

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.[Wu Yanfeng, Zhang Guangxin. Spatio-temporal Patterns of Meteorological and Hydrological Drought in the Songhuajiang Area from 1961 to 2010. Scientia Geographica Sinica, 2018, 38(10): 1731-1739.] doi: 10.13249/j.cnki.sgs.2018.10.018

# 松花江区气象水文干旱演变特征

吴燕锋<sup>1,2</sup>, 章光新<sup>1</sup>

(1.中国科学院东北地理与农业生态研究所,吉林 长春 130102; 2.中国科学院大学,北京 100049)

**摘要:**采用标准化降水蒸散指数和径流干旱指数分析了1961~2010年研究区水文干旱和气象干旱时空演变特征,并探讨了水文干旱与气象干旱的关系。结果表明:① 1961~2010年松花江区呈总体干旱化且又有明显时段性的特征,其中1967~1983年和1996~2010年气象干旱频发、覆盖范围广、持续时间长且强度大;其它时段气象干旱少有发生。其次,气象干旱空间分布差异明显,东部的平均干旱频次和强度都大于西部地区,中部(嫩江流域中下游)平均干旱持续时间最长;但在嫩江流域和黑龙江上游地区干旱略有减弱趋势。② 松花江流域和挠力河流域水文干旱呈加剧的趋势,尤其是近15 a干旱化趋势明显;挠力河流域干旱频发、强度大且持续时间很长。松花江流域水文干旱程度弱于挠力河流域,但极端水文干旱事件频发。③ 松花江区气象干旱与水文干旱密切相关,嫩江流域水文干旱滞后于气象干旱2个月,而第二松花江流域和松花江流域水文干旱滞后于气象干旱3个月;挠力河流域水文干旱与气象干旱无明显的时滞相关性。

**关键词:**气象干旱;水文干旱;标准化降水蒸散指数;径流干旱指数;松花江区

**中图分类号:**P333      **文献标识码:**A      **文章编号:**1000-0690(2018)10-1731-09

气候变化下全球干旱面积在持续增加,强度在不断增强,尤其是大尺度极端干旱也较为频发<sup>[1,2]</sup>。水文干旱作为水文极值现象,一旦发生将对区域水资源系统平衡造成不可估量的影响<sup>[3]</sup>。但是,干旱的发生往往并不是单一性的,多种干旱类型相伴发生更具有严重的致灾性<sup>[4-6]</sup>。目前学者们主要集中在基于单个干旱指标的干旱特征研究,部分学者开展了多种干旱指数对比分析研究,但是从流域尺度同时对气象干旱指数与水文干旱指数进行对比分析的研究较少<sup>[7]</sup>。基于水文干旱与气象干旱指数的时滞相关分析或对比分析,可以定量揭示两者时滞时间,并能够同时从大气与水体不同的角度对干旱进行有效的定量刻画<sup>[8-10]</sup>。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,对通过气象干旱监测预警水文干旱具有重要意义。

松花江区位于中国东北地区,占东北地区面积的61%,是中国重要的粮食主产区和商品粮生产基地,也是中国重要的湿地分布区之一,目前承担着国家千亿斤粮食增产任务的1/3,主要途径是通过大规模调配水资源在松嫩-三江平原发展灌区<sup>[11]</sup>。东北地区是中国受全球气候变化影响最显著的地区之一,气温呈明显的增加趋势,降水和径流则呈减少趋势,是中国干旱频发地区之一<sup>[12]</sup>。前人研究表明,半个世纪以来,东北地区气象干旱程度呈显著加剧、范围有明显扩大的趋势,并呈现出明显的空间分带性和季节分带性<sup>[13,14]</sup>。当前,对东北研究以气象干旱为主,对水文干旱的研究较少,仅仅集中在对水文干旱特征以及水文干旱联合概率分布特征的探讨<sup>[15]</sup>,综合气象干旱和水文干旱探究东北地区干旱时空演变特征及其变化趋势的研究鲜有报道。近年来,松花江区干旱缺水问题突

**收稿日期:**2017-09-07; **修订日期:**2017-12-30

**基金项目:**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)、国家重点研发计划(2017YFC0406003)、水利部公益性行业科研专项经费项目(201401014)资助。[Foundation: The Featured Institute Project 4, Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences (IGA-135-05), National Key Research and Development Program of China (2017YFC0406003), the Public Welfare Industry Research Funded by China's Ministry of Water Resources (201401014).]

**作者简介:**吴燕锋(1986-),男,河南沈丘人,博士研究生,主要从事湿地生态水文、水文与水资源方面研究。E-mail: wuyanfeng@iga.ac.cn

**通讯作者:**章光新,研究员。E-mail: zhgx@neigae.ac.cn

出,面临严峻形势也十分严峻,直接影响农业水资源利用效率尤其大型灌区供水保证率以及湿地水源补给<sup>[11,16]</sup>。因此,探究其干旱演变,对保障东北地区粮食安全和湿地生态安全具有重要意义。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于中国东北的松花江区,行政区划主要为黑龙江省和吉林省,部分地区跨辽宁省和内蒙古自治区(图1)。区域内流域面积达  $93.48 \times 10^4 \text{ km}^2$ 。全区按照水资源分区包括8个二级区,分别为嫩江、第二松花江、松花江干流、额尔古纳河、黑龙江干流(中国境内,下同)、乌苏里江、绥芬河、图们江<sup>[17]</sup>。根据《2016年松辽流域水资源公报》<sup>①</sup>,松花江区的水资源总量为1278.75亿 $\text{m}^3$ ,地表水资源总量为1496.98亿 $\text{m}^3$ ,地下水资源量(与地表水不重复)为205.20亿 $\text{m}^3$ 。松花江区冬季寒冷漫长,夏季炎热多雨,春季干燥多风,秋季很短,年内温差较大,1960~2010年平均温度约为4.51℃,降水量为551 mm,东南部山区降水可达640~820 mm,西部地区仅240~380 mm。受日照、风速、气温等因素的影响,蒸发量由南向北递减。多年平均蒸发量为517.65~927.93 mm。

### 1.2 数据来源

气象数据为松花江区65个气象站1961~2010

年逐日降水、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地质量控制,数据的实有率和正确率在99%以上,满足研究的精度要求。鉴于松花江区国际河流较多,数据难以获取,本研究选取典型的松花江流域和挠力河流域开展水文干旱研究。水文数据来源于4个水文站:嫩江流域入松花江干流的控制站——大赉水文站1961~2010年逐月径流数据;第二松花江流域入松花江干流的控制站——扶余水文站1961~2010年逐月径流数据;松花江干流控制站——佳木斯水文站1961~2009年逐月径流数据;挠力河入乌苏里江控制站——菜咀子1961~2010年逐月径流数据。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。65个气象站和4个水文站点地理位置如图1所示。

### 1.3 研究方法

#### 1.3.1 标准化降水蒸散指数

Vicente-Serrano 等在标准化降水指数(Standard Precipitation Index, SPI)的基础上提出标准化降水蒸散指数(Standard Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI),该指数具有SPI指数多时间尺度特征,并考虑了温度变化的影响,表征气象干旱化趋势,因此在许多国家和地区得到了广泛应用<sup>[5]</sup>。

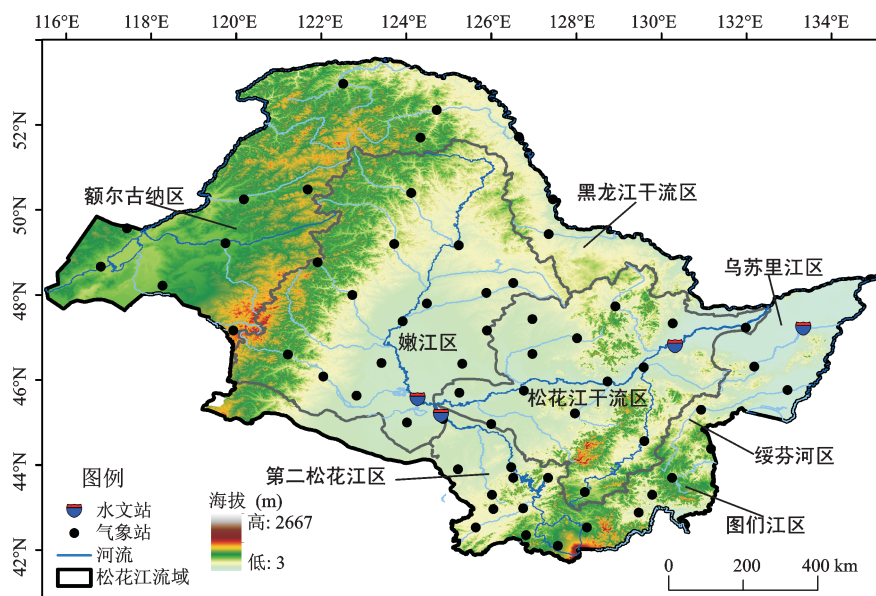


图1 松花江区地理位置及气象、水文站点分布

Fig.1 Location of gauge stations and meteorological stations of the Songhua River Area in Northeast China

① 水利部松辽水利委员会. 2016年松辽流域水资源公报. 2016.

SPEI 指数与东北地区干旱灾情数据和土壤水分监测值均具有极度的关联性,因此其在东北地区干旱预测和定量化研究中具有较好的适用性<sup>[18]</sup>。本文首先采用彭曼-孟蒂斯法计算逐日潜在蒸散量;然后计算逐月的潜在蒸散量以及降水与蒸散量的差值,构建不同时间尺度的累积序列;最后采用 Loglogistic 分布对数据序列进行拟合,并对序列进行标准化转化,获得不同时间尺度的 SPEI 指数。根据中国气象局制定的 SPEI 干旱等级划分标准对流域气象干旱等级进行划分: $SPEI > -0.5$  为无旱; $-1 < SPEI \leq -0.5$  为轻旱; $-0.5 < SPEI \leq -1$  为中旱; $-2 < SPEI \leq -1.5$  为重旱; $SPEI \leq -2$  为特旱。

### 1.3.2 径流干旱指数

径流干旱指数 (Streamflow Drought Index, SDI) 采用  $T$  分布概率来描述径流量的变化,对呈偏态概率分布的径流量进行正态标准化处理,最终用标准化径流累计频率分布来划分干旱等级。SDI 以观测径流数据为基础,可以计算不同时间尺度的水文干旱情况,也能反映由于季节变化引起的滞后而导致干旱事件变化的情况,在国际上应用广泛<sup>[6]</sup>。根据 SDI 指数,可将水文干旱划分为 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, $-1 \leq SDI < -1.5$  为重旱; $SDI < -2$  为特旱。Fleig<sup>[19]</sup>认为 12 个月尺度的干旱指数比较小尺度的干旱指数更能表现出干旱的演变特征,尤其是水文干旱的盈亏特征,故本研究采用 12 个月尺度的 SPEI 指数 (SPEI-12) 和 SDI 指数 (SDI-12) 探究松花江区气象和水文干旱的时空演变特征,并进一步分析水文干旱对气象干旱的响应。

### 1.3.3 干旱指标

本研究采用干旱频次、干旱覆盖范围、干旱强度和持续时间等指标定量表征和评价干旱时空演变特征<sup>[8-10,18]</sup>。采用世界气象组织建议的非参数 Mann-Kendall 趋势检验分析法研究干旱指标的变化趋势<sup>[12,13]</sup>。

## 2 结果与分析

### 2.1 松花江区气象干旱时空演变特征

#### 2.1.1 气象干旱的时间变化特征

1961~2010 年 SPEI-12 较为频繁的在 0 值上下波动,总体呈干旱化趋势(图 2)。松花江区干旱有明显的时段性,1967~1983 年和 1996~2010 年气象干旱较为频繁,几乎每年都有干旱发生;其中,几次

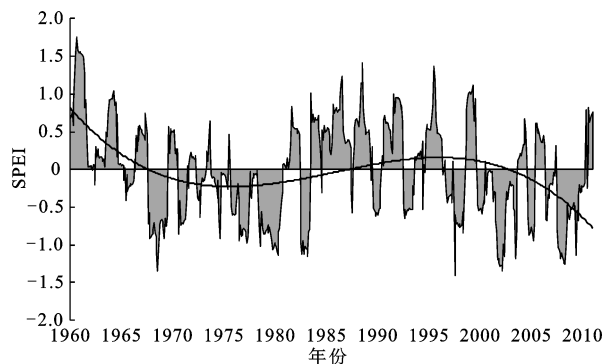


图 2 1961~2010 年松花江区 SPEI-12 时间变化特征

Fig.2 Temporal variation of SPEI-12 series in the Songhua River Area from 1961 to 2010

干旱持续时间长且强度较大,如 1967 年 9 月~1969 年 8 月(持续时间为 24 个月,干旱强度为 14.75)、1975 年 4 月~1980 年 9 月(持续时间为 66 个月,干旱强度为 35.11)、2001 年 4 月~2003 年 8 月(持续时间为 29 个月,干旱强度为 17.13)和 2007 年 6 月~2010 年 3 月(持续时间为 34 个月,干旱强度为 19.65)。

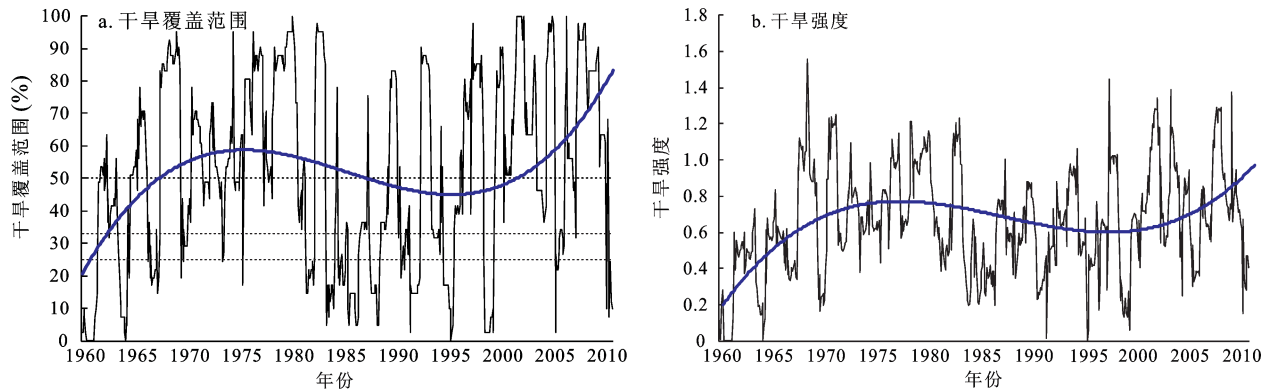
过去 60 a,松花江区干旱影响较为严重,流域干旱覆盖范围较广,干旱强度较大,1996 年以后,干旱覆盖范围有继续扩大的趋势,干旱强度有加重的趋势。三次多项式拟合表明,1960~1974 年和 1996~2010 年,干旱覆盖范围和干旱强度都呈增加趋势,而在 1975~1995 年,干旱覆盖范围和干旱强度呈减少趋势。此外,该流域多为全域性干旱,过去 60 a 全域性干旱占 57.35%,区域性干旱站 20.69%,部分区域性干旱占 7.08%,局域性干旱占 14.88%(图 3)。

#### 2.1.2 气象干旱的空间变化特征

松花江区干旱较为频发,区内干旱频次达到 50%的区域占研究区的 55%(图 4a)。其中,嫩江流域和黑龙江流域的上游地区干旱发生较少,而在松花江干流区、第二松花江流域、额尔古纳区、绥芬河区 and 图们江区,干旱较为频发。平均干旱强度呈明显的东强西弱的特征,其中黑龙江上游地区、额尔古纳区、嫩江的右岸区域、松花江干流的中游地区的中部和挠力河上游干旱强度较弱,嫩江流域的左岸地区、松花江下游地区、挠力河下游地区和第二松花江流域的上游地区干旱强度较强(图 4b)。

嫩江中游地区和第二松花江流域的上游地区平均干旱持续时间较长,都达到了 12 个月以上;其中,干旱持续月数在 12 个月以上的区域占研究区的





a 图中3条虚线自下而上分别代表局域性干旱(25%),区域性干旱(33%)和全域性干旱(50%)的分界线

图3 1961~2010年松花江区气象干旱覆盖范围(a)和干旱强度(b)的时间变化特征

Fig.3 Temporal variation of meteorological drought coverage (a) and intensities (b) in the Songhua River Area from 1961 to 2010

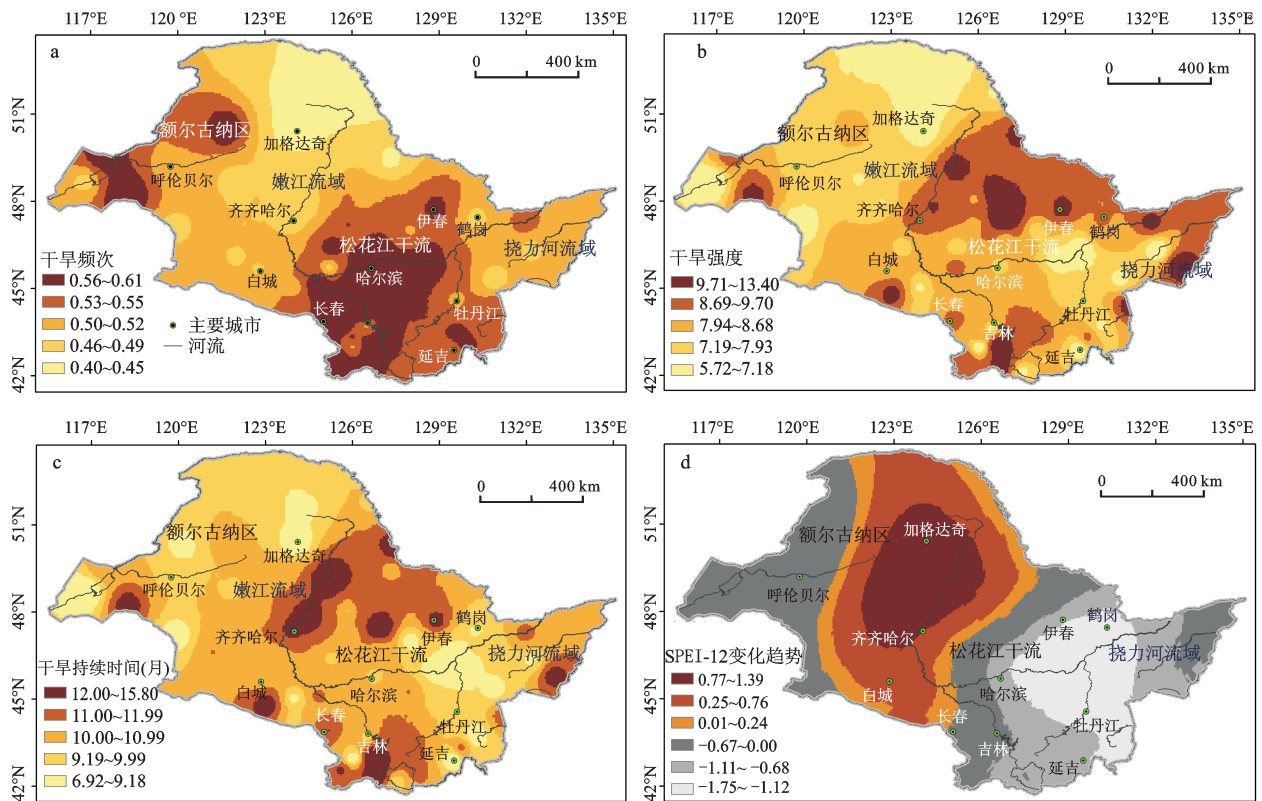


图4 松花江区干旱频次(a)、强度(b)、持续时间(c)和变化趋势(d)的空间分布特征

Fig.4 Spatial variation of meteorological drought frequency(a), intensities(b), durations(c) and change trend(d) in the Songhua River Area

18.46%,在10个月以上的区域占研究区的56.92%(图4c)。第二松花江流域的上游地区的桦甸气象站,平均每次气象干旱时间达到15.78个月,嫩江中游的嫩江和齐齐哈尔气象站平均每次气象干旱时间分别为14.45和12.59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%(图4d);其中,松花江干流区、乌苏里江区、绥芬河区 and 图们江区干旱化趋势明显,嫩江区和黑龙江流域上游干旱有缓解趋势,但是不明显。

## 2.2 松花江区水文干旱演变特征

### 2.2.1 径流干旱指数的时间变化特征

4个水文站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(图5)。大赉和佳木

斯水文站都在20世纪60年代末、1974~1981年和1999~2010年发生了持续时间长、强度大的干旱。如大赉站在1999年10月~2003年8月和2004年9月~2010年12月分别发生了长达47和76个月的水文干旱,干旱强度分别为58.62和73.78;扶余站在1999年11月~2005年6月和2007年6月~2010年5月发生了长达68和36个月,干旱强度分别为52.07和12.05。变化趋势上,大赉、扶余和佳木斯的SDI都呈微弱的减少趋势,气候倾向率分别为 $-0.017/10a$ 、 $-0.012/10a$ 、 $-0.022/10a$ 和 $-0.024/10a$ 。大赉和佳木斯的水文干旱有明显的时段特征,在1983~1995年为干旱少发期,水文干旱少发且强度小、持续时间较短,其他时段为干旱频发期。扶余站水文干旱频发,但间隔时间较短。菜嘴子站水文干旱在1999年以后最为严重,如2000~2010年一直处于水文干旱状态(图5d)。

### 2.2.2 水文干旱特征

基于4个水文站SDI-12月时间序列(图6),对3个水文站不同干旱等级的干旱频次、干旱强度和干旱持续时间统计分析。可以看出,挠力河流域干旱最为频发,且平均干旱持续时间最长、平均干旱强度最大;其中,挠力河流域轻旱最为频发,其

次是中旱,重旱次之,无特旱发生。松花江流域中,大赉站干旱频次最多,其中轻旱、重旱和重旱发生频次也最多;扶余站轻旱、中旱和重旱的频次仅次于大赉站,但是特旱频次最多;佳木斯站总体水文干旱频次最少,且各等级干旱频次也最少。干旱持续时间上,扶余站平均水文干旱持续时间最长,佳木斯站次之,大赉站持续时间最短。干旱强度上,大赉平均干旱强度最大,佳木斯次之,扶余干旱强度最小。综合分析可以看出,挠力河流域水文干旱频发且严重;松花江流域水文干旱程度弱于挠力河流域,且下游地区水文干旱程度弱于上游地区。

### 2.3 水文干旱与气象干旱的关系

松花江区水文干旱与气象干旱的历时和强度之间具有相关性,但在历时的长短和强度的大小上有所差异。1961~1973年,嫩江流域水文干旱较弱(干旱事件少发),持续时间较短且强度较小;1974~1980年,水文干旱持续发生且强度远远大于气象干旱,而气象干旱频发但强度较小;1981~1998年,水文干旱和气象干旱都少有发生,两者持续时间相当,但水文干旱强度较弱;1999~2010年,水文和气象干旱频发且强度之大,水文干旱强度与气象干

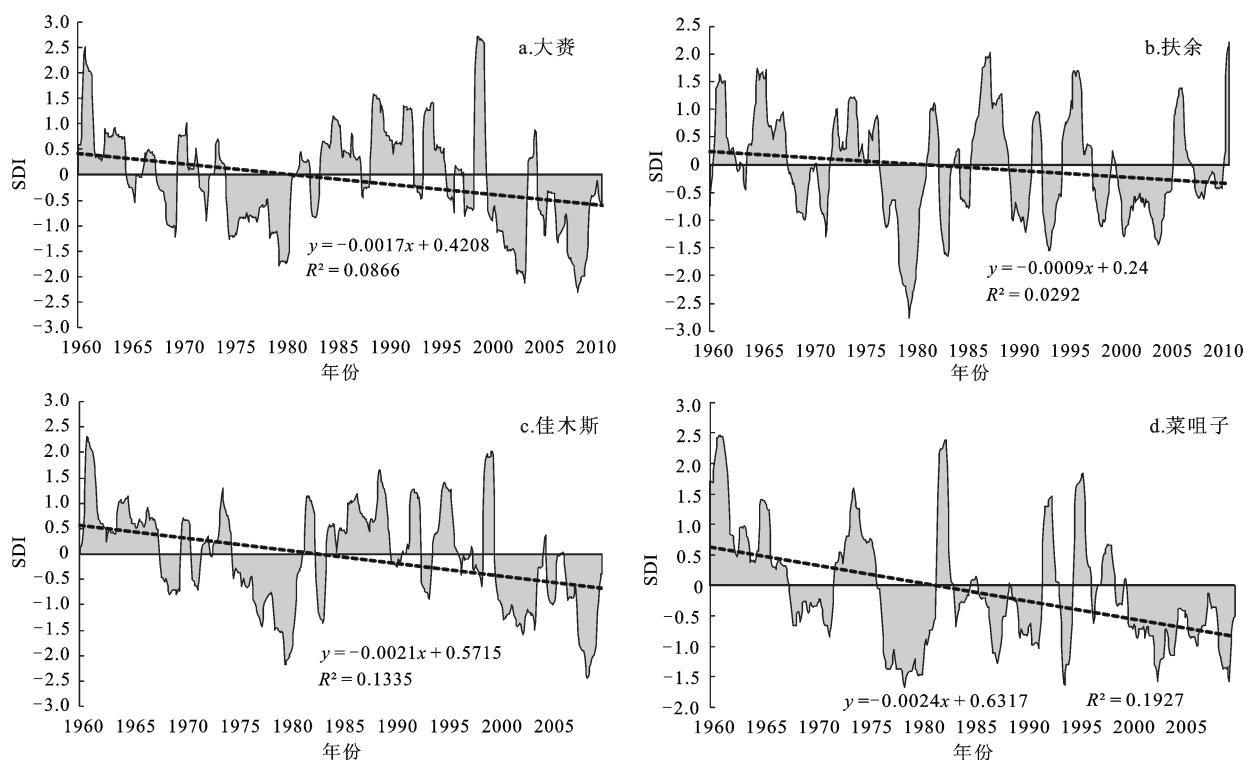


图5 1961~2010年松花江区的SDI-12时间变化特征

Fig.5 Temporal variation of SDI-12 series in the Songhua River Area from 1961 to 2010

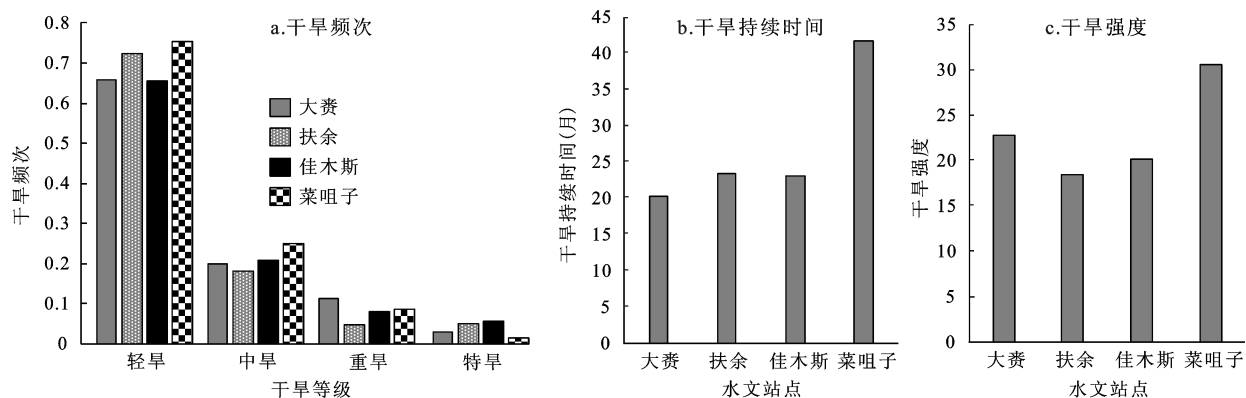


图6 松花江区水文干旱频次(a)、平均持续时间(b)和平均强度(c)

Fig.6 Drought frequency (a), average intensities (b) and durations (c) of hydrological drought in the Songhua River Area

旱强度大致相当,但水文干旱有一定的滞后性(图7a)。

第二松花江流域气象干旱和水文干旱差异明显,在过去60 a里多次出现气象干旱发生但无水文干旱的现象;其中,1976~1981年、1989~1991年和2000~2004年的水文干旱强度和持续时间大于气象干旱,其他时间段的水文干旱强度和持续时间都弱于气象干旱(图7b)。松花江流域气象干旱和水文干旱都表明流域有明显的干湿演变特征,1961~

1981年和1998~2010年,干旱逐渐加剧,1982~1998年,干旱趋于减轻(图7c);其次,松花江流域气象干旱和水文干旱的关系有明显的时段性,1961~1998年,气象干旱的频次、强度和干旱持续时间都明显大于水文干旱,在1998~2010年则反之。挠力河流域气象干旱与水文干旱在持续时间、强度和频次差异最为明显(图7d)。1964年7月~1966年5月和1973年9月~1975年6月,严重的气象干旱发生但水文干旱没有发生;1967年7月~1971年10月和

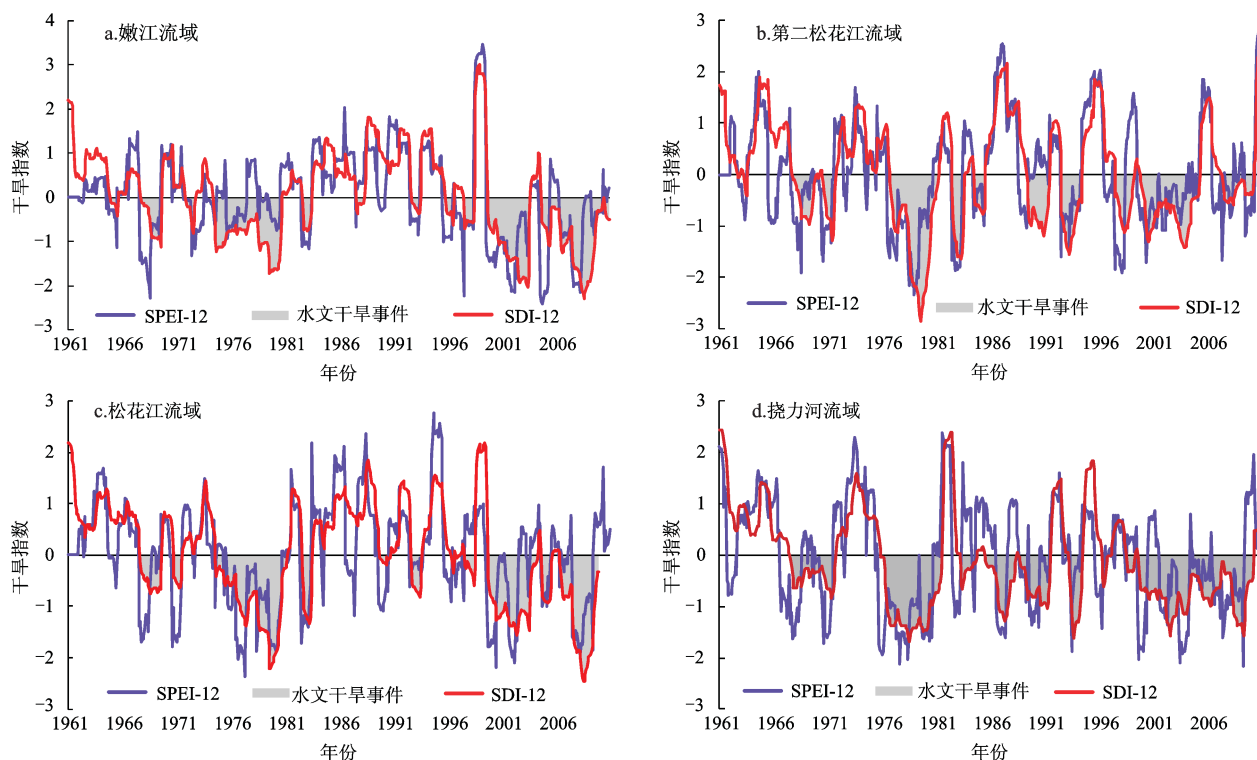


图7 1961~2010年松花江区SPEI-12和SDI-12变化的比较

Fig.7 Comparison of SPEI-12 and SDI-12 variations for the Songhua River Area

1976年12月~1981年6月,水文干旱先于气象干旱发生,晚于气象干旱结束,且强度大于气象干旱。1999年9月~2010年4月,气象干旱发生3次而水文干旱持续发生,但水文干旱强度弱于气象干旱。

总之,松花江流域水文干旱时都会有气象干旱发生,但是在气象干旱的历时较短或强度较小的情况下,气象干旱并不一定会引发水文干旱。另外,松花江流域水文干旱相对于气象干旱有一定的滞后性,如在气象干旱发生后,水文干旱才又发生,且在水文干旱事件的最大强度出现的时间都晚于气象干旱出现最大强度的时间;其次,有些时段在气象干旱逐渐减轻的情况下,水文干旱逐渐加重,甚至超过了气象干旱的严重程度。

嫩江流域、第二松花江流域、松花江流域和挠力河流域 SPEI-12 和 SDI-12 的相关系数分别为:0.67( $P<0.01$ )、0.73( $P<0.01$ )、0.73( $P<0.01$ )和0.26( $P>0.05$ )。因此,嫩江流域、第二松花江流域和松花江流域的水文干旱与气象干旱密切相关,而挠力河流域水文干旱与气象干旱关系较弱。为探究水文干旱与气象干旱的时滞相关性,分别取滞后1个月、滞后2个月……48个月作为时间梯度,计算 SDI-12 和 SPEI-12 相关系数,取最大相关系数对应的时间梯度作为滞后时间。结果表明,嫩江流域水文干旱对气象干旱的响应在滞后2个月的时候最为敏感,而第二松花江流域和松花江干流区水文干旱对气象干旱的响应在滞后3个月的时候最为敏感,挠力河流域水文干旱对气象干旱没有明显的滞后性。

从水文干旱形成机制来看,大气环流异常导致降水减少引发气象干旱,气象干旱引起土壤含水量降低和包气带水分消耗加快,进而影响地表水和地下水的补给,诱发水文干旱<sup>[21]</sup>。1961~2010年,松花江区气温呈明显的增加趋势( $0.30^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ ),降水量呈减少趋势( $-0.30\text{ m}/10\text{a}$ ),潜在蒸散量呈明显的增加趋势( $7.32\text{ m}/10\text{a}$ ),气候变化下径流量呈减少趋势,且松花江干流减少趋势最明显<sup>[12]</sup>。因此,气候变化直接引起的径流量的减少是水文干旱频发的原因之一。其次,松嫩平原地区分布着众多湖泊泡沼泽湿地,在抵御洪水、调节径流、蓄洪防旱等方面有着其它系统所不能替代的作用,从而影响径流演变,同时在一定程度上能缓和区域气候暖化和干旱的趋势,影响气象干旱向水文干旱的转化<sup>[22,23]</sup>。人类活动也是水文干旱的驱动因素之一。人类活动通过干扰下垫面(如修建水

库、水资源调配和连通工程等),改变了水循环过程,在一定程度上改变了天然径流的时间分布规律,改变湿地生态格局和生态过程,影响水文干旱形成过程的水分收入和支出项。如挠力河上游的龙头桥水库于1998年4月开工截流,2002年8月开始蓄水,因此引起1999年9月~2010年4月气象干旱偶发而水文干旱的持续发生。第二松花江流域分布有丰满和白山等大型水库,水库对径流的调节作用推迟了水文干旱对气象干旱的响应时间。由于上游水库蓄水和中下游农业开垦和灌溉,一方面导致挠力河流域径流量明显减少甚至部分有些时段断流,加剧水文干旱;另一方面,导致下游湿地面积的大幅减少,影响湿地水文调节功能的发挥,极端水文干旱频发<sup>[16,24,16]</sup>。但是,水库不合理的调度,也会使得河流原有的生态系统得不到有效的保护,对于来水较多的年份弃水较多,水量得不到合理的利用,从而加剧下游水文干旱的发生<sup>[17]</sup>。因此,面对松花江区干旱现状,一方面要加强干旱演变特征及预测研究,为干旱应对提供理论支撑;另一方面,充分发挥区域水资源调控和跨流域调水等工程的调控作用,如水库、跨流域调水和补水工程等,合理配置水资源,减少输水量损失,降低干旱对区域农业、湿地和河流生态系统等的影响。

本研究仅仅基于12个月尺度的标准化降水蒸散指数和径流干旱指数探究了松花江区气象和水文干旱特征及两者的关系,未考虑干旱指数计算尺度对干旱特征及水文干旱对气象干旱响应的影响。其次,本研究仅仅从干旱强度、持续时间和滞后时间等角度分析了水文干旱对气象干旱的响应,未开展其中的响应机制(如临界条件、成因分析等)等方面的研究。另外,松花江区范围较大,子流域自然地理环境和人类活动对气候和水文的影响程度有空间差异性,如何定量区分气候变化(气候因子变化和湿地演变等)和人类活动(水利工程和土地利用变化等)对不同流域水文干旱的影响,这有待进一步研究。

### 3 结论

1) 1961~2010年松花江区总体呈干旱化趋势。气象干旱有明显的时段性,1967~1983年和1996~2010年气象干旱频发、覆盖范围广、持续时间长且强度大;1961~1967年和1984~1995年气象干旱鲜有发生。松花江区气象干旱空间分布差异



明显,东部的平均干旱频次和干旱强度都大于西部地区,中部(嫩江流域)平均干旱持续时间最长;其次,区域气象总体呈干旱化趋势,但在嫩江流域和黑龙江上游地区干旱略有减弱趋势。

2) 松花江区水文干旱也呈加剧的趋势,水文干旱的时段特征与气象干旱大致相同;挠力河流域水文干旱严重,干旱频发,持续时间长且强度大。松花江三个子流域干旱程度弱于挠力河流域,其中嫩江流域水文干旱强度最大且最为频发,第二松花江干旱持续时间最长,松花江下游地区干旱弱于上游两个子流域。

3) 松花江区气象干旱与水文干旱的干旱频次、持续时间和强度密切相关,嫩江流域水文干旱滞后于气象干旱2个月,而第二松花江流域和松花江流域水文干旱滞后于气象干旱3个月。挠力河流域水文干旱与气象干旱没有明显的时滞相关性。

## 参考文献(References):

- [1] Schwalm C R, Anderegg W R L, Michalak A M et al. Lobal patterns of drought recovery[J].*Nature*,2017,548(7666):202-205.
- [2] Taufik M,Torfs P J J F, ijenhoet R et al. Amplification of wildfire area burnt by hydrological drought in the humid tropics[J]. *Nature Climate Change*, 2017,7:428-431.
- [3] Prudhomme C, Iuntoli I, Robinson E L et al. Hydrological droughts in the 21st century, hotspots and uncertainties from a global multimodel ensemble experiment[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2014,111(9): 3262-3267.
- [4] He X, Wada Y, Wanders N et al. Intensification of hydrological drought in California by human water management[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017,44(4): 1777-1785.
- [5] Vicente-Serrano S M, eguería S, López-Moreno J I. Multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(7): 1696-1718.
- [6] Dai A.Drought under global warming: a review[J].*Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2011,2(1):45-65.
- [7] 吴杰峰,陈兴伟,高路.水文干旱对气象干旱的响应及其临界条件[J].*灾害学*,2017,32(1):199-204.[Wu Jiefeng, Chen Xingwei, Gao Lu. Response of hydrological drought to meteorological drought and its critical conditions.*Journal of Catastrophology*, 2017,32(1):199-204.]
- [8] 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.[He Fuli, Hu Caihong, Wang Jijun et al. Analysis of meteorological and hydrological drought in the Yellow River Basin,during the past 50 years based on SPI and SDI. *Geography and Geo-Information Sciences*,2015,31(3):69-75.]
- [9] 张建龙,王龙,杨蕊,等.盘江流域水文干旱对气象干旱的响应特征[J].*南水北调与水利科技*,2014,12(3):29-32.[Zhang Jianlong,Wang Long,Yang Rui et al. Response characteristics of hydrological drought to meteorological drought in Nanpan River Basin.*South-to North Water Transfers and Water Sciences & Technology*, 2014,12(3):29-32.]
- [10] 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.[Jiang Yiwen, Zhang Xifeng,Yang Lixiao et al. Analysis and comparison of spatial and temporal patterns of meteorological and hydrological drought indices in the Upper Reach of the Heihe River Watershed, Northwest China. *Resources Science*, 2014, 36(9):1842-1851.]
- [11] 章光新.北粮食主产区水安全与湿地生态安全保障的对策[J].*中国水利*, 2012(15):9-11.[Zhang Guangxin.Measures for securing water safety of main grain production base and wetland ecological safety in Northeast China. *China Water Resources*,2012 (15):9-11.
- [12] Li Fengping, Zhang Guangxin, Xu Yijun. Spatiotemporal variability of climate and streamflow in the Songhua River Basin, Northeast China[J]. *Journal of Hydrology*, 2014,514:53-64.
- [13] 卢洪健,莫兴国,孟德娟,等.气候变化背景下东北地区气象干旱的时空演变特征[J].*地理科学*, 2015, 35(8):1051-1059.[Lu Hongjian, Mo Xingguo, Meng Dejuan et al. Analyzing spatio-temporal patterns of meteorological drought and its responses to climate change across Northeast China. *Scientia Geographica Sinica*, 2015, 35(8):1051-1059.]
- [14] 冯波,章光新,李峰平.花江区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. [Feng Bo,Zhang Guangxin,Li fengping. Characteristics of seasonal meteorological drought characteristics of seasonal meteorological drought and risk regionalization in Songhua River Basin.*Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(3): 466-474.]
- [15] 冯波,闫佰忠,章光新.松花江区水文干旱联合概率分布特征研究[J].*节水灌溉*, 2014(5):38-42. [Feng Bo, Yan Baizhong, Zhang Guangxin.Joint probability distribution characteristics of hydrological drought in Songhua River Basin, Northeast of China. *Water Saving Irrigation*,2014(5):38-42.]
- [16] 章光新,郭跃东.嫩江中下游湿地生态水文功能及其退化机制与对策研究[J].*干旱区资源与环境*, 2008, 22(1):122-128. [Zhang Guangxin,Guo Yuedong. Study on the wetland ecological and hydrological function and their degradation mechanisms and countermeasures in the middle and lower reaches of Nenjiang River. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008,22(1):122-128.]
- [17] 何杰,张士锋,李九一.粮食增产背景下松花江区农业水资源承载力优化配置研究[J].*资源科学*, 2014, 36(9):1780-1788. [He Jie, Zhang Shifeng, Li Jiuyi. The optimal allocation of agricultural water resources carrying capacity under grain production increases in Songhuajiang. *Resources Science*, 2014,36(9): 1780-1788.]



- [18] 沈国强, 郑海峰, 雷振锋. SPEI 指数在中国东北地区干旱研究中的适用性分析[J]. 生态学报, 2017, 37(11):3787-3795. [Shen Guoqiang, Zheng Haifeng, Lei Zhenfeng. Applicability analysis of SPEI for drought research in Northeast China. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(11):3787-3795.]
- [19] Fleig A K, Tallaksen L M, Hisdal H et al. A global evaluation of streamflow drought characteristics[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2006, 10(4):535-552.
- [20] Yevjevich V M. An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts[J]. *Hydrology Papers (Colorado State University)*; 1967, 23: 25.
- [21] 裴源生, 蒋桂芹, 翟家齐. 干旱演变驱动机制理论框架及其关键问题[J]. 水科学进展, 2013, 24(3):449-456. [Pei Yuansheng, Jiang Guiqin, Zhai Jiaqi. Theoretical framework of drought evolution driving mechanism and the key problems. *Advances in Water Science*, 2013, 24(3):449-456.]
- [22] Acreman M, Holden J. How wetlands affect floods [J]. *Wetlands*, 2013, 33(5):773-786.
- [23] 董李勤, 章光新. 嫩江流域沼泽湿地景观变化及其水文驱动因素分析[J]. 水科学进展, 2013, 24(2): 177-183. [Dong Liqin, Zhang Guangxin. The dynamic evolvement and hydrological driving factors of marsh in Nenjiang River basin. *Advance in Water Science*, 2013, 24(2):177-183.]
- [24] Yao Y L, Wang L, Lv X et al. Changes in stream peak flow and regulation in Naoli river watershed as a result of wetland loss [J]. *The Scientific World Journal*, 2014, 209547.

## Spatio-temporal Patterns of Meteorological and Hydrological Drought in the Songhua River Area from 1961 to 2010

Wu Yanfeng<sup>1,2</sup>, Zhang Guangxin<sup>1</sup>

(1. *Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, Jilin, China;*

2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

**Abstract:** Climate change is likely to lead to an increased frequency and intensity of extreme weather events, including floods and droughts. To investigate spatiotemporal variation of meteorological and hydrological drought as well as the correlation between the two types of droughts, we calculated the standard precipitation evapotranspiration index and streamflow drought index for characterizing variability of drought frequency, coverage, duration and intensity in the Songhua River Area. The results indicate that: 1) Meteorological droughts exhibited an insignificant increasing trend at the annual scale from 1961 to 2010. The meteorological drought experienced higher frequency, wider coverage, longer duration and greater intensity during 1967-1983 and 1996-2010, while occurred rarely in 1961-1967 and 1984-1995. Spatial analysis showed that drought had higher frequency and greater intensity in east region than that in west region, longer duration in central region than other regions. 2) Hydrological drought also showed an increasing trend and have similar temporal-variation characteristics with meteorological droughts. The severity of hydrological drought towards more intensive in the Songhua River Basin and Naoli River Basin during the past fifty years, especially more significant during the past fifteen years. The hydrological drought experienced higher frequency, wider coverage, longer duration and greater intensity in the Naoli River Basin, while less severe in the Songhua River Basin. Therefore, it is necessary to take mitigation measures involving integrated water resources management and regulation to minimize losses caused by the increasing extremely hydrological droughts. 3) Hydrological drought has close relation with meteorological drought, which not only reflected by significant positive correlation but also indicated by 2, 3 and 3 months' lags response between them in the Nenjiang River Basin, the Songhua River Basin and the Main Stream Basin of the Songhua River, respectively. However, the hydrological drought has no significant correlation with meteorological drought as a result of intensive human activities in the Naoli River Basin.

**Key words:** meteorological drought; hydrological drought; standardized precipitation evapotranspiration index; stream flow drought index; the Songhua River Area