

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2021.06.006

# 长江流域极端水文气象事件时空变化特征 及其对植被的影响

金佳鑫<sup>1,2</sup>, 肖园园<sup>1</sup>, 金君良<sup>3</sup>, 朱求安<sup>1,2</sup>, 雍斌<sup>1,4</sup>, 季盈盈<sup>1</sup>

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210024; 2. 国家地球系统科学数据中心, 北京 100101; 3. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏 南京 210098; 4. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210098)

**摘要:** 利用1982—2015年高时空分辨率地面气象再分析数据, 识别以降水和大气饱和水汽压差(VPD)为指标的极端干旱(Dry-VPD和Dry-PRE)和极端湿润(Wet-VPD和Wet-PRE)事件, 分析其年际变化趋势; 结合归一化植被指数(NDVI), 探讨植被与不同极端事件发生频数的相关关系与差异。结果表明: 除Wet-VPD外, Dry-VPD、Wet-PRE和Dry-PRE总体呈上升趋势, 特别是1998年以后Dry-VPD在长江上、下游流域显著增加; 长江流域植被对极端干旱事件的敏感性(以负相关为主)高于极端湿润事件, 且长江上游植被对Dry-VPD敏感, 而中下游植被对Dry-PRE敏感。综上, 长江流域极端干旱事件日趋严重, 相较于降水干旱限制植被生长的传统认识, 本研究指出在长江上游地区大气干旱对植被的负效应更加明显。

**关键词:** 极端水文气象事件; 饱和水汽压差; 干旱; 湿润; 归一化植被指数; 长江流域

**中图分类号:** P426.614 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2021)06-0867-10

极端水文气象事件, 如洪涝和干旱等, 是全球变化的重要表现之一。植被作为陆地生态系统的主体, 受极端水文气象事件的影响极大<sup>[1]</sup>。随着全球变暖, 极端水文气象事件的频率正在增加, 对自然生态系统和社会经济系统造成严重破坏<sup>[2-5]</sup>。Piao等<sup>[1]</sup>针对极端水文气象事件阐述了陆地生态系统碳循环对极端气候事件的响应机制, 并着重探讨了干旱和极端降水对生态系统造成的影响, 指出2种极端水文气象事件均会对植被造成严重胁迫; Bai等<sup>[6]</sup>研究了11个极端气候指数在不同小麦生长阶段对小麦产量的影响, 发现全国小麦生产区可能更易受高温胁迫的影响; Li等<sup>[7]</sup>利用作物产量和保险数据量化了降雨对美国玉米的影响, 并与同期极端干旱的影响做比较, 结果表明过量降雨使玉米产量降低了34%, 这与同期极端干旱对玉米产量的影响相当; Yuan等<sup>[8]</sup>基于气候极端指数, 分析了生态系统在历史(1901—2016年)和未来(2006—2100年)对温度和降水极端事件的响应, 指出随着全球变暖, 更加频繁的极端气候事件将对陆地植被生产力造成强烈的负面影响。除传统的以降水为指标进行定义的极端水文气象事件以外, 以大气饱和水汽压差(Vapor Pressure Deficit, VPD)为指标的极端干旱和极端湿润事件也越来越受到重视。VPD描述了饱和时水蒸气压力与实际水蒸气压力之间的差异, 是陆-气水汽传输的重要驱动力, VPD的变化对陆地生态系统的结构和功能具有重要意义<sup>[9]</sup>。Yuan等<sup>[9]</sup>利用分段线性回归的方法量化VPD的趋势变化, 并研究VPD变化趋势对植被生长力的影响, 表明大气干旱作为干旱的一种重要类型, 其增加确实会抑制植被的生长; Zhou等<sup>[10]</sup>利用低土壤湿度(SM)和高VPD分别代表了干旱和大气干旱, 探究了两者对陆地碳吸收的效应, 模型结果预测未来两者的复合事件发生会更加频繁, 并且对植被生产力影响越来越强。了解不同指标下的极端水文气象事件对

收稿日期: 2020-12-08; 网络出版日期: 2021-10-25

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20211022.1626.004.html>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2018YFA0605402); 国家自然科学基金资助项目(41971374)

作者简介: 金佳鑫(1986—), 男, 河北秦皇岛人, 教授, 博士, 主要从事生态水文遥感方面研究。

E-mail: jiaxingking@hhu.edu.cn

于全面认识极端气候的变化动态及生态影响具有重要意义,然而,当前该领域的研究仍不够深入。

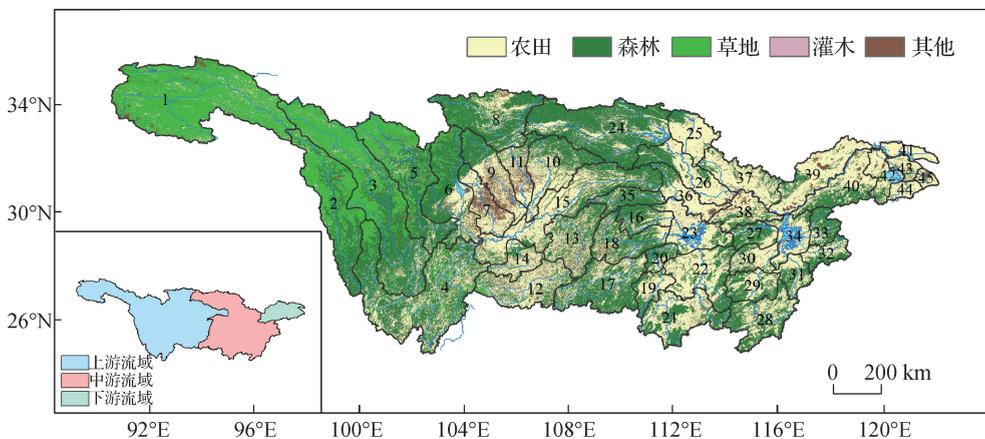
长江流域是世界第三大流域,在中国自然资源与社会经济中扮演重要角色。在气候变化背景下,长江流域极端水文气象事件的时空格局愈发复杂。有研究证明<sup>[11]</sup>,1951—2015年长江流域发生季节性干旱的面积整体呈扩大趋势,同时发现极端降水事件也在逐渐增强。然而,目前的研究缺乏对长江流域的极端水文气象现状的系统性研究。

考虑到未来极端水文气象事件将进一步频发,本文选取长江流域为研究区,针对基于降水和基于VPD的4种极端水文气象事件(极端干旱与极端湿润事件),利用中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集,采用滑动窗口技术识别各类型极端事件并统计其频数,分析研究区极端水文气象事件的时空变化规律;结合遥感植被指数,分析不同类型的极端水文气象事件频数对生态系统的影响。研究长江流域的极端气候变化规律及其生态影响,对了解该地区极端气候事件的发展规律以及应对气候变化等工作具有重大意义。

## 1 数据与方法

### 1.1 研究区概况

长江流域位于 $90^{\circ}33'E-122^{\circ}25'E$ 、 $24^{\circ}30'N-35^{\circ}45'N$ ,总面积达180万 $km^2$ ,属亚热带季风气候区(图1)。一般而言,长江干流宜昌以上为上游,流域面积100万 $km^2$ ,包含15个小流域,地势较高,以草地和森林为主;宜昌至湖口为中游,流域面积68万 $km^2$ ,包含23个小流域,主要以自然植被(如森林和灌丛)和农田为主;湖口至长江入海口为下游,流域面积12万 $km^2$ ,包含7个小流域,主要以农田为主。图1展示了研究区主要植被分布状况,植被类型数据来源于ESA CCI-LC maps<sup>[12]</sup>,小流域区划来源于国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>)长江流域1:100万主要河流数据集。



上游: 1 通天河; 2 直门达至石鼓; 3 雅砻江; 4 石鼓以下干流; 5 大渡河; 6 青衣江和岷江干流; 7 沱江; 8 广元昭化以上; 9 涪江; 10 渠江; 11 广元昭化以下干流; 12 思南以上; 13 思南以下; 14 赤水河; 15 宜宾至宜昌干流。中游: 16 澧水; 17 沅江浦市镇以上; 18 沅江浦市镇以下; 19 资水冷水江以上; 20 资水冷水江以下; 21 湘江衡阳以上; 22 湘江衡阳以下; 23 洞庭湖环湖区; 24 丹江口以上; 25 唐白河; 26 丹江口以下干流; 27 修水; 28 赣江栋背以上; 29 赣江栋背至峡江; 30 赣江峡江以下; 31 抚河; 32 信江; 33 饶河; 34 鄱阳湖环湖区; 35 清江; 36 宜昌至武汉左岸; 37 武汉至湖口左岸; 38 城陵矶至湖口右岸。下游: 39 巢滁皖及沿江诸河; 40 青弋江和水阳江及沿江诸河; 41 通南及崇明岛诸河; 42 湖西及湖区; 43 武阳区; 44 杭嘉湖区; 45 黄浦区。

图1 研究区及主要植被空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of the main vegetation types over the study area

## 1.2 数据来源与预处理

气象资料来源于中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集<sup>[13]</sup>。该数据集是以国际上现有 Princeton 再分析资料、GLDAS 资料、GEWEX-SRB 辐射资料,以及 TRMM 降水资料为背景场,融合了中国气象局常规气象观测数据制作而成。本研究选用逐日 6'空间分辨率的近地面气温、近地面气压、近地面空气比湿和地面降水率,共 4 个要素,时间范围为 1981—2016 年。

归一化植被指数(Normal Difference Vegetation Index, NDVI)与植被覆盖度、叶面积指数呈显著正相关关系,可以很好地反映植被生长状况,被广泛应用于植被气候变化响应研究中<sup>[14]</sup>。本文选用美国国家航天航空局(NASA)的全球监测与模型研究组(Global Inventory Modelling and Mapping Studies, GIMMS)根据搭载在 NOAA 系列卫星的先进高分辨率雷达(the Advanced Very High Resolution Radiometer, AVHRR)影像的 NDVI 产品。GIMMS NDVI 数据集在校正了轨道漂移效应、消除太阳天顶角和其他与植被变化无关的错误之后<sup>[15]</sup>,提供了 1982—2015 年空间分辨率为 5'、时间分辨率为 15 d 的植被信息。

数据预处理过程如下:利用长江流域边界矢量文件对气候数据和 NDVI 数据进行裁剪,得到长江流域气候数据和 NDVI 数据;利用温度、空气比湿、气压数据计算长江流域 VPD 数据<sup>[16]</sup>;将 NDVI 数据合成为 6',并逐像元计算 NDVI 的年均值。

## 1.3 研究方法

### 1.3.1 极端水文气象事件

本文选取 4 种极端水文气象事件,即基于 VPD 的极端干旱(VPD-based extreme drought, Dry-VPD)、极端湿润(VPD-based extreme wetness, Wet-VPD),以及基于降水的极端干旱(Precipitation-based extreme drought, Dry-PRE)、极端湿润(Precipitation-based extreme wetness, Wet-PRE)。为识别并统计极端水文气象事件,本文采用基于像元的动态极值法<sup>[17]</sup>。针对某一像元,首先在 1982—2015 年中,选取历年的以同一日期为中心的 21 d 时间窗口,共计 714 d;然后,将这些日期的 VPD 按升序排序,将 90% 和 10% 分位数的值分别定义为极端干旱和极端湿润的阈值;以每一年该中心日期的 VPD 值是否高于干旱阈值(低于湿润阈值),来判断该年该日期是否为极端干旱事件(极端湿润事件)。降水(去除零值)按照相同方法升序排序后,小于 10% 阈值的日期为极端干旱事件,大于 90% 阈值的日期为极端湿润事件。统计 1 a 中出现极端干旱和极端湿润天数的累计值即为该年极端水文气象事件的频数。

### 1.3.2 统计分析

本研究采用线性回归分析法分析流域极端水文气象事件频数的年际变化趋势,并利用最优分段线性回归法探究突变情况,选取分段回归拟合效果最好(即均方根误差最小)的分段点作为频数趋势改变的拐点;为了降低异常值的干扰,在像元尺度,利用 Sen's slope 量化极端水文气象事件频数的变化幅度( $s$ ),并运用 Mann-Kendall 方法对变化趋势进行显著性分析<sup>[18]</sup>;利用 Pearson 偏相关分析,在控制其他极端水文气象事件以及气候因子(年均温、年降水)后,研究单一极端水文气象事件与 NDVI 之间的关系。在流域尺度,利用 Fisher 法(Fisher's Combined Probability)表征小流域的变化趋势的显著性;利用方差分析(Analysis of Variance, ANOVA)判断不同小流域之间差异的显著性。

## 2 结果分析

### 2.1 极端水文气象事件年际变化

图 2 展示了长江流域上游、中游、下游地区 4 种极端水文气象事件频数的总体年际变化趋势,以及通过最优分段线性回归识别的突变点前后两阶段的变化趋势。其中,实线和虚线分别表示线性回归结果显著( $p < 0.05$ )和不显著,色块是各地区标准差的年际变化趋势。结果表明 Dry-VPD 整体表现为显著增加的趋势(上

游  $s = 1.13 \text{ d/a}$ ,  $p < 0.05$ ; 中游  $s = 1.23 \text{ d/a}$ ,  $p < 0.05$ ; 下游  $s = 1.33 \text{ d/a}$ ,  $p < 0.05$ )。1982—1998 年 Dry-VPD 变化不大(上游  $s = -0.33 \text{ d/a}$ ,  $p = 0.358$ ; 中游  $s = -0.03 \text{ d/a}$ ,  $p = 0.95$ ; 下游  $s = 0.16 \text{ d/a}$ ,  $p = 0.668$ ), 自 1998 年开始 Dry-VPD 出现了较明显的上升趋势(上游  $s = 1.55 \text{ d/a}$ ,  $p < 0.05$ ; 中游  $s = 0.96 \text{ d/a}$ ,  $p = 0.067$ ; 下游  $s = 1.64 \text{ d/a}$ ,  $p < 0.05$ ), 而且长江流域上游、中游、下游地区 Dry-VPD 的空间分布差异也不断增大(图 2(a))。上游和下游 Dry-PRE 增长速度比 Dry-VPD 小(上游  $s = 0.56 \text{ d/a}$ ,  $p < 0.05$ ; 中游  $s = 1.41 \text{ d/a}$ ,  $p < 0.05$ ; 下游  $s = 1.05 \text{ d/a}$ ,  $p < 0.05$ ), 其中 1982—1998 年长江下游流域呈显著增加趋势( $s = 1.78 \text{ d/a}$ ,  $p < 0.05$ ), 1998 年以后呈显著下降趋势( $s = -1.48 \text{ d/a}$ ,  $p < 0.05$ )。长江流域极端干旱事件呈现逐年上升趋势, 尤其是基于 VPD 的极端干旱事件。

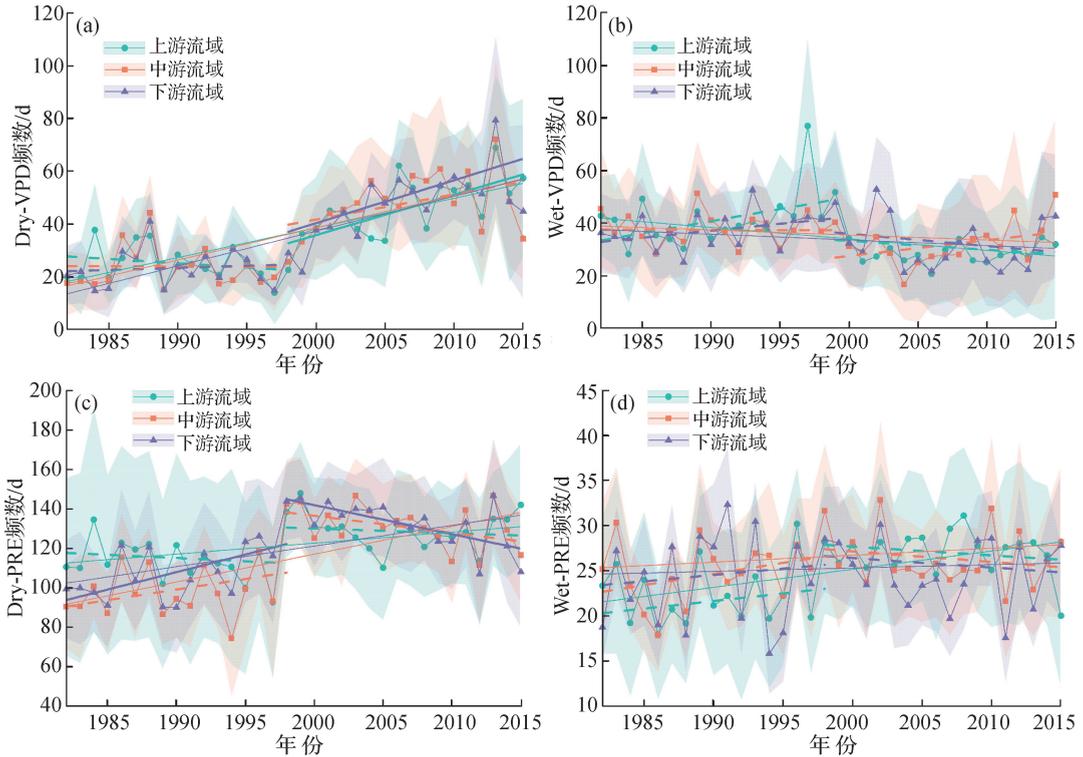


图 2 1982—2015 年长江流域极端水文气象事件频数的时序特征及趋势

Fig. 2 Inter-annual variabilities of the yearly frequency of the hydrometeorological extremes over the Yangtze River basin from 1982 to 2015

与极端干旱事件不同, 极端湿润事件变化幅度较小。Wet-VPD 普遍表现为下降趋势(图 2(b)), 其中, 上游流域 Wet-VPD 在 1997 年出现明显的峰值( $77 \pm 33 \text{ d}$ ), 之后开始下降( $s = -0.34 \text{ d/a}$ ,  $p = 0.323$ ); Wet-PRE 的整体呈上升趋势, 但变化不显著, 并且空间异质性也较小(图 2(d))。通过极端水文气象事件的时序变化分析, 发现在 1998 年左右出现了非常明显的变化, 主要表现为年降水突然增多, 这可能与 1998 年青藏高原冬春季异常雪盖和厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)事件作用有关<sup>[19]</sup>。

## 2.2 极端水文气象事件时空格局

图 3(a)—图 3(d)展示了极端水文气象事件频数多年平均值和变化趋势的空间分布。结果显示, 97.8% 的研究区 Dry-VPD 年均值在 34d 以上(图 3(a)), Dry-VPD 低值主要集中分布在上游地区的思南以下、宜昌至宜宾干流流域, 以及中游地区的丹江口以上流域。Dry-PRE 的整体强度非常大(图 3(b)), 96.8% 的地区 Dry-PRE 强度的年均值在 70 d 以上, 只有 3.2% 地区 Dry-PRE 年均值在 70 d 以下, 主要集中分布在上游流域的大渡河、青衣江和岷江干流流域; 中游地区 Dry-PRE 南北差异明显, 北部地区较强。97.8% 的地区

Wet-VPD的年均值在33 d以上, 2.2%的地区 Wet-VPD的年均值在33 d以下(图3(c)), 主要分布在中游地区的沅江浦市镇以上、资水冷水江以上、资水冷水江以下流域的交界处, 以及湘江衡阳以下流域的东北部。Wet-PRE(图3(d))和Dry-PRE有明显的地区分布差异, 19%的地区 Wet-PRE的年均值在28 d以上, 主要集中在长江流域的大渡河、青衣江和岷江干流、沱江、涪江、思南以上、思南以下、赤水河、宜宾至宜昌干流流域。可以发现, Wet-PRE与Dry-PRE在地区分布上基本相反, 即Wet-PRE高值区对应Dry-PRE低值区。

图3(e)—图3(h)展示了1982—2015年长江流域水文气象事件频数变化趋势的空间分布, 其中阴影区表示变化趋势显著( $p < 0.05$ )。Dry-VPD整体表现为逐年上升趋势(图3(e)), 79.5%的像元线性趋势达到显著, 其中, 78.2%的像元呈现显著上升趋势, 1.3%的像元呈现显著下降趋势。下游流域Dry-VPD平均增长趋势最大, 平均增幅为 $(1.51 \pm 0.32)$ d/a, 在杭嘉湖区、黄浦江区较为突出, 同时在上游流域的石鼓以下干流、涪江等流域较为突出以及中游流域的湘江衡阳以下、洞庭湖环湖区、赣江峡江以下等流域。Dry-PRE整体同样表现出上升的趋势(图3(f)), 78.4%的像元达到显著, 但Dry-PRE表现出的上升趋势强度(显著增长

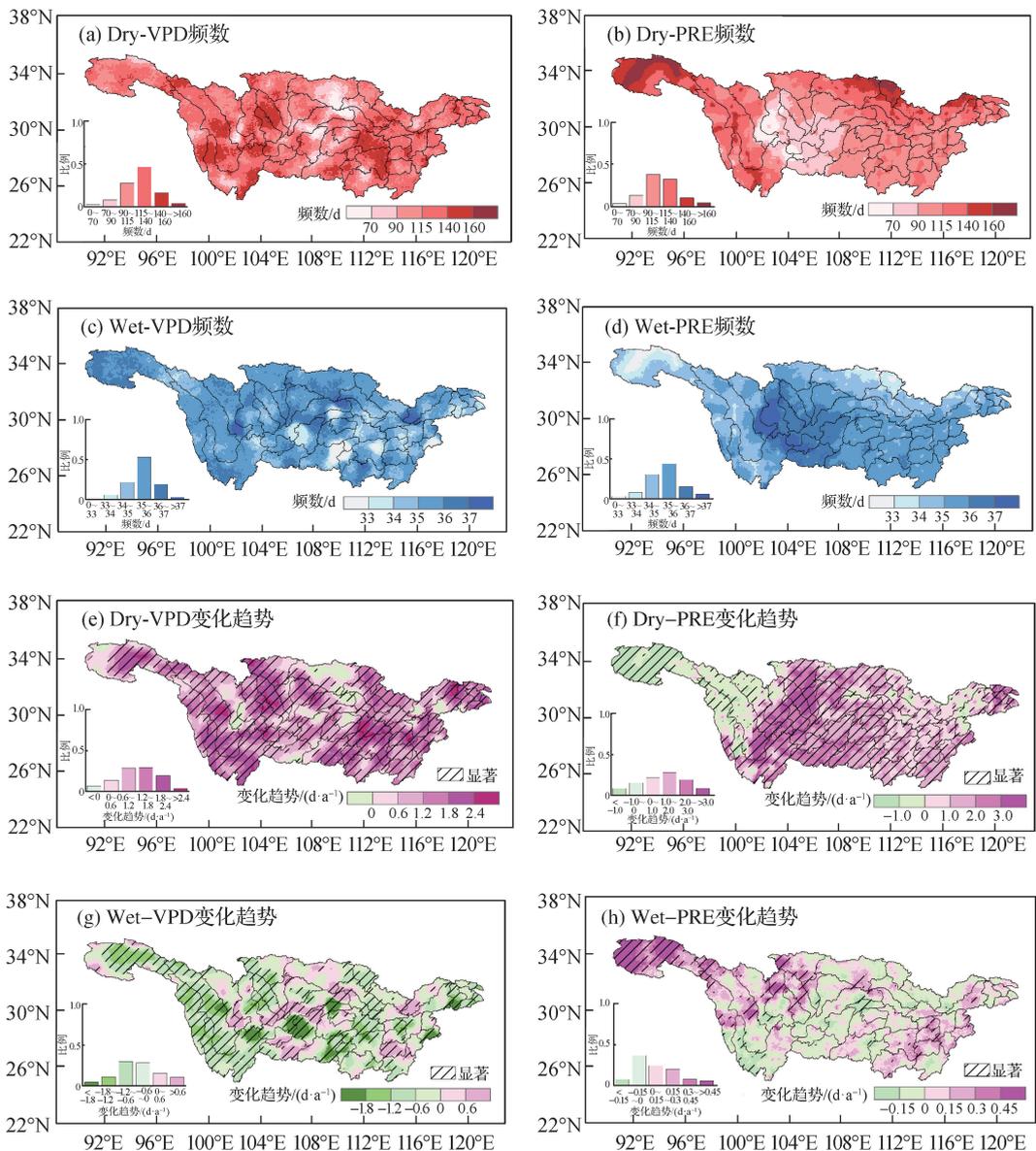


图3 1982—2015年长江流域极端水文气象事件时空格局

Fig. 3 Spatial-temporal pattern of the hydrometeorological extremes over the Yangtze River basin from 1982 to 2015

像元占比 65.8%) 小于 Dry-VPD, 主要在雅砻江和大渡河尾部、青衣江和岷江干流、沱江、广元昭化以上、涪江、广元昭化以下干流、思南以上流域。与 Dry-VPD 相近, 下游地区 Dry-PRE 平均增长趋势最大, 平均增幅为  $(1.65 \pm 0.98) \text{d/a}$ , 在湖西及湖区和武阳区流域较突出, 同时在上游流域的沱江、涪江、广元昭化以下干流、思南以上等流域比较突出。长江流域极端湿润事件的变化幅度都较小。Wet-VPD 表现出大范围的下降趋势(图 3(g)), 55.6% 的像元线性存在显著变化趋势, 其中, 9.8% 的像元呈现增长趋势, 45.8% 像元呈现降低趋势。下游地区的 Wet-VPD 平均降低趋势最大, 平均降幅为  $(0.62 \pm 0.49) \text{d/a}$ , 在湖西及湖区流域比较突出, 同时在上游流域的石鼓以下干流、思南以下流域, 以及中游流域的信江流域较为突出。与 Wet-VPD 不同, Wet-PRE 整体呈现小幅度的上升趋势(图 3(h)), 其中, 19.8% 像元线性趋势具有显著性, 2.7% 的像元呈现降低趋势, 17.1% 像元呈现增长趋势。上游地区的 Wet-PRE 平均增长趋势最大, 平均增幅为  $(0.10 \pm 0.13) \text{d/a}$ , 在通天河流域最为突出, 同时在直门达至石鼓、雅砻江、青衣江和岷江干流、广元昭化以上、涪江等流域的局地较为突出。

### 2.3 极端水文气象事件对植被的影响

图 4 展示了长江流域极端水文气象事件频数与 NDVI 偏相关性的空间分布特征以及小流域统计情况。其中, 小流域编号见图 1; 右侧柱状图(灰色误差线)表示小流域偏相关系数平均值(标准差), 黑色实线(虚线)分别表示上游、中游、下游小流域总体均值(标准差); 左侧空间图中标记阴影部分和柱状图彩色填充柱形表示偏相关性显著( $p < 0.05$ ), 无阴影标记和空心柱形表示偏相关性不显著。总体而言, 长江流域极端干旱事件对植被活动产生普遍的负面影响。NDVI 与 Dry-VPD 整体上表现为负相关关系(上游偏相关系数  $r = -0.11 \pm 0.07$ ; 中游  $r = -0.05 \pm 0.13$ ; 下游  $r = -0.06 \pm 0.08$ ), 并且上游和下游流域之间具有显著性差异(图 4(a))。其中, 12.2% 的像元偏相关性显著, 2.3% 的像元表现为显著正相关, 主要分布在大渡河、湖西及湖区等流域的局地, 以及洞庭湖环湖区及修水流域的交界处; 9.9% 的像元表现为显著负相关, 主要分布在通天河、直门达至石鼓、雅砻江、石鼓以下干流、大渡河、赣江栋背以上等流域的局地。NDVI 与 Dry-PRE 整体上表现为较强的负相关关系(上游  $r = -0.05 \pm 0.15$ ; 中游  $r = -0.13 \pm 0.11$ ; 下游  $r = -0.16 \pm 0.08$ ), 主要分布在长江流域中部地区(图 4(b))。其中, 12.6% 的像元显著相关, 4.3% 的像元表现为显著正相关, 主要分布在上游流域的直门达至石鼓、雅砻江、大渡河等流域的局地; 8.3% 的像元表现为显著负相关, 主要分布涪江、广元昭化以下干流、资水冷水江以下、湘江衡阳以上、湘江衡阳以下等流域。

长江流域极端湿润事件对植被活动产生的影响较小。NDVI 与 Wet-VPD 正相关和负相关分布较均匀(图 4(c)), 52.4% 的像元表现为正相关, 47.6% 的像元表现为负相关, 仅 8.9% 的像元显著相关, 其中有 4.7% 的像元呈现显著正相关, 主要分布在石鼓以下干流流域的东北部、思南以上流域的东部、宜宾至宜昌干流流域的南部等地。NDVI 与偏相关系数在 0.4 以上的像元主要分布在上游地区, 平均偏相关系数为  $0.04 \pm 0.11$ , 而中游地区( $r = -0.03 \pm 0.10$ )和下游地区( $r = -0.13 \pm 0.12$ )大多为负相关, 上游地区和中游、下游地区之间具有显著性差异。NDVI 与 Wet-PRE 呈正相关的地区占长江流域的 49.4%, 主要分布在上游地区( $r = 0.02 \pm 0.05$ ), 呈负相关的地区占 50.6%(图 4(d)), 主要分布在中游地区( $r = -0.03 \pm 0.10$ )和下游地区( $r = -0.03 \pm 0.09$ )。只有 5.6% 的像元显著相关, 其中 2.8% 像元呈现正相关, 主要分布在宜宾至宜昌干流流域的北部, 呈现显著负相关的主要是中游地区的抚河流域。对比其他极端水文气象事件来说, Wet-PRE 对 NDVI 的影响较小。

## 3 讨 论

(1) 本文分析了长江流域极端干旱和极端湿润事件的时序变化特征, 发现近 34 a 来 Dry-VPD 和 Dry-PRE 2 种极端干旱事件的频数都呈增长的趋势。这与 Yuan 等<sup>[8]</sup>的研究结果一致, 气候变暖增加了极端干旱的频数<sup>[6,20]</sup>, 极端干旱也会受到 ENSO 的影响, 与正常年份相比, 太平洋变暖导致较少的降水<sup>[21]</sup>。此外,

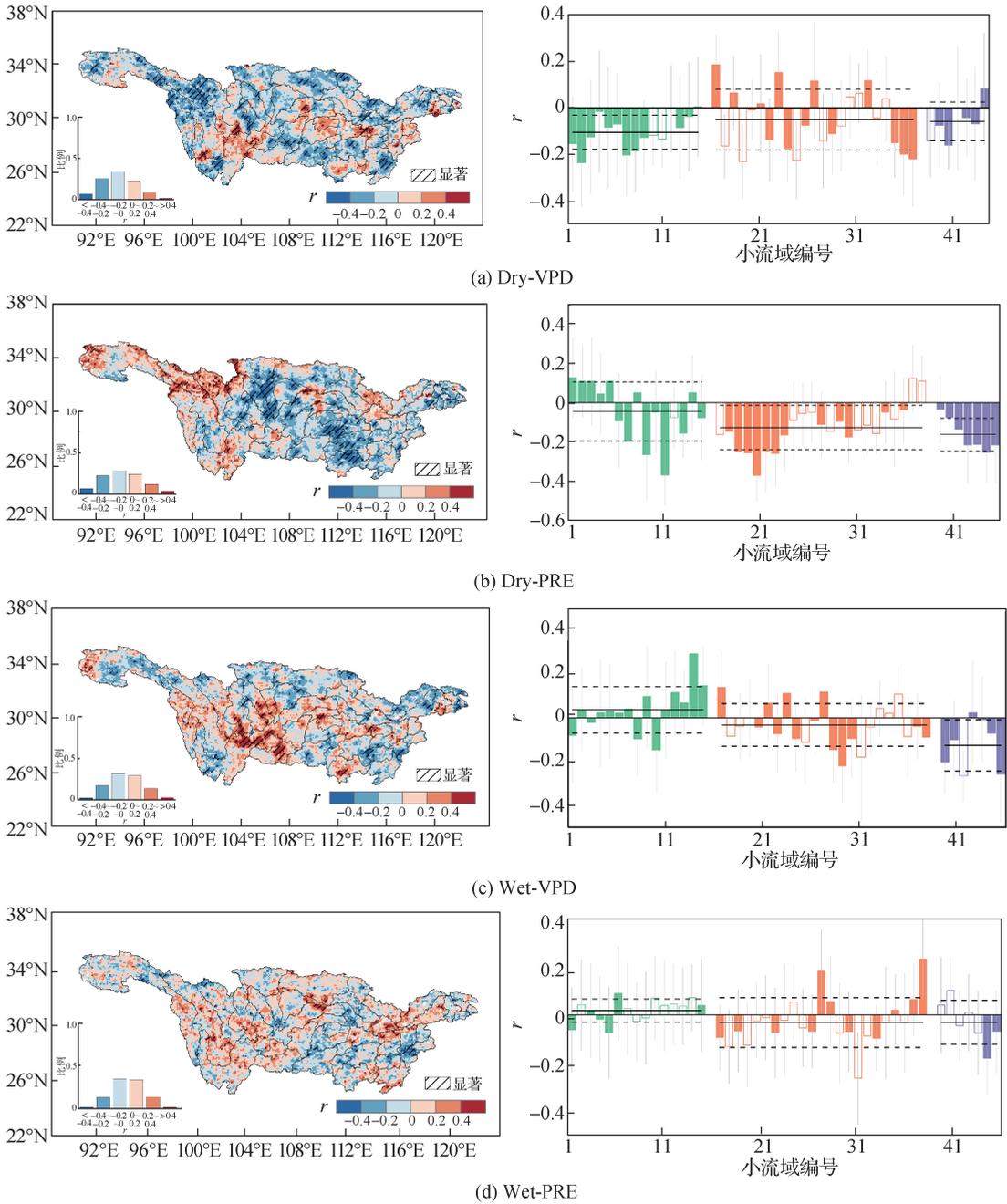


图 4 1982—2015 年长江流域极端水文气象事件频数与 NDVI 偏相关性的空间分布特征和小流域统计结果  
 Fig. 4 Partial correlations of the yearly NDVI with the yearly frequency of the hydrometeorological extremes over the Yangtze River basin from 1982 to 2015 and the corresponding statistics at the sub-basin scale

本文进一步揭示了 Dry-VPD 和 Dry-PRE 之间的变化差异, 表明该地区变暖对长江流域造成的 Dry-VPD 越发严重, 应予以重视。值得注意的是, 基于降水和基于 VPD 的极端水文气象事件年际变化趋势的协同性存在差异, 即 Dry-PRE 和 Wet-PRE 同呈现增加趋势, 而 Dry-VPD 呈增加趋势且 Wet-VPD 呈降低趋势, 极端干旱事件的年均频数以及增长趋势均大于极端湿润事件<sup>[20]</sup>, 表明大气环境持续变干。因此, 须对气候变暖背景下不同的极端气候现象之间的协同或补偿作用进一步关注。

(2) 植被对极端气候的响应非常复杂, 受到国内外学者的广泛关注。根据极端水文气候事件和 NDVI 的

偏相关分析结果,发现大部分地区降水干旱和大气干旱对植被都有显著的负面影响,这与干旱对生态系统的生产力的抑制有关,干旱会影响植被的光合作用,削弱生态系统的碳汇功能<sup>[1]</sup>。Dry-VPD 可以通过触发植被气孔关闭限制生物群落的蒸散发<sup>[22]</sup>,进而抑制植被生长,这与 Yuan 等<sup>[9]</sup>的研究具有一致性,VPD 的变化和土壤干燥可能会限制陆地生态系统中植物的碳吸收和水分利用<sup>[23]</sup>,表明 VPD 过高会导致干旱胁迫,使植被的死亡率增加,Dry-VPD 的增长趋势表明长江流域气象干旱越来越严重,未来可能对长江流域的生态系统造成更大影响。降水量对生态系统的影响有较大的异质性,比如,Wet-PRE 和 Dry-PRE 对农田区域 NDVI 的正影响和负影响都很普遍,这可能是受到人类灌溉的影响,而其他植被生态系统对降水干旱事件的响应也不相同,这可能因为降水对 NDVI 的影响主要取决于当地已有的水分条件<sup>[1]</sup>,一方面是在区域干旱的前提下,Wet-PRE 会增加土壤含水量,促进植物生长;另一方面是区域湿润的前提下,植物本身不缺水,如果发生 Wet-PRE,会导致植被根系处于缺氧状况下,从而导致植被死亡,生态系统固碳能力下降。

(3) 根据极端水文气象事件的时空变化特征及其对植被的影响,Dry-VPD 在保持增长趋势(图 3(e))的情况下,对植被的影响基本为负相关(图 4(a)),表明基于 VPD 定义的气象干旱事件逐年增多,同时对植被的胁迫将加重。Wet-VPD 总体呈下降趋势,而上游流域 Wet-VPD 对植被的影响表现为正相关(图 4(c)),即上游流域 Dry-VPD 和 Wet-VPD 的变化都对植被生长产生胁迫;中游流域和下游流域 Wet-VPD 与植被生长整体上表现为弱负相关,结合长江流域的土地利用类型,发现上游主要以自然植被为主,而中游、下游流域大部分地区为农田,受到人为干预的影响较大。对于基于降水的极端干旱事件,Dry-PRE 的变化趋势及其对植被的影响与 Dry-VPD 基本一致,Wet-PRE 整体上是呈现增长趋势的,而且在上游流域 Wet-PRE 与自然植被生长呈现正相关,在中游、下游呈现负相关,这种情况是因为上游地区降水是植被生长的限制因子之一,因此,随着 Wet-PRE 的增长,对植被生长产生正效应。但是极端降水事件和植被的相关性较弱,所以未来基于 VPD 的极端干旱事件可能会主导植被生长。

(4) 本研究存在一定局限性:① 本研究未考虑极端水文气象事件对植被生长影响的滞后效应,可能对偏相关分析造成不确定性,需要进一步研究和研讨。② 考虑到人类活动对生态系统的重要影响,本文采用 NDVI 去趋势距平值进行极端气候事件与植被生长关系分析,在一定程度上去除了研究区内人为经营管理等对结果造成的不确定性<sup>[12,24-25]</sup>。尽管如此,如何区分气候变化与人类活动作用,仍是植被响应研究中的难点,有待进一步研究。③ NDVI 主要反映植被的覆盖度或绿度变化,对极端水文气象事件的响应存在一定的滞后性。今后研究中可以考虑使用日光诱导叶绿素荧光(SIF)等对胁迫敏感的植物生理生态参数,指示植被响应程度。④ 本文考虑到了多种极端气候事件交互的现象,进行评估后发现本研究中复合极端水文气象事件不满足统计分析要求,因此未在结果中展示。这表明当前长江流域仍以独立极端气象事件为主,但随着气候变暖,应进一步关注长江流域复合型极端水文气象事件及其生态影响。

## 4 结 论

本文基于中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集,识别以降水和大气饱和水气压差为指标的极端干旱和极端湿润事件,探究长江流域极端水文气象事件的时空变化特征,并结合遥感植被数据,分析极端水文气象事件频数对不同流域植被的影响。主要研究结论如下:

(1) 长江流域极端干旱事件总体呈上升趋势,特别是 1998 年以后大气极端干旱在上游、下游显著增加。

(2) 长江流域植被对极端干旱事件的敏感性(以负相关为主)高于极端湿润事件,且在长江上游植被对 VPD 干旱敏感,而中下游植被对降水干旱敏感。

(3) 相较于降水干旱影响植被生产的传统认识,本文指出在长江上游地区大气干旱对植被的负效应更加明显,进一步深化了对植被生态水文响应的理解,为应对流域气候变化、保障生态安全提供有益参考。

### 参考文献:

[1] PIAO S L, ZHANG X P, CHEN A P, et al. The impacts of climate extremes on the terrestrial carbon cycle: a review[J].

- Science China Earth Sciences, 2019, 62(10): 1551-1563.
- [2] ZANG Y X, MIN X J, de DIOS V R, et al. Extreme drought affects the productivity, but not the composition, of a desert plant community in Central Asia differentially across microtopographies[J]. Science of the Total Environment, 2020, 717: 137251.
- [3] LIU X F, ZHU X F, PAN Y Z, et al. Vegetation dynamics in Qinling-Daba Mountains in relation to climate factors between 2000 and 2014[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(1): 45-58.
- [4] 宋晓猛, 张建云, 孔凡哲, 等. 北京地区降水极值时空演变特征[J]. 水科学进展, 2017, 28(2): 161-173. (SONG X M, ZHANG J Y, KONG F Z, et al. Spatio-temporal variation characteristics of precipitation extremes in Beijing[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(2): 161-173. (in Chinese))
- [5] 杨涛, 陆桂华, 李会会, 等. 气候变化下水文极端事件变化预测研究进展[J]. 水科学进展, 2011, 22(2): 279-286. (YANG T, LU G H, LI H H, et al. Advances in the study of projection of climate change impacts on hydrological extremes[J]. Advances in Water Science, 2011, 22(2): 279-286. (in Chinese))
- [6] BAI H Z, XIAO D P, WANG B, et al. Multi-model ensemble of CMIP6 projections for future extreme climate stress on wheat in the North China plain[J]. International Journal of Climatology, 2020, 41: E171-E186.
- [7] LI Y, GUAN K Y, SCHNITKEY G D, et al. Excessive rainfall leads to maize yield loss of a comparable magnitude to extreme drought in the United States[J]. Global Change Biology, 2019, 25(7): 2325-2337.
- [8] YUAN M S, ZHU Q A, ZHANG J, et al. Global response of terrestrial gross primary productivity to climate extremes[J]. Science of the Total Environment, 2021, 750: 142337.
- [9] YUAN W P, ZHENG Y, PIAO S L, et al. Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth[J]. Science Advances, 2019, 5(8): eaax1396.
- [10] ZHOU S, ZHANG Y, PARK WILLIAMS A, et al. Projected increases in intensity, frequency, and terrestrial carbon costs of compound drought and aridity events[J]. Science Advances, 2019, 5(1): eaau5740.
- [11] 黄涛, 徐力刚, 范宏翔, 等. 长江流域干旱时空变化特征及演变趋势[J]. 环境科学研究, 2018, 31(10): 1677-1684. (HUANG T, XU L G, FAN H X, et al. Temporal and spatial variation characteristics and the evolution trends of droughts in the Yangtze River basin[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(10): 1677-1684. (in Chinese))
- [12] BONTEMPS S, BOETTCHER M, BROCKMANN C, et al. Multi-year global land cover mapping at 300 m and characterization for climate modelling: achievements of the land cover component of the ESA Climate Change Initiative[J]. ISPRS-International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2015, XL-7/W3: 323-328.
- [13] HE J, YANG K, TANG W, et al. The first high-resolution meteorological forcing dataset for land process studies over China[J]. Scientific Data, 2020, 7(1): 25.
- [14] BRASWELL B H, SCHIMEL D S, LINDER E, et al. The response of global terrestrial ecosystems to interannual temperature variability[J]. Science, 1997, 278(5339): 870-873.
- [15] FENSHOLT R, RASMUSSEN K, NIELSEN T T, et al. Evaluation of earth observation based long term vegetation trends: intercomparing NDVI time series trend analysis consistency of Sahel from AVHRR GIMMS, Terra MODIS and SPOT VGT data[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(9): 1886-1898.
- [16] AHMADI S H, FOOLADMAND H R. Spatially distributed monthly reference evapotranspiration derived from the calibration of Thornthwaite equation: a case study, South of Iran[J]. Irrigation Science, 2008, 26(4): 303-312.
- [17] LU Y, HU H C, LI C, et al. Increasing compound events of extreme hot and dry days during growing seasons of wheat and maize in China[J]. Scientific Reports, 2018, 8: 16700.
- [18] JIN J X, MA X L, CHEN H, et al. Grassland production in response to changes in biological metrics over the Tibetan Plateau [J]. Science of the Total Environment, 2019, 666: 641-651.
- [19] 陈烈庭. 青藏高原异常雪盖和 ENSO 在 1998 年长江流域洪涝中的作用[J]. 大气科学, 2001, 25(2): 184-192. (CHEN L T. The role of the anomalous snow cover over the Qinghai-Xizang Plateau and ENSO in the great floods of 1998 in the Changjiang River valley[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2001, 25(2): 184-192. (in Chinese))
- [20] 贾艳青, 张勃. 1960—2016 年中国北方地区极端干湿事件演变特征[J]. 自然资源学报, 2019, 34(7): 1543-1554. (JIA Y Q, ZHANG B. Spatio-temporal changes of the extreme drought and wet events in Northern China from 1960 to 2016[J]. Journal of Natural Resources, 2019, 34(7): 1543-1554. (in Chinese))

- [21] JIANG P, YU Z B, YUAN F F, et al. The multi-scale temporal variability of extreme precipitation in the source region of the Yellow River[J]. *Water*, 2019, 11(1): 92.
- [22] FLETCHER A L, SINCLAIR T R, ALLEN L H Jr. Transpiration responses to vapor pressure deficit in well watered 'slow-wilting' and commercial soybean[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2007, 61(2): 145-151.
- [23] NOVICK K A, FICKLIN D L, STOY P C, et al. The increasing importance of atmospheric demand for ecosystem water and carbon fluxes[J]. *Nature Climate Change*, 2016, 6(11): 1023-1027.
- [24] WANG Y, LIU Y B, JIN J X. Contrast effects of vegetation cover change on evapotranspiration during a revegetation period in the Poyang Lake basin, China[J]. *Forests*, 2018, 9(4): 217.
- [25] XU W Y, JIN J X, JIN X B, et al. Analysis of changes and potential characteristics of cultivated land productivity based on MODIS EVI: a case study of Jiangsu Province, China[J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(17): 2041.

## Spatial-temporal variabilities of the contrasting hydrometeorological extremes and the impacts on vegetation growth over the Yangtze River basin\*

JIN Jiabin<sup>1,2</sup>, XIAO Yuanyuan<sup>1</sup>, JIN Junliang<sup>3</sup>, ZHU Qiuhan<sup>1,2</sup>, YONG Bin<sup>1,4</sup>, JI Yingying<sup>1</sup>

(1. *School of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210024, China*; 2. *National Earth System Science Data Center, National Science & Technology Infrastructure of China, Beijing 100101, China*; 3. *Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China*; 4. *State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

**Abstract:** This research aimed to determine the temporal and spatial variations of the hydrometeorological extremes, and their impacts on vegetation across the Yangtze River basin (YRB). First, a meteorological reanalysis dataset with high spatial and temporal resolution from 1982 to 2015 was used to identify and analyze the annual variation trends of the extreme drought (Dry-PRE or Dry-VPD) and extreme wetness (Wet-PRE or Wet-VPD), based on precipitation and vapor pressure deficit (VPD), respectively. Subsequently, the responses and sensitivities of vegetation growth (indicated by normalized difference vegetation index, NDVI) to the hydrometeorological extremes were explored. The results showed that the frequencies of Dry-VPD, Wet-PRE and Dry-PRE generally increased while that of Wet-VPD decreased during the study period. Particularly, Dry-VPD increased significantly in the upstream and downstream of the YRB after 1998. The vegetation across the YRB was more sensitive to extreme drought (mainly with a negative correlation) than extreme wetness. Moreover, the vegetation growth in the upstream was sensitive to Dry-VPD, while that in the midstream and downstream was sensitive to Dry-PRE. To summarize, this study found that extreme drought was on the rise across YRB. Different from the general notion that precipitation limits vegetation growth, our study indicates that vegetation in the upper reach of the YRB is more negatively impacted by atmospheric drought.

**Key words:** hydrometeorological extreme; vapor pressure deficit; drought; wetness; normal difference vegetation index; Yangtze River basin

\* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No. 2018YFA0605402) and the National Natural Science Foundation of China (No. 41971374).