

三江平原气象水文干旱演变特征

郑越馨^{1,2}, 吴燕锋^{2,3}, 潘小宁⁴, 齐鹏², 戴长雷¹, 章光新²

(1. 黑龙江大学 水利电力学院, 哈尔滨 150080; 2. 中国科学院 东北地理与农业生态研究所, 长春 130102; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 吉林省水文水资源局松原分局, 吉林 吉林 138000)

摘要: 利用三江平原6个气象站和4个水文站近50年的数据, 采用标准化降水蒸散指数(SPEI)和径流干旱指数(SDI), 探究了三江平原近50 a气象干旱和水文干旱时空演变特征, 并对气象干旱与水文干旱进行了对比分析。结果表明: (1) 1970—1980年和2000—2010年气象干旱较为频发, 从季节上看, 三江平原大部分地区春季和冬季有变湿的趋势, 而夏和秋两季有变干的趋势, 但趋势均不显著。(2) 1960s末、1974—1981年和1999—2010年发生了持续时间长且强度大的水文干旱。挠力河流域菜咀子站水文干旱频发且严重, 挠力河下游地区水文干旱程度强于上游地区。(3) 水文干旱滞后于气象干旱1~7个月, 且时间尺度越长, 水文干旱滞后气象干旱的现象越明显。研究结果可以为三江平原地区干旱应对和水资源综合管理提供参考。

关键词: 气象干旱; 水文干旱; 年变化; 季节变化; 三江平原

中图分类号: P333; P426

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2019)04-0177-08

Evolution Characteristics of Meteorological and Hydrological Drought in Sanjiang Plain

ZHENG Yuexin^{1,2}, WU Yanfeng^{2,3}, PAN Xiaoning⁴, QI Peng², DAI Changlei¹, ZHANG Guangxin²

(1. School of Hydraulic and Electric Power, Heilongjiang University, Harbin 150080, China; 2. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Songyuan Branch of Jilin Hydrology and Water Resources Bureau, Jilin, Jilin 138000, China)

Abstract: The standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) and runoff drought index (SDI) were used to examine spatial and temporal evolution characteristics of meteorological drought and hydrological drought in the Sanjiang Plain in the past 50 years. We collected data from 1961 to 2010 in 6 meteorological stations and 4 hydrological stations in the study area. The results showed that: (1) meteorological drought was frequent during the period 1970—1980 and period 2000—2010; the wet tendency in spring and winter occurred in most parts of Sanjiang Plain from a seasonal perspective; however, there was a non-significant dry tendency in summer and autumn in the study area; (2) in the late 1960s, 1974—1981 and 1999—2010, a longer and more intense hydrologic drought occurred; the hydrological drought intensity in the downstream was more serious than that in the upper stream; (3) hydrological drought had 1~7 months lag to meteorological drought; the time lag prolonged with the increase of the time scale. This study can provide the reference for drought management and integrated water resources management in Sanjiang Plain.

Keywords: meteorological drought; hydrological drought; annual change; seasonal variation; Sanjiang Plain

干旱通常是因长期无降水或降水偏少而造成水分收支或供求失衡形成的水分亏缺, 是全球范围内频繁发生且复杂的自然灾害, 给社会经济和人民生活带来了严重影响^[1-2]。由于研究领域的不同, 对干旱的

定义也不同, 干旱可分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱4种类型^[3]。气象干旱通常是指降水量与蒸发量的不平衡时间较长而出现的水分短缺现象, 是常见的气象灾害类型, 且居各气象灾害之

首^[4-5]。水文干旱是指径流没有达到标准值或含水层水位下降的现象。Shokoohi 等^[6]认为对水文干旱进行严格的监测、合理的分析是对流域水资源合理管理与高效利用的基础。目前学者们普遍研究气象干旱或水文干旱特征,但在三江平原地区综合气象干旱指数与水文干旱指数的研究较少^[7]。基于气象干旱指数与水文干旱指数,深入分析干旱时空演变特征,可以反映干旱的准确性,从而有效地刻画干旱^[8],为流域水资源综合管理和干旱应对提供参考。因此,综合气象干旱和水文干旱探究流域尺度的干旱演变特征很有必要,具有重要的理论和现实意义。

三江平原是我国重要的粮食主产区和湿地集中分布区,其抗旱能力弱,干旱对其社会经济,特别是农业生产影响巨大,还会造成水资源短缺、湿地面积萎缩、地下水位下降等诸多生态和环境方面的严重后果^[9-10]。由于流域修建水库、湿地排水、农业垦殖和灌溉等强烈人类活动的影响,流域水文要素发生显著改变,对湿地生态环境产生不利影响。对水文干旱进行研究不仅是填补干旱研究理论的需要,更是满足三江平原地区社会经济活动、农业生产实践和生态文明建设的要求。因此,探究三江平原干旱的时空演变特征,对保障国家粮食安全和生态安全具有重大战略意义。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

三江平原(45°01′—48°27′56″N, 130°13′—135°05′26″E)位于黑龙江省东部,北起黑龙江、南抵兴凯湖、西邻小兴安岭、东至乌苏里江,为黑龙江、松花江、乌苏里江的冲积平原,总面积 10.9 万 km²(图 1)。行政区有 21 个市(县)包括鸡西市、七台河市和佳木斯市等。气候属于温带湿润半湿润大陆性季风气候,1 月平均气温低于 -18℃,7 月平均气温 21~22℃;年降水量 500~600 mm,降水季节分配不均,主要集中于夏秋两季^[11-12]。四季分明,春季气候干燥且风力较大,夏季高温多雨,秋季多风但温差较大,冬季严寒干燥。

1.2 数据来源

气象数据为三江平原 6 个气象站近 50 a 逐日降水、气温、相对湿度、风速和日照时数等数据,数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。这些气象数据经过中国气象局严格质量控制,其实有率和正确率在 99% 以上,满足研究的精度要求。6 个国家级气象站分别为:依兰站、佳木斯站、鸡西站、富锦站、宝清站、虎林站(图 1)。鉴于挠力河是三江平原最大的流域,典型的沼泽性河和重要的农业分布区,因此选择该流域开展水文干旱研究。水文数据来源于 4

个水文站:挠力河流域支流控制站—保安水文站、挠力河上游宝清水文站、中游支流—红旗岭水文站和下游菜咀子水文站近 50 a 逐月径流数据(图 1)。以上径流序列能反映出控制流域径流变化情况,具有很好的代表性,数据资料较完整,可靠性高。

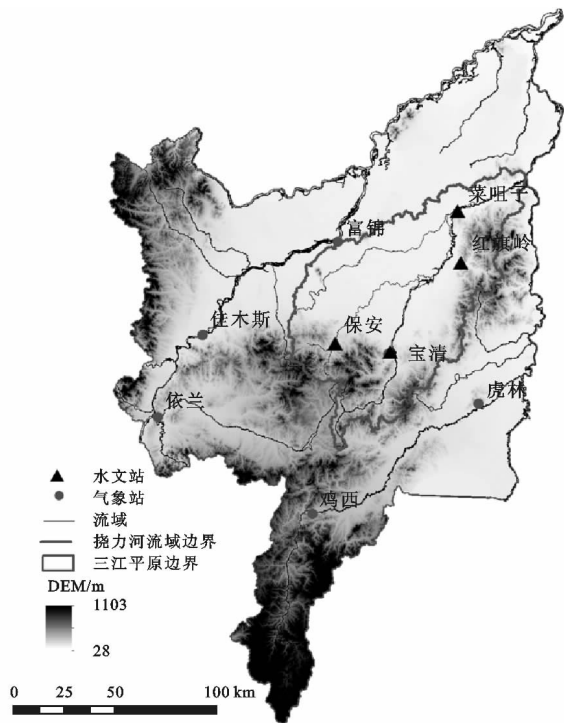


图 1 三江平原地理位置及气象、水文站点分布

1.3 研究方法

1.3.1 标准化降水蒸散指数 Vicente-Serrano 等^[13]提出了标准化降水蒸散指数(Standard Precipitation Evapo-transpiration Index, SPEI),该指数既考虑了地表水分的收支变化,又考虑到不同时间尺度下不同地区的温度、蒸散等影响因子,具有很强的适用性。SPEI 是对降水量与潜在蒸散量累积概率之后进行正态标准化后的指数^[14-15]。本研究基于逐日的气象数据,首先利用 Penman-Monteith 公式计算了潜在蒸散发^[16-17];然后计算了 3 个月尺度的 SPEI(SPEI-3)和 12 个月尺度的 SPEI(SPEI-12),分别表征季节性干旱(春季、夏季、秋季和冬季)和年尺度的干旱。参考 Vicente-Serrano 等^[13]的研究,基于 SPEI 值将气象干旱划分为 5 个等级,其中,干旱等级为特旱时 $\text{SPEI} \leq -2$, $-2 < \text{SPEI} \leq -1.5$ 时为重旱, $-1.5 < \text{SPEI} \leq -1$ 时为中旱, $-1 < \text{SPEI} \leq -0.5$ 时为轻旱, $\text{SPEI} > -0.5$ 时为无旱。

1.3.2 径流干旱指数 径流干旱指数(Streamflow Drought Index, SDI)是由 Shukla 等^[18]于 2008 年提出的水文干旱指数,该指数采用 Γ 分布概率来描述径流量的变化,SDI 以观测径流数据为基础,不仅可以计算不同时间尺度的水文干旱情况,还能很好地反映因季节变化从而导致干旱事件变化的问题^[19]。基

于SDI指数将水文干旱划分为5个等级, $SDI \geq 0$ 为无旱; $-1.0 \leq SDI < 0$ 为轻旱, $-1.5 \leq SDI < -1$ 为中旱, $-2 \leq SDI < -1.5$ 为重旱; $SDI < -2$ 为特旱。

1.3.3 干旱评价方法

(1) 干旱频次(P_i)。表示干旱发生的次数与相应等级的干旱发生频次之比,计算公式为:

$$P_i = (n/N) \times 100\% \quad (1)$$

式中: n 为站点*i*发生干旱的次数(月数); N 为数据时间序列总月数。

(2) 干旱覆盖范围(P_j)。表示研究区内干旱发生的站数与站点总数之比,计算公式为:

$$P_j = (m/M) \times 100\% \quad (2)$$

式中: m 为发生干旱的站点数; M 为研究区气象站点数之和; j 为不同年份。

(3) 干旱强度和干旱持续时间。采用游程理论^[20]得出干旱强度和干旱持续时间,取0作为游程的截断水平,当 $SPEI \leq 0$ 时表示发生了一次干旱事件,游程长度表征干旱持续时间,干旱强度是指干旱程度与干旱持续时间的比值。

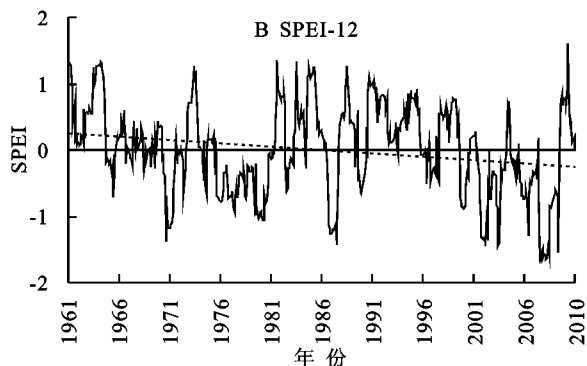
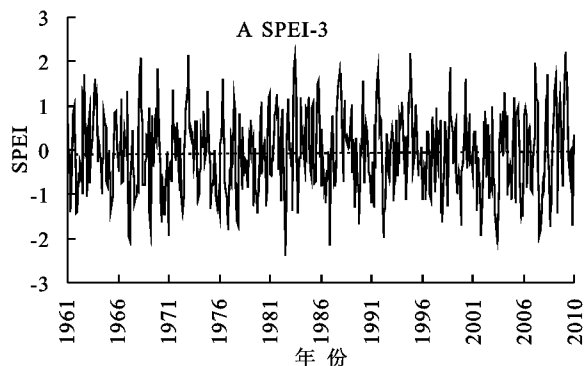


图2 1961—2010年三江平原地区SPEI-3和SPEI-12变化特征

2.1.2 SPEI季节变化特征 1961—2010年三江平原春季和冬季SPEI均呈缓慢上升趋势,夏季和秋季呈缓慢下降趋势(图3)。春季SPEI变化倾向率为0.159/10a, SPEI小于0和大于0的年份分别共有22,28a,其中,1992年和2003年春季SPEI值为-1.57, -1.58,旱涝等级为重旱(图3A);夏季, SPEI变化倾向率为0.039/10a, SPEI小于0和大于0的年份均为25a,其中,1982年SPEI值为-1.73,旱涝等级为重旱(图3B);秋季, SPEI变化倾向率为0.162/10a, SPEI小于0和大于0的年份分别共有27a和23a,其中,1977年和2007年秋季SPEI值均为-1.43,旱涝等级为中旱(图3C);冬季, SPEI变化倾向率为0.098/10a, SPEI小于0和大于0的年份分别共有28,22a,其中,1997年冬季为中旱, SPEI值分别为-1.04(图3D)。以上分析表明,春季湿润化速度最快,1982年、1992年和2003年重干旱年的发生主要是由该年春旱和夏旱影响,1997年和2007年

2 结果与分析

2.1 气象干旱时间变化特征

2.1.1 SPEI-3和SPEI-12变化特征 近50a三江平原SPEI-3指数变化区间为-2.38~2.24(图2A),变化倾向率为0.001/10a,1961—2010年SPEI-3呈微弱的递增趋势,即总体干旱化的趋势有所减缓。其中,几次干旱持续时间长且强度较大,如1970年2月—1971年4月(持续时间为15个月,干旱强度为12.55)。因此,过去50a,三江平原季节性干旱略有减弱,但减弱趋势不明显,且季节性干旱仍然较为频发。SPEI-12指数变化区间为-1.66~1.34,1961—2010年SPEI-12呈微弱的减少趋势,即总体呈干旱化的趋势特征(图2B)。三江平原干旱有明显的时段性,1970—1980年和2000—2010年气象干旱较为频繁,几乎每年都有干旱发生,其中,几次干旱持续时间长且强度较大,如1975年8月—1981年4月(持续时间为65个月,干旱强度为6.43),2001年6月—2004年4月(持续时间为34个月,干旱强度为8.25)。

的中旱主要是受该年的秋旱所致。

2.2 气象干旱事件时间变化特征

2.2.1 气象干旱时间覆盖范围变化特征 通过每个站点SPEI-12可计算分析三江平原年尺度下的干旱发生范围。三江平原近50年来站次比在0~100%波动变化,且变化程度剧烈。三江平原干旱影响范围总体较大,全域性干旱发生频繁,占43.14%,局域性干旱和无明显干旱发生较少,占总年数的7.84%,1.96%;站次比年际差异大,少有连续大范围干旱出现。近50a干旱站次比总体呈缓慢上升趋势,站次比变化趋势率为9.779/10a,20世纪80年代干旱影响范围最小,全域性干旱年份最少,变化倾向率为-2.0813/10a,在此之前,站次比呈上升趋势,1960—1975年变化倾向率为2.292/10a,1991—2010年站次比呈明显上升趋势,变化倾向率为2.73/10a;2000年以后,干旱站次比增大最显著,全域性干旱达8a,无明显干旱年数为0(表1)。

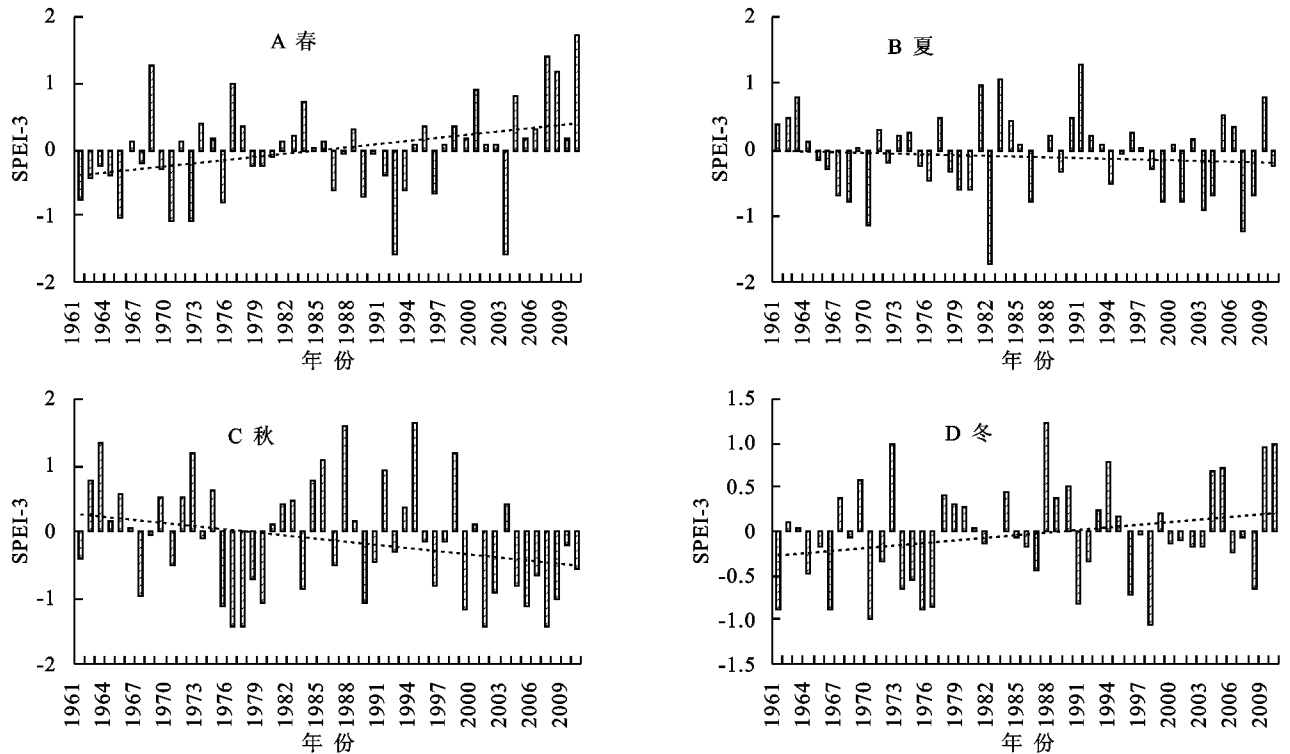


图 3 1961—2010 年三江平原地区不同季节 SPEI 变化特征

表 1 三江平原各年代不同范围干旱年数统计

年份	全域性 干旱	区域性 干旱	部分区域 性干旱	局域性 干旱	无明显 干旱
1961—1970	3	5	1	2	0
1971—1980	8	2	0	0	0
1981—1990	1	7	2	0	0
1991—2000	2	3	2	2	1
2001—2010	8	2	0	0	0

2.2.2 气象干旱强度变化特征 SPEI-3 干旱事件强度呈减小趋势,变化倾向率为 0.012/10 a。近 50 a 所有干旱事件强度的平均值为 0.547,60% 的干旱事件强度在 0.2~0.6 之间波动;其中,干旱强度最大的年份发生在 1975 年,其值为 1.093,为中度干旱事件,其次是 1967 年,其值为 0.986,为轻旱事件(图 4A)。

从 1961—2010 年区域干旱强度变化特征可以看出(图 4B),SPEI-12 干旱强度较大,1996 年以后,干旱强度有加重的趋势。1960—1974 年和 1996—2010 年,干旱强度都呈增加趋势,而在 1975—1995 年,干旱强度呈减少趋势,变化倾向率为 0.000 5。近 50 a,三江平原干旱强度的均值为 0.678,干旱强度在 0.004~2.23 之间波动;其中,干旱强度最大的年份发生在 2009 年 5 月,强度值为 2.234,其次是 2003 年 7 月,干旱强度为 2.04。

2.2.3 气象干旱持续时间变化特征 在 SPEI-3 和 SPEI-12 中,一次干旱事件开始到结束所跨越的时间定为该次事件的名称,不同时间尺度干旱事件持续时间变

化特征存在差异。季节干旱上,干旱事件持续时间整体呈显著的减少趋势,变化倾向率为 0.121/10 a,干旱事件持续时间的离散程度亦渐趋平缓,其中,1960s,1990s 和 2000s 干旱事件平均持续时间分别为 4.05,2.96,4.25 个月,1970s 最长为 5.01 个月,1980s 最短为 2.89 个月(图 4C);近 50 a 的干旱事件持续时间均值为 3.832 个月,大多数干旱事件持续时间处于 1~9 个月,其中,持续时间最长的是 1970—1971 年干旱事件,持续时间长达 15 个月。年尺度干旱上,干旱事件持续时间整体亦呈增加的趋势,其中,1970s,1990s 和 2000s 干旱事件平均持续时间分别为 7.75,5,21 个月,1980s 最长为 21.5 个月,1960s 最短为 3.83 个月,近 50 a 干旱事件平均持续时间为 10.92 个月,大多数干旱事件持续时间处于 1~10 个月,其中持续时间最长的是 1975—1983 年干旱事件,持续时间长达 69 个月,其次是 2001—2004 年、2005—2007 年、2007—2009 年干旱事件,其持续时间分别为 35,22,25 个月(图 4D)。

2.3 气象干旱空间变化特征

如图 5 所示,空间上,富锦区和虎林区,干旱较为频发,平均干旱强度呈明显的东北部强西南弱的特征,其中宝清县和佳木斯市干旱强度较弱,松阿察河的干旱强度较强。三江平原干旱较为频发,区内干旱频次达到 50% 的区域占研究区的 55%。虎林区和富锦区平均干旱持续时间较长,都达到了 11 个月以上;其中,干旱持续

月数在 11 个月以上的区域占研究区的 18.46%，在 10 个月以上的区域占研究区的 56.92%。富锦气象站平均每次气象干旱时间达到 13.38 个月，虎林气象站和佳木斯气象站平均每次气象干旱时间分别为 12.83、9.37 个月，鸡西气象站和挠力河中游的宝清气象站，平均每次气象干旱时间分别为 8.59、8.94 个月，依兰气象站平均

每次气象干旱时间达到 6.91 个月。变化趋势上，松花江区气象 SPEI-12 以减少趋势为主，减少区域占整个研究区的 63.07%，增加趋势占整个研究区的 36.93%；其中，汤旺河区、倭肯河区、牡丹江区干旱化趋势明显，挠力河区干旱有缓解趋势，但是不明显，整体由西向东干旱趋势逐渐减弱。

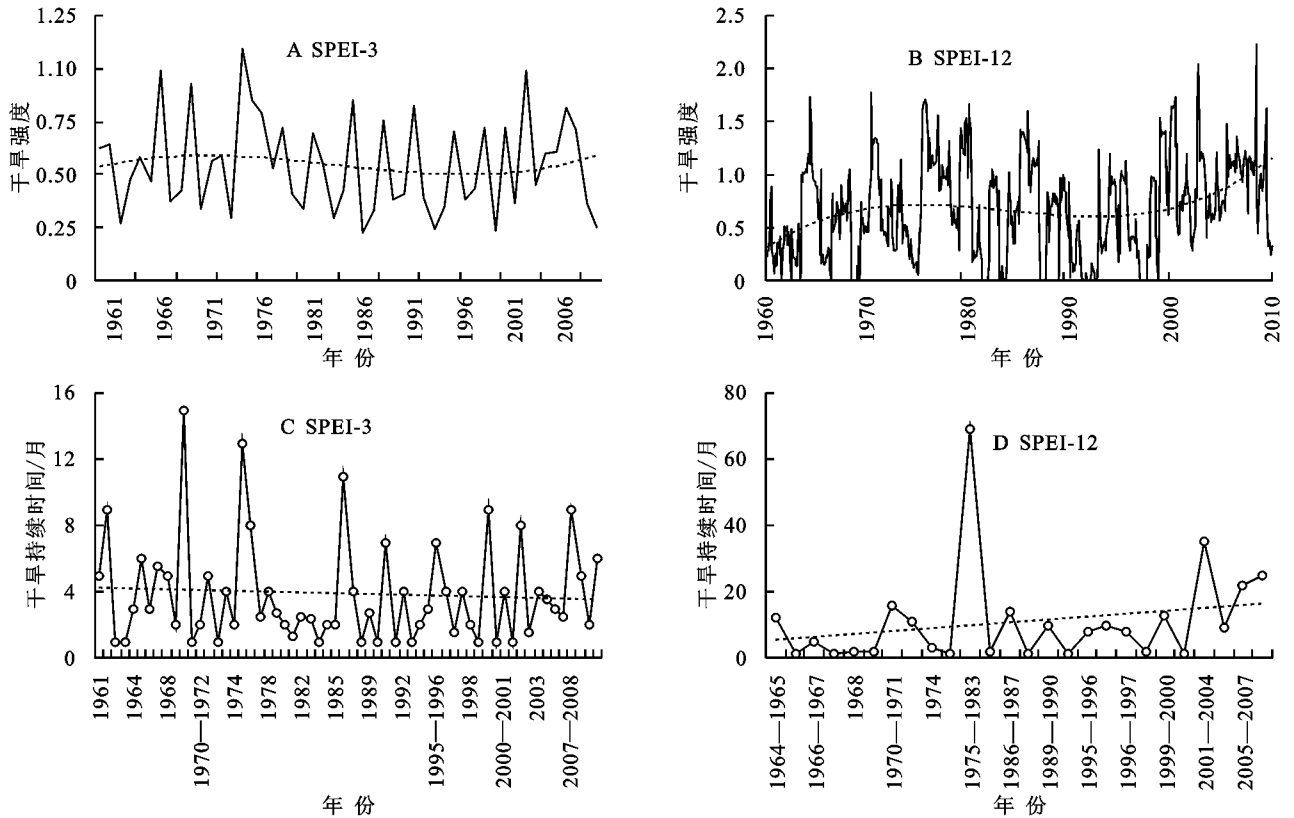


图 4 1961—2010 年三江平原 SPEI-3 和 SPEI-12 干旱持续时间与干旱强度变化特征

2.4 水文干旱时空变化特征

2.4.1 水文干旱时间变化特征 保安水文站、宝清水文站、红旗岭水文站和菜咀子水文站 SDI-12 波动频繁，总体都呈干旱化的趋势，且极端水文干旱频发。4 个水文站都在 1960s 末、1974—1981 年和 1999—2010 年发生了持续时间长且强度大的干旱。保安水文站 SDI-12 指数为 $-1.83 \sim 2.5$ ，气候倾向率为 $-0.025/10\text{ a}$ 。1975 年 10 月—1981 年 3 月发生了长达 66 个月的水文干旱，干旱强度为 67.88(图 6A)；宝清水文站 SDI-12 指数为 $-2.32 \sim 2.53$ ，气候倾向率为 $-0.021/10\text{ a}$ ，1975 年 10 月—1981 年 4 月发生了长达 67 个月的水文干旱，干旱强度为 94.89(图 6B)；红旗岭站 SDI-12 指数为 $-2.93 \sim 2.68$ ，气候倾向率为 $-0.016/10\text{ a}$ ，1992 年 8 月—2006 年 7 月发生了长达 106 个月的水文干旱，干旱强度为 106.63(图 6C)；菜咀子站 SDI-12 指数为 $-1.68 \sim 2.46$ ，气候倾向率为 $-0.023/10\text{ a}$ ，菜咀子站在 1999 年 9 月—2010 年 4 月发生了长达 127 个月干旱，干旱强度为 102.3(图 6D)，变化趋势上，菜

咀子站水文干旱在 1999 年以后最为严重，如 2000—2010 年一直处于水文干旱状态。

2.4.2 水文干旱空间演变特征 基于 4 个水文站的时间序列，对 4 个水文站不同干旱等级的干旱频次、干旱持续时间和干旱强度统计分析，揭示挠力河流域水文干旱空间演变特征。

菜咀子站水文干旱频次最多，水文干旱持续时间最长，水文干旱强度最大；红旗岭水文站总体水文干旱频次最少，水文干旱持续时间最短且干旱强度也最小。水文干旱频次上，菜咀子站干旱频次为 0.62，保安站干旱频次为 0.6，仅次于菜咀子站，宝清站干旱频次为 0.58，红旗岭站干旱频次最少，值为 0.53(图 7A)。水文干旱强度上，菜咀子站平均干旱强度为 7.54，保安站次之，平均干旱强度为 3.23，宝清站平均干旱强度为 2.24，红旗岭站平均干旱强度最小，值为 2.04(图 7B)。水文干旱持续时间上，菜咀子站平均水文干旱持续时间为 46.87 个月，其次为保安站，平均干旱持续时间为 32.81 个月，宝清站次之，平均

干旱持续时间为 22 个月,红旗岭站最短,平均干旱持续时间为 14.45 个月(图 7C)。综合分析可以看出,

挠力河流域菜咀子站水文干旱频发且严重,且挠力河下游地区水文干旱程度强于上游地区。

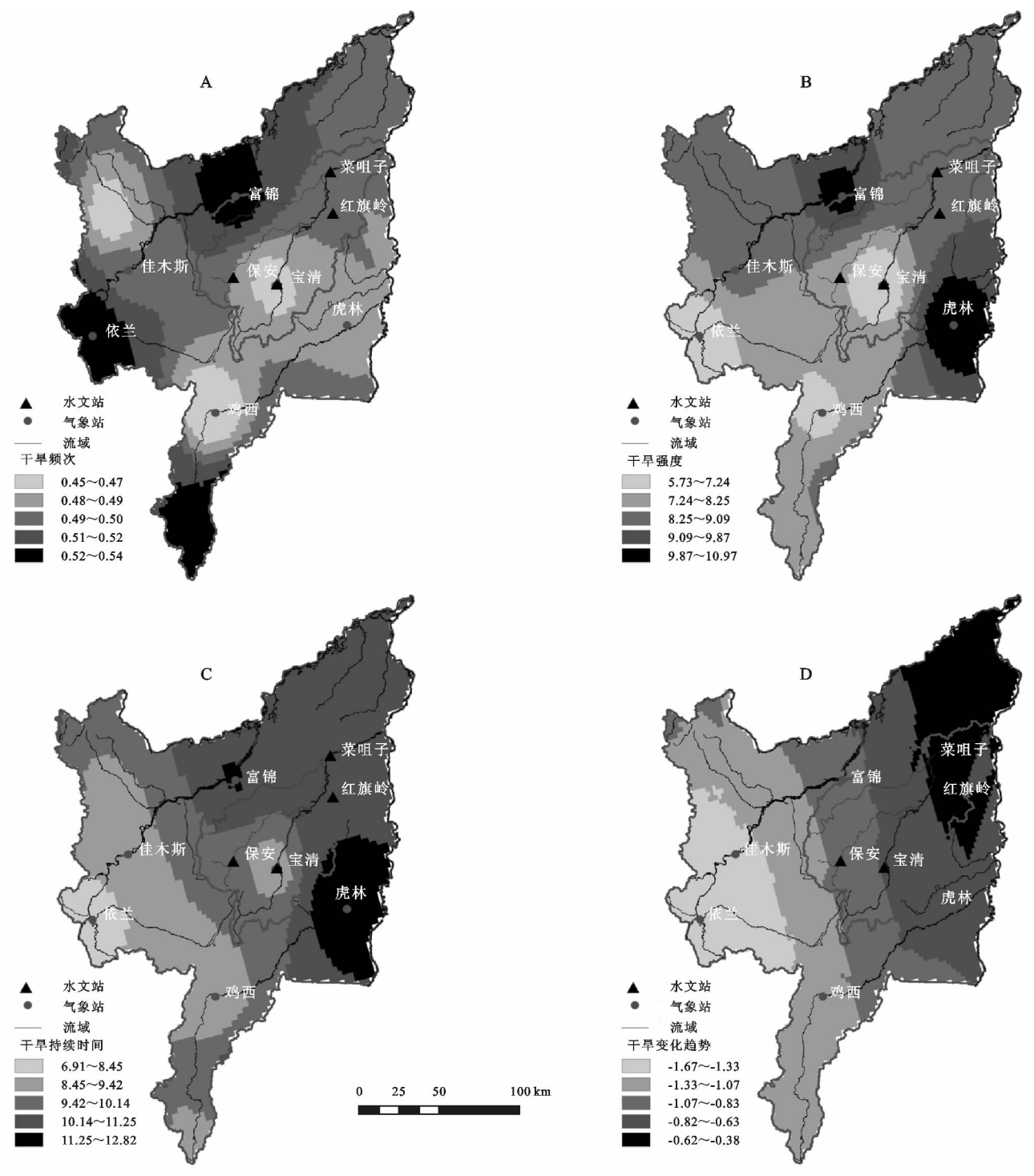


图 5 1961—2010 年三江平原干旱频次、强度、持续时间和变化趋势的空间分布

2.5 气象干旱与水文干旱对比分析

气象干旱的主要影响因素是降水和蒸发,随着气象干旱的发生,土壤含水量和包气带水分会逐渐消耗,地表水和地下水的补给随之减少,则会发生水文干旱。出现水文干旱时都会发生气象干旱,但当气象干旱强度小、历史短时不一定会发生水文干旱(图 8)。水文干旱的发生一般会滞后于气象干旱,且时间

尺度长的 SPEI 和 SDI 水文干旱滞后现象明显,通过分析气象干旱和水文干旱的发生时间,发现水文干旱滞后于气象干旱 1~7 个月,气象干旱是水文干旱的主要驱动因素。1971—1976 年,水文干旱少有发生,气象干旱较弱,且持续时间短、强度小;在 1976—1981 年和 1989—1991 年,水文干旱强度远大于气象干旱,但水文干旱滞后于气象干旱(图 8B)。

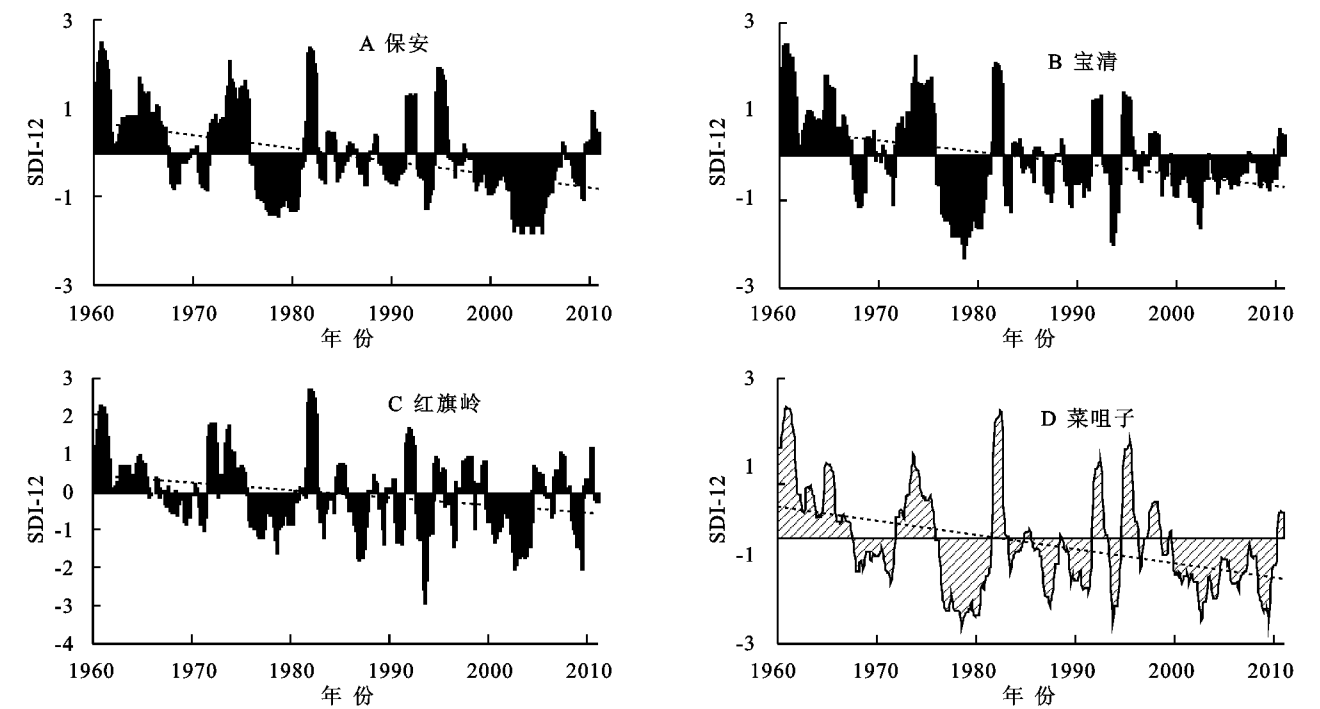


图 6 挠力河流域 SDI-12 变化特征

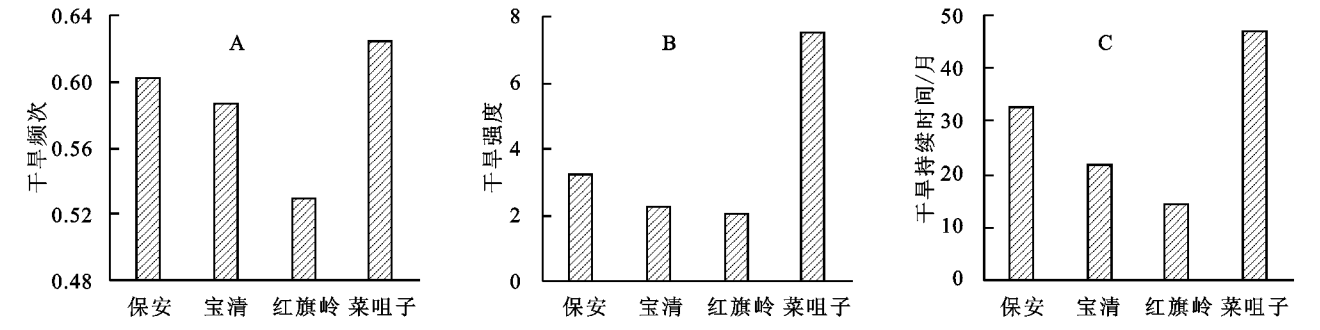


图 7 挠力河流域水文干旱频次、强度和持续时间变化特征

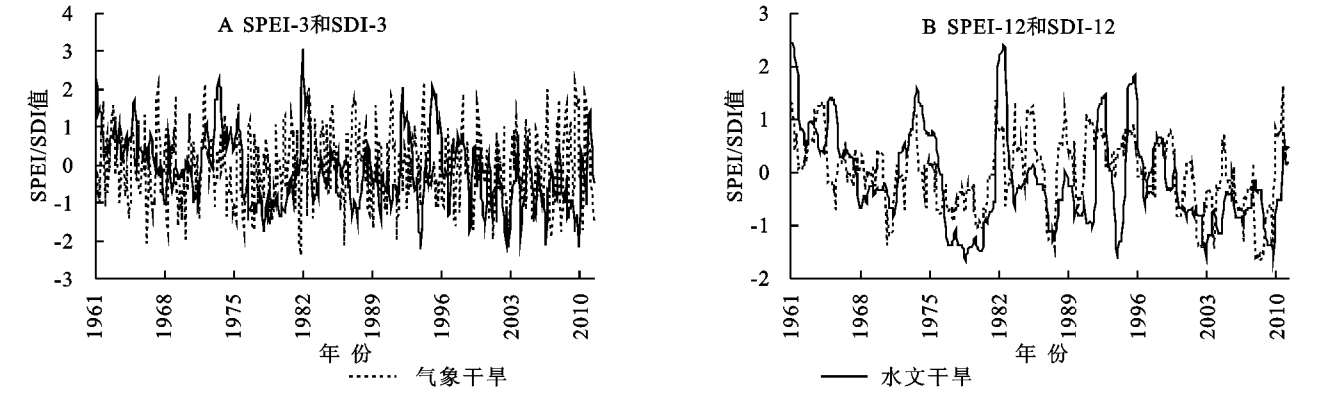


图 8 不同时间尺度 SPEI 和 SDI 值变化比较

3 讨论

本研究基于 SPEI 和 SDI 指数探究了三江平原地区近 50 a 气象和水文干旱的时空演变特征,结果表明过去 50 a 气象和水文干旱频发且总体均呈明显的加重趋势。气候干旱化的趋势主要是区域气候暖干化所导致的,水文干旱则是气候变化和人类活动共同作用的结果^[21-22]。三江平原层沼泽湿地广布,湿地具

有重要的水文调蓄能力,如调蓄洪水和维持基流等,在维持区域生态安全和水安全等方面有重要作用^[23]。但自 20 世纪 50 年代以来,人类开始对三江平原进行了过度的开发和破坏,使得湿地面积萎缩、数量较少、破碎化加剧且生态水文功能退化甚至丧失,引起了一系列的生态环境问题,表现为气候干旱化、地下水位下降、土壤退化和动植物资源减少等^[24-25]。
随着三江平原水利工程的不断修建和河道取水

量的增加,减少了河道径流量,直接加剧了水文干旱^[26-27]。不仅如此,大规模的农业开发、城市扩展、路建设和工业发展使三江平原下垫面性质发生了巨大变化。比如仅 1980—2010 年三江平原沼泽地面积和草地面积分别减少了 59.1%,15.2%,而水田面积增幅达 610%,农田已取代湿地而成为现在三江平原的主要景观类型^[28]。下垫面性质的变化,会影响地表水热通量,进而改变产汇流过程,改变水循环的空间格局,加速水循环要素时空分异的复杂性和不确定性,最终导致水资源供需关系发生变化^[29]。随着三江平原地区干旱化的不断加剧,就需要综合水资源管理和调控,既要维持合理的湿地水文情势,保证湿地生态安全,也要满足农业灌溉的需要,保证农业安全。因此,一方面,有必要从农业、水库蓄水和城市用水等方面研究人类活动对水文干旱的干扰程度,定量区分水文干旱演变的驱动因素,提高水文干旱预报和预测精度,对区域干旱应对和水资源管理提供参考。另一方面,在区域干旱加剧的情境下,基于精细的干旱预测研究,如何精细计算和预测流域水资源可利用量及需求量(社会经济需水、生活需水、农业需水和湿地生态需水)的变化趋势,分析流域水资源供需平衡状况,提高水资源综合利用率,提出流域湿地多水源优化配置与调控方案,实现多水源在社会经济系统和湿地生态系统之间的优化配置,这需要进一步探究。

4 结论

(1) 1970—1980 年和 2000—2010 年气象干旱较为频繁,从季节上看,大部分地区春季和冬季有变湿的趋势,而夏和秋两季有变干的趋势,但趋势均不显著。平均干旱强度呈明显的东北部强西南弱,三江平原春旱和冬旱影响范围逐渐减小,夏旱和秋旱影响范围呈现扩大趋势。

(2) 1960s 末、1974—1981 年和 1999—2010 年发生了持续时间长且强度大的水文干旱。挠力河流域菜咀子站水文干旱频发且严重,且挠力河下游地区水文干旱程度强于上游地区。

(3) 水文干旱滞后于气象干旱 1~7 个月。且时间尺度长的 SPEI 和 SDI 其水文干旱滞后现象明显,气象干旱是水文干旱的主要影响因素。

参考文献:

- [1] Turco M, Jerez S, Doblasreyes F J, et al. Skilful forecasting of global fire activity using seasonal climate predictions[J]. *Nature Communications*, 2018,9(1):2718-2719.
- [2] Schwalm C R, Anderegg W R L, Michalak A M, et al. Global patterns of drought recovery[J]. *Nature*, 2017,

548(7666):202-205.

- [3] 冯波,章光新,李峰平.松花江流域季节性气象干旱特征及风险区划研究[J]. *地理科学*, 2016,36(3):466-474.
- [4] 安莉娟,任福民,李韵婕,等.近 50 年华北区域性气象干旱事件的特征分析[J]. *气象*, 2014,40(9):1097-1105.
- [5] 何福力,胡彩虹,王纪军,等.基于标准化降水、径流指数的黄河流域近 50 年气象水文干旱演变分析[J]. *地理与地理信息科学*, 2015,31(3):69-75.
- [6] Shokooi A, Morovati R. Basinwide comparison of RDI and SPI within an IWRM Framework [J]. *Water Resources Management*, 2015,29(6):2011-2026.
- [7] 王孟和,何桂芳,徐建辉,等.基于 GIS 的安徽省江淮分水岭区域气象干旱研究[J]. *水土保持研究*, 2018,25(4):162-167.
- [8] 蒋忆文,张喜凤,杨礼箫,等.黑河上游气象与水文干旱指数时空变化特征对比分析[J]. *资源科学*, 2014,36(9):1842-1851.
- [9] 刘吉平,赵丹丹,田学智,等.1954—2010 年三江平原土地利用景观格局动态变化及驱动力[J]. *生态学报*, 2014,34(12):3234-3244.
- [10] 徐羽,许有鹏,吴艳飞,等.近 50 年重庆市气象干旱时空分布特征研究[J]. *水土保持研究*, 2016,23(6):363-368.
- [11] 康蕾,张红旗.我国五大粮食主产区农业干旱态势综合研究[J]. *中国生态农业学报*, 2014,22(8):928-937.
- [12] 邹立尧,国世友,牛宁.三江平原 1960—2004 年农业气候环境年代际变化[J]. *地球科学进展*, 2010,25(8):844-850.
- [13] Vicente-Serrano S M, Beguería, Santiago, et al. A multi-scalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index[J]. *Journal of Climate*, 2010,23(7):1696-1718.
- [14] Hong X J, Guo S L, Zhou Y L, et al. Uncertainties in assessing hydrological drought using Streamflow Drought Index for the upper Yangtze River Basin[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2014,29(4):1235-1247.
- [15] Li Y, He D, Hu J, et al. Variability of extreme precipitation over Yunnan Province, China 1960—2012[J]. *International Journal of Climatology*, 2015, 35(2):245-258.
- [16] 李红霞,张永强,张新华,等.遥感 Penman-Monteith 模型对区域蒸散发的估算[J]. *武汉大学学报:工学版*, 2011,44(4):457-461.
- [17] 王海波,马明国.基于遥感和 Penman-Monteith 模型的内陆河流域不同生态系统蒸散发估算[J]. *生态学报*, 2014,34(19):5617-5626.
- [18] Shukla S, Wood A W. Use of a standardized runoff index for characterizing hydrologic drought [J]. *Geophysical Research Letters*, 2008,35(2):41-46.

沛;枯水年,土壤含水量低值区从西南向东部延伸,土壤干旱化严重;其中,不同年份的东乌珠穆沁旗中西部、西乌珠穆沁旗西部、锡林浩特市、阿巴嘎旗北部和太仆寺旗土壤含水量变化幅度明显高于其他区域。

(2) 在研究区植被生长季,4—5 月份的土壤含水量变化幅度不大;6—7 月份的土壤含水量随着降水的增减而增减;在 8 月份,土壤含水量基本达到生长季最低值;9 月份土壤含水量有回升趋势。

(3) 研究区土壤含水量与降水、水汽压和相对湿度呈正相关关系($p<0.01$),与气温呈负相关关系($p<0.01$),与大气压、风速呈负相关,但没有明显的相关性($p>0.05$)。

(4) 研究区土壤干旱化程度严重,主要以中度干旱为主,无干旱和轻度干旱适中,重度干旱面积最小。以锡林郭勒盟平水年的干旱化程度状况图为标准,在丰水年,中度干旱面积明显减少,转化为无干旱和轻度干旱区;在枯水年,中度干旱面积明显增加,无干旱和轻度干旱地区明显缩减。所分析的丰、平、枯 3 个年份,苏尼特右旗、二连浩特、苏尼特左旗、阿巴嘎旗、镶黄旗长期处于中度干旱状态;东乌珠穆沁旗东部、西乌珠穆沁旗东部、多伦县大部分时间无旱情发生。

参考文献:

[1] 薛天翼,白建军. 基于 TVDI 和气象数据的陕西省春季旱情时空分析[J]. 水土保持研究,2017,24(4):240-246.
[2] 张巧凤,刘桂香,于红博,等. 锡林郭勒草原土壤含水量

遥感反演模型及干旱监测[J]. 草业学报,2017,26(11): 1-11.
[3] 李杉,艾丽坤. 中美半干旱区地表能量通量变化特征比较[J]. 高原气象,2014,33(5):1262-1271.
[4] 王利民,刘佳,邓辉,等. 我国农业干旱遥感监测的现状与展望[J]. 中国农业资源与区划,2008,29(6):4-8.
[5] 张岩,朱岩,张建军,等. 林地土壤水分模型 SWUF 在晋西黄土高原的适用性[J]. 林业科学,2012,48(5):8-14.
[6] Neale C M U, Geli H M E, Kustas W P, et al. Soil water content estimation using a remote sensing based hybrid evapotranspiration modeling approach [J]. Advances in Water Resources, 2012,50:152-161.
[7] Zhao G, Wang H, Li J, et al. Study on spatial variation of soil moisture in coal mining subsidence area in Mu Us Sandy Land[J]. Asian Agricultural Research, 2018,10(3):66-70.
[8] 李政海,鲍雅静,王海梅,等. 锡林郭勒草原荒漠化状况及原因分析[J]. 生态环境,2008,17(6):2312-2318.
[9] 李相,丁建丽,黄帅,等. 实测高光谱和 HSI 影像的区域土壤含水量遥感监测研究[J]. 土壤,2016,48(5):1032-1041.
[10] 佟斯琴,张继权,哈斯马,等. 基于 MOD16 的锡林郭勒草原 14 年蒸散发时空分布特征[J]. 中国草地学报, 2016, 38(4):83-91.
[11] 徐广才,康慕谊,李亚飞. 锡林郭勒盟土地利用变化及驱动力分析[J]. 资源科学,2011,33(4):690-697.
[12] 杜晓,王世新,周艺,魏华. 一种新的基于 MODIS 的地表含水量模型构造与验证[J]. 武汉大学学报:信息科学版,2007(3):205-207,211.

(上接第 184 页)

[19] Dai A. Drought under global warming: a review[J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2011,2(1):45-65.
[20] 张利利,周俊菊,张恒玮,等. 基于 SPI 的石羊河流域气候干湿变化及干旱事件的时空格局特征研究[J]. 生态学报,2017,37(3):996-1007.
[21] 陈琰,肖伟华,王建华,等. 基于 SPEI 的三江平原干旱时空分布特征分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2018,16(2):122-129.
[22] 李运刚,何娇楠,李雪. 基于 SPEI 和 SDI 指数的云南红河流域气象水文干旱演变分析[J]. 地理科学进展, 2016,35(6):758-767.
[23] Fossey M, Rousseau A N. Assessing the long-term hydrological services provided by wetlands under changing climate conditions: A case study approach of a

Canadian watershed[J]. Journal of Hydrology, 2016, 32(541):1287-1302.
[24] 汪爱华,张树清,张柏. 三江平原沼泽湿地景观空间格局变化[J]. 生态学报,2003,23(2):237-243.
[25] 刘吉平,马海超,赵丹丹. 三江平原孤立湿地景观空间结构[J]. 生态学报,2016,36(14):4307-4316.
[26] 吴志刚,杜春晓,王世岩. 三江平原沼泽湿地退化现状及因素分析[J]. 黑龙江水利科技,2007,35(5):119-121.
[27] 吴燕锋,章光新. 松花江区气象水文干旱演变特征[J]. 地理科学,2018,38(10):1731-1739.
[28] 关静,梁川,赵璐,等. 3 种干旱指数在宁夏中部干旱带的适用性分析[J]. 水土保持研究,2018,25(3):122-127.
[29] Shi P, Ma X, Hou Y, et al. Effects of land-use and climate change on hydrological processes in the upstream of Huai River, China[J]. Water Resources Management, 2013, 27(5):1263-1278.