会的影响, 2008, 2: 21-27.
LIU Changming, et al. Impacts of climate change on hydrology and water resources. *Impact of Science on Society*, 2008(2): 21-27. (in Chinese)
- [10] Climatic Research Unit, School of Environmental Sciences of University of East Anglia. Statistical and regional dynamical downscaling of extremes for European regions. (2005-11-01) [2007-08-10]. <http://www.cru.uea.ac.uk/projects/stardex>
- [11] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999.
WEI Fengying. Modern climatic statistical diagnosis and prediction technology. Beijing: China Meteorological Press, 1999. (in Chinese)
- [12] NORTH, G.R.T, BELL, R.C., et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal function. *Monthly Weather Review*, 1982, 110(7): 699-706.
- [13] 任国玉, 封国林, 严中伟. 中国极端气候变化观测研究回顾与展望[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(4): 337-353.
REN Guoyu, FENG Guolin and YAN Zhongwei. Progresses in observation studies of climate extremes and changes in mainland China. *Climatic and Environmental Research*, 2010, 15(4): 337-353. (in Chinese)
- [14] 陈效迷, 刘立, 尉杨平. 1961~2005 年黄河流域极端气候事件变化趋势[J]. 人民黄河, 2011, 33(5): 3-5.
CHEN Xiaoqiu, LIU Li and WEI Yangping. Variation trend of extreme climate events of the Yellow River basin in 1961-2005 period. *Yellow River*, 2011, 33(5): 3-5. (in Chinese)