

东北农牧交错带旱涝特征对气候变化的响应

韩晓敏, 延军平

(陕西师范大学 旅游与环境学院, 陕西 西安 710062)

摘要: [目的] 从旱涝灾害角度分析气候变化对东北农牧交错带的影响, 对该区的气候变化和旱涝特征进行研究, 为充分利用气候资源, 合理调配水资源, 提高灾害应变能力提供科学依据。[方法] 统计 1960—2011 年东北农牧交错带 21 个气象台站的逐月气温、降水资料, 应用 Mann—Kendall 气候突变检验法、标准化降水指数(SPI)、样条函数插值法对该带旱涝状况的时空分布进行了分析。[结果] (1) 东北农牧交错带气候呈现出明显的暖干化趋势, SPI3 表明春、夏、秋三季干旱事件增多, 21 世纪以来, 春旱事件较为频繁, 冬季降水略微增加; (2) 气温突变发生在 1988 年, 突变后, 干旱的比例增加了 20.7%, 涝的比例增加了 9.3%, 降水处于“正常”的年份则大幅度减少, 对该区极为不利; (3) SPI12 低值中心由科尔沁沙地向东北延伸到松嫩平原, 干旱面积有大幅度增加的趋势, 东北农牧交错带中南部旱化较为严重。[结论] 东北农牧交错带暖干化的趋势给该区农牧业带来不利影响, 受旱地区应及时启动干旱预警紧急方案, 开展抗旱工作。

关键词: 东北农牧交错带; 气候暖干化; 旱涝响应; SPI

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)02-0257-06

中图分类号: P468.0

Droughts and Floods Response to Climate Change in Agro-pastoral Ecotone of Northeast China

HAN Xiaomin, YAN Junping

(Tourism and Environment College, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710062, China)

Abstract: [Objective] This paper analyzed the characteristics of drought and flood disasters occurred in agro-pastoral ecotone of Northeast China and the precedent climate change, mainly from the view of the effects of climate change on drought and flood disasters, in order to provide the scientific basis for making full use of climate resources, allocating water resources reasonably and improving response capacity to disaster. [Methods] Using the monthly temperature and precipitation data of 21 stations in agro-pastoral ecotone of Northeast China from 1960 to 2011, this paper analyze the temporal and spatial distribution of drought and flood conditions by Mann—Kendall climate mutation test, the standardized precipitation index(SPI), splining interpolation method. [Results] (1) The area showed a tendency of warming and drying. SPI3 showed that flood events increased in spring and winter, while in summer and autumn drought event increased; (2) The temperature changed in 1988 suddenly. After the mutation, drought increased at a proportion of 20.7%, flood rised in a proportion of 9.3%. Precipitation in the “normal” year reduced significantly, this is extremely unfavorable to the area; (3) Regions with low value center of SPI extended from Horqin sandy land to the Songnen Plain in the northeast area, drought was more serious in the middle and south of the agro-pastoral ecotone of Northeast China. [Conclusion] The ecological environment of this area seems vulnerable, in order to offset the negative influence of warming and drying on farming and animal husbandry, emergency plan should be started early in drought areas.

Keywords: Northeast agro-pastoral ecotone; climate warming; drought and flood response; standardized precipitation index

收稿日期: 2013-11-10

修回日期: 2014-03-26

资助项目: 国家自然科学基金项目“部分重大自然灾害的时空对称性: 结构、机理与适应对策”(41171090)

第一作者: 韩晓敏(1988—), 女(汉族), 山西省长治市人, 硕士研究生, 研究方向为全球气候变化与灾害防治。E-mail: hanxiaominsnnu@163.com。

通信作者: 延军平(1956—), 男(汉族), 陕西省绥德县人, 教授, 博士生导师, 主要从事区域自然灾害和区域开发研究。E-mail: yanjp@snnu.edu.cn。

农牧交错带是我国东部季风气候区向西北内陆干旱区过渡的地带,是集约农业区向游牧业区过渡的地带,由于土壤基质的不稳定性与贫瘠性,又被称为“生态环境脆弱带”^[1]。全球气候变暖将进一步加剧农牧区生态环境的恶化,诸如旱涝灾害、大风和沙尘暴频繁,土地沙漠化等^[2]。研究^[3-4]表明,东北地区近 50 a 呈现出明显的暖干化趋势;东北西部的生态环境荒漠化(盐渍化、沙漠化)以经向扩展,荒漠化逼近东北商品粮基地。东北农牧交错带是全球气候变化最敏感地区之一,也是生态环境非常脆弱的地区。因此,对该区的气候变化及旱涝响应的研究有重要的现实意义,本研究利用标准化降水指数 SPI^[5-8]和样条函数插值法^[9-10]对该地区旱涝的时空分布进行相关分析。SPI 是一种新的非常有价值的干旱强度评估指数。该指数计算简单易行,资料容易获取,同时各个地区和各个时段都有着良好的计算稳定性,能够有效地反映旱涝状况,优于在中国有着成熟应用的 Z 指数^[11]。本研究着重从旱涝灾害角度分析气候变化对东北农牧交错带的影响,以期深入认识该区的气候变化和旱涝特征,为充分利用气候资源,合理调配水资源,提高灾害应变能力提供科学依据,做到趋利避害。

1 数据来源和方法

1.1 研究区域

农牧交错带的范围和位置因研究目的和划分指标不同而常有不同,但各种划分方案中最核心的地区则没有本质差别^[12],东北农牧交错带位于中国北方农牧交错带的东部,涉及 4 个省(区)11 个市(盟)的 43 个县(旗)和县级市(14 个县级区)。包括内蒙古呼伦贝尔市、兴安盟、通辽市、赤峰市;辽宁省朝阳市;黑龙江省齐齐哈尔市、大庆市;吉林省白城市、松原市、四平市等^[13]。

1.2 资料来源

根据气象资料的完整度,选取了东北农牧交错带 21 个站点 1960—2011 年的气象资料,主要包括逐月平均气温、逐月平均降水量,资料来源于中国气象科学数据共享服务网。文中春季指 3—5 月、夏季指 6—8 月、秋季指 9—11 月,冬季是 12 月至翌年 1—2 月。

1.3 方法

主要应用 Mann—Kendall 气候突变检验法^[14],标准化降水指数 SPI,样条函数插值法,气候倾向率及其它数理统计方法进行分析。

1.3.1 标准化降水指数(SPI) 标准化降水指数

(SPI)由 Mckee 等人^[15]于 1993 年提出,由于不同时间,不同地区降水量变化较大,直接用降水量很难在不同时空尺度上相互比较,而且降水是一种偏态分布,不是正态分布,所以在降水分析过程中,采用 I 分布概率来描述降水量的变化,然后再经正态标准化求得 SPI 值,其等级详见表 1。

表 1 SPI 旱涝等级表

标准化降水指数 SPI	旱涝等级
$SPI \geq 2.0$	重涝
$1.5 \leq SPI < 2.0$	中涝
$1.0 \leq SPI < 1.5$	轻涝
$-1.0 \leq SPI < 1.0$	正常
$-1.5 \leq SPI < -1.0$	轻旱
$-2.0 \leq SPI < -1.5$	中旱
$SPI < -2.0$	重旱

1.3.2 样条函数法 样条函数插值法^[16-17]是一种较常用的局部插值方法,主要利用空间实测的降水量值,通过控制估计方差,用多项式拟合出平滑的插值曲线,并依据这条曲线来估算每个定点的属性数值,在计算时采用最小曲率的概念来行,该方法具有易操作、计算量小等优点,相对比较稳健,并且过分依赖潜在的统计模型。Jeffrey 等^[18]就是利用三变量(经度、纬度和高程)对气象数据如温度和降水进行了插值,运用样条法进行插值分析,涉及的参数不同,所建立的数学模型也不同。因此,在考虑降水时,如涉及地形因素如坡向、坡度的影响,可采用此方法^[11]。

1.3.3 Mann—Kendall 检验 Mann—Kendall 检验方法是非参数方法,其优点是不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,适用于类型变量和顺序变量,计算比较简便。绘出 UF 和 UB 曲线图,若 UF 或 UB 的值大于 0,则表明序列呈上升趋势,当它们超过临界线时,表明上升或下降趋势显著。超过临界线的范围确定为出现突变的时间区域,如果 UF 和 UB 出现交点,且在临界线之间,那么交点对应的时刻为突变开始的时间。

2 结果与分析

2.1 东北农牧交错带气候年际变化

近 52 a 东北段农牧交错带年平均气温呈整体震荡上升趋势(图 1),多年平均气温为 $5.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,气候倾向率为 $0.34\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ (通过了 $\alpha=0.001$ 的极显著性水平),与东北地区气候倾向率 $0.34\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 接近,明显高于近 50 a 全国增温速率 $0.25\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$ 的平均水平^[19],气候变暖现象显著。由 6 阶拟合曲线可以看出,20 世纪 60 年代年均气温呈下降趋势,70 年代初

到 80 年代后期小幅度波动,80 年代后期气温大幅度上升。进入 21 世纪,气温有所回落。2007 年该区气温达到 7.5 °C,为 52 a 来的最高值。由表 2 可知,春、夏、秋、冬四季该区随着代际的过渡气温都随之递增,由各个季节的气候倾向率判断春季对整个带内气温变暖的贡献率最大,冬季次之,夏季最小。

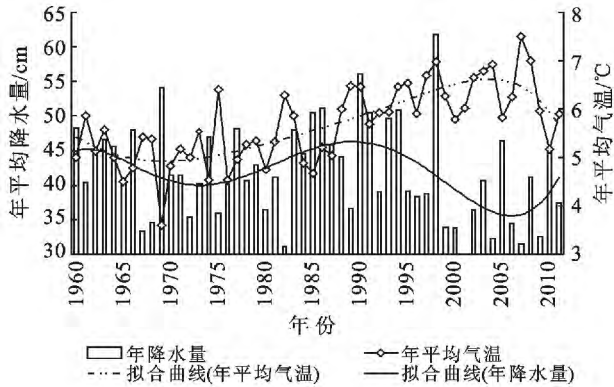


图 1 东北农牧交错带 1960—2011 年平均气温、降水量变化
东北农牧交错带 1960—2011 年年平均降水量为

418.8 mm,近 52 a 来降水量小幅度下降,气候倾向率为 $-9.88 \text{ mm}/10 \text{ a}$ 。由 6 阶拟合曲线可以看出,20 世纪 60 年代初期到 70 年代中期降水小幅度下降,70 年代中期到 90 年代初期降水略微增加,90 年代到 21 世纪初期降水持续下降,2005 年至今降水又有所增加。1998 年降水量达到 618.3 mm,为 52 a 来的最大值。

从一个稳定的气候阶段向另一个稳定的气候阶段过渡,且气候阶段持续时间的长度远大于过渡时期的长度,这种现象称作气候突变。通过对该区 1960—2011 年气温进行 Mann—Kendall 气候突变检验发现(图 2),1960—1981 年正向时间序列统计值 UF 多在 0 值以下,说明此时段气温呈波动下降趋势,1982 年后 $UF > 0$,气温回升,1986 年以后气温上升速率加快,1995 年 UF 超出显著性水平 0.05 信度线,说明气温显著增加。UF 和 UB 在 ± 1.96 临界线内相交于 1988 年,表明该地区年均温在 1988 年前后发生了由冷到暖的突变。

表 2 东北农牧交错带气温代际变化

项目	四季气温/°C				年均温/°C
	春季	夏季	秋季	冬季	
1960s	6.58	21.51	5.55	-13.53	0.50
1970s	6.51	21.51	5.72	-13.12	0.52
1980s	6.98	21.76	5.73	-12.67	0.55
1990s	7.68	21.97	6.49	-10.99	0.63
2000—2011 年	7.98	22.62	6.69	-12.45	0.62
气候倾向率/(°C/(10 a))	0.36	0.24	0.28	0.34	0.31

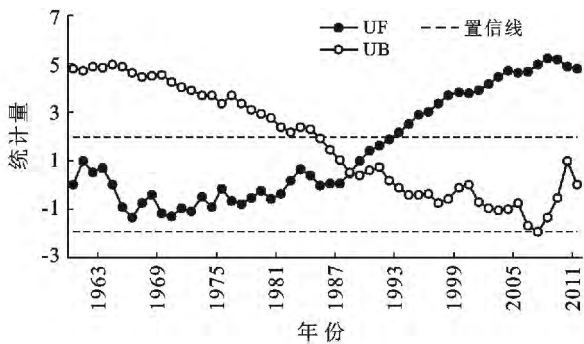


图 2 东北农牧交错带年平均气温 Mann—Kendall 检验

2.2 东北段农牧交错带旱涝时间变化特征

SPI 指数用于度量多种时间尺度上的降水指数。不同时间尺度反映了不同时间上的降水特征。SPI₁, SPI₃ 属于短时间尺度,能够反映短时间内的旱涝变化特征。具体而言,SPI₁ 代表 1 个月的时间尺度,能明确地指示旱涝具体的发生时间和程度;SPI₃ 代表 3 个月的时间尺度,能较好地反映季节变化特征。

SPI₁₂ 属于长时间尺度,代表 12 个月的时间尺度,能更好地反映旱涝的年变化特征。不同时间尺度的 SPI 可以用于监测不同类型的旱涝,多种时间尺度的 SPI 综合应用可实现对旱涝的综合监测评估。研究^[20-22]表明,短时间尺度的 SPI₁ 由于受短时间降水影响大,频繁地在 0 线上下波动,反映出短期的旱涝变化特征;SPI₃ 可以反映季节干旱,与农业干旱关系密切;SPI₁₂ 旱涝变化比较稳定周期更明显,可较清楚地反映长期的旱涝变化特征。本研究对东北段农牧交错带近 52 a 的降雨量做了以 1 个月、3 个月、12 个月为时间尺度的 SPI 值,以进一步分析其旱涝年际变化特征和季节变化特征(图 3)。

2.2.1 旱涝年际变化特征

SPI 的年际变化可以反映出旱涝发生的具体时段。由图 3 中 SPI₁₂ 的逐年变化可见,该带 1960—1970 年雨涝频繁,1970—1982 年正常年份居多,1986—2000 年雨涝年份多,2000—2011 年干旱频繁。52 a 间共发生 19 次干旱事件,其

中重旱 3 次:2001 年 6 月至 2002 年 5 月、2003 年 5 月至 2004 年 4 月、2007 年 7 月至 2008 年 6 月;极旱 4 次:1967 年 8 月至 1968 年 7 月、1971 年 8 月至 1972 年 7 月、1983 年 4 月至 1984 年 3 月、1967 年 8 月至 1968 年 7 月。15 次雨涝事件,极涝 2 次,1990 年 10 月至 1991 年 9 月、1999 年,重涝 3 次,1969 年 6

月至 1970 年 5 月、1986 年 8 月至 1987 年 7 月、1995 年 7 月至 1996 年 6 月。

通过气候趋势系数的分析可以发现,自 1960—2011 年东北段农牧交错带气候有变干旱趋势。尤其进入 21 世纪以来该带干旱事件显著增多,干旱发生频率和成灾面积逐年增加。

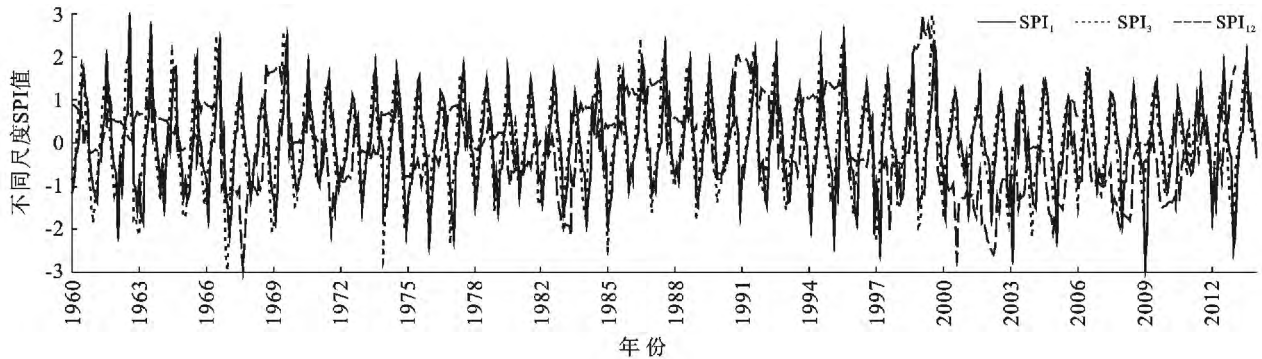


图 3 东北农牧交错带 1960—2011 年 SPI 多时间尺度分析

2.2.2 旱涝季节变化特征

(1) 春季。东北段农牧交错带春季旱涝整体呈交替变化特征,1960—1974 年只出现一次春旱;1975—1990 年旱涝交替:旱(1975 年)—涝(1977 年)—旱(1980 年)—涝(1983 年)—旱(1986 年)—涝(1990 年);1991—1999 年春季正常年份居多;21 世纪以来,春旱事件较为频繁。其中 1965 年春旱最为严重,SPI 达到 -2.09 。

(2) 夏季。该带夏季旱涝呈阶段性变化特征,20 世纪 60 年代夏涝频繁(1964,1966,1969 年),70 年代正常年份居多,80—90 年代夏涝事件居多(1985,1990,1993,1994,1998 年),2001 年以来,夏旱年数增加,平均约 2~3 a 出现一次夏旱(2001,2004,2007,2008,2009 年)。多年 SPI 线性倾向率为 $-0.16/10$ a,夏旱呈增加趋势,夏季降水减少幅度较大。

(3) 秋季。秋旱主要年份有 1962,1967,1982,1999,2001,2002,2007 和 2011 年,其中 2001 年秋旱最为严重,SPI 达 -2.15 。秋涝主要年份有 1960,1972,1974,1986 和 2010 年,其中 1986 年秋涝最为严重,SPI 达 1.79 。SPI 线性倾向率为 $-0.07/10$ a,表明秋旱略增加。

(4) 冬季。该带冬季旱涝分为 3 个阶段,1960—1980 年为旱涝交替阶段,1981—2000 年冬旱年份比率较高,2001 年以来,冬涝事件较多。SPI 线性倾向率为 $0.07/10$ a,表明冬涝略有上升,冬季降水增多。

2.2.3 气温突变前后旱涝响应 以 SPI_{12} 指数划分该区旱涝等级,对其旱涝等级进行统计分析(表 3),气温突变前 28 a 和突变后 24 a 对比,突变后重涝出

现的年份数为 1,重旱出现的年份数为 1;中涝出现的年份数为 1,中旱出现的年份数为 2;轻涝出现的年份数为 3,轻旱出现的年份数为 4,其比例均有所增加,增幅分别为 4%,4%,4%,4.35%,1.3%,12.35%;正常年份数比例有所下降,降幅为 30%。可见,突变后旱涝灾害都有所增加,气候变暖对该带有较为不利的影响。由表 3 可以看出,气温突变后,干旱的比例增加了 20.7%,涝的比例增加了 9.3%,东北农牧交错带旱灾比例增加幅度约为涝灾增加比例的 2 倍。亦即突变后旱化较为严重。该区降水处于“正常”的年份大幅度减少,对区域农业发展极为不利。

表 3 突变前后旱涝各等级出现年份数及所占比例

等级	1960—1988 年		1988—2011 年	
	出现年份数	比例/%	出现年份数	比例/%
重涝	0	0	1	4
中涝	0	0	1	4
轻涝	3	10.70	3	12
正常	23	82.00	13	52
轻旱	1	3.65	4	16
中旱	1	3.65	2	8
重旱	0	0	1	4

2.3 旱涝空间响应

对比气温突变前后(图 4),突变前 SPI_{12} 值在整个空间上差值略小,空间差异不是很明显,而突变后差值增大。 SPI_{12} 低值中心整体向东北方向扩张,由科尔沁沙地到延伸到松嫩平原,尤以吉林西部最为显著,干旱面积有大幅度增加的趋势;东北农牧交错带

中南部旱化较为严重,北部雨涝事件较多, SPI_{12} 高值中心出现在大兴安岭北侧的扎兰屯市和辽河平原东部的四平市,突变后高值中心分别向北、向东移动,雨

涝面积呈现减少态势。说明该带半湿润区向半干旱区过渡转化,半湿润区的面积在减少,而半干旱区的面积在增加。

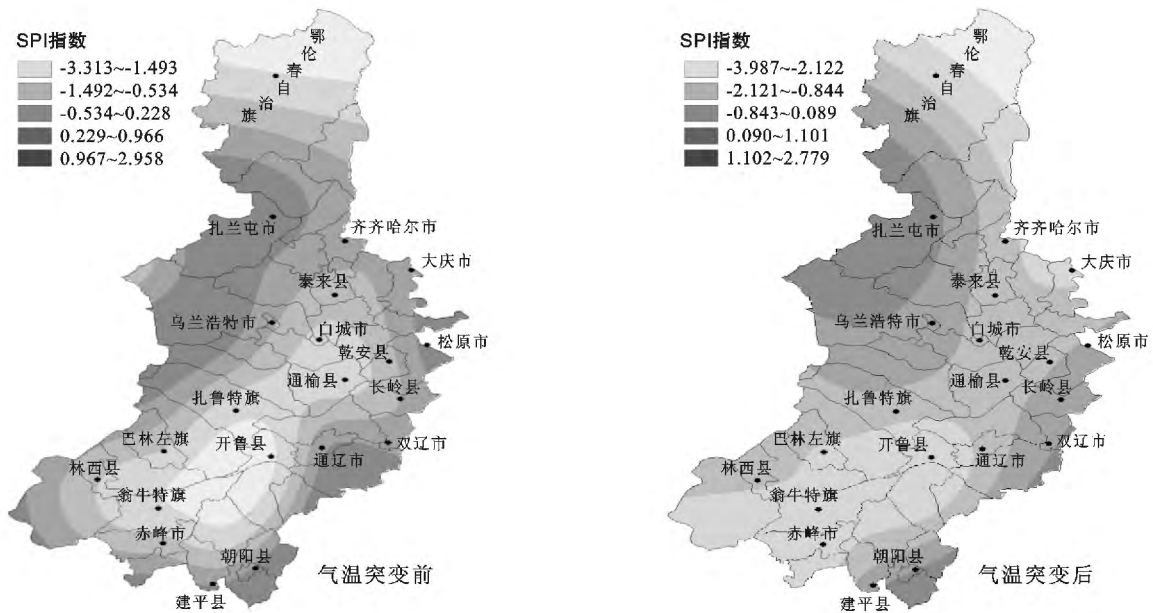


图 4 气温突变前后各站点多年平均 SPI 值等值线分布

3 讨论

研究^[23]表明,近 50 a 东北地区气候暖干化使吉林省西部、辽宁省西北部、内蒙古自治区东部地区均农作物气候生产力呈现减少趋势,而东北农牧交错带恰好位于该区域,其农作物气候生产力呈现下降趋势。究其原因,气候暖干化会对该区域的旱涝程度有所影响,而旱涝为中国农业生产影响最严重的自然灾害。因此研究该区域的旱涝程度对气候变化的响应具有非常重要的现实意义。其次,东北农牧交错带是生态环境脆弱带,干旱向东部扩张对该区农牧业的发展都极其不利。

本研究利用标准化降水指数研究该区域的旱涝程度及其对气候变化的响应,旨在于为该区域的农牧业可持续发展提供理论依据。但就其旱涝灾害的影响因素和形成机制而言,还有待于进一步深入研究。本文从时间尺度详细分析了东北农牧交错带的旱涝程度,对于空间尺度还有待于深入分析。许多外界因素(如高程、坐标位置、下垫面状况、风速等)也会对降水插值结果产生重要影响,详细考虑研究区域的地形特征(如坡度、坡向等),可以明显提高插值结果的精度。因此在研究区域降水空间插值时,应更为全面地考虑以上因素,以便找到最适合特定研究区域的最优插值方法。

4 结论

(1) 近 52 a 东北段农牧交错带年平均气温呈整体震荡上升趋势,气候倾向率为 $0.34\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ a}$,通过对 1960—2011 年气温进行 Mann—Kendall 气候突变检验发现,该带气温在 1988 年(UF 和 UB 的交点)发生了突变。此前为冷期,此后为暖期。对于该区气温增暖而言,冬季的贡献率最大,春季次之。

(2) 通过气候趋势系数的分析可以发现,1960—2011 年东北段农牧交错带气候有变干旱趋势。尤其进入 21 世纪以来该带干旱事件显著增多,干旱发生频率逐年增加。SPI3 表明夏、秋两季干旱事件增多,21 世纪以来,春旱事件较为频繁,冬季降水略微增加。

(3) 气温突变后,干旱的比例增加了 20.7%,涝的比例增加了 9.3%,东北农牧交错带旱灾比例增加幅度约为涝灾增加比例的 2 倍。亦即突变后旱涝灾害均增加,且干旱化较为严重。该区降水处于“正常”的年份大幅度减少,对本区农业发展极为不利。

(4) SPI_{12} 低值中心由科尔沁沙地向东北到延伸到松嫩平原,干旱面积有大幅度增加的趋势,东北农牧交错带中南部旱化较为严重。

[参 考 文 献]

- [1] 张汉雄,邵明安,张兴昌. 东北农牧交错带生态环境恢复与持续发展战略[J]. 干旱区资源与环境, 2004, 18(1):

- 129-134.
- [2] 郭维栋,马柱国,姚永红.近 50 a 中国北方土壤湿度的区域演变特征[J].地理学报,2003,58(S):83-90.
- [3] 孙凤华.东北气候变化与极端气象事件[M].北京:气象出版社,2008.
- [4] 廉毅,高枞亭,任红玲.20 世纪 90 年代中国东北地区荒漠化的发展与区域气候变化[J].气象学报,2001,59(6):730-736.
- [5] 张强,鞠笑生,李淑华.三种干旱指标的比较和新指标的确定[J].气象科技,1998,28(3):248-252.
- [6] 车少静,李春强,申双和.基于 SPI 的近 41 年(1965—2005)河北省旱涝时空特征分析[J].中国农业气象,2010,31(1):137-143.
- [7] 陈社明,卢文喜,罗建男.吉林西部气象干旱的多尺度分形特征[J].吉林大学学报:地球科学版,2013,43(1):245-249.
- [8] 王媛媛,张勃.基于标准化降水指数的近 40 年陇东地区旱涝时空特征[J].自然资源学报,2012,27(12):2136-2142.
- [9] 曹文静,李强子,蒙继华.基于 GIS 的气温插值方法比较[J].中国农业气象,2007,28(S):175-178.
- [10] 黄丙湖,孙根云.等雨量线自动提取的分析与实现[J].计算机工程与设计,2010(15):3499-3502.
- [11] 史建国,严昌荣.气象干旱指数研究方法概述[J].中国农业气象,2007(S):191-195.
- [12] 王静爱.中国北方农牧交错带土地利用与人口负荷研究[J].资源科学,1999,21(5):19-24.
- [13] 何学娟.东北地区农牧交错带的产生与可持续发展[J].大连民族学院学报,2008,10(2):136-141.
- [14] 刘贤赵,张安定,李嘉竹.地理学数学方法[M].北京:科学出版社,2009.
- [15] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. Drought Monitoring with Multiple Time Scales[C]. Boston:9th AMS Conference on Applied Climatology, 1993:179-184.
- [16] 汤国安,杨昕.地理信息系统空间分析试验教程[M].北京:科学出版社,2006.
- [17] 何红艳,郭志华,肖文发.降水空间插值技术的研究进展[J].生态学杂志,2005,24(10):1187-1191.
- [18] Jeffrey S J, Carter J O, Moodie K B. Using spatial interpolation to construct a comprehensive archive of Australia climate data[J]. Environ. Model. Softw., 2001,16(4):309-330.
- [19] 苏伟,郭日生.气候变化对中国的影响评估及其适应对策[M].北京:科学出版社,2012.
- [20] 李敏敏,延军平.华北段农牧交错带气候变化特征及其响应[J].干旱区资源与环境,2013,27(5):100-106.
- [21] 谭学志,粟晓玲,邵东国.基于 SPI 的陕西关中地区气象干旱时空特征分析[J].干旱地区农业研究,2011,29(2):224-229.
- [22] 车少静,李春强.基于标准化降水指数的石家庄干旱时空特征[J].气象科技,2010,38(1):65-70.
- [23] 韩晓敏,延军平.东北地区气候生产力对气候变化的时空响应[J].江西农业学报,2013,25(7):69-74.

(上接第 256 页)

[参 考 文 献]

- [1] 刘希林,连海清.崩岗侵蚀地貌分布的海拔高程与坡向选择性[J].水土保持通报,2011,31(4):32-36.
- [2] 张淑光,钟朝章.广东省崩岗形成机理与类型[J].水土保持通报,1990,10(3):8-15.
- [3] 丘世钧.红土坡地崩岗侵蚀过程与机理[J].水土保持通报,1994,14(6):31-40.
- [4] 吴志峰,王继增.华南花岗岩风化壳岩土特性与崩岗侵蚀关系[J].水土保持学报,2000,14(2):31-35.
- [5] 任兵芳,丁树文,吴大国,等.鄂东南崩岗土体特性分析[J].人民长江,2013(3):93-96.
- [6] 林金石,黄炎和,张旭斌,等.南方花岗岩区典型崩岗侵蚀产沙来源分析[J].水土保持学报,2012,26(3):53-57.
- [7] 卢冬,胡耀国,彭四清,等.应用浅层地温测量法分析崩岗侵蚀与地下水分布关系[J].生态环境学报,2011,20(2):208-216.
- [8] 张大林,刘希林.应用三维激光扫描监测崩岗侵蚀地貌变化:以广东五华县莲塘岗崩岗为例[J].热带地理,2014,34(2):133-140.
- [9] 林敬兰,黄炎和,蒋芳市,等.崩岗土体的渗透性能机理研究[J].水土保持学报,2013,27(2):53-56.
- [10] 蒋芳市,黄炎和,林金石,等.崩岗崩积体土壤渗透特性分析[J].水土保持学报,2013,27(3):49-54.
- [11] Miller D E, Gardner W H. Water infiltration into stratified soil[J]. Soil Science Society of America Journal, 1962,26(2):115-119.
- [12] 王文焰,张建丰,旺志荣,等.黄土中砂层对入渗特性的影响[J].岩土工程学报,1995,17(5):34-41.
- [13] 甘永德,贾仰文,仇亚琴,等.降雨条件下分层土壤入渗特性[J].水土保持学报,2012,26(5):217-219.
- [14] 冶运涛,伍靖伟,王兴奎.双套环测定土壤渗透系数数值模拟分析[J].灌溉排水学报,2007,26(3):14-18.
- [15] 邵明安,王全九,黄明斌.土壤物理学[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [16] Kostikov A N. On the dynamics of the coefficient of water-percolation in soils and on the necessity for studying it from a dynamic point of view for purposes of amelioration[J]. Trans, 1932, 6: 17-21.
- [17] 张大林,刘希林.崩岗泥砂流粒度特性及流体类型分析:以广东五华县莲塘岗崩岗为例[J].地球科学进展,2014,29(7):810-818.