

汉江流域 1961~2018 年多尺度

气象干旱时空演变特征

汪琳^{1, 2} 舒章康^{1, 2} 王国庆^{1, 2} 彭涛^{3, 4} 林青霞^{3, 4} 周俊⁵¹

(1. 南京水利科学研究所, 江苏 南京 210029;

2. 水利部应对气候变化中心, 江苏 南京 210029;

3. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 443004;

4. 水资源安全保障湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430072;

5. 中国科学院国家空间科学中心, 北京 100000)

【摘要】: 干旱是一种最常见的自然灾害, 随着人类活动和气候变化的加剧, 干旱事件的发生愈发频繁, 对人类的生产和生活产生了巨大影响。基于 1961~2018 年汉江流域 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$ 格点降水资料, 选用标准化降水指数 (SPI) 定量分析了汉江流域的月尺度、季尺度、年尺度气象干旱的干旱趋势、干旱频率及干旱强度, 揭示了汉江流域气象干旱发生的时空演变特征。结果表明: (1) SPI 值能较好的反映汉江流域气象干旱变化特征, 随着时间尺度的增加, SPI 值波动幅度减小, 稳定性增强。月、季、年尺度 SPI 序列的突变年份分别为 1980、1988、1994 年, 季尺度和年尺度 SPI 序列分别表现出 2 和 4 年的显著周期性特征。(2) 汉江流域自 20 世纪 90 年代以来呈现中部地区干旱化、东部和西部地区湿润化的趋势, 干旱发生频率总体呈上升趋势, 干旱强度呈现中部高, 东西低的特征。其中丹江口水库附近区域和唐白河下游段呈显著干旱化趋势, 丹江口以上区域干旱频率最高, 干旱强度最大, 轻旱、中旱事件频发。(3) 各地区的季节性气象干旱特征具有一定差异性。丹江口以下地区秋旱趋势最显著, 唐白河地区夏旱发生频率最高, 且以轻旱、中旱事件为主, 丹江口以上地区秋旱强度最高。

【关键词】: 气象干旱 格点数据 时空演变 多尺度 汉江流域

【中图分类号】: TV121.2 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227 (2021) 07-1649-10

干旱是一种地球上空间范围广、持续时间长、对社会影响大、发生频率高的自然灾害, 人类从诞生开始就长期遭受干旱灾

作者简介: 汪琳(1998~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水文水资源. E-mail: wanglin068@foxmail.com

王国庆 E-mail: gqwang@nhri.cn

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划专项(2016YFA0601500); 国家自然科学基金项目(51779144); 重点实验室基本科研业务费基金(Y520025)

害的困扰^[1]。2014 年, IPCC 第五次评估报告指出: 干旱影响区的范围将进一步扩大^[2]。因此, 干旱研究进一步成为全球学者关心的热点问题。根据干旱评估的对象, 干旱主要分为气象干旱、水文干旱、农业干旱和社会经济干旱 4 种类型, 而气象干旱是其它几种类型干旱的源头, 故而揭示气象干旱的时空特征可为其他类型的干旱提供预警与防范^[3]。

干旱指数是一种进行干旱评估的有效方法, 通过干旱指数可以衡量干旱事件的严重程度并反映干旱事件的发生过程、干旱特征及影响^[4]。据不完全统计, 现有干旱指数多达 55 种^[5], 常用的指标有降水距平百分数(Pa), Z 指数, 标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI), 综合干旱指数 CI(Composite Index), 帕尔默干旱指数(Palmer Drought Severity Index, PDSI)^[6]。在中国区域的干旱研究中, 学者们通常对比不同干旱指数的区域适用性, 并结合区域特点对干旱指数进行选用或改进, 进而更合理的评估区域干旱状态^[7]。杨庆等^[8]对比了 7 种气象干旱指数在中国区域的适用性, 发现 SPI 和 SPEI 在湿润地区的适用性较好, 而在干旱半干旱地区的适用性较差; 李忆平等^[9]系统分析总结了气象干旱指数在中国各个区域的适用性研究, 结论表明 SPEI、CI 和 K 指数在全国大部分地区适用性较好。Feng 等^[10]基于标准地下水水位干旱指数 SGI 和标准化径流指数 SRI 提出 SRGI 指数, 同时利用交叉小波变换和相关系数方法揭示了气象干旱与水文干旱之间的联系和传播特征。受全球气候变暖的影响, 中国干旱灾害的发生愈发频繁^[11]。Xu 等^[12]基于 SPI3、RDI3 和 SPEI3 的 0.25° 网格指数对过去半个世纪以来的中国的干旱变化进行了研究, 发现严重干旱通常集中在华北平原至长江下游地区, 在干旱地区, SPI 和 RDI 比 SPEI 更合适; Chen 等^[13]采用 SPEI 指数研究了中国 1961~2012 年中国干旱特征的变化, 结果表明中国的干旱表现出明显的年代际变化, 自 20 世纪 90 年代后期以来, 中国各地的干旱变得更加频繁和严重; HongXin 等^[14]结合年尺度的径流干旱指数 SDI 研究长江上游的水文干旱情况, 发现长江上游流域抗击干旱的困难在进一步加大。关于汉江流域干旱的研究方面, 前人已经进行了许多有意义的研究, Liu 等^[15]使用 SPI 指数研究了丹江口大坝上下游的干旱空间特征, 结果表明, 汉江流域上游旱情变化较大, 下游地区从 20 世纪 90 年代旱情愈发严重; 石卫等^[16]基于 SPEI 指数分析了南水北调中线水源区的干旱特征, 发现汉江流域的降水量呈不显著下降趋势, 气温呈现显著上升趋势, 干旱趋势进一步显著; 张奇谋等^[17]预测了不同 RCP 情景下汉江流域气象干旱的变化趋势, 推断汉江流域的严重干旱有加重的趋势。

汉江作为南水北调中线工程重要水源地, 同时也是鄂北水资源配置工程的重要区域, 其旱涝变化与京津冀地区和鄂北地区的供水密不可分, 深入剖析汉江多尺度干旱时空特征对于流域水资源配置、经济规划和工农业发展具有重要意义^[18]。尽管前人针对汉江流域的气象干旱已进行了部分研究, 但是研究区域大多针对汉江上游流域, 随着气候变化和人类活动影响的加剧, 仅仅关注汉江上游流域的气象干旱趋势已经不能满足流域水资源配置和规划管理的要求, 尤其是自 2014 年丹江口水库开始作为南水北调中线工程的水源地调水以来, 汉江流域的气象干旱趋势更需要着重关注。本文将研究区域扩大至整个汉江流域, 将时间序列延长至 2018 年, 并且在月尺度、季尺度、年尺度上分别对汉江流域的气象干旱的时间和空间演变特征规律进行探讨, 以期对汉江流域水资源管理与干旱风险应对提供参考。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

汉江流域是长江最大支流, 全流域集水面积为 15.9 万 km², 地处我国南北地区水文、气候特征变化的过渡带, 属东亚副热带季风气候区, 气候较为温暖湿润。流域多年平均降水量为 700~1800mm, 多年平均气温为 14.6℃, 径流量年内分配不均, 75%的水量集中在 5~10 月, 并且年际变化较大^[19]。汉江总长度的 3/4 以上流经湖北省境内, 在湖北省的中部和长江一起, 冲积形成全国重要的粮食产区、湖北省重要的城市群——江汉平原^[20]。南水北调中线工程从位于汉江中游的丹江口水库调水之后, 汉江中下游水量大幅减少, 对湖北中部和汉江沿线地区的生产和发展以及生态环境带来重大影响^[21]。为缓解从汉江调水后的不利影响, 在湖北省的荆州市荆州区和潜江市之间, 兴建了中国现代最大的人工运河——引江济汉工程, 以长江之水补给汉江下游^[22]。

1.2 资料来源

汉江流域降水数据来自国家气象中心提供的 CN05.1 数据集(分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$), 该数据集由全国 2400 多个气象站通过距平逼近法插值生成, 数据质量良好, 被广泛应用于区域气候特征和模型性能分析^[23]。经过截取, 汉江流域共 235 个有效格点, 数据序列长度为 1961~2018 年。根据汉江流域的水资源三级区将汉江流域划分为丹江口以上、丹江口以下、唐白河 3 个水资源分区, 分别包含 143、54、38 个气象格点。汉江流域水资源分区示意图及气象格点分布如图 1 所示。

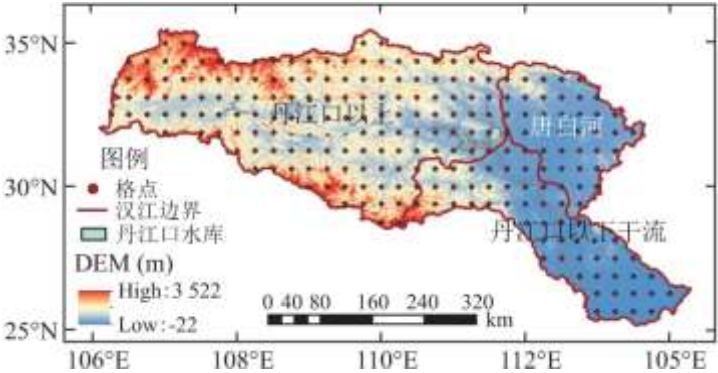


图 1 汉江流域气象格点与水资源分区概况图

1.3 研究方法

本文采用 McKee 等^[24]提出的标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI)研究汉江流域气象干旱状况。通过正态标准化处理某时段内降水量对应的分布函数之后计算标准化降水累积频率分布即可得到相应的 SPI 指数值。经过标准化处理之后的 SPI 值可以消除降水的时空分布差异, 在不同的研究尺度下均可较好的反映区域内的干旱情况, 计算公式如下:

$$SPI = S * \frac{t - (c_2 t + c_1) t + c_0}{((d_3 t + d_2) t + d_1) t + 1.0} \quad (1)$$

式中: $t = \sqrt{\ln(1/G(x))^2}$, $G(x)$ 为与 τ 函数相关的降水分布概率, 当 $G(x) > 0.5$ 时, $G(x) = 1 - G(x)$, $S = 1$; 当 $G(x) < 0.5$ 时, $S = -1$ 。上述参数取如下值: $c_0 = 2.515517$, $c_1 = 0.802853$, $c_2 = 0.010328$, $d_1 = 1.432788$, $d_2 = 0.189269$, $d_3 = 0.001308$ 。

本文参照中华人民共和国国家标准干旱等级(GB/T20481-2006)规定的干旱等级标准对 SPI 所表征的气象干旱等级进行划分(表 1), 以月尺度、季尺度、年尺度为时间研究尺度, 以 3~5 月为春季, 6~8 月为夏季, 9~11 月为秋季, 当年 12 月至次年 2 月为冬季。

表 1 干旱等级划分

SPI 值	干旱等级
(-1.0, -0.5]	轻度干旱
(-1.5, -1.0]	中度干旱
(-2.0, -1.5]	重度干旱

≥ -2.0	极端干旱
-------------	------

Mann-Kendall (M-K) 检验法是世界气象组织推荐的非参数检验方法, 已广泛应用于气象、水文等领域, 不仅可以检验时间序列的趋势性, 也可以检验序列的突变性^[25]。本文首先采用 M-K 检验法分析不同尺度 SPI 序列的突变性与趋势性; 然后以 Morlet 小波为母小波, 使用小波功率谱法^[26]分析不同尺度的 SPI 序列的周期性特征; 最后计算年尺度和季尺度的干旱趋势变化值及不同等级干旱的干旱频率值, 采用游程理论计算干旱强度, 使用克里金插值法(Kriging)反映气象干旱空间演变特征。干旱指标具体计算过程如下:

(1) 干旱趋势

干旱趋势是整个流域各个尺度 SPI 序列的变化趋势, 通过 Mann-Kendall (MK) 法计算出汉江流域年尺度和季尺度 235 个格点的 SPI 值的 M-K 检验值, 再结合克里金插值法反映到空间变化上。计算过程如下:

设定 $x_1, x_2, \dots, x_n$ 为一列时间序列的变量, n 为研究序列的长度, 定义统计量如下:

$$s = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{k=j+1}^n \text{sgn}(x_k - x_j) \quad (2)$$

其中:

$$\text{sgn}(x_k - x_j) = \begin{cases} 1 & (x_k - x_j > 0) \\ 0 & (x_k - x_j = 0) \\ -1 & (x_k - x_j < 0) \end{cases} \quad (3)$$

式中: x_k, x_j 分别为第 j, k 年对应的降水值, 且 $k > j$ 。

构造正态分布统计量 Z , 表达式如下:

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & (s > 0) \\ 0 & (s = 0) \\ \frac{s+1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & (s < 0) \end{cases} \quad (4)$$

$$\text{Var}(s_k) = n(n-1)(2n+5)/18 \quad (5)$$

在给定的 α 置信水平上, 若 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$, 则原假设被拒绝, 所研究时间序列在给定置信水平上存在显著的上升或下降趋势, 具体趋势大小计算:

$$\beta = \text{Median} \left| \frac{x_k - x_j}{k - j} \right|, \quad \forall j < k \quad (6)$$

若 $\beta > 0$, 表示序列呈上升趋势; 若 $\beta < 0$, 则表示序列呈下降趋势^[25]。

(2) 干旱频率

干旱频率是各个等级干旱事件的发生次数占研究序列长度的比例, 根据中华人民共和国国家标准干旱等级 (GB/T20481-2006) 规定的干旱等级标准对 SPI 所表征的气象干旱等级进行划分, 统计汉江流域 1961~2018 年四季、年的干旱发生状况, 求得历年、季度干旱频率:

$$P = (n/m) \times 100\% \quad (7)$$

式中: n 为实际干旱发生次数; m 为序列长度^[27]。

(3) 干旱强度

干旱强度是一场干旱事件的干旱烈度与干旱历时的比值, 表征了一场干旱事件的严重程度。首先参考相关研究^[28], 选择 0、-0.2、-0.5 作为临界点, 使用游程理论进行识别汉江流域年尺度、季尺度 SPI 序列的干旱事件起止时间及干旱特征变量。干旱历时为负游程长度, 干旱烈度为负游程的面积, 干旱强度为干旱烈度与干旱历时的比值。

2 结果与讨论

2.1 气象干旱时间演变特征

2.1.1 趋势性与突变性

汉江流域月尺度、季尺度、年尺度 SPI 值时间变化过程如图 2 所示。由图 2 可知, 不同尺度的 SPI 值对干旱的敏感程度不同, 随着时间尺度的增大, 序列波动逐渐减小。其中, 月尺度干旱指数 SPI-1 变化幅度最大, 波动最强, 随着时间尺度增加, 季尺度干旱指数 SPI-3 变化幅度逐渐减缓; 而对于年尺度干旱指数 SPI-12, 其变化幅度较小, 具有一定的稳定性。

依据中华人民共和国国家标准干旱等级 (GB/T20481-2006) 规定的干旱等级标准, 结合汉江流域不同尺度的 SPI 变化曲线, 统计各个尺度的 SPI 序列中的特旱事件发生时间, 发现与《中国气象灾害大典湖北卷》^[29]、《中国气象灾害大典陕西卷》^[30] 及各地区县志等资料中记载的特旱事件发生时间吻合度较好, 如各个尺度均识别出较为典型的汉江流域 1997、2011 年大旱。以资料记录的位于汉江中游的老河口地区为例, 资料记载^[29]老河口地区在 1994~1998 年遭遇了伏秋连旱, 1999 年遭遇了严重的夏旱, 同期累积总雨量比常年同期减少 4~6 成, 而不同尺度的 SPI 值在 1994~2002 年特旱事件发生频率较高, 与历史事件相吻合。综上, SPI 值能较好的反映汉江流域气象干旱变化特征。

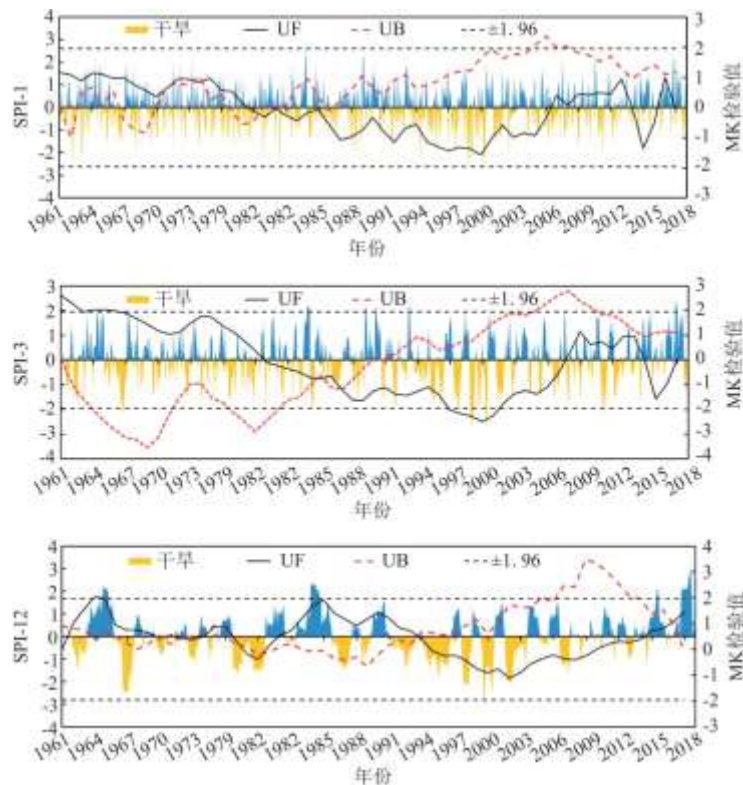


图 2 汉江流域多尺度 SPI 时间变化特征

表 2 汉江流域不同尺度特旱事件发生时间

尺度	特旱时间
月尺度	1962, 1963, 1968, 1977, 1979, 1981, 1987, 1988, 1994~2000, 2002, 2011
季尺度	1966, 1979, 1984, 1996~2000, 2011
年尺度	1966, 1967, 1997~2002, 2011

结合月、季、年尺度干旱指数变化情况(图 2), 汉江流域 SPI 值自 1961~2018 年呈现湿润-干旱-湿润的复杂周期性变化状态, 具有明显的时段性特征, 在 1962~1980 和 1990~2011 年各个尺度下汉江流域较为频繁的发生干旱, 2011 年之后整体干旱趋势稍有缓和, 但干旱现象依然会周期性的出现, 这种趋势随着尺度的增加愈发显著。由 M-K 突变检验法的结果可知(图 2), 月尺度 SPI 的突变年份在 1974、1980 年左右, 但均为不显著突变点, 1980~2000 年 UF 曲线总体呈现下降状态, 此时段内汉江流域的干旱有加剧的迹象; 季尺度的突变年份出现在 1988 年左右, 1988~2000 年内 UF 曲线呈现下降状态, 流域干旱加剧; 年尺度的突变点出现在 1994 和 2016 年附近, 1994 年之后 UF 曲线表现出下降趋势, 2016 年之后呈显著增加趋势, 说明汉江流域干旱状况先加重再逐渐缓解。各个尺度的突变点均未超过临界线, 表明汉江流域气象干旱状况突变情势并不显著。根据王润等^[31]的研究结果表明, 汉江流域从 20 世纪 80 年代的多雨期过渡到 90 年代的少雨期, 近 60 年来降水量呈不显著下降趋势, 而 SPI 值直接受降水的影响, 因此各个时间尺度的不显著突变也和汉江流域降水变化的情况较为一致, 同时, 由于不同尺度的计算差异与时间概化性导致不同尺度序列识别的突变点有所不同。

此外, 干旱强度在不同尺度的表征也存在一定的差异性, 不同尺度下的干旱状态可能在其他尺度中得到缓解或者加重, 如汉江流域 1999 年的 9 月, 其 SPI-1 为-0.8, 轻旱状态, SPI-3 为-1.5, 重旱状态, SPI-12 为-2.1, 特旱状态, 说明随着时间尺度的增加, 干旱的持续时间延长, 干旱状况加重; 另一方面, 汉江流域 1980 年 12 月的 SPI-1 为-1.8, 呈重度干旱状态, 而 SPI-3=-0.9, 中旱状态, SPI-12=0.49, 轻涝状态, 表明随着时间尺度的增加, 干旱状况在降水的影响下得到了缓解。

2.1.2 周期性

汉江流域 1961~2018 年的月、季和年尺度 SPI 值变化呈现一定的周期性特征 (图 3)。由图 3 可知, 对于月尺度干旱指数 SPI-1, 小波功率谱图中能量中心的频域尺度主要集中在 2 年, 小波方差极值在 2 年左右达到极值, 但未通过 0.05 显著性水平的检验; 而季尺度 SPI-3 的能量中心的频域尺度主要集中在 2 年, 小波方差极值也在 2 年左右达到极值, 且通过了 0.05 显著性水平的检验, 周期性显著; 年尺度 SPI-12, 能量中心的频域尺度主要集中在 4 年以上, 其中 SPI-12 值在 4 年时震荡最强烈, 周期性较为显著。由于月尺度 SPI 时间尺度较为精细, 序列波动噪声明显, 因而导致周期性变化不显著, 而季和年尺度 SPI 相对月尺度序列消除了部分噪声, 因此识别出了显著的周期性特征。

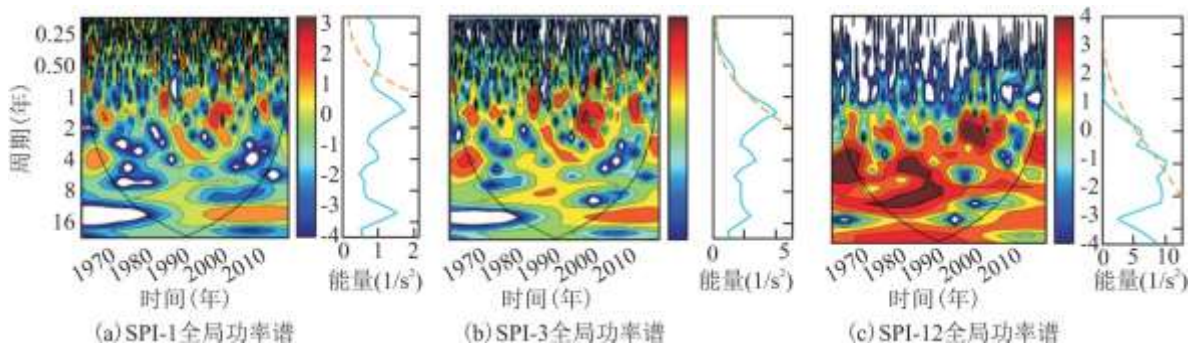


图 3 汉江流域多尺度干旱指数周期性特征

2.2 气象干旱空间演变特征

2.2.1 年尺度气象干旱空间演变特征

汉江流域年尺度气象干旱趋势、干旱频率和干旱强度空间特征如图 4 所示。汉江流域年尺度气象干旱呈现中部地区干旱化、南部和西部地区湿润化的趋势 (图 4a)。其中显著干旱化区域主要分布在丹江口水库附近区域和唐白河下游段, 显著干旱化区域占比为 20.85%; 显著湿润化地区主要分布在丹江口以上西北部和汉江东南部, 显著湿润化区域占比为 23.4%。汉江流域从上游至下游整体呈现湿润-干旱-湿润的变化趋势。

对汉江流域 235 个格点年尺度和不同季节的 SPI 时序进行统计分析, 计算汉江流域年尺度不同类型气象干旱频率分布状况 (表 3)。

由表 3 可知, 汉江流域各个区域年尺度干旱频率差异较小 (图 4b)。丹江口以上区域干旱频率最高, 为 37.42%, 以轻旱事件为主; 唐白河区域干旱频率略低于丹江口以上区域, 为 36.67%, 发生中旱事件的次数相对较多, 为 9.83%; 而丹江口以下地区干旱频率最低, 为 36.07%, 特旱事件发生频率最高, 为 7.69%。从干旱类型来看, 轻旱、中旱事件高频区在丹江口以上区域, 而重旱特旱事件高频区在丹江口以下区域, 表明丹江口以下区域虽然干旱化趋势不显著, 部分地区有湿润化趋势, 却极易发生极端干旱事件。

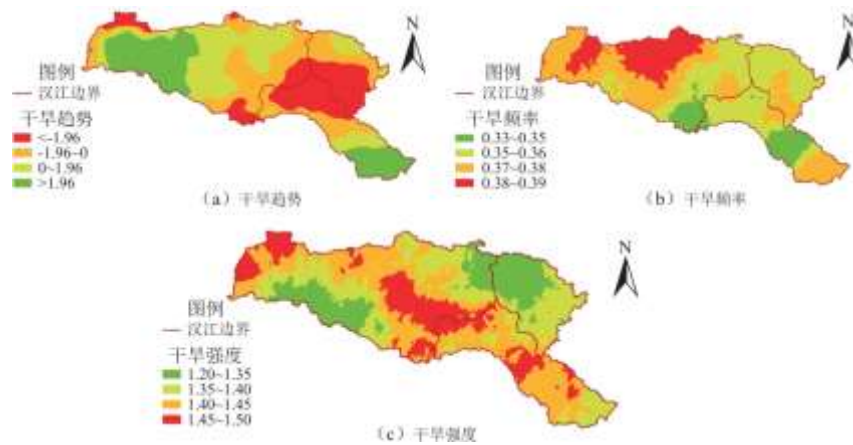


图 4 汉江流域年尺度气象干旱空间演变特征

表 3 汉江流域年尺度不同类型干旱频率(%)

水资源分区	轻旱频率	中旱频率	重旱频率	特旱频率	干旱频率
丹江口以上	16.42	9.83	3.96	7.21	37.42
丹江口以下	14.35	9.50	4.53	7.69	36.07
唐白河	16.06	9.62	4.28	6.72	36.67

汉江流域年尺度干旱强度呈现中部高、东西低的特征，流域西北至东南沿线干旱强度整体高于其他地区，具有明显地区差异性(图 4c)。丹江口以上东南地区干旱强度最高，区域最大干旱强度为 1.48, 丹江口以下区域次之，区域最大干旱强度为 1.42。干旱强度最弱的区域为丹江口以上西南地区 and 唐白河流域北部地区，区域最低干旱强度为 1.21。

2.2.2 季尺度气象干旱空间演变特征

汉江流域四季的气象干旱空间特征和各个类型的干旱事件频率如图 5 和表 4 所示。春季，丹江口以上北部地区干旱化趋势显著；整个流域干旱强度差异较小，干旱强度略高区域零星斑块状分布在流域东北部；丹江口以上地区的干旱频率较大，轻旱、重旱事件发生较多，其南部地区干旱频率达 34.03%。夏季，丹江口以下北部地区干旱化趋势显著；空间上干旱强度较为接近，丹江口以下南部地区干旱强度略高；干旱发生高频区在丹江口以上东部和唐白河区域北部，干旱频率最高为 35.65%、36.28%。秋季，丹江口以下和唐白河区域大片地区干旱趋势显著，但秋旱较夏旱发生频率低，干旱强度整体比春夏季干旱强度高。丹江口以上和唐白河区域的干旱强度和干旱频率明显高于丹江口以下地区，这两个区域的干旱强度最高为 1.69, 干旱频率均在 30%以上，而丹江口以下地区的最低干旱强度为 0.71, 干旱频率为 29.34%。冬季，丹江口以上中部地区有显著干旱化趋势。汉江流域东西部地区冬旱发生频率差异较大，表现出西高东低的规律。丹江口以上地区干旱频率均在 31%以上，且干旱强度较大，而唐白河区域于丹江口下游地区干旱频率分别为 29.31%、29.79%, 干旱强度较小。

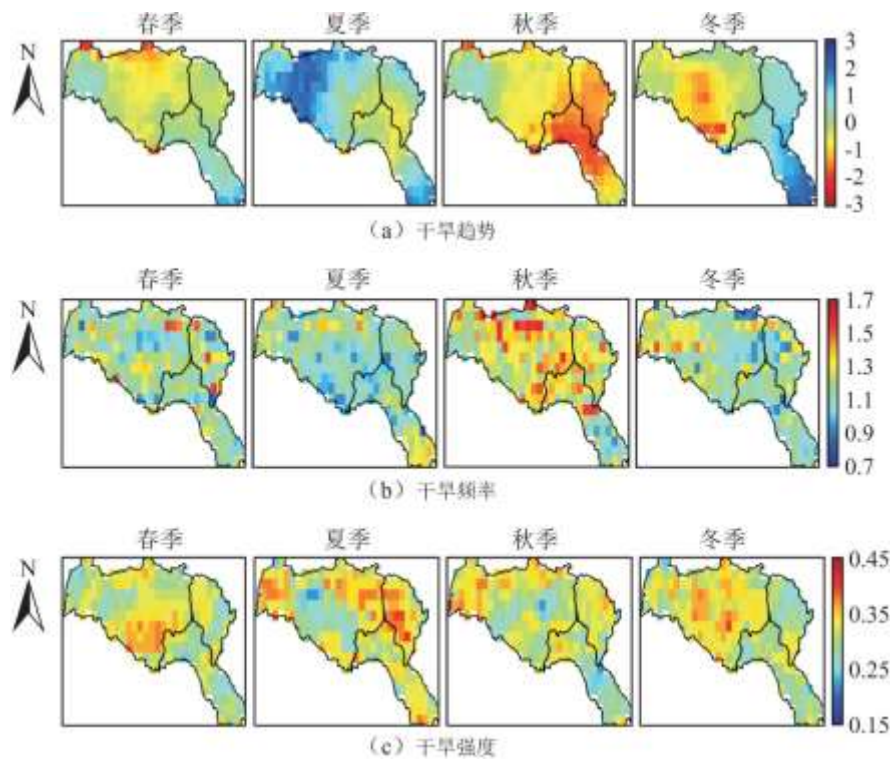


图 5 汉江流域季尺度气象干旱空间特征

表 3 汉江流域季尺度不同类型干旱频率表 (%)

季节	水资源区	轻旱频率	中旱频率	重旱频率	特旱频率	干旱频率
春季	丹江口以上	15.26	9.83	4.81	2.12	32.02
	丹江口以下	12.77	10.63	3.29	3.1	29.69
	唐白河	14.84	9.71	3.45	2.59	30.58
夏季	丹江口以上	15.96	8.93	4.72	2.16	31.76
	丹江口以下	17.24	9.26	3.93	1.95	32.38
	唐白河	17.71	12.48	3.36	1.01	34.62
秋季	丹江口以上	17.84	8.8	2.92	1.93	31.47
	丹江口以下	15.96	7.57	3.74	2.08	29.34
	唐白河	19.51	8.39	1.72	2.4	32.03
冬季	丹江口以上	16.6	11.78	3.42	1.03	32.81
	丹江口以下	11.43	10.54	7.15	0.67	29.79
	唐白河	12.21	7.92	8.58	0.63	29.31

3 结论

(1) 汉江流域不同尺度的气象干旱指标 SPI 值对干旱的敏感程度不同, 随着时间尺度的增大, 序列波动逐渐减小。SPI 值能较好的反映汉江流域气象干旱特征, 各个时间尺度的 SPI 序列变化趋势表明汉江流域自 20 世纪 90 年代之后干旱化趋势显著, 重旱特旱事件频发, 自 2011 年之后汉江下游南部地区与上游西部地区干旱化趋势有所缓解。

(2) 汉江流域各个尺度的 SPI 序列突变点不同, 月尺度 SPI 的突变点在 1974、1980 年左右, 季尺度的突变年份出现在 1988 年, 年尺度的突变点出现在 1994 和 2016 年附近。各个尺度的突变点均为不显著突变点, 且与汉江流域降水不显著变化的时期较为接近。同时, 季尺度和年尺度的 SPI 序列分别表现出 2 和 4 年的显著周期性特征。

(3) 汉江流域年尺度气象干旱呈现中部地区干旱化、南部和西部地区湿润化的显著趋势特征, 各个区域间干旱发生频率差异较小, 干旱强度呈现中部高、东西低的空间特征。丹江口水库附近区域及唐白河下游段干旱化趋势显著; 丹江口以上区域干旱频率最高, 干旱强度最大, 轻旱、中旱事件频发; 唐白河区域南部地区呈现不显著干旱化趋势, 干旱频率略次于丹江口以上地区, 干旱强度最小, 以轻旱事件为主; 丹江口以下北部地区呈现不显著干旱化趋势, 干旱频率最低, 干旱强度略次于丹江口以上地区, 发生重旱、特旱事件相对较多。

(4) 汉江流域季尺度气象干旱空间分布差异明显。丹江口以下地区夏旱趋势显著, 唐白河地区干旱频率最高, 轻旱、中旱事件频发; 唐白河地区和丹江口以下地区秋旱有加重趋势, 丹江口以上地区和唐白河地区的干旱频率和干旱强度明显高于丹江口以下地区。

本文基于汉江流域 1961~2018 年逐日降水数据, 采用标准化降水指数 SPI 探讨了汉江流域月尺度、季尺度、年尺度的气象干旱时空特征演变规律, 但未深入分析汉江流域气象干旱的演变规律的成因, 任利利等^[32]的研究表明, 汉江流域气象干旱变化主要影响因素是气候变化, 区域降水受大气环流和太阳黑子的运动等因素影响明显, 近年来汉江流域降水呈不显著下降趋势, 同时, 随着全球变暖趋势的明显, 区域蒸发量也随之增加, 进一步加剧了气象干旱的发生^[33]。其次是人类活动的影响, 城镇化的发展导致了下垫面的剧烈变化, 城市热岛效应加剧, 减少了区域降雨, 最终加剧了气象干旱的发生^[34]。因此, 在后续研究中应当结合气候变化特征和人类活动影响来更深层次的揭示汉江流域气象干旱的成因及其演变机理, 以期对未来复杂气候变化情景下汉江流域气象干旱风险的应对提供参考与依据。

参考文献:

- [1] SCHWALM C R, ANDEREGG W R L, MICHALAK A M, et al. Global patterns of drought recovery [J]. *Nature*, 2017, 548(7666): 202-205.
- [2] ALLEN S K, PLATTNER G K, NAUELS A, et al. Climate change 2013: The physical science basis: An overview of the working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change (IPCC) [J]. *Contribution of Working*, 2013, 43(22): 143-151.
- [3] LORENZO-LACRUZ J, VICENTE-SERRANO S M, GONZALEZ-HIDALGO J C, et al. Hydrological drought response to meteorological drought in the Iberian Peninsula [J]. *Climate Research*, 2013, 58(2): 117-131.
- [4] WASEEM M, AJMAL M, KIM T W. Development of a new composite drought index for multivariate drought assessment [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 527: 30-37.

-
- [5]MISHRA K, SINGH V P. A review of drought concepts [J]. *Journal of Hydrology*, 2010, 391(1):202-216.
- [6]SUN Z, ZHU X, PAN Y, et al. Drought evaluation using the GRACE terrestrial water storage deficit over the Yangtze River Basin, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 634:727-738.
- [7]倪深海, 顾颖, 彭岳津, 等. 近七十年中国干旱灾害时空格局及演变[J]. *自然灾害学报*, 2019, 28(6):176-181.
- [8]杨庆, 李明星, 郑子彦, 等. 7 种气象干旱指数的中国区域适应性[J]. *中国科学(地球科学)*, 2017, 47(3):337-353.
- [9]李忆平, 李耀辉. 气象干旱指数在中国的适应性研究进展[J]. *干旱气象*, 2017, 35(5):709-723.
- [10]FENG K, SU X, ZHANG G, et al. Development of a new integrated hydrological drought index (SRGI) and its application in the Heihe River Basin, China [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2020, 141(1-2):43-59.
- [11]ZHOU L, WU J, MO X, et al. Quantitative and detailed spatiotemporal patterns of drought in China during 2001-2013 [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 589:136-145.
- [12]XU K, YANG D, YANG H, et al. Spatio-temporal variation of drought in China during 1961-2012: A climatic perspective [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 526:253-264.
- [13]CHEN H, SUN J. Changes in drought characteristics over China using the standardized precipitation evapotranspiration index [J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(13):5430-5447.
- [14]HONG X, 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*, 2015, 29(4):1235-1247.
- [15]LIU H, WU J, XU Y. Investigating the effects of precipitation on drought in the Hanjiang River Basin using SPI [J]. *Journal of Water and Climate Change*, 2019, 10(4):977-992.
- [16]石卫, 雷静, 马立亚, 等. 基于 SPEI 的南水北调中线水源区干旱时空特征[J]. *人民长江*, 2019, 50(7):92-97, 103.
- [17]张奇谋, 陈思, 陈松生, 等. 不同 RCP 情景下未来汉江流域气象干旱变化趋势预估研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2019, 28(6):1470-1480.
- [18]朱烨, 李杰, 潘红忠. 南水北调中线调水对汉江中下游水文情势的影响[J]. *人民长江*, 2019, 50(1):79-83.
- [19]陈燕飞, 熊刚, 刘伟, 等. 基于标准化降水指数的汉江流域干旱时空分布特征[J]. *中国农村水利水电*, 2016(4):82-88.
- [20]方思达, 刘敏, 任永建. 南水北调中线工程水源区和受水区旱涝特征及风险预估[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(6):263-267, 276.
- [21]邓鹏鑫, 郝建平, 贾建伟, 等. 汉江流域 1956~2016 年汛期降水时空演变格局[J]. *长江流域资源与环境*, 2018, 27(9):2132-2141.

-
- [22]甄伟琪,王润,郭卫,等.气候变化对江汉平原调水格局的影响[J].长江流域资源与环境,2019,28(11):2753-2762.
- [23]马彬,张勃.基于格点数据的1961-2016年中国气候季节时空变化[J].地理学报,2020,75(3):458-469.
- [24]MCKEE T B,DOESKEN N J,KLEIST J.The relationship of drought frequency and duration to time scales:Proceedings of Vulnerability [M].Cambridge University Press,1993.
- [25]叶磊,周建中,曾小凡,等.气候变化下 SPEI 指数在嘉陵江流域的干旱评估应用[J].长江流域资源与环境,2015,24(6):943-948.
- [26]丁倩倩,刘友存,焦克勤,等.赣江上游典型流域水沙过程对全球气候变化的响应[J].长江流域资源与环境,2020,29(1):174-186.
- [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).
- [28]孙艺杰,刘宪锋,任志远,等.1960-2016年黄土高原干旱和热浪时空变化特征[J].地理科学进展,2020,39(4):591-601.
- [29]姜海如.中国气象灾害大典:湖北卷[M].气象出版社,2007.
- [30]翟佑安.中国气象灾害大典:陕西卷[M].气象出版社,2005.
- [31]王润,张奇谋,李娜,等.1961~2049年汉江流域降水量变化研究[J].长江流域资源与环境,2019,28(11):2743-2752.
- [32]任利利,殷淑燕,彭维英.历史时期汉江上游旱灾统计及成因分析[J].水土保持通报,2013,33(1):129-133,145.
- [33]张静,任志远.基于MOD16的汉江流域地表蒸散发时空特征[J].地理科学,2017,37(2):274-282.
- [34]班璇,朱碧莹,舒鹏,等.汉江流域气象水文变化趋势及驱动力分析[J].长江流域资源与环境,2018,27(12):2817-2829.