

中国水论坛No.14

China Water Forum
No.14

面向未来的水安全 与可持续发展

章光新 张蕾 李峰平 李红艳 鲍新华 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

中国水论坛 No.14

面向未来的水安全 与可持续发展

章光新 张蕾 李峰平 李红艳 鲍新华 主编



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

· 北京 ·

内 容 提 要

本书为第十四届中国水论坛论文集，全书共分 4 个部分，即水文过程与响应、水资源管理与调度、水生态与水环境和极端气候与应对。全书汇集 47 篇论文，百余位水资源等领域专家学者就“面向未来的水安全与可持续发展”进行了探讨和成果展示，为水科学前沿与我国水安全问题的解决提供了具有重要参考和借鉴价值的理论方法、思路措施和对策建议，以期为我国经济社会可持续发展和生态文明建设的水安全保障提供科技支撑，具有一定的学术价值。

本书适合从事水文与水资源、气候变化与水资源、水生态与水环境、自然地理、水利工程等方面教学与科研的专家、学者及工程技术人员参考。

图书在版编目（C I P）数据

面向未来的水安全与可持续发展 / 章光新等主编
． — 北京：中国水利水电出版社，2017. 3
（中国水论坛；No. 14）
ISBN 978-7-5170-5635-5
I．①面… II．①章… III．①水资源管理—安全管理—中国—文集②水资源管理—可持续性发展—中国—文集
IV．①TV213-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 173003 号

书 名	中国水论坛 No.14 面向未来的水安全与可持续发展 MIANXIANG WEILAI DE SHUI ANQUAN YU KECHIXU FAZHAN
作 者	章光新 张蕾 李峰平 李红艳 鲍新华 主编
出版发行	中国水利水电出版社 （北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038） 网址：www.waterpub.com.cn E-mail：sales@waterpub.com.cn
经 售	电话：（010）68367658（营销中心） 北京科水图书销售中心（零售） 电话：（010）88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京三原色工作室
印 刷	北京中献拓方科技发展有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 19.75 印张 640 千字
版 次	2017 年 3 月第 1 版 2017 年 3 月第 1 次印刷
定 价	98.00 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换
版权所有·侵权必究

第十四届中国水论坛论文集
《面向未来的水安全与可持续发展》
编委会

顾问：刘昌明 林学钰 夏 军 胥毅军 左其亭

主编：章光新 张 蕾 李峰平 李红艳 鲍新华

委员：（按姓氏拼音顺序）

范伟 冯波 李鸿雁 刘玉玉 宋晓 吴燕锋

第十四届中国水论坛及本书的出版得到了水利部公益性行业科研专项（201401014）“吉林西部湿地生态恢复的水系连通技术研究”、中国科学院东北地理与农业生态研究所特色所项目（IGA-135-05）和国家自然科学基金（41371108）以及“中国科协-学会能力提升专项优秀科技社团奖项目”的资助。

前 言

我国水资源自然禀赋条件先天不足，水资源时空分布极不均匀。随着经济社会快速发展，人类活动的加剧及未来全球气候变化的影响，将进一步改变水循环过程，引起水资源总量变化及其在时空格局上的重新分配，增加洪涝、干旱等极端灾害发生的频率和强度，加剧我国水资源供需矛盾。因此，未来我国面临的水旱灾害频发、水资源短缺、水污染严重、水生态损害等新老水问题将更加突出、相互交织，对保障水安全提出了严峻挑战，已经严重威胁到国家粮食安全和生态安全，制约着经济社会可持续发展和生态文明建设。

在此背景下，2016年8月25—27日，由中国科学院东北地理与农业生态研究所、吉林大学、吉林省科学技术协会、长春市科学技术协会和中国科学院湿地生态与环境重点实验室等单位承办，水利部松辽水利委员会、吉林省水利厅、东北师范大学、吉林省水利水电勘测设计研究院、吉林省气象科学研究所、长春工程学院和华北水利水电大学学报编辑部、中国水利水电出版社等单位协办的第十四届中国水论坛在长春市召开。来自全国高校、科研机构及相关企事业单位的近700名专家、学者参加了本次水科学领域的盛会，其中包括来自美国路易斯安那州立大学、美国俄克拉荷马大学、中国台湾大学、中国香港中文大学、中国香港浸会大学的专家。

本届水论坛以“面向未来的水安全与可持续发展”为主题，围绕变化环境下水文水资源响应、水资源调度与管理、生态水文、地下水科学与管理、水文预报与水文模型、水文过程、极端气候与水文循环、农业水资源、河湖连通与防洪减灾、遥感水文与国际河流、水污染与水环境等11个议题进行交流与讨论。刘昌明院士、林学钰院士、夏军院士、王浩院士、美国路易斯安那州立大学胥毅军教授、中国香港中文大学陈永勤教授、中国台湾大学张仓荣教授、国家“千

人计划”的清华大学洪阳教授和北京师范大学段青云教授等 13 位国内外知名学者作了大会特邀报告，203 位专家学者在 6 个分会场报告了各自的最新研究成果，深入研讨了当前水科学领域研究的学科前沿以及我国面临的诸多水安全问题及解决对策建议，为我国经济社会可持续发展和生态文明建设的水安全保障提供科技支撑。

本次会议共收到参会论文和摘要 300 多篇，其中通过会议报告与专家组评议，评选出 10 篇优秀青年论文，由中国自然资源学会颁发证书，中国水利水电出版社颁发奖金，并筛选出 47 篇优秀论文由中国水利水电出版社结集出版。在此感谢中国水利水电出版社的编辑为本次论文集出版付出的辛勤工作！

由于编者水平有限，论文集难免存在不足甚至错误之处，敬请广大专家、读者不吝赐教。

编者

2016 年 10 月

目 录

前言

水文过程与响应

全国日降水过程随机性的空间分布特征·····	李鑫鑫, 桑燕芳	2
淮河中上游流域降水及径流变化特性·····	安贵阳, 郝振纯	6
沙颍河流域天然径流与实测径流演变及对比分析·····	石永强, 左其亭	12
基于 P - M 法的农田日实际蒸散发估算及影响因子分析·····	郭雪蕊, 沈冰, 黄领梅	21
五道沟水文实验站土壤湿度的季节与年际变化特征·····	贾青, 杨传国, 朱文立, 束美珍	26
基于水文响应相似性的无资料流域预测方法·····	薄岩, 周丰	31
DEM 分辨率对 SWAT 模型径流模拟的影响·····	赵韦, 李占玲, 王月华	42
基于新陈代谢的权马尔科夫模型在年径流量预测中的应用·····	李子龙, 莫淑红, 王娇, 沈冰	48
基于 PCSWMM 模型的水文参数敏感性分析·····	路雨, 李亮, 纪忠华, 王璐, 苏保林	55
气候变化影响下淮河流域水文响应和成因识别·····	石卫, 夏军	60
汾河上游径流对土地利用变化响应研究·····	高申, 吴泽宁, 穆立超, 裴倩楠	67
极强 ENSO 事件对长江流域降水和径流的影响分析·····	魏佳, 荣艳淑, 张亮	73
人类活动对马湖峪河流域汛期径流量的影响·····	冯鑫伟, 黄领梅, 沈冰	82
陆浑水库汛期入库径流及降雨变化特征分析·····	张志华, 姚娜, 胡彩虹, 薛旭升, 武玲玲, 赵留香	87
水文季节性节律下鄱阳湖水流特性研究·····	林玉茹, 梅亚东, 胡振鹏, 许继军, 毕胜	93
海河流域径流变化趋势及其变化归因关键技术研究·····	张利茹, 贺永会, 唐跃平, 王国庆	108

水资源管理与调度

基于最严格水资源管理的节水减排效用研究·····	纪璎苈, 左其亭	118
吉林省中西部农业水资源高效利用技术与模式·····	赵云	127
雨洪资源在吉林西部湿地生态恢复与保护中的利用研究·····	佟剑杰, 魏景忠, 王洪淼	133
基于水资源管理“三条红线”的许昌市水资源配置分析·····	雷德义, 胡彩虹	138
基于和谐论的区域水安全量化研究——以河南省为例·····	史树洁, 左其亭, 王亚迪	145
流域“二层三要素”联合调度理论研究·····	吴比, 张翔, 孟钰, 刘建峰	153
近半个世纪以来长三角区苏州河网及调蓄能力时空变化分析 ·····	杨柳, 许有鹏, 徐羽, 杨洁, 高斌, 王强, 项捷, 吴雷	157
郑州市主城区多水源调蓄水库联合调度模型研究·····	裴倩楠, 高申, 胡彩虹	166
海绵城市建设背景下湖南省凤凰县河湖水系连通实践·····	丁相毅, 刘家宏, 栾勇	171

变化环境下非一致性最低通航水位设计方法研究展望	176
三峡水库汛末蓄水方案优化设计	183
河道演变机理及其关联因素研究	189
平原湖区土地利用变化对排涝模数的影响	193

水生态与水环境

新安江流域生态补偿机制试点研究	200
西藏纳木错流域冰川与湖泊演变及对气候变化的响应	206
黑河流域中游地区景观格局演变过程与分析——以张掖地区为例	210
北洛河流域 <i>NDVI</i> 时空变化及其对气象要素的响应	219
基于多种方法的瀾河下游生态基流计算	226
基于变化范围法 (RVA) 的汉江支流生态流量研究	231
莆田东圳水库水源地保护区水质状况分析	239
鄱阳湖湿地土壤-植物碳氮稳定同位素组成特征分析	244
表面活性剂胶团强化超滤法处理重金属废水研究	251
北江流域地表水的发光菌毒性测试	256

极端气候与应对

中国干旱趋势敏感性归因分析	262
赣江流域极端降水时间变化特征研究	269
基于 SPI 指数的长江流域干旱时空变化分析	275
不同极值概率分布模型的适用性评价——以黑河流域极端降水为例	281
热带气旋强度变化对我国东南沿海核电厂址影响分析	287
核电厂新增极端气象灾害的风险与应对策略	293
基于 SCS-MIKE11 的平原湖区排涝措施模拟研究	298
短历时暴雨计算方法研究	305

水文过程与响应

全国日降水过程随机性的空间分布特征*

李鑫鑫, 桑燕芳

(中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环与地表过程重点实验室, 北京 100101)

摘要: 本文基于 1961—2013 年中国 520 个站点的日降水数据, 选用信息熵指标分析了全国日降水随机性的空间分布特征。分析认为, 地形、气候、台风、人类活动等因素的综合影响决定了全国日降水随机性的空间分布特征, 但不同区域的主导因素存在差别; 结合我国历史旱涝灾害发生情况进行分析, 认为日降水的信息熵值对我国南方地区洪涝灾害的空间格局具有较好的识别和划分意义。

关键词: 气候变化; 日降水; 信息熵; 洪涝灾害; 季风

1 引言

降水是水循环过程的基本环节, 也是大气环流和水量平衡的基本要素^[1]。降水受大气环流控制和影响, 空气冷暖交汇形成降雨^[2]。我国地形地貌条件和气候条件复杂多样^[3], 导致降水过程存在明显的空间差异性。降水过程空间分布的不均匀性和随时间变化的随机性是引起我国洪涝灾害发生的直接原因^[4]。近几十年来, 全球气候变化和人类活动的综合影响改变了全球海陆热力差异, 使得大尺度的大气环流结构发生变化, 影响了区域以及全球的降水空间分布格局, 使得极端水文事件发生的频率和强度均发生了明显改变^[5], 进而对水资源、生态系统状况和社会经济发展等产生深刻的影响^[6-7]。

我国总体上东南地区降水量多, 且由东南向西北降水量逐渐减少, 但受全球变化的影响, 降水过程的空间分布格局发生了较大变化。目前针对我国降水的复杂时空变化规律已有大量研究。有学者对全国降水的区域分异性和降水强度的变化趋势进行了研究^[3,8-9], 由于不同地区的差异性明显, 因此更多的是针对某一区域或流域进行研究, 如西部地区^[10]、华北地区^[11-12]、黄河流域^[13]、黑河流域^[14]、长江中下游地区^[15]等; 从研究的时间尺度看, 很多研究都是针对不同地区独特的降水季节性分配进行有针对性的分析讨论^[16-17]; 从关心的降水变量看, 不同的研究分别关注了年降水、季节降水、月降水、极端降水^[18]等。然而, 由于所用资料和方法不同, 导致研究结果也不尽相同。此外, 目前的研究主要是关注了不同降水变量的时空变化规律, 但缺少关于降水随机特性的针对性研究, 导致对极端水文事件发生规律的认识不足。研究降水过程的随机性, 揭示极端降水事件发生的统计特性, 对全国开展洪涝灾害评估及防治等工作具有重要的实际意义。

本文选用信息熵指标, 旨在重点分析全国日降水过程的随机性以及全国空间分布的差异性。信息熵可以理解为某种特征信息出现的频率, 因此可以表征降水过程随机性程度的高低, 且可以较好地反映极端水文事件发生的情况。

* 基金项目: 国家自然科学基金项目 (41330529), 中科院地理所秉维优秀青年人才计划项目。

第一作者简介: 李鑫鑫(1993—), 女, 河南濮阳人, 硕士研究生, 从事随机水文过程分析与模拟研究。Email: inslixin@163.com

2 数据与方法

2.1 数据

采用中国气象局国家气候中心提供的降水观测数据开展相关研究, 该数据已进行了一致性分析、异常值剔除等数据质量检查。在考虑站点空间分布、数据观测连续性与完整性等基础上, 选取 520 个气象站 1961—2013 年逐日降水数据, 分析降水过程的随机性。

2.2 信息熵

本文选用信息熵指标, 定量描述我国日降水过程的随机性及空间差异性。熵的概念起源于热力学, shannon 首先在信息论中引入了熵的概念, 并把信息中排除了冗余后的平均信息量称为“信息熵”^[19-22]。信息熵可以理解某种特征信息的出现频率, 即对于一个不确定性系统, 若用随机变量 X 表示其状态特征, 对于离散型随机变量, 设 X 的取值为 $X=\{a_1, a_2, \dots, a_n\} (n \geq 2)$, 每一取值对应的概率为 $P=\{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ ($0 \leq p_i \leq 1, i=1, 2, \dots, n$), 且有 $\sum_{i=1}^n p_i = 1$, 则该系统的熵为 $e = -\sum_{i=1}^n p_i \ln p_i$ 。变量的随机性和不确定性越大, 可以掌握的有用信息量越少, 信息熵值也就越大。当应用于分析日降水序列时, 信息熵越大, 表明降水的随机性越大, 越不容易进行准确分析预测; 反之, 如果降水的随机性越小, 可掌握的有用信息量越多, 因此较容易进行合理地分析预测。

3 结果分析

根据 1961—2013 年 520 个气象观测站的日降水序列, 计算了每个站点的信息熵值。结果表明, 我国日降水序列信息熵值的空间分布较为规律, 呈现出由南向北递减的规律。在长江流域以南地区, 除华南沿海和云贵高原的日降水的信息熵值较周边地区偏小 (约为 1~1.5) 外, 其余地区的信息熵值均大于 1.5; 而在华北和东北地区, 除海河流域东南部地区、内蒙古东部局部地区较周边地区信息熵值偏小 (小于 1) 外, 大部地区的信息熵值在 1~1.5 之间。然而, 新疆南部、内蒙古西部、甘肃和青海西北地区信息熵值均小于 1, 而新疆西北地区的信息熵值偏大 (为 1~1.5)。

对比不同流域日降水过程随机性的差异可以看出, 长江流域以南地区 (包括东南诸河流域、珠江流域、西南诸河流域) 日降水的信息熵值基本大于 1.5, 而长江流域以北地区日降水的信息熵值则小于 1.5; 此外, 海河流域东南部、松辽流域西南部和内陆河流域 (除西北角) 的日降水的信息熵值均小于 1。

日降水数据的信息熵值与经度、纬度和集中度的分析结果显示: 日降水的信息熵值具有十分明显的纬度分布规律 (图 1), $20^\circ\text{N} \sim 30^\circ\text{N}$ 区域的信息熵值比较大, 而 $30^\circ\text{N} \sim 40^\circ\text{N}$ 区域信息熵值随纬度增大时逐渐减小, 且 40°N 以北地区随着纬度增大信息熵值增大。此外, 日降水数据的信息熵值在 100°E 以东明显大于 100°E 以西地区。

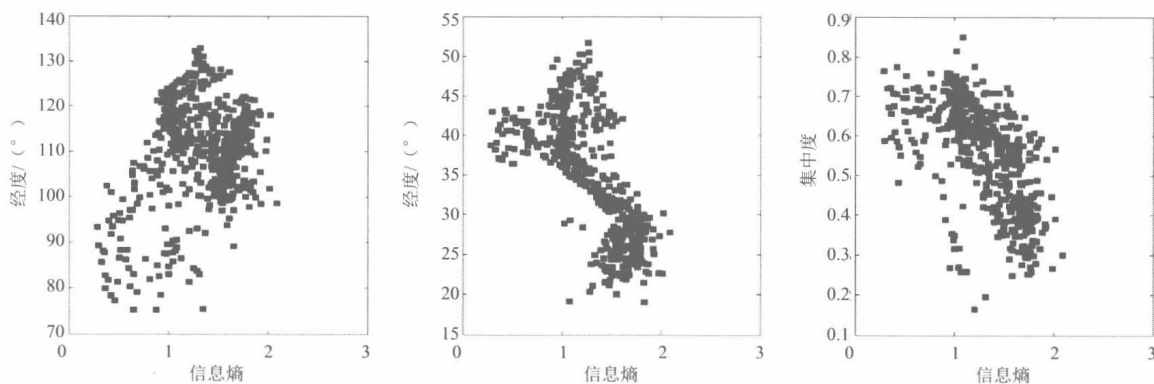


图 1 日降水序列信息熵与其站点经度、纬度关系以及与序列集中度的关系

为探讨日降水过程空间分布差异性的原因, 进一步分析了降水年内分配特征与信息熵值的关系。当某地区降水年内分配比较集中时, 从统计学角度看降水量的概率分布将集中于某一较小的值域, 此时降

水的随机性较小,因此信息熵值也较小;反之,当降水年内分配比较均匀时,降水的随机性较大,因此,信息熵值也较大。图1结果清楚地显示了降水的集中度和信息熵值的关系,随着集中度值由0.8逐渐减小至0.2,信息熵值由0.3逐渐增大到2.2,反映出信息熵值和集中度都呈明显的负相关关系。

综上所述认为,地形、气候、台风、人类活动等因素的综合影响决定了全国日降水随机性的空间分布特征,但不同区域的主导因素存在差别。分析我国气候条件,我国主要受印度洋的西南季风、太平洋的东南季风和西伯利亚寒流的影响。其中印度洋的西南季风影响我国西南地区,太平洋的东南季风影响我国东南地区和东北地区,西伯利亚干寒流影响我国东北和新疆西北地区。此外,新疆的西北部地区还受到了大西洋和北冰洋水汽的影响。受上述原因影响,我国新疆北部、东北局部和东南、西南地区降水的随机特性整体上表现出较大的随机性,而一些局部地区则由于其他主导因素的作用,使得降水随机性表现出差异性。例如,海河流域东南部随机性较周边地区偏小,初步分析认为这是人类活动的原因,这些地区受人为因素的影响(如热岛效应),降水的随机性反而表现的偏小;陕、甘、宁、青的交界区是中国西南和东南地区日降水的信息熵值向西北地区递减的过渡带,在其他研究中有学者提出了在高原东部的陕、甘、宁、青的交界区是中国西北降水变动率最大、旱涝异常的敏感地区^[16];吉林的东南部降水的随机性大,初步分析认为是地形的缘故,由于地处长白山,来自海洋的水汽在山地更容易形成降雨,使得降水的随机性更大;同样云贵高原降水的随机性也是地形因素作用的结果,云贵高原海拔相对较高,可以避免北方寒流的影响,并且在西南暖流的控制下,多晴天,所以降水的随机性较周边地区偏小;而在我国华南沿海,认为这是受到台风影响的结果,我国台风降水具有明显的季节变化^[23],如1—3月的台风只能在沿海或局部地区带来不足1mm的降水,甚至不能形成降水。之后台风的影响开始显现,并逐月向西北发展,且影响面积也不断增大,直到8月达到顶峰,此时的影响位置到达了中东部地区,之后台风逐月向东南方向撤退,影响力也逐渐减弱,所以也使得这些地区较周边内陆降水的随机性偏小。

4 结语

本文基于我国520个站点1961—2013年日降水气象观测资料,选用信息熵为指标分析了我国日降水随机性的空间分布特征,得到如下主要结论:

(1)我国日降水的随机性呈现出明显的纬度分布规律,30°N以南地区降水的随机性较大,在30°N~40°N区域随着纬度增大时降水的随机性减小,而在40°N以北地降水的随机性波动较大。

(2)我国降水的随机性在经度上也有明显的转折过渡带,即100°E以东地区降水的随机性大于100°E以西地区。

(3)日降水的信息熵值与降水过程年内分配(即序列的集中度)呈明显的负相关关系。

总体上,我国日降水过程的随机性主要受到地形、气候、台风、人类活动等因素的综合影响,但不同区域的主导因素存在差别。本文主要使用信息熵指标分析和描述了日降水过程的随机性,且结合我国历史洪涝灾害发生的空间分布情况,认为日降水的信息熵值对我国南方地区暴雨和洪涝灾害的空间分布具有较好的指示意义。关于信息熵与我国暴雨及洪涝发生空间分布规律的相互对应关系,需要做进一步地深入研究。

参考文献

- [1] 张建云,王国庆,杨扬,等.气候变化对中国水安全的影响研究[J].气候变化研究进展,2008,4(5):290-295.
- [2] 贾浩松,王静,袁春风.2013年8月河南驻马店市一次持续降雨天气过程分析[J].北京农业,2016(1):114-115.
- [3] 徐新创,张学珍,戴尔阜,等.1961—2010年中国降水强度变化趋势及其对降水量影响分析[J].地理研究,2014,33(7):1335-1347.
- [4] 刘昌明.中国水文地理[M].北京:科学出版社,2014.
- [5] 夏军,刘昌明,丁永建,等.中国水问题观察:第1卷 气候变化对我国北方典型区域水资源影响及适应对策[M].北京:科学出版社,2011.

- [6] 钟军, 苏布达, 翟建青, 等.中国日降水的分布特征和未来变化[J].气候变化研究进展, 2013, 9 (2): 89-95.
- [7] 王英, 曹明奎, 陶波, 等.全球气候变化背景下中国降水量空间格局的变化特征[J].地理研究, 2006, 25 (6): 1031-1040.
- [8] 王艳姣, 闫峰.1960—2010 年中国降水区域分异及年代际变化特征[J].地理科学进展, 2014 (10): 1354-1363.
- [9] 任国玉, 任玉玉, 战云健, 等.中国大陆降水时空变异规律——II.现代变化趋势[J].水科学进展, 2015, 26(4): 451-465.
- [10] 郭慧, 李栋梁, 林纾, 等.近 50 多年来我国西部地区降水的时空变化特征[J].冰川冻土, 2013,35 (5): 1165-1175.
- [11] 张一驰, 吴凯, 于静洁, 等.华北地区 1951—2009 年气温、降水变化特征[J].自然资源学报, 2011,26 (11): 1930-1941.
- [12] 唐蕴, 王浩, 严登华, 等.近 50 年来东北地区降水的时空分异研究[J].地理科学, 2005,25 (2): 172-176.
- [13] 徐宗学, 张楠. 黄河流域近 50 年降水变化趋势分析[J].地理研究, 2006,25 (1): 27-34.
- [14] 丁永健, 叶佰生, 周文娟, 等.黑河流域过去 40 年来降水时空分布特征[J].冰川冻土, 1991,21 (1): 42-48.
- [15] 梅伟, 杨修群.我国长江中下游地区降水变化趋势分析[J].南京大学学报, 2005,41 (6): 577-589.
- [16] 李耀辉, 李栋梁, 赵庆云.中国西北地区秋季降水异常的特征分析[J].高原气象, 2001,20 (2): 158-164.
- [17] 李栋梁, 王文.中国西北夏季降水特征及其异常研究[J].大气科学, 1997 (3): 331-340.
- [18] 蔡敏, 丁裕国, 江志红.我国东部极端降水时空分布及其概率特征[J].高原气象, 2007,26 (2): 309-318.
- [19] 王媛, 张宏伟, 杨会民, 等.信息熵在水污染物总量区域公平分配中的应用[J].水利学报, 2009, 40 (9) .
- [20] Gonzalez RC, Woods RE, Eddins SL.Digital image processing using MATLAB[M].New Jersey, Prentice Hall, 2003, Chapter 11.
- [21] Jaynes E T.Information Theory and Statistical Mechanics[J].Physical Review, 1957,106 (4): 620-630.
- [22] Chou C M.Wavelet-based multi-scale entropy analysis of complex rainfall time series[J]. Entropy, 2011,13 (1): 241-253.
- [23] 王咏梅, 任福民, 李维京, 等.中国台风降水的气候特征[J]. 热带气象学报, 2008,24 (3): 233-238.

淮河中上游流域降水及径流变化特性*

安贵阳¹, 郝振纯²

(1. 浙江省水利水电勘测设计院, 杭州 310002;

2. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098)

摘要: 利用 Mann-Kendall (M-K) 检验分析了淮河中上游流域 1959—2009 年降水和径流的变化特性, 并且利用小波分析和双累计曲线检验了降水、径流的变化周期和突变点。结果显示, 由降水趋势的空间分布可以看出, 夏季、冬季降水表现出增加的趋势, 春季、秋季降水则表现出减少的趋势, 北部地区和南部地区的降水趋势变化比其他区域更显著。淮河流域降水和径流之间存在较好的相关关系, 降水和径流的主要周期为 28 年和 18 年。从双累积曲线和小波分析中可以看出存在 4 个突变点 (1967 年、1978 年、1991 年和 2001 年)。双累积曲线中突变点之间交替变换的斜率表明淮河中上游流域每 10 年左右发生一次丰枯变化。

关键词: 淮河中上游; 降水; 径流; 趋势检验; 周期分析

1 引言

降水和径流是水文过程中最重要的两个要素, 二者之间有着密切的关系, 其变化特性是水资源准确评估, 洪水和干旱灾害防治以及水资源合理开发利用的起点^[1]。全球气候变暖加快了水文循环的速率同时影响到了降水和径流, 继而增加了中国的很多地区洪水和干旱灾害发生的风险^[2-4]。

淮河中上游流域地处我国东部, 介于长江和黄河两流域之间, 地处我国南北气候过渡带, 是中国人口密度最大的地区。淮河中上游流域是淮河流域的主要产流区, 同时也是中国洪水、干旱灾害最为严重的地区之一。1975 年 8 月, 淮河流域洪灾导致了 26000 人的死亡, 同时摧毁 2 座大型水库及 60 余座小型水库^[5]。进入 21 世纪以后, 淮河流域的洪灾发生频率增加, 2003 年、2005 年和 2007 年的洪水造成了巨大的经济损失。淮河中上游流域的极端降水和径流经常导致洪水和干旱, 甚至时常发生在同一年内。同时, 淮河中上游流域也是中国东部非常重要的产粮区, 在作物生长过程中需要大量的水用于灌溉。对长序列降水和径流变化特性的研究可以帮助我们更好的理解气候变化的影响, 同时更好的控制洪水和干旱灾害。

本文中, 1959—2009 年不同尺度 (年、季节) 降水和径流的趋势由 M-K 检验得到。继而可以获得降水和径流变化的空间分布特性。研究目的有两个: ①分析单站和区域的年、季节和月的降水及径流变化的时空分布特性; ②检测降水和径流的突变点及周期性。

2 研究区概况及方法

2.1 研究区概况

淮河中上游流域地处我国东部, 介于长江和黄河两流域之间, 位于 111°55'E~119°E, 30°55'N~34°55'N,

*基金项目: 国家自然科学基金项目 (41371047); 中国科学院战略性先导科技专项 (XDA05110102); 浙江省水利厅科技项目 (RC1524)。

第一作者简介: 安贵阳 (1986—), 男, 江苏连云港人, 博士, 主要从事水文水资源与气候变化影响研究。Email: anguiyang@163.com

面积为 19 万 km²。流域西起桐柏山、伏牛山，东临洪泽湖，南以大别山、江淮丘陵分界，北以黄河南堤与黄河流域毗邻。淮河中上游流域地处我国南北气候过渡带，淮河以北属暖温带区，淮河以南属北亚热带区，气候温和。年平均气温为 11~16℃。气温变化由北向南、由东向西递增。蒸发量南小北大，年平均水面蒸发量为 900~1500mm。淮河中上游流域多年平均降水量约为 910mm。

2.2 Mann-Kendall 检验

Mann-Kendall (M-K) 检验^[6-7]是世界气象组织认可推荐的广泛使用的检验水文时间序列趋势的一种非线性检验方法^[8]。M-K 方法用来检验降水和径流序列的趋势。检验显著的置信水平为 90%，即 $Z \geq 1.64$ 为显著。

2.3 小波分析

小波分析广泛用于检验气候变量时间序列的频率、周期、强度等，优点在于并不需要数据稳定^[9]。Morlet 小波是广泛用于周期检测的一个函数。选择 Morlet 小波分析降水和径流序列的周期和突变点。

3 结果与讨论

3.1 年、季节降水趋势分析

图 1 为淮河中上游流域年及季节降水趋势的空间分布。位于北部和东部的 2 个站点的年降水表现出显著的增加趋势。虽然只有 2 个站点表现出显著的增加趋势，但是几乎所有站点的 Z 值都为正值，说明淮河中上游流域年降水趋势是增加的。在春季，只有位于南部的 1 个站点表现出显著的减少趋势。在夏季，位于北部和南部的 4 个站点表现出显著的增加趋势。所有 18 个站的 Z 值都为正值，说明区域降水趋势是增加的。在秋季，位于北部、西部和南部的 7 个站点表现出显著的减少趋势。在冬季，6 个站点的 Z 值超过 90% 置信水平，表现出显著增加的趋势。汛期，位于北部和东部的两个站点表现出显著的增加趋势。

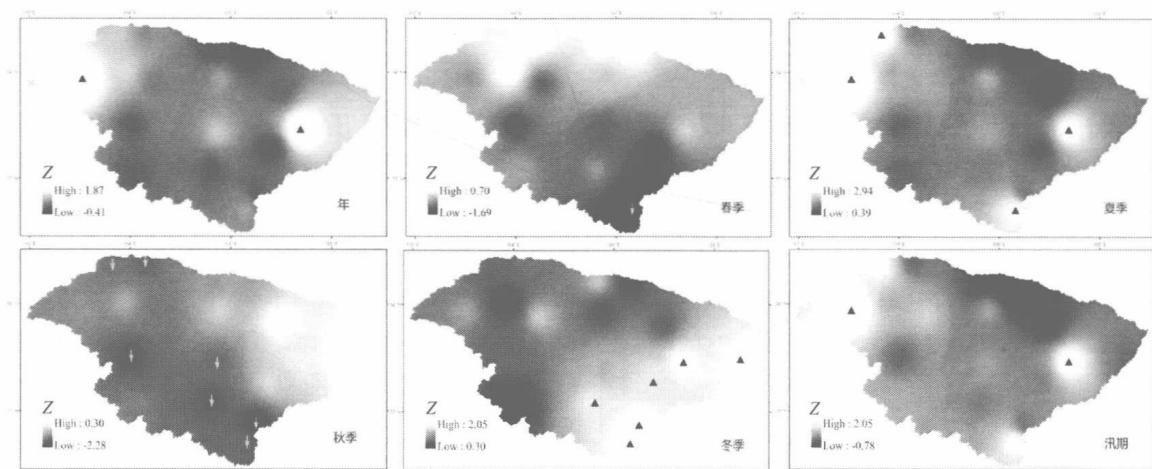


图 1 淮河中上游流域年及季节降水趋势空间分布(↓表示显著减少趋势，▲表示显著增加趋势)

3.2 月降水趋势分析

图 2 为月降水趋势的空间分布。6 月、7 月、8 月降水分别有 3 个、5 个、3 个站点表现出显著增加的趋势。9 月有 4 个站点的降水表现出显著减少的趋势，4 月也有 1 个站点表现出显著的减少趋势。另外，1 月、5 月、12 月分别有 2 个、1 个、2 个站点表现出显著的增加趋势，2 月、3 月、10 月、11 月 4 个月并没有站点表现出显著的趋势变化。月降水的显著变化通常发现在 6—9 月，其中 6—8 月表现出显著增加趋势，9 月表现出显著减少趋势。6 月、7 月表现出显著增加趋势的站点通常位于区域 I。在 8 月，位于区域 II 的 2 个站点表现出显著增加趋势。与 6—8 月正好相反，9 月所有站点都表现出减少趋势，其中位于区域 II 的 4 个站点表现为显著。其他月份，大多数站点没有显著趋势变化。

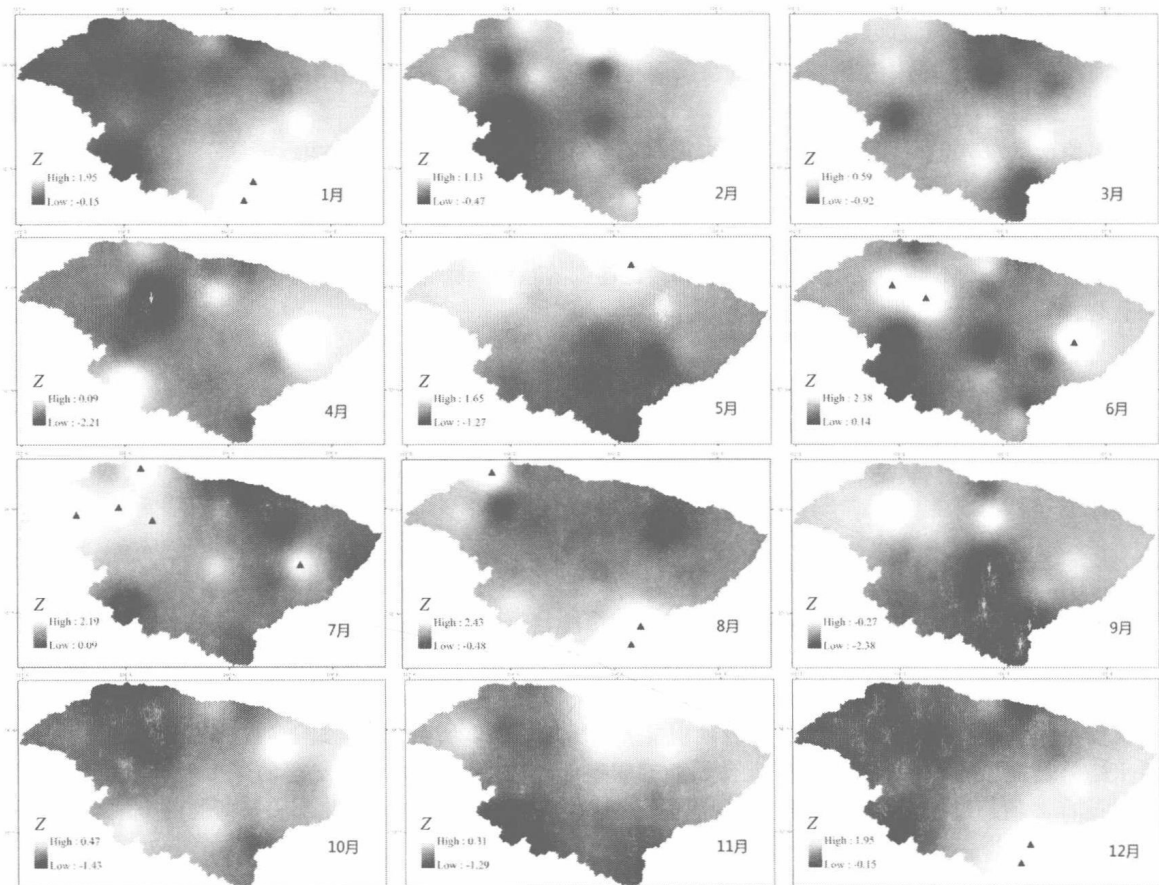


图2 淮河中上游流域月降水趋势空间分布（↓表示显著减少趋势，▲表示显著增加趋势）

3.3 降水和径流的关系及其趋势分析

降水是淮河流域产流的主要原因。近年来，人类活动对水文过程的影响越来越深。降水和径流的变化可以揭示出径流的变化与降水之间的相关关系。图3是降水和径流之间的相关关系，利用18个气象站1959—2009年的日降水资料和蚌埠水文站的日径流资料。图3中可以看出年和汛期降水和径流之间存在很好的相关关系。这说明降水变化确实影响到了径流的变化。年序列较之汛期序列相关关系更好。

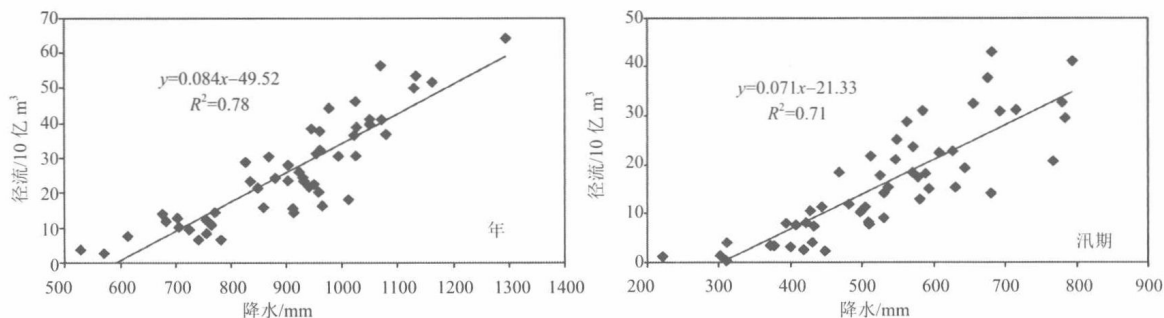


图3 降水径流之间的相关关系

淮河流域蚌埠以上气象站平均降水 $[P(B)]$ 及径流趋势见表1，降水和径流趋势检验主要方法为M-K和Sen斜率法。结果显示 $P(B)$ 在夏季表现出显著的增加趋势，而秋季则表现出显著的减少趋势。年径流表现出减少趋势，但并不显著。年和冬季降水和径流的趋势相反，而其余季节的降水和径流趋势相同。