

气候暖化对中国洪旱极端事件演变趋势影响研究

祁添垚^{1,2} 张强^{1,2} 孙鹏^{1,2} 肖名忠^{1,2}

(1. 中山大学 水资源与环境系 广东 广州 510275; 2. 中山大学 华南地区水循环与水安全广东省普通高校重点实验室 广东 广州 510275)

摘 要: 针对气候暖化加剧区域水循环、增加洪旱灾害风险这一科学问题, 利用 1960-2005 年全国 588 个气象台站资料, 对基于标准化降雨蒸散指数的气象洪旱时空演变特征作了深入分析, 并通过 Copula 函数与气温构建了二维联合分布函数, 揭示了气温上升对中国气象洪旱极端事件发生的可能影响。研究发现, 在不同的气温上升情景下, 不同重现期的极端气象洪旱事件有着不同的响应。希望该研究对气候暖化背景下的中国防洪抗旱减灾及流域水资源管理能作出积极贡献。

关键词: 气象洪旱; Copula 函数; 全球变暖; SPEI

中图分类号: P49

文献标志码: A

Influence of climate warming on evolution trend of extreme flood/drought events in China

QI Tianyao^{1,2}, ZHANG Qiang^{1,2}, SUN Peng^{1,2}, XIAO Mingzhong^{1,2}

(1. Department of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China;

2. Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in Southern China of Guangdong High Education Institute, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: Climate warming has a potential to aggravate regional hydrologic cycle and enhance the risk of floods and droughts. By use of the data of 588 meteorological observatories in China from 1960 to 2005, the standardized precipitation evapotranspiration index-based meteorological flood and drought spatiotemporal evolution characteristics was analyzed and through Copula function and air temperature, a two-dimensional joint distribution was established. The possible effect of temperature rise on occurrence of flood and drought extreme events in China was revealed. The results indicate that under different air temperature rise scenarios, the extreme events of meteorological droughts and floods with different return periods have different responses. It is hoped that the research may make an active contribution to flood and drought prevention and reduction and water resources management of river basins.

Key words: meteorological flood and drought; Copula function; global warming; SPEI

20 世纪以来, 全球变暖及其对区域水循环、流域水生态与水环境、人类活动等的诸多影响已引起国际社会与国内外学术界的广泛关注。气温上升导致水循环加剧这一科学论断已从观测数据及模式模拟结果中得到进一步论证^[1-5]。Held 等^[4]认为全球变暖影响下水循环加剧的一个重要影响就是干旱地区将更加干旱, 湿润地区将更加湿润。2009 年, Chou 等^[5]对热带区域异常降水情况, 利用耦合大气环流模型验证了一种降水不平衡

收稿日期: 2014-05-25; 修回日期: 2014-08-15

基金项目: 新疆维吾尔自治区科技计划项目(201331104); 国家杰出青年科学基金项目(51425903); 中山大学滨海小流域自然地理综合过程观测与实验平台(2012 年度)

作者简介: 祁添垚(1989-)男, 硕士研究生, 主要从事气象水文学研究。E-mail: qity@foxmail.com

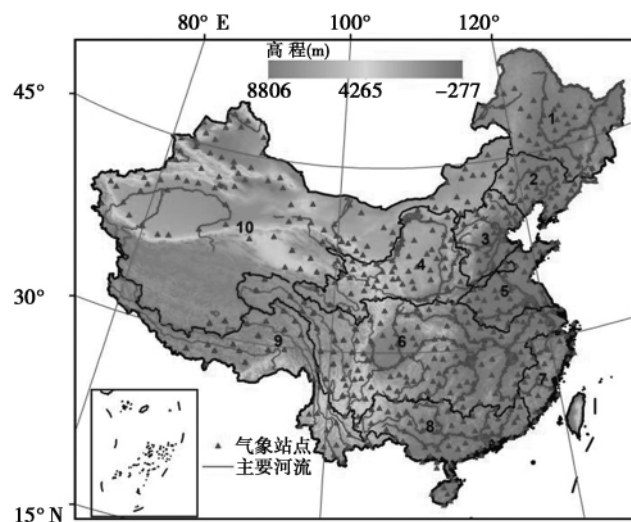
通讯作者: 张强, 男, 博士, 教授, 博士生导师。E-mail: zhangq68@mail.sysu.edu.cn

变化机制。但对于我国来讲,这一科学论断并不适用,研究结果表明^[6-7]在气候暖化影响,我国降水时空变异体现在西北干旱区呈湿润化趋势,而华南湿润区干旱风险增加,同时,降水季节变异显著,体现在冬季降水有较大幅度增加,而夏季降水则呈微弱减少趋势。降水结构的变化在我国体现在连续降水历时缩短,降水强度增大^[8]。这与欧洲地区降水过程变化是相反的^[9]。上述研究表明水循环对全球气候变化响应的区域差异性。Dai等^[10]表明全球平均降雨在1900-1998内增加了2%,而Allen等^[11]则表明全球降水无明显变化。Roderick等^[12]与Robock等^[13]对于蒸发的观点较为一致,认为气温上升会导致蒸发量增加。相反,Peterson等^[14]于1995年发现1950-1990美国与前苏联地区的蒸发皿蒸发量呈下降趋势,并由此得出水循环中陆地蒸发减少的结论。基于此,有必要针对气候暖化对中国洪旱极端事件发生影响进行深入研究。

对于洪旱极端事件的描述,Vicente-Serrano等^[15]提出基于标准化降水指数(SPI)^[16]的考虑蒸发的标准化降水蒸散指数(SPEI),其在气温显著升高情况下效果更接近帕默尔旱度指数(PDSI)^[17]。在国内,张伟东等^[18]利用综合水平衡模型对PDSI模式中的水量平衡模型进行替换,并对修正模式作了验证。He等^[19]利用SPI指数对1960-2008年中我国地区干旱变化特征进行分析,识别出不同的干旱中心并且评价了不同地域的干旱风险。但SPEI于我国的应用相当鲜见,同时,对于全球变暖背景下,中国洪旱灾害风险定量评估研究尚未开展^[20],而洪旱灾害研究多是区域性的研究^[21-22],尤其是新疆地区,相关研究较多^[23-25]。基于此,本文利用1960-2005年全国588个气象站点资料,运用Copula函数对气象洪旱发生风险进行全面分析,相关研究对于科学理解气候变化影响下,中国洪旱灾害时空演变特征及防洪抗旱减灾有着重要科学与现实意义。

1 数据

本文采用中国588个气象站1960至2005年月观测资料,包括气压、气温、水汽压、相对湿度、低云量、风速、降水量、日照时数、20 cm蒸发皿蒸发量等14种气象观测量,数据由国家气象中心提供。根据数据缺失程度,本研究所用588个气象站点数据是从732个气象站中挑选出来的,并对缺失资料进行插补^[8]。图1为具体的站点分布图。对于站点资料的空间化,本文采用克里格空间插值方法。可以见到,在青藏高原西部与新疆南部(塔克拉玛干沙漠)的站点分布稀疏,因而上述区域的计算结果存在不可避免的误差,本文对此不进行详细讨论。



棕色点代表气象测站,数字代表10个主要流域:

1. 松花江流域; 2. 辽河流域; 3. 海河流域; 4. 黄河流域; 5. 淮河流域; 6. 长江流域;
7. 东南诸河流域; 8. 珠江流域; 9. 西南诸河流域; 10. 西北诸河流域

图1 中国588个气象测站地理分布示意图

Fig.1 Locations of 588 meteorological stations considered in this study.

2 方法

2.1 标准化降水蒸散指数

Vicente – Serrano^[15]等基于降水与温度资料提出标准化降水蒸散指数 (standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI), 其核心概念是构造气象水循环去描述累积的水分缺失或剩余, 进而达到干旱评估的目的。与常用的 PDSI 以及 SPI 相比, SPEI 相比较 PDSI, 其计算更为方便, 对资料的需求更低, 适用性更广; 而相比较 SPI, SPEI 考虑了温度对干旱的影响, 对于气温变化显著升高的地区, 其结果更切合实际。

对于蒸散发的计算^[26], 本文采用联合国粮食与农业组织 (FAO) 推荐的 Penman – Monteith 公式^[27]计算, 即

$$PE = \frac{0.48 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0.34 u_2)} \quad (1)$$

式中: PE 为参考作物蒸发蒸腾量 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); R_n 为植被表面辐射量 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); G 为土壤热通量 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); Δ 为饱和水汽压 – 温度关系曲线的斜率 ($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); γ 为湿度计常数 ($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); T 为空气平均温度 ($^\circ\text{C}$); u_2 为 2 m 高处的风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); e_s 为空气饱和水汽压 (kPa); e_a 为空气实际水汽压 (kPa)。

需要注意的是, 在实际计算的彭曼蒸发时, 式 (1) 中的气象变量与实测资料难免有出入, 其之间的转换可以按照参见参考文献 [27]。

Vicente – Serrano^[15]提出 SPEI 时就其适用性与 PDSI 以及 SPI 进行对比, 发现 10 ~ 18 个月尺度的 SPEI 与 PDSI 相关性最好。为此, 本研究选用 12 个月时间尺度的 SPEI 描述洪旱极端事件。干旱可由干旱历时、干旱严重程度和干旱强度 3 个特征值来表示。取阈值为 0, 本文用干旱严重程度来反映干旱综合情况; 对气象湿润事件, 其严重程度的定义类同气象干旱, 即在游程中累积的 SPEI 值与临界值的缺乏 (剩余) 值为干旱 (湿润) 严重程度。并且于下文提及的干旱 (湿润) 事件的重现期仅根据干旱 (湿润) 的严重程度计算, 主要考虑到严重程度兼顾历时与强度。

2.2 Copula 函数

Copula 是定义在^[10, 11]区间上均匀分布的联合分布函数。设 H 为一 n – 维分布函数, 各变量边缘分布分别为 F_1, F_2, \dots, F_n 。则存在一个 n – Copula 函数 C , 使得任意 $x \in \mathbb{R}^n$

$$H(x_1, x_2, \dots, x_n) = C(F_1(x_1), F_2(x_2), \dots, F_n(x_n)) \quad (2)$$

如果 F_1, F_2, \dots, F_n 是连续的, 则 C 是唯一的, 相反地, 如果 C 是一个 n 维 Copula, F_1, F_2, \dots, F_n 为分布函数^[28]。Copula 函数独立于随机变量的边缘分布, 反映随机变量的相关性结构, 从而可将联合分布分成两个独立部分来处理, 即随机变量的边缘分布于相关性结构。而在构造 Copula 函数时, 不要求随机变量具有相同的边缘分布, 任意边缘分布均适用于构造联合分布。

Copula 函数总体上可以划分为 3 类: 椭圆型、Archimedean 型和二次型, 其中椭圆型包括 Meta – elliptical Copula, Meta – Gaussian Copula, Student t Copula 和非对称 Kotz Copula 等。其中含一个参数的 Archimedean Copula 函数应用最为广泛。因而选用 Clayton Copula, Ali – Mikhail – Haq Copula (AMH), Gumbel – Hougaard – Copula 和 Frank Copula 等 4 种 Archimedean Copula 函数, 外加常用的 Farlie – Gumbel – Morgenstern Copula (FGM) 函数共 5 类。

边缘分布参数的估计采用极大似然估法, 函数类型的选择采用 AIC 信息准则法从常用的对数正态分布、指数分布、Log – logist 分布、伽马分布、广义极值分以及广义帕累托分布共 6 种分布中挑选。类似地, Copula 函数参数的估计采用极大似然估计, 而函数类型的选择同样采用 AIC 信息准则法。AIC 信息准则包括两个部分: Copula 函数拟合的偏差和 Copula 函数的参数个数导致的不稳定性, 当 AIC 越小时, Copula 函数拟合的越好^[29]。AIC 信息准则适用于参数个数不同的 Copula 函数之间的相互比较和选择。当然, 最终 Copula 函数的选择还需要通过置信水平为 95% 拟合优度检验^[30]。受限于篇幅, 文本略去检验结果的展示。

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_{ei} - e_i)^2; \quad (3)$$

$$\text{AIC} = n \ln(\text{MSE}) = 2m. \quad (4)$$

式中: p_{ei} 、 p_i 分别为经验频率和理论频率, S_n 为数据长度, m 为模型参数个数。

为研究温度上升对区域洪旱极端事件发生的影响, 利用 Copula 函数建立年均气温与年总干旱严重程度、湿润严重程度之间的二维联合概率分布函数。假定平均气温上升了 Δt °C, 重现期为 n 年的干旱(湿润)严重程度发生改变的概率可以用条件概率差值 ΔP 去定义, 即

$$\Delta P = P(S > s_n | T > \bar{t} + \Delta t) - P(S > s_n | T > \bar{t}). \quad (5)$$

式中: $P(\cdot | \cdot)$ 为条件概率; S_n 为 n 年一遇的严重程度量值, 可以通过拟合严重程度 S 的实测序列获得; \bar{t} 为平均气温, 本文采用 0.5 分位数替代, 以减少实测资料中奇异值导致的计算偏差。而在提取每年干旱(湿润)严重程度与平均气温序列后, 利用 Copula 函数按照上述步骤便可简便地得到严重程度 S 与温度 T 的联合分布 $F(S, T)$, 进而计算公式 4 中的 ΔP 。

因为气象干旱(湿润)极端事件并不是每年都发生, 因而需要将 ΔP 进行修正, 即

$$\Delta P' = \Delta P \frac{N_0}{N}. \quad (6)$$

式中: N_0 为气象干旱(湿润)极端事件没有发生的年数, 亦即干旱(湿润)严重程度为 0 的历时(a); N 为资料总长度(a), 此处为 46(a)。

3 结果与讨论

3.1 气象干旱发生概率变化

图 2 为温度上升 0.2、0.4、0.6、0.8 °C 时 2a 一遇干旱事件发生概率变化的空间分布情况。由图 2 可以看出, 在不同温度上升情景下, 干旱发生风险空间分布模态基本相同, 只是在变化幅度及区域范围有所差异。由图 2 可以看出, 除西北部分区域外(图中绿色部分), 中国绝大部分地区干旱发生风险呈上升态势。

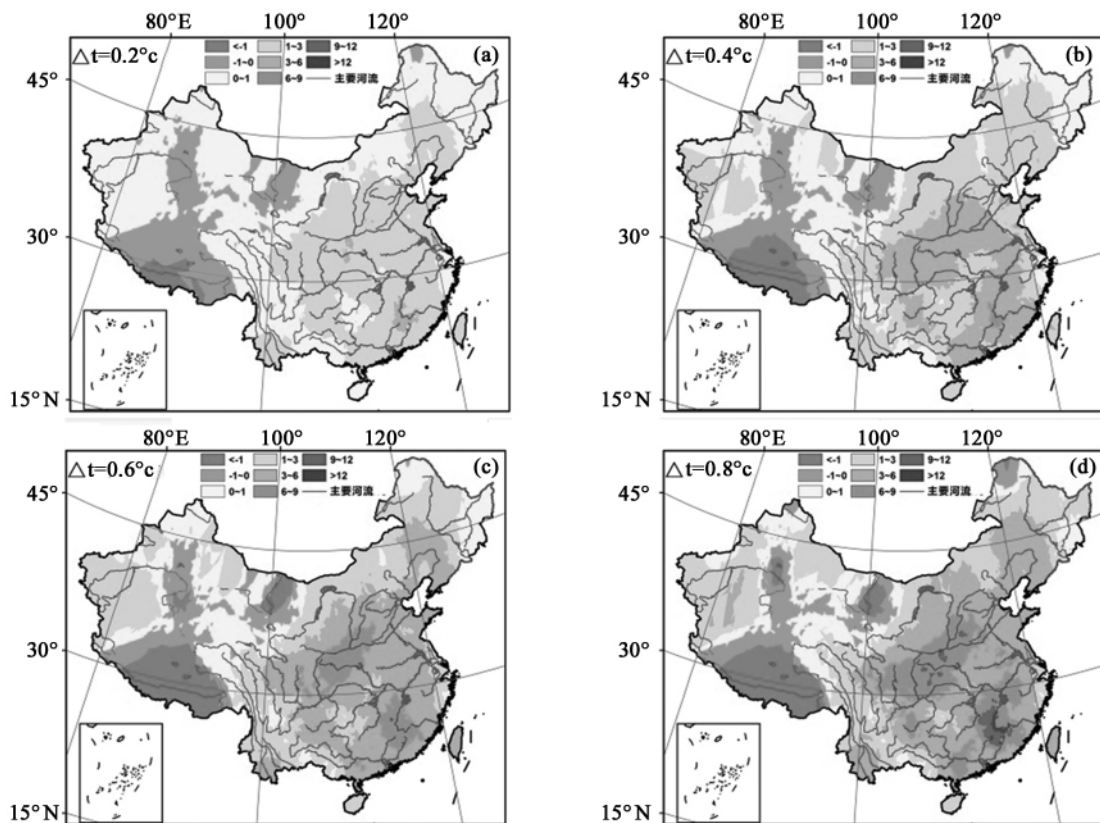


图 2 平均温度上升 Δt °C 时, 严重程度为 2a 一遇的干旱事件发生概率变化(%) 的空间分布图

Fig. 2 Spatial patterns of changes of occurrence probability(%) of drought regimes with return periods of 2 years for the temperature increase scenarios of Δt °C. $\Delta t = 0.2, 0.4, 0.6$, and 0.8

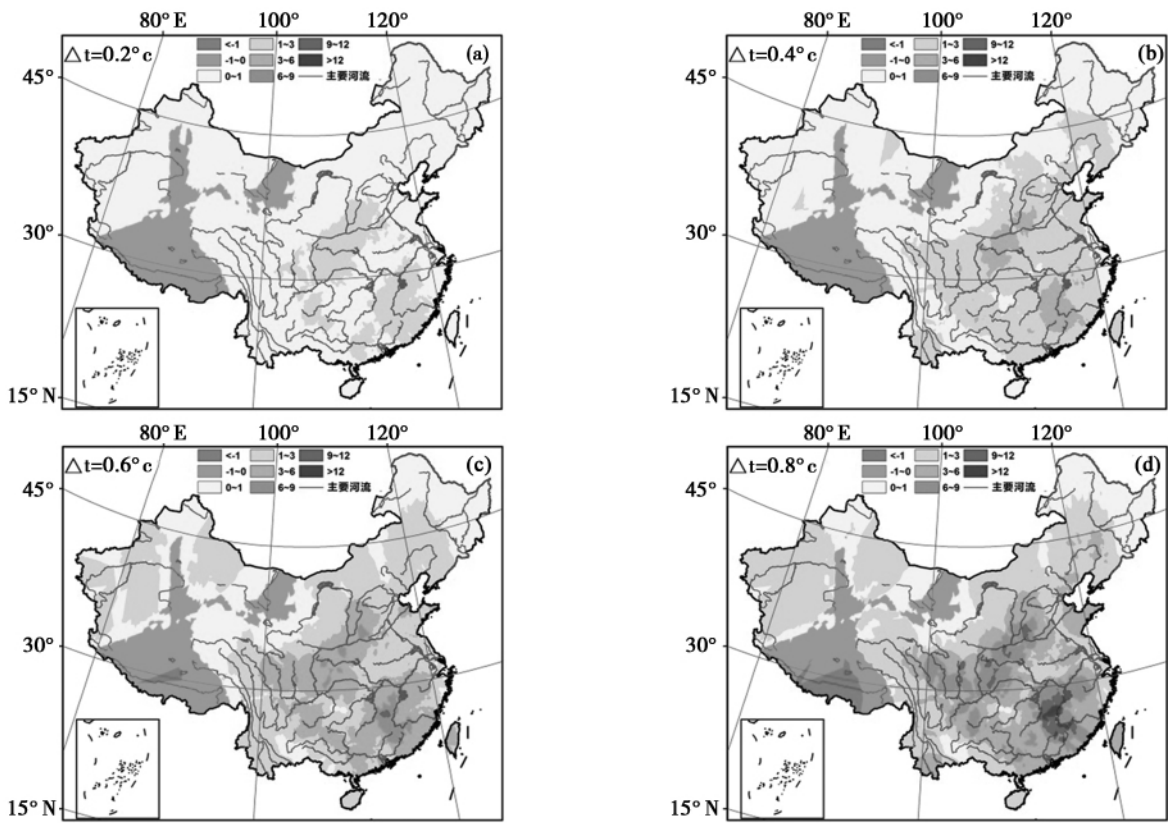


图 3 平均温度上升 $\Delta t^\circ \text{C}$ 时, 严重程度为 10a 一遇的干旱事件发生概率变化(%) 的空间分布图

Fig. 3 Spatial patterns of changes of occurrence probability(%) of drought regimes with return periods of 10 years for the temperature increase scenarios of $\Delta t^\circ \text{C}$. $\Delta t = 0.2, 0.4, 0.6$, and 0.8

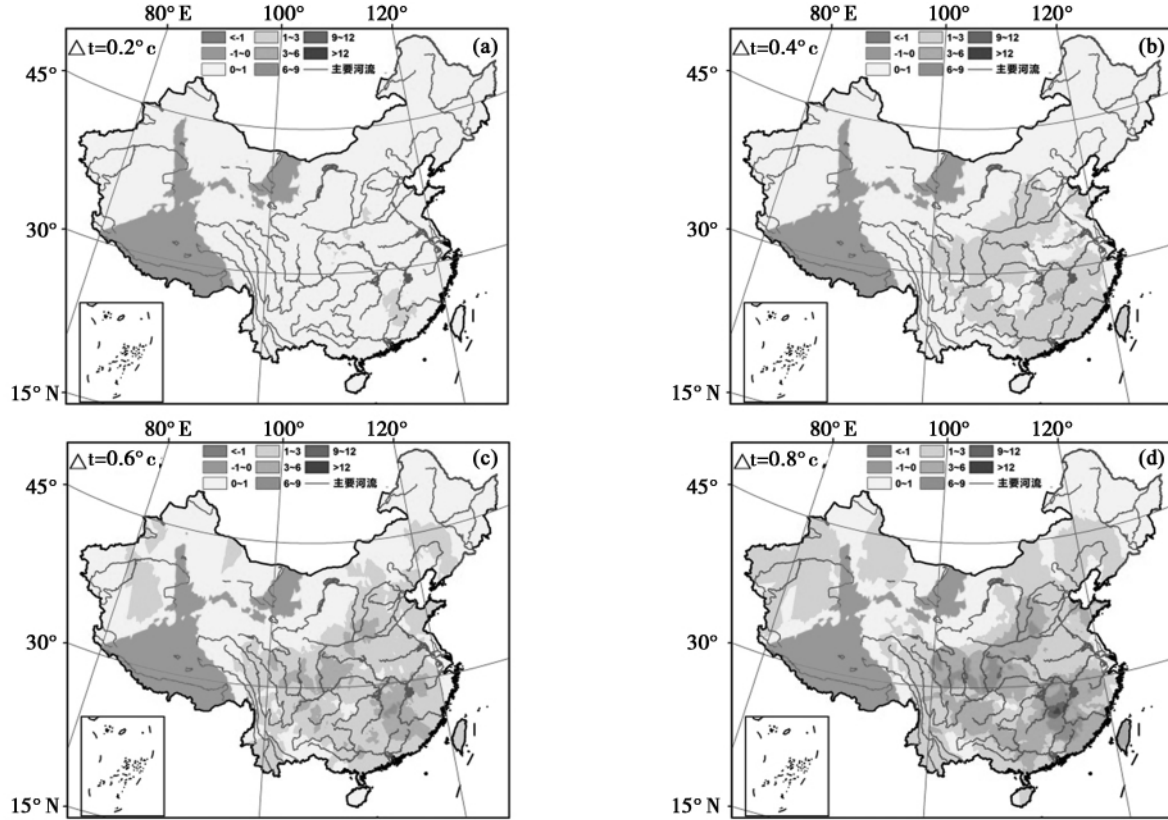


图 4 平均温度上升 $\Delta t^\circ \text{C}$ 时, 严重程度为 20a 一遇的干旱事件发生概率变化(%) 的空间分布图

Fig. 4 Spatial patterns of changes of occurrence probability(%) of drought regimes with return periods of 20 years for the temperature increase scenarios of $\Delta t^\circ \text{C}$. $\Delta t = 0.2, 0.4, 0.6$, and 0.8

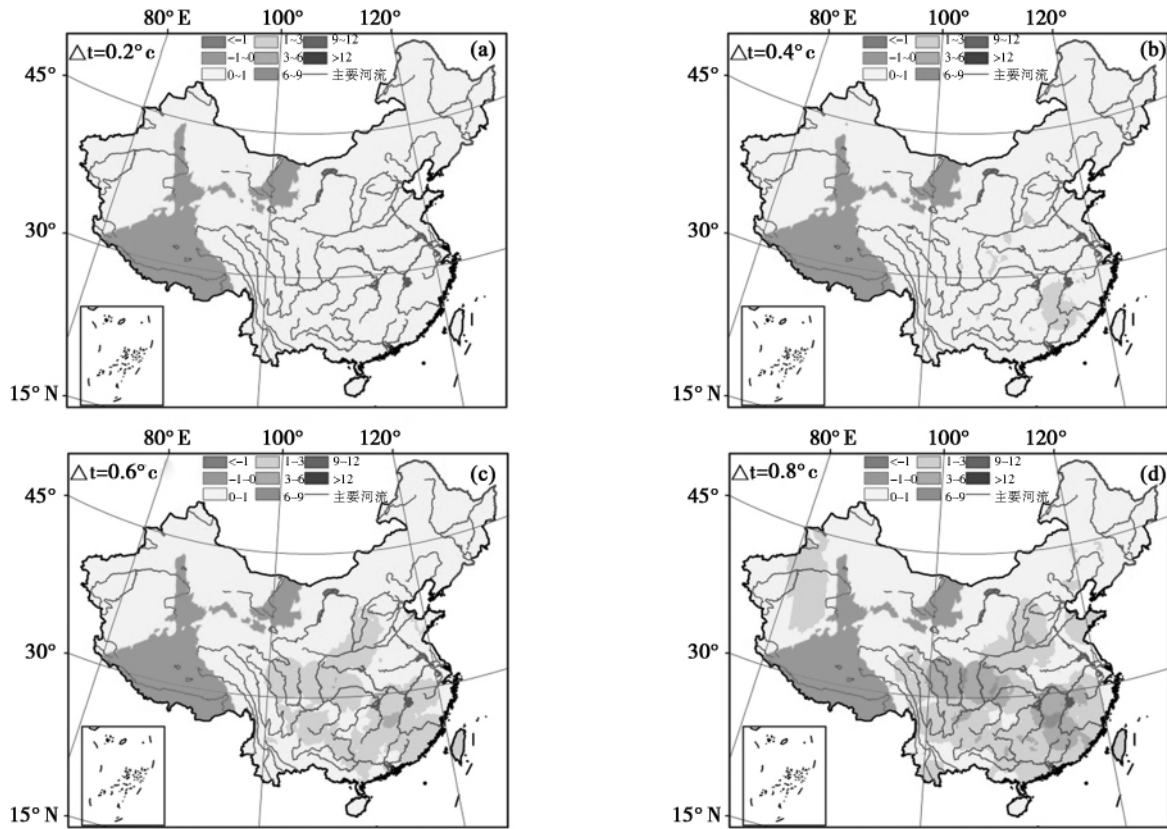


图5 平均温度上升 $\Delta t^{\circ}\text{C}$ 时,严重程度为50a一遇的干旱事件发生概率变化(%)的空间分布图
Fig.5 Spatial patterns of changes of occurrence probability(%) of drought regimes with return periods of 50 years for the temperature increase scenarios of $\Delta t^{\circ}\text{C}$. $\Delta t = 0.2, 0.4, 0.6$, and 0.8

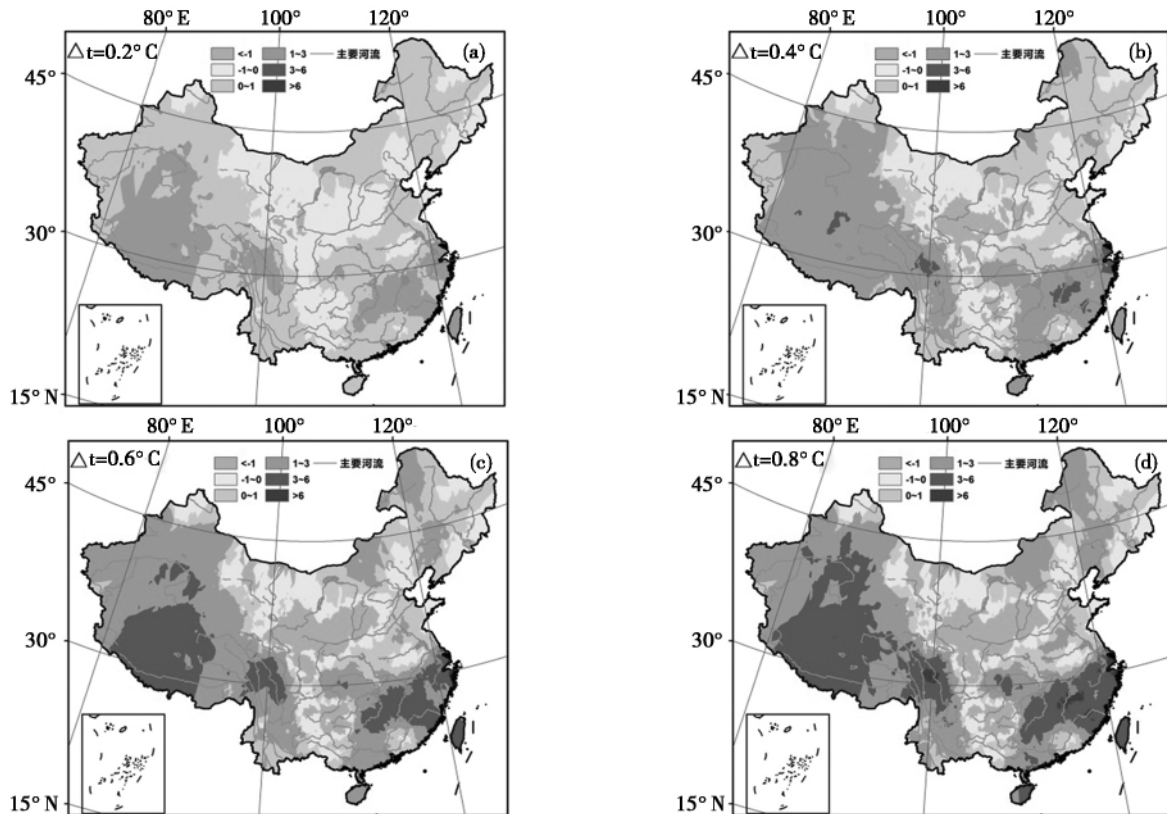


图6 平均温度上升 $\Delta t^{\circ}\text{C}$ 时,严重程度为2a一遇的湿润事件发生概率变化(%)的空间分布图
Fig.6 Spatial patterns of changes of occurrence probability(%) of wetness regimes with return periods of 2 years for the temperature increase scenarios of $\Delta t^{\circ}\text{C}$. $\Delta t = 0.2, 0.4, 0.6$, and 0.8

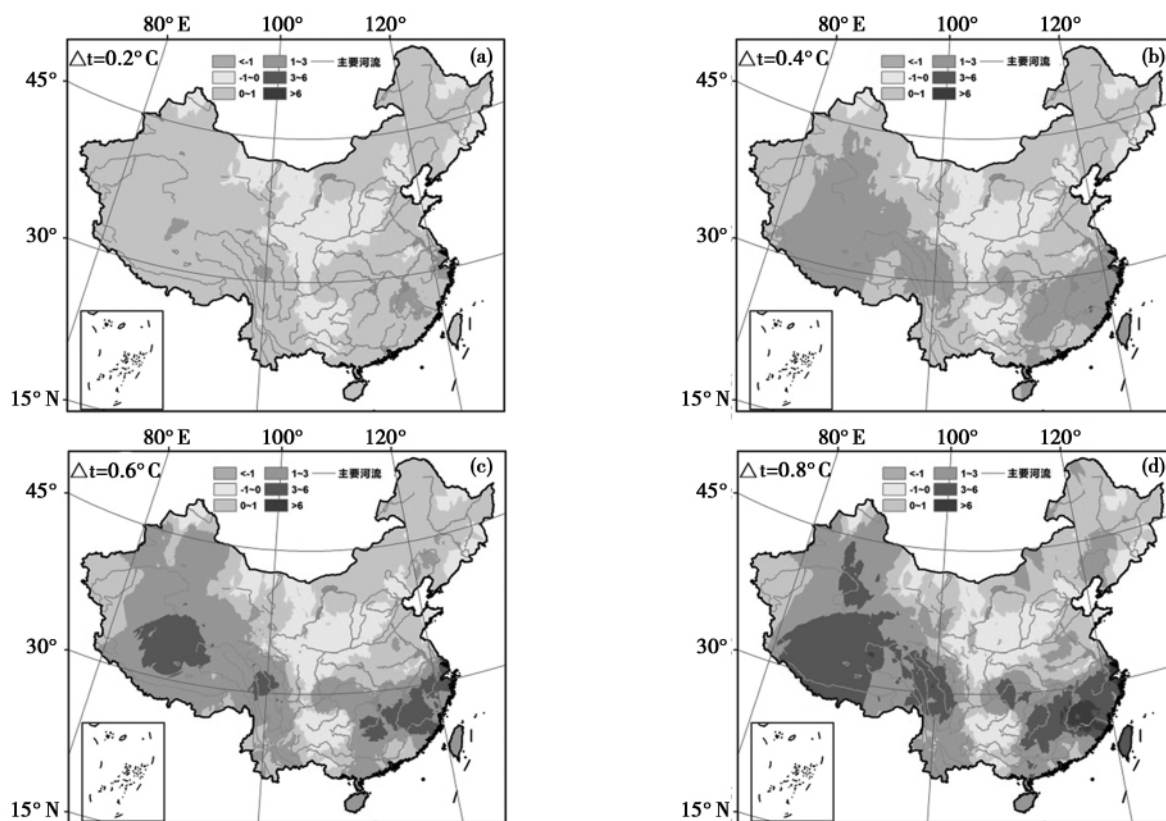


图7 平均温度上升 $\Delta t^{\circ}\text{C}$ 时,严重程度为10a一遇的湿润事件发生概率变化(%)的空间分布图

Fig. 7 Spatial patterns of changes of occurrence probability(%) of wetness regimes with return periods of 10 years for the temperature increase scenarios of $\Delta t^{\circ}\text{C}$. $\Delta t = 0.2, 0.4, 0.6$, and 0.8

其中黄河中游、长江中游及珠江流域下游,干旱发生概率显著上升,当温度上升 0.8°C 时,长江流域中游的鄱阳湖流域一带平均干旱发生概率增加高达 $9\% \sim 12\%$ (图2(d)).而西南诸河流域西北部干旱发生概率下降最为显著。另外,东北及西南地区平均干旱风险普遍上升。在图2(a)中,干旱发生概率变化幅度不大,多属 $-1\% \sim 1\%$ 范围。图2(b)中干旱发生概率变化幅度增加,在空间分布上并没有较大变化。这一点从图2(c)与2(d)中也可以看出。

图3为气温影响下,10a一遇干旱事件发生风险变化空间分布图。由图3看出,10(a)一遇干旱事件发生风险空间分布情况与2a一遇干旱事件概率变化空间分布类似(图2)除西南诸河流域西北部、西北诸河流域的中部及黑河周边外,其余地区极端干旱事件发生概率上升。受气温上升影响,极端干旱事件发

生概率上升区域主要为长江中游、黄河中游及珠江流域下游。随着气温上升幅度加大,极端干旱事件发生概率上升幅度的区域差异性增大,当 $\Delta t = 0.8^{\circ}\text{C}$ 时,洞庭湖与鄱阳湖一带发生10a一遇干旱的概率变化将大于 12% ,显著高于周边地区。干旱发生概率下降中心主要为西南诸河流域西北部。

在此基础上,对气温上升影响下,重现期为20、50a的极端干旱事件发生概率的变化做了详细分析(图4、图5)。对比图2-图5可发现,受气温上升影响,不同重现期极端干旱事件发生概率变化的空间演变模态相近,随温度上升,不同重现期极端干旱事件发生概率变化的区域差异愈加显著。这一点充分表明,气温上升将增加不同重现期极端干旱事件发生概率或风险,而干旱发生风险增加的区域主要在黄河流域、长江流域中游及长江流域下游地区。另外,对图2-图5的对比分析发现,气温上升似对重现期较长的极端干旱事件影响较小。事实上,重现期较长的干旱事件,其灾害程度大,在增加相同风险的情况下,重现期长的干旱事件其影响远较重现期短的干旱事件为大。例如,由图2D看出,极端干旱事件发生概率上升 $9\% \sim 12\%$,表明温度上升 0.8°C 对平均状态下干旱事件的影响只有 $18\% \sim 24\%$,因为理论上2a一遇干旱事件发生概率为 50% ;而图3(d)中极端干旱事件上升 $9\% \sim 12\%$ 却意味着温度上升 0.8°C 对10a一遇的干旱事件的影响高达 $90\% \sim 120\%$ 。由此,不难得出这样的科学论断,干旱严重程度的重现期越大,温度上升对其发生概率的

影响就越大。

3.2 气象湿润发生概率变化

湿润事件的发生可显著增加洪水事件的发生概率,因此,本研究将湿润事件也做全面分析。图6(a)至图6(d)显示当温度上升0.2、0.4、0.6及0.8℃时,2a一遇极端湿润事件发生概率变化的空间分布图。由图6可看出,极端湿润事件在西北诸河流域中的黑河和疏勒河周边、整个黄河流域、长江流域上游的岷江与乌江附近、珠江流域上游等区域,其发生概率呈下降趋势;在中国西北部、长江流域上游及中下游、东南诸河流域,极端湿润事件发生概率上升。随着气温上升,极端湿润事件发生概率变化的区域差异性增加,主要表现为发生概率增加幅度变大,极端湿润区发生概率增加的区域范围扩大。当气温上升0.8℃时,即 $\Delta t = 0.8^\circ\text{C}$ 时,长江流域上游雅砻江与金沙江、长江中下游鄱阳湖及长江下游附近,极端湿润事件发生概率将上升6%。

对于重现期为10、20、50a的极端湿润事件来讲(限于篇幅及三者空间分布的相似性,此处只显示10a一遇极端湿润发生概率变化的分布情况,如图7),与2a一遇极端湿润事件发生概率变化的空间分布相似,发生概率上升与下降的空间分布模态相似。受气温上升响应,极端湿润事件发生概率变化的区域差异性增加,空间分布范围增大,另外,通过分析同样发现:气温上升时,高强度的极端湿润事件发生概率的增加要远大于强度较低的弱极端湿润事件发生概率的上升。

4 极端干湿事件对气温上升区域响应差异性

诸多研究表明,气温上升将导致区域水循环加剧,同时,观测数据及模型模拟结果均表明,水汽循环对全球气候变化的响应具有显著区域差异性^[5-9]。基于此,本文基于气温上升对极端气象干旱与湿润事件发生概率影响的区域性差异的研究结果,总结并划分出中国区域内水汽循环及极端气象干旱与湿润事件对气温上升响应的区域差异性空间分布。根据研究需要,定义4种趋势:

(1)极端化趋势:受气温影响,区域极端干旱与湿润事件发生概率均上升的区域,定义为分域1;

(2)干旱趋势:受气温影响,区域极端干旱事件发生概率上升,而极端湿润事件发生概率下降的区域,定义为分区2;

(3)湿润化趋势:受气温影响,区域内极端干旱事件发生概率下降,而极端湿润事件发生概率上升的区域,定义为分区3;

(4)稳定化趋势:与极端化区域相反,该区域中,受气温上升影响,极端干旱与湿润事件发生概率均下降的区域,定义为分区4。

根据气温上升对极端干旱与湿润事件发生概率的影响可知,无论极端干旱还是极端湿润事件,在气温上升影响下,某一重现期的极端干湿事件发生概率变化的空间模态并没有较大变化,变化只是发生概率增加的幅度。基于此,本文选择气温上升0.4℃时,重现期为10a一遇的极端干旱和极端湿润事件发生概率为研究对象,划分上述四个区域的空间分布情况,如图8所示。

由图8可以看出,中国大部分地区属分区1,进一步说明,受气温上升的影响,中国区域水循环将出现显著加剧的现象,进而导致洪旱事件极端化趋势。黄河流域大部分地区、长江上游的岷江及乌江附近、海河流域东西两端、西北及东北部分地区,属分区2,表明上述区域干旱化趋势明显;在西南诸河流域西北部、西北诸河流域部分地区,湿润化趋势明显,属分区3。这一分区也充分说明,受气温上升影响,干旱地区更干旱,湿润地区更湿润的科学论断,并展示出于在气温上升影响下,中国干湿事件时空变化格局,显示水汽循环对气候变化响应的区域差异性。分区4的范围较小,仅限于西北诸河流域中黑河附近区域(或许由于计算误差引起)。表明受气温上升影响,中国区域水循环加剧,使中国大部分地区气象洪旱极端化趋势。

如章节4所述,受气温上升的影响,灾害强度大的极端洪旱事件发生概率的增加,将远大于灾害强度小的极端洪旱事件发生概率的增加,而研究表明^[31],对于影响较小的洪旱灾害事件来讲,其时空变化规律性并不很强,但当洪旱灾害的强度与历时达到某一临界域时(均值以上),洪旱灾害即呈链式、集聚式或者群聚式发生。由此,气温上升将显著增加灾害强度大、历时的洪旱灾害发生风险,也将增加洪旱灾害从时间与空间上频繁发生或者群聚式发生的风险。因此,在气温上升影响下,中国应对防洪抗旱的压力是巨大的。

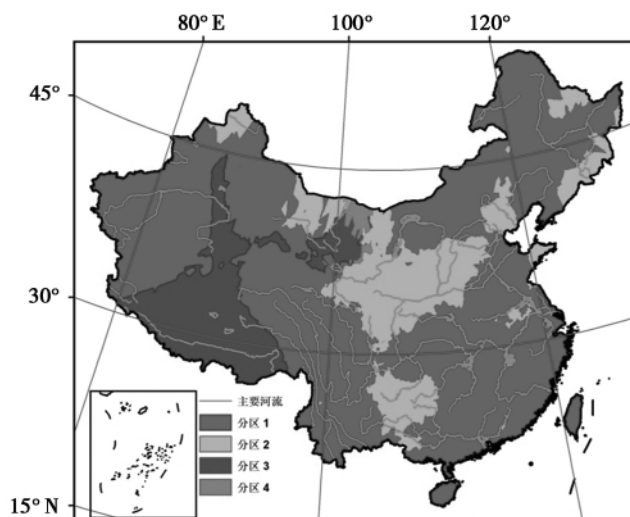


图8 气温上升影响下,中国气象洪旱发生风险分区示意图

Fig. 8 Regionalization of China being dominated by different drought risks under the influences of increasing temperature

5 结论

选择12个月尺度的SPEI,运用了Copula函数构建气温与干旱(湿润)严重程度的二维联合分布函数,系统研究了中国极端气象洪旱事件发生概率对气温上升响应影响空间格局与区域差异性,得到如下主要结论及简短讨论:

(1)受气温上升影响,不同重现期极端气象干湿事件除西北部分区域外,中国绝大部分地区干旱发生风险呈上升态势。其中黄河中游、长江中游及珠江流域下游,干旱发生概率显著上升,当温度上升 0.8°C 时,长江流域中游的鄱阳湖流域一带平均干旱发生概率增加高达 $9\% \sim 12\%$ 。而西南诸河流域上游干旱发生概率下降最为显著。

(2)对于极端湿润事件来讲,受气温上升影响,极端湿润事件在西北诸河流域中的黑河和疏勒河周边、整个黄河流域、长江流域上游的岷江与乌江附近、珠江流域上游等区域,其发生概率呈下降趋势;在中国西北部、长江流域上游及中下游、东南诸河流域,极端湿润事件发生概率上升。

(3)随着气温上升,不同重现期极端干湿事件发生概率显著增加,气温上升的幅度增大,将加剧极端干湿事件发生概率变化的空间差异性。另外,研究结果还表明,气温上升对高强度的极端干湿事件发生概率影响要大于强度低的极端干湿事件。

(4)气温上升将进一步加剧中国区域内极端干湿事件发生的极端化,增加洪旱灾害风险,且易增加洪旱急转现象。另外,需要注意的是,本文研究主要针对气温对洪旱灾害概率的影响,而具体洪旱事件的变化及其影响,还需考虑区域人类活动对其的适应性及应对性,如节水灌溉、水资源管理与水资源高效配置等。但本研究成果对于理解洪旱灾害风险对气候暖化的响应及其区域响应的区异性、对于增强防洪抗旱非工程措施、应对气候变化、加强区域水资源管理及农业生产规划具有重要科学与现实意义。

参考文献:

- [1] DelGenio A D, Lalis A A, Ruedy R A. Simulations of the effect of a warmer climate on atmospheric humidity[J]. Nature, 1991, 351: 382 - 385.
- [2] Loaiciga H A, Valdes J B, Vogel R, et al. Global warming and the hydrologic cycle[J]. Journal of Hydrology, 1996, 174: 83 - 127.
- [3] Trenberth K E. Conceptual framework for changes of extremes of the hydrological cycle with climate change[J]. Climatic Change, 1999, 42: 327 - 339.
- [4] Held I M, Soden B J. Robust responses of the hydrologic cycle to global warming[J]. Journal of Climate, 2006, 19: 5686 - 5699.
- [5] Chou C, Neelin J D, Chen C A, et al. Evaluating the "rich - get - richer" mechanism in tropical precipitation change under global warming[J]. Journal of Climate, 2009, 22: 1982 - 2005.

- [6] Zhang Qiang, Xu Chong - Yu, Chen Xiaohong, et al. Statistical behaviors of precipitation regimes in China and their links with atmospheric circulation 1960 - 2005 [J]. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(11): 1665 - 1678.
- [7] Zhang Qiang, Xu Chong - Yu, Chen Xiaohong, et al. Observed changes of drought/wetness episodes in the Pearl River basin, China, using the Standardized Precipitation Index and Aridity Index [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2009, 98(1/2): 89 - 99.
- [8] Zhang Qiang, Singh V P, Li Jianfeng, et al. Analysis of the periods of maximum consecutive wet days in China [J]. *Journal of Geophysical Research*, 2011, 116(23): D23106.
- [9] Zolina O, Simmer C, Gulev S K, et al. Changing structure of European precipitation: Longer wet periods leading to more abundant rainfalls [J]. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(6): L06704.
- [10] Dai A, Fung I Y, Del Genio A D. Surface observed global land precipitation variations during 1900 - 88 [J]. *Journal of Climate*, 1997, 10: 2943 - 2962.
- [11] Allen M R, Ingram W J. Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle [J]. *Nature*, 2002, 419: 224 - 232.
- [12] Roderick M L, Farquhar G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years [J]. *Science*, 2002, 298(5597): 1410 - 1411.
- [13] Robock A, Konstantin V Y, Srinivasan G. The global soil moisture data bank [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2000, 81(6): 1281 - 1299.
- [14] Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. Evaporation losing its strength [J]. *Nature*, 1995, 337: 687 - 688.
- [15] Vicente - Serrano S M, Beguería S, López - Moreno J I. A multi - scalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation on evapotranspiration index [J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696 - 1718.
- [16] McKee T B, Doesken N J, Kliest J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Anaheim, CA. In *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. Boston, MA: American Meteorological Society, 1993: 179 - 184.
- [17] Palmer W C. Meteorological Drought [R/OL]. Washington, D. C: US Weather Bureau, 1965 [2014 - 7 - 25]. http://103.2.211.229/video-player/palmer.pdf?ich_u_r_i=e422e047b13e5b94d9edb6bf419bdbe8&ich_s_t_a_r_t=0&ich_e_n_d=0&ich_k_e_y=1345088922750263072446&ich_t_y_p_e=1&ich_d_i_s_k_i_d=4&ich_u_n_i_t=1.
- [18] 张伟东, 石霖. 区域干旱帕默尔旱度指标的修正 [J]. *地理科学*, 2011, 31(2): 153 - 158.
ZHANG Weidong, SHI Lin. Modification of Palmer Drought Severity Index of Regional Drought [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2011, 31(2): 153 - 158. (in Chinese)
- [19] HE Bin, LU Aifeng, WU Jianjun, et al. Drought hazard assessment and spatial characteristics analysis in China [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2011, 21(2): 235 - 249.
- [21] 肖名忠, 张强, 陈永勤, 等. 基于三变量 Copula 函数的东江流域水文干旱频率分析 [J]. *自然灾害学报*, 2013, 22(2): 99 - 108
XIAO Mingzhong, ZHANG Qiang, CHEN Yongqin, et al. Hydrological drought frequency analysis of East River basin based on trivariate Copulas function [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2013, 22(2): 99 - 108. (in Chinese)
- [22] 陈永勤, 孙鹏, 张强, 等. 基于 Copula 的鄱阳湖流域水文干旱频率分析 [J]. *自然灾害学报*, 2013, 22(1): 75 - 84.
CHEN Yongqin, SUN Peng, ZHANG Qiang, et al. Copula - based analysis of hydrological drought frequency in Poyang Lake Basin [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2013, 22(1): 75 - 84. (in Chinese)
- [23] 孙鹏, 张强, 陈晓宏, 等. 塔里木河流域枯水径流演变特征、成因与影响研究 [J]. *自然灾害学报*, 2013, 22(3): 135 - 143.
SUN Peng, ZHANG Qiang, CHEN Xiaohong, et al. Study on evolution characters, cause and influence of low water flow in Tarim River Basin [J]. *Journal of Natural Disasters*, 2013, 22(3): 135 - 143. (in Chinese)
- [20] 李坤刚. 我国洪旱灾害风险管理 [J]. *中国水利*, 2003(6B): 47 - 48.
LI Kungang. Management of risk of flood and drought in China [J]. *China Water Resources*, 2003, 6B: 47 - 48. (in Chinese)
- [24] 姜逢清, 杨跃辉. 新疆洪旱灾害与大尺度气候强迫因子的联系 [J]. *干旱区地理*, 2004, 27(2): 148 - 153.
JIANG Fengqing, YANG Yuehui. Potential Links of Flood and Drought Disasters in Xinjiang to some Larger - scale Climatic Driving Forces [J]. *Arid Land Geography*, 2004, 27(2): 148 - 153. (in Chinese)
- [25] 姜逢清, 胡如骥. 近 50 年来新疆气候变化与洪、旱灾害扩大化 [J]. *中国沙漠*, 2004, 24(1): 35 - 40.
JIANG Fengqing, HU Ruji. Climate Change and Flood & Drought Disasters in Xinjiang during Recent 50 Years [J]. *Journal of Desert Research*, 2004, 24(1): 35 - 40. (in Chinese)
- [26] Sheffield J, Wood E F, Roderick M L. Little change in global drought over the past 60 years [J]. *Nature*, 2012, 491: 435 - 440.
- [27] Allen R G, Pereira L S, Raes D, et al. Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements [M]. Rome: FAO, 1998.
- [28] Nelson R B. An introduction to Copulas [M]. New York: Springer, 1999.
- [29] Joe H. Multivariate Models and Dependence Concepts [M]. London: Chapman & Hall, 1997.
- [30] Genest C, Rémillard B, and Beaudoin D. Goodness - of - fit tests for copulas: A review and a power study [J]. *Insurance: Mathematics and Economics*, 2009, 44: 199 - 214.
- [31] Zhang Qiang, Zhou Yu, Singh V P, et al. Scaling and clustering effects of extreme precipitation distributions [J]. *Journal of Hydrology*, 2012, 454 - 455: 187 - 194.