

基于气候区的全球干旱形势分析

吴陶樱, 方秀琴, 吴小君, 杜晓彤, 汪 伟

(*河海大学 地球科学与工程学院, 南京 211100*)

摘 要:使用 Mann-Kendall 趋势检验方法对过去三十多年间全球陆地和各气候区的干旱变化进行了分析,得到了全球陆地和各气候区内的干旱变化情况。结果表明:在干旱发生影响范围上,湿润地区的影响范围更大,而在干旱发生的频率上,干旱半干旱地区的频率更高。同时,热带季风气候区、热带稀树草原气候区、沙漠气候区、湿润亚热带气候区和海洋性气候区干旱面积有显著变大趋势,全球陆地、湿润大陆性气候区、亚寒带气候区和苔原气候区干旱面积有显著变小趋势。文章又对过去三十多年间全球和各气候区的变干趋势和变湿趋势进行了研究,发现全球 20% 以上的陆地有显著变干趋势,20% 以上的陆地有显著变湿趋势,其中热带季风气候区和热带稀树草原气候区有 40% 以上面积有显著变干趋势,亚寒带气候区和苔原气候区有 40% 以上面积有显著变湿趋势。

关键词:全球干旱; 气候分区; Mann-Kendall 检验; SPI

中图分类号:P426.616

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2019)03-0166-08

Analysis of Globe Drought Conditions Based on Climate Zones

WU Taoying, FANG Xiuqin, WU Xiaojun, DU Xiaotong, WANG Wei

(*School of Earth Sciences and Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China*)

Abstract: We analyzed changes in the world and climate zones under drought over the past three decades using Mann-Kendall trend test and showed how drought changed in the globe and different climate zones. The results revealed that, in terms of amplitude, it had a larger drought-influence-area in humid areas, but arid and semi-arid areas showed a higher frequency of drought. The results exhibited a significant growing trend in the area under drought over tropical monsoon climate zone, tropical savanna climate zone, desert climate zone, humid subtropical climate zone and oceanic climate zone, while there's a significant shrinking trend in the area under drought over the global land, humid continental climate zone, subarctic climate zone and tundra climate zone. We investigated the drying and wetting trend in globe and climate zones over the past three decades, and we found that over 20% of lands of globe were getting drier and over 20% of lands of globe were getting wetter respectively, and over 40% of lands of tropical monsoon climate zone and tropical savanna climate zone showed the significant drying trend while over 40% of lands of subarctic climate zone and tundra climate zone showed the significant wetting trend.

Keywords: global drought; climate classification; Mann-Kendall test; SPI

干旱是一种发生在所有气候区的常见的自然灾害,已经引起了环境学家、生态学家、水文学家、气象学家、地质学家以及农业科学家的注意。通常干旱被分为 4 类:气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱^[1-5]。干旱发展缓慢,但造成的影响随着季节或年份的持续而累积,并且在干旱结束后的一段时间内,造成的影响并不会随之结束^[6]。例如,Schwalm

等^[7]研究发现,当干旱发生后,干旱恢复时间与气候和碳循环动态密切相关,热带地区和北半球高纬度地区(地球气候系统的脆弱地区)让生态系统恢复到干旱发生前的状态需要的时间最长;Lesk 等^[8]研究发现由干旱造成的生产损失与收获面积减少、产量下降有关,而极端高温主要导致谷物产量下降;Doughty 等^[9]研究发现,在干旱发生期间,亚马孙流域的树木

净初级生产力没有变化,光合作用减弱,树木通过减少与生长无关(组织维护、自身防御)的自养呼吸来优先生长,这将导致旱后树木死亡率增加。因此对气象干旱进行研究,了解气象干旱的发生趋势与模式,对预防可能引起的水文干旱及农业干旱十分重要。

标准化降水指数(SPI)是 McKee 等^[10]提出的,世界气象组织(WMO)所推荐^[11]的,用于描述气象干旱的干旱指数。SPI 的正值代表湿润,负值代表干燥^[12]。SPI 值在-2 到-1 之间代表了中度干旱(下文用“中旱”表示)和严重干旱(下文用“重旱”表示),当 $SPI \leq -2$ 时,代表了特大干旱(下文用“特旱”表示)^[10]。由于 SPI 灵活简单,它被广泛用于各种干旱研究中,比如 Wang 等^[13]、Leng 等^[14]、Hao 等^[15]、Mo^[16]、张苗苗^[17]、Park 等^[18]等均使用 SPI 来表示气象干旱。

了解过去干旱发生的频率和影响范围对预计未来干旱的发生有极大帮助,目前对气候与干旱的研究主要集中在两方面:一方面是区域尺度气候变化对干旱的影响,比如 Leng 等^[14]利用标准化降水指数,标准化径流指数和标准化土壤湿度指数,从气象、农业和水文角度评估气候变化对我国干旱的影响,Wang 等^[13]基于气候变化预测和降水尺度技术,评估气候变化对伊利诺斯州中部干旱的影响可靠性,柳媛普等^[19]对气候变暖背景下我国西南地区的干旱风险进行评估;另一方面是气候变化导致的干旱对生态、社会经济等方面造成的影响,比如 Dallmann 等^[20]研究了气候变化导致的干旱对印度移民的影响,Young 等^[21]研究了气候变化导致的干旱对树木死亡率的影响,王华等^[22]研究了气候变暖背景下广东气象灾害的变化及对广东冬种的影响。而对于全球的气候区内干旱的特征及变化的研究不多,并且现有的少量研究仅在区域尺度上进行气候区内干旱特征探究,如 Park 等^[18]对美国 2000—2012 年干旱区与湿润区作物生长季的气象干旱与农业干旱进行了研究,以及 Son 等^[23]对亚洲季风区不同气候区转变为干旱区的干旱特征进行了研究。

同一气候区内因气温、降水条件相似,空间相关性较高,发生干旱特征也更相似,因此本文使用基于卫星的数据集,采用 SPI 指数,对全球陆地及各气候区内的干旱趋势进行研究,得到全球陆地及各气候区内的干旱特征及变化形势。

1 数据和方法

1.1 数据

本文所使用的 SPI 数据来自于 MERRA 数据集

(Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications)。MERRA 是最近推出的一套基于将现场和遥感观测资料同化为全球大气和陆地表面数值模式的全球长期再分析产品(<http://dx.doi.org/10.6084/m9.figshare.853801>),除了估算大气条件外,再分析产品还提供陆地表面场的估算,包括地面气象强迫数据(如降水,辐射,气温和湿度)以及地表状态和通量(如土壤湿度,雪和径流),其中包括 SPI 数据^[24]。本研究所使用的 SPI 的时间跨度为 1980 年 1 月—2013 年 9 月,空间分辨率为 $0.67^\circ \times 0.5^\circ$,时间分辨率为月尺度,数据覆盖全球陆地(其中格陵兰岛大部分地区和南极没有数据)。

气候区的分类参考柯本—盖格气候分类方法^[25](<http://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/present.htm>),并作了一定改进。柯本—盖格气候分类按气温和降水分为 30 个气候区,在此基础上我们考虑气温、降水和区域位置及面积进行一定程度的归类,归类条件见表 1,归类后一共划分了 12 个气候分区,作为本研究所采用的气候分区。

表 1 中 T_{\min} 表示最冷月月均温, T_{\max} 表示最热月月均温, T_{mon} 表示月均温, P_{\min} 表示最干燥月份降水量, P_{ann} 表示年降水量, P_{th} 表示降水阈值,计算如式(1)所示, P_{\min} 表示夏半年降水最少月份降水量, P_{wmin} 表示冬半年降水最少月份降水量, P_{wmax} 表示冬半年降水最多月份降水量。

$$P_{\text{th}} = \begin{cases} 2\{T_{\text{ann}}\} & \text{一年中至少 67\% 的降水发生在冬半年} \\ 2\{T_{\text{ann}}\} + 28, & \text{一年中至少 67\% 的降水发生在夏半年} \\ 2\{T_{\text{ann}}\} + 14 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

其中 T_{ann} 表示年均温,夏半年指北半球 4—9 月,南半球 10—3 月,冬半年指北半球 3—10 月,南半球 4—9 月。

1.2 方法

本文采用 SPI-6(由当月及前 5 个月的降水计算得到)^[10]进行研究,参考 GB/T20481~2017 气象干旱等级,本研究使用的干旱等级是:(1) $-2 < SPI \leq -1$ (中旱、重旱), (2) $SPI \leq -2$ (特旱)。我们先用 ArcGIS 的 Select 工具提取不同干旱等级的点,然后使用 Point to Raster 工具将点转换为栅格,接着使用 ArcGIS 的 Zonal Statistics as Table 工具统计了 12 个气候分区的干旱栅格数量,计算得到全球陆地及各气候分区内的干旱面积占比。最后使用非参数 Mann-Kendall 检验(M-K 检验)^[26-27]对全球陆地以及 12 个气候分区内不同干旱等级的干旱面积占比以及全球所有栅格进行趋势检验。

表 1 12 个气候分区归类条件

命名	包含柯本—盖格气候区	归类条件
热带气候	A	$T_{\min} \geq 18^{\circ}\text{C}$
热带雨林气候	Af	$P_{\min} \geq 60\text{ mm}$
热带季风气候	Am	$P_{\text{ann}} \geq (100 - P_{\min}) \times 25$
热带稀树草原气候	As, Aw	$P_{\text{ann}} < (100 - P_{\min}) \times 25$
干燥气候	B	$P_{\text{ann}} < 10 P_{\text{th}}$
半干旱气候	BSh, BSk	$P_{\text{ann}} > 5 P_{\text{th}}$
沙漠气候	BWh, BWk	$P_{\text{ann}} \leq 5 P_{\text{th}}$
温带气候	C	$-3^{\circ}\text{C} < T_{\min} < 18^{\circ}\text{C}$
地中海气候	Csa, Csb, Csc	$P_{\text{smin}} < P_{\text{wmin}}, P_{\text{wmax}} > 3 P_{\text{smin}}, P_{\text{smin}} < 40\text{ mm}$
湿润亚热带气候	Cfa, Cwa	$T_{\text{max}} \geq 22^{\circ}\text{C}$
海洋性气候	Cfb, Cfc, Cwb, Cwc	$T_{\text{max}} < 22^{\circ}\text{C}$
大陆性气候	D	$T_{\min} \leq -3^{\circ}\text{C}$
湿润大陆性气候	Dfa, Dfb, Dsa, Dsb, Dwa, Dwb	至少有 4 个月的 $T_{\text{mon}} \geq 10^{\circ}\text{C}$
亚寒带气候	Dfc, Dfd, Dsc, Dwc, Dwd	$T_{\text{mon}} \geq 10^{\circ}\text{C}$ 少于 4 个月
极地气候	E	$T_{\text{max}} < 10^{\circ}\text{C}$
冰原气候	EF	$T_{\text{max}} < 0^{\circ}\text{C}$
苔原气候	ET	$0^{\circ}\text{C} \leq T_{\text{max}} < 10^{\circ}\text{C}$

M-K 趋势检验是指对样本的相对大小进行比较,并返回一个样本是否有某种趋势的判断。对一个随机变量组 $X(x_1, x_2, \cdots, x_n)$, M-K 趋势检验方法见式(2):

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i) \tag{2}$$

其中 n 表示样本大小, sgn 是个符号函数:

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

在 M-K 检验中,当式(2)中的 $S > 0$ 时,表示随机变量组有增长的趋势,当 $S < 0$ 时,表示随机变量组有减少的趋势。趋势的显著性可以用 z 检验来获得:

$$z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sigma(S)} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sigma(S)} & S < 0 \end{cases} \tag{4}$$

其中 z 代表标准 z 统计检验^[28], σ 是标准差,可用式(5)近似表示:

$$\sigma(S) = \sqrt{\frac{n(n-1)(2n+5)}{18}} \tag{5}$$

本文使用 0.05, 0.01 的置信水平,分别表示 95% 和 99% 的可信度。

2 结果与分析

2.1 不同气候区干旱面积占比变化

1980—2013 年中旱、重旱 ($-2 < \text{SPI} \leq -1$) 和特旱 ($\text{SPI} \leq -2$) 在全球陆地和 12 个气候大区的面积占比变化情况如图 1 和图 2 所示。

(1) 在热带气候区内,2000 年之前发生大范围(干旱面积占比超过全球陆地)干旱的频率较小,但是干旱发生时的影响范围(干旱面积占比)较大。2000 年之后发生大范围干旱的频率有较大幅度增加,但是干旱发生时的影响范围比 2000 年之前有略微减小。在热带的 3 个气候区内,热带雨林气候区在 2000 年前干旱发生的影响范围最大,2000 年之后干旱发生的影响范围有所下降;热带季风气候区在 2000 年后干旱发生的影响范围最大,发生大范围干旱的频率有所上升;热带稀树草原气候区在 2000 年之后发生大范围干旱的频率有所增加。

(2) 在干燥气候区内,干旱发生的影响范围与发生大范围干旱的频率没有太大差别。在干燥气候的两个气候区内,半干旱气候区在 2003 年前干旱发生的影响范围较大,而 2003 年之后干旱发生的影响范围大幅度减小,而沙漠气候区发生干旱的影响范围与发生大范围干旱的频率均没有太大差别。

(3) 在温带气候区内,发生大范围中旱、重旱的频率没有太大差别,2003 年之后干旱发生的影响范围略微有所增加,而对于特旱,2005 年前发生大范围干旱的频率与影响范围均比 2005 年后大。在温带的 3 个气候区内,2005 年后海洋性气候区发生大范围特旱的影响范围与频率下降到与全球平均相当,发生大范围中旱、重旱的影响范围与频率没有太大差别;地中海气候区 2005 年后发生大范围特旱的影响范围与频率也有大幅度下降,发生大范围中旱、重旱的影响范围与频率同样没有太大差别;而湿润亚热带气候区发生大范围中旱、重旱以及大范围特旱的影响范围与频率均无太大差别。

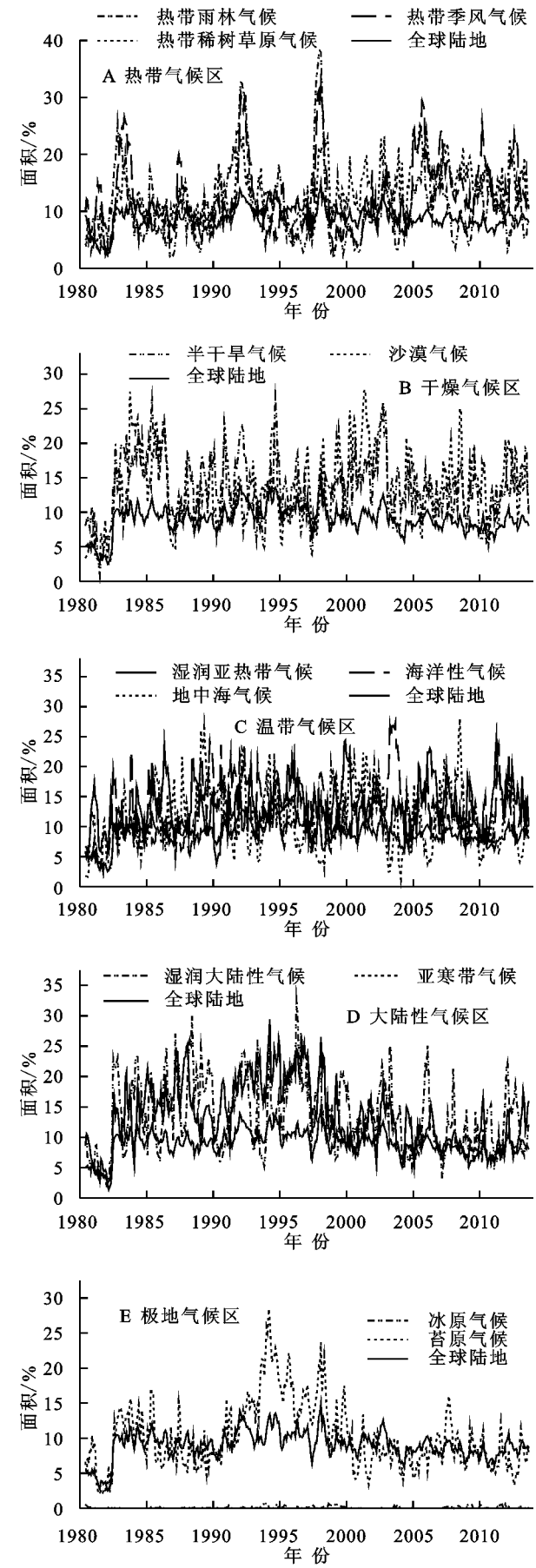


图 1 1980—2013 年中旱、重旱 ($-2 < SPI \leq -1$) 在全球陆地及 12 个气候分区面积占比

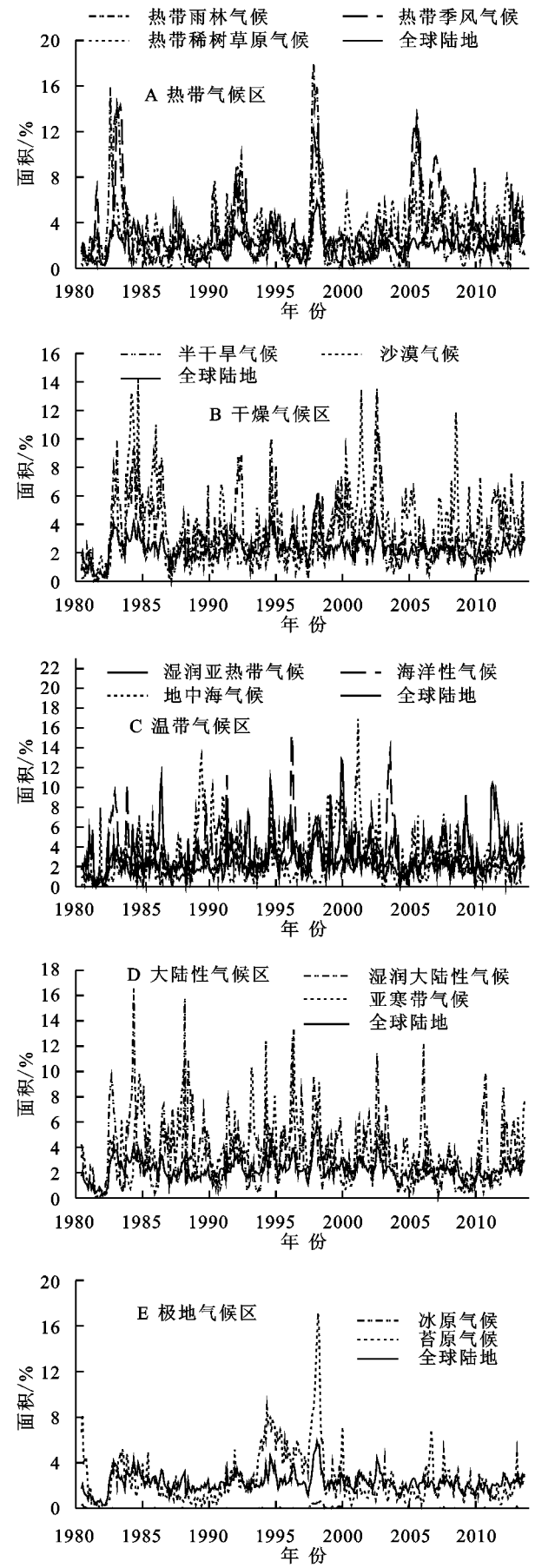


图 2 1980—2013 年特旱 ($SPI \leq -2$) 在全球陆地及 12 个气候分区面积占比

(4) 在大陆性气候区内,发生大范围干旱的影响范围与频率均在 2000 年后有所下降。在大陆性气候区的两个气候区内,湿润大陆性气候区在 2000 年后发生干旱的影响范围有略微减少,频率有较大幅度下降;而亚寒带气候区在 2000 年后大范围干旱发生的影响范围以及频率均有较大幅度下降。

(5) 在极地气候区内,由于冰原气候区所在范围主要是南极和格陵兰岛,我们的原始数据只覆盖了很小一部分,即便有干旱发生,影响范围也十分有限。而苔原气候区除 1990 年代有较大范围的干旱,其余年份的干旱情况与全球平均相持平,并且自 2000 年后发生干旱的影响范围略低于全球平均水平。

表 2 1980—2013 年全球陆地和各气候区干旱面积百分比变化范围和均值

气候类型	-2<SPI≤-1		SPI≤-2	
	范围/%	平均/%	范围/%	平均/%
全球陆地	12.44	9.01	5.63	2.26
热带雨林气候	36.11	10.74	18.02	2.65
热带季风气候	30.46	12.10	14.19	3.05
热带稀树草原气候	22.91	12.89	11.08	3.22
半干旱气候	25.68	13.53	13.50	3.38
沙漠气候	25.37	13.51	14.30	3.43
地中海气候	26.71	11.58	16.92	2.89
湿润亚热带气候	21.21	13.05	12.80	3.26
海洋性气候	25.06	12.44	15.34	3.11
湿润大陆性气候	30.70	13.54	16.54	3.39
亚寒带气候	28.05	13.46	13.25	3.38
冰原气候	0.78	0.10	0.71	0.02
苔原气候	26.49	10.18	17.10	2.57

表 2 分别列出了 1980—2013 年全球陆地和各气候区处于干旱下的面积百分比变化范围和平均值。从图 1、图 2 和表 2 中可以得知,对于全球五大气候区(热带气候区、干燥气候区、温带气候区、大陆性气候区和极地气候区):

(1) 相对湿润的气候区(如热带气候区中的热带雨林气候区、干燥气候区中的半干旱气候区、大陆性气候区中的湿润大陆性气候区、极地气候区中的苔原气候区)内发生干旱的影响范围更大;

(2) 降水相对较少的气候区(如热带气候区中年均降水最少的热带稀树草原气候区,以及干燥气候区)内发生大范围干旱的频率相对更高;

(3) 各气候区发生干旱影响范围与大范围干旱的频率大部分在 21 世纪后发生变化:热带气候区在 2000 年前后发生干旱影响范围减小、大范围干旱的频率增加,干燥气候区中的半干旱气候区在 2003 年前后发生干旱影响范围大幅度减小,温带气候区在 2003—2005 年前后发生干旱的影响范围与大范围干

旱的频率有较复杂的变化,大陆性气候区在 2000 年前后发生干旱的影响范围与大范围干旱的频率均有所下降,极地气候区中的苔原气候区在 2000 年前后发生干旱的影响范围与大范围干旱频率均降低,且略低于全球平均水平。

2.2 不同气候区干旱面积变化趋势

在统计了全球陆地及各气候区发生干旱的面积变化情况后,我们使用 M-K 检验对全球及各气候区的干旱面积变化趋势进行了检验,结果见表 3。

表 3 1980—2013 年全球陆地及各气候区干旱面积变化趋势

区域	干旱等级	趋势	干旱等级	趋势
全球陆地	SPI≤-1	-1**	SPI≤-2	0
热带雨林气候	SPI≤-1	0	SPI≤-2	0
热带季风气候	SPI≤-1	1**	SPI≤-2	1**
热带稀树草原气候	SPI≤-1	1**	SPI≤-2	1**
半干旱气候	SPI≤-1	0	SPI≤-2	0
沙漠气候	SPI≤-1	1**	SPI≤-2	1**
地中海气候	SPI≤-1	0	SPI≤-2	0
湿润亚热带气候	SPI≤-1	1**	SPI≤-2	1**
海洋性气候	SPI≤-1	1*	SPI≤-2	0
润湿大陆性气候	SPI≤-1	-1**	SPI≤-2	0
亚寒带气候	SPI≤-1	-1**	SPI≤-2	-1**
冰原气候	SPI≤-1	0	SPI≤-2	0
苔原气候	SPI≤-1	-1**	SPI≤-2	0

注: * 表示通过 0.05 显著性检验; ** 表示通过 0.01 显著性检验

从表 3 可看出,热带雨林气候区、半干旱气候区、地中海气候区和冰原气候区没有显著的干旱面积变化趋势。热带季风气候区、热带稀树草原气候区、沙漠气候区、湿润亚热带气候区和海洋性气候区发生干旱的面积均有变大趋势,并且热带季风气候区、热带稀树草原气候区、沙漠气候区、湿润亚热带气候区均通过了 0.01 显著性检验,海洋性气候区通过了 0.05 显著性检验;热带季风气候区、热带稀树草原气候区、沙漠气候区和湿润亚热带气候区发生特旱等级干旱的面积都有显著变大的趋势,并且都通过了 0.01 显著性检验。全球陆地、湿润大陆性气候区、亚寒带气候区和苔原气候区干旱面积均有变小趋势,并且均通过了 0.01 显著性检验;亚寒带气候区发生特旱等级干旱的面积有显著变小的趋势,并且通过了 0.01 显著性检验。

2.3 栅格 SPI 值 M-K 检验结果

在对全球陆地及各气候区发生干旱的趋势进行检验后,我们又对所有栅格的 SPI 值进行了 M-K 检验,以查看全球陆地的变化趋势(变干趋势和变湿趋势)。对栅格 SPI 值进行 M-K 检验的结果如图 3 所示,颜色越深表示变干或变湿的趋势越显著。

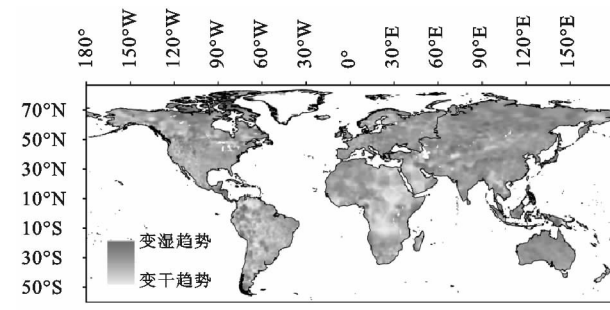


图 3 栅格 M-K 检验结果

从图 3 可以看出,北美洲西海岸、南美洲大部分地区、非洲东部一大半地区、欧洲西部和北部、阿拉伯半岛、亚洲中南半岛北部、白令海峡一带有非常显著的变干趋势;北美洲北部、北美洲南部加勒比海地区、亚洲北部、东南亚、澳大利亚大部分地区有非常显著的变湿趋势。

从图 4 和图 5 可以进一步看出,加拿大西部、美国西部和南部、墨西哥、南美洲绝大部分地区、非洲东部绝大部分地区、西欧、北欧、阿拉伯半岛、中南半岛、中国西南部分地区、蒙古、巴布亚新几内亚、新西兰南岛、俄罗斯远东地区白令海峡一带均有显著的变干趋势。加拿大北部、美国东海岸、北美洲南部加勒比海地区、非洲地中海沿岸西部、欧洲中部、俄罗斯亚洲境内、中亚、中国北纬 30°~40°、青藏高原东部、东南亚、

澳大利亚西部和北部均有显著的变湿趋势。美国大平原、非洲西部和南部、欧洲东部、印度大部分地区、中国南方和东北、澳大利亚东南均没有显著的变干趋势或变湿趋势。

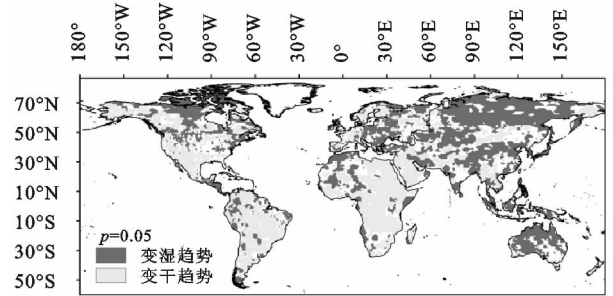


图 4 栅格 M-K 检验通过 0.05 置信水平变湿趋势和变干趋势分布

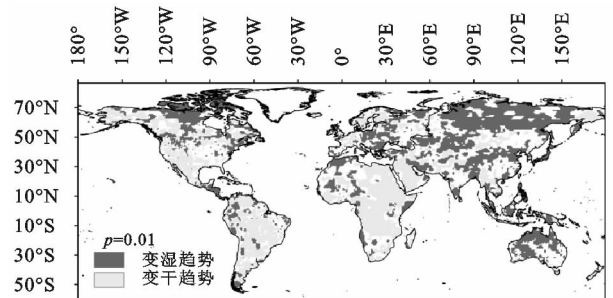


图 5 栅格 M-K 检验通过 0.01 置信水平变湿趋势和变干趋势分布

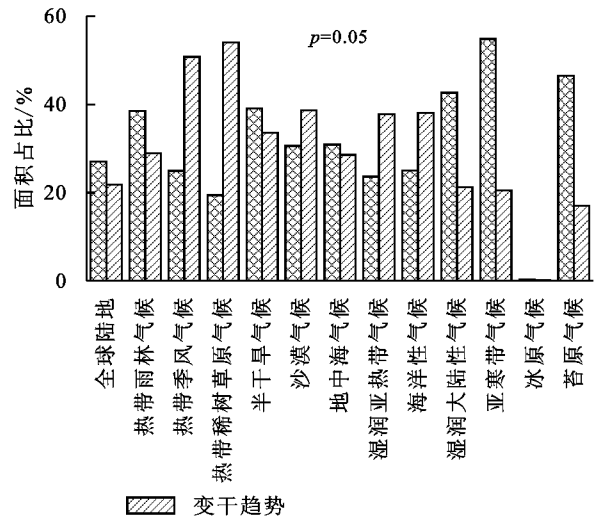
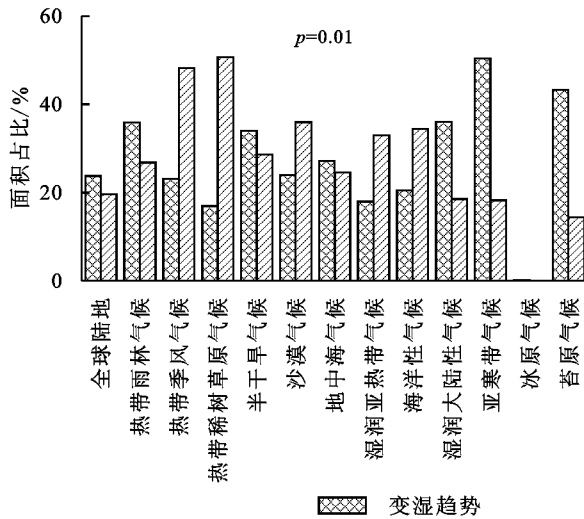


图 6 全球陆地和各气候区有显著变湿趋势和变干趋势面积占比

从图 6 可以看出,全球有 20% 以上的陆地分别有显著变干趋势和显著变湿趋势,变湿趋势所占面积更大。在热带气候区中:热带雨林气候区有 35% 左右的面积有显著变湿趋势,有 25% 左右的面积有显著变干趋势;热带季风气候区有 20% 以上的面积有显著变湿趋势,而有显著变干趋势的面积占比是显著变湿面积的两倍多;热带稀树草原气候区同样是显著变干趋势面积是显著变湿趋势面积的两倍多。在干燥气候区中:半干旱气候区显著变干趋势和显著变湿

趋势所占的面积均在 30% 左右,显著变湿趋势所占面积更大;沙漠气候区有 20% 以上的面积有显著变湿趋势,显著变干趋势面积达到了 30% 以上。在温带气候区中:仅地中海气候区显著变湿趋势所占面积更大,达到了 30% 左右;湿润亚热带气候区和海洋性气候区有显著变干趋势的面积是有显著变湿趋势面积的近 1.5 倍。在大陆性气候区中:湿润大陆性气候区和亚寒带气候区的显著变干趋势所占面积均为 20% 左右,而这两个气候区中显著变湿的面积均大大

超过显著变干趋势的面积,前者达到了40%左右,后者达到了50%左右。在极地气候区中:苔原气候区仅不到20%的面积有显著变干趋势,而有显著变湿趋势的面积达到了40%;冰原气候区由于数据覆盖范围太小,两种趋势所占面积可以忽略不计。

3 讨论

本文使用1980—2013年的SPI-6数据对全球陆地及12个气候大区进行了干旱形势分析。分析表明,在不同气候区中,较湿润气候区发生干旱的范围变化较大,较干旱气候区发生大范围干旱的频率较高,各气候区干旱发生的影响范围与大范围干旱的频率大部分在21世纪后发生变化(图1,图2,表2)。热带气候区中热带季风气候区和热带稀树草原气候区发生大范围干旱的频率在2000年后有所增加,与表3、图6的结果一致;大陆性气候区中湿润大陆性气候区和亚寒带气候区在2000年后发生干旱的影响范围与大范围干旱的频率均有一定程度的下降,与表3、图6的结果一致;极地气候区中苔原气候区发生干旱的影响范围与大范围干旱的频率在2000年后有一定程度的下降,与表3、图6的结果一致。

对全球陆地整体和各气候区分别进行M-K检验的结果(表3)显示,全球总体而言并无显著的干旱面积增加趋势,这与Sheffield等^[29],Damberg等^[30]的研究结果一致。然而,热带季风气候区、热带稀树草原气候区、沙漠气候区、湿润亚热带气候区和海洋性气候区发生干旱的面积有显著增加的趋势,其中热带季风气候区、热带稀树草原气候区、沙漠气候区和湿润亚热带气候区发生特旱等级干旱的面积有十分显著的增加趋势,这可能是由于极端降水增多,而总降水量并无太大变化^[31]造成的。全球陆地整体、湿润大陆性气候区、亚寒带气候区和苔原气候区发生干旱的面积有显著减少的趋势;亚寒带气候区发生特旱等级干旱的面积有十分显著的减少趋势,这可能是由于全球变暖,亚寒带地区降水增加^[32]造成的。

对栅格进行M-K检验的结果显示,全球20%以上的陆地有显著变干趋势,20%以上的陆地有显著变湿趋势,其中热带季风气候区、热带稀树草原气候区、沙漠气候区、湿润亚热带气候区和海洋性气候区有变干趋势的面积更大,而全球陆地、热带雨林气候区、半干旱气候区、地中海气候区、湿润大陆性气候区、亚寒带气候区和苔原气候区有变湿趋势的面积更大,热带地区有变干的趋势可能是由于极端降水增多,而总降水量并无太大变化^[31]造成的,寒冷地区有变湿的趋势可能是由于全球变暖,寒冷地区降水增加^[32]造成的。

4 结论与展望

本文使用SPI-6对全球陆地及各气候区过去三十多年间的干旱情况进行了分析,结果表明:在干旱发生影响范围上,湿润地区的影响范围更大;而在大范围干旱发生的频率上,干旱半干旱地区的频率更高。

全球陆地及各气候区干旱面积的变化趋势分析结果显示,干旱的发生和变化具有强烈的空间异质性,表现为全球总体而言并无显著干旱面积增加趋势,这与其他学者^[29-30]的研究结果一致,而热带季风气候区、热带稀树草原气候区、沙漠气候区、湿润亚热带气候区和海洋性气候区干旱面积有显著变大趋势,其中热带季风气候区、热带稀树草原气候区、沙漠气候区和湿润亚热带气候区发生特旱等级干旱的面积有十分显著的变大趋势;同时全球陆地、湿润大陆性气候区、亚寒带气候区和苔原气候区干旱面积有显著变小趋势,其中亚寒带气候区发生特旱等级干旱的面积有显著变小的趋势。

过去三十多年间全球和各气候区的变干趋势和变湿趋势显示全球有20%以上的陆地有显著变干趋势,20%以上的陆地有显著变湿趋势,其中热带季风气候区和热带稀树草原气候区有40%以上面积有显著变干趋势,亚寒带气候区和苔原气候区有40%以上面积有显著变湿趋势。

本文对气候区的划分较为粗糙,未来可以对划分更加精细的气候区进行研究。在对气候区重新划分的过程中,我们发现气候区的划分也有季节之分,未来同样也可以对不同季节下各气候区进行研究。本文仅对各气候区干旱的整体情况进行研究,无法显示具体干旱区域的变化,未来可对典型干旱区域、典型干旱事件进行研究。

参考文献:

- [1] Wilhite D A, Glantz M H. Understanding the drought phenomenon: the role of definitions[J]. Water International, 1985,10(3):111-120.
- [2] Hisdal H, Stahl K, Tallaksen LM, et al. Have stream-flow droughts in Europe become more severe or frequent [J]. International Journal of Climatology, 2001,21(3): 317-33.
- [3] Keyantash J, Dracup J A. The quantification of drought: An evaluation of drought indices[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2002,83(8):1167-1180.
- [4] Nagarajan R. Drought Indices[J]. Drought Assessment, 2009:160-204.
- [5] Sheffield J, Wood E F. Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model,

- multi-scenario, IPCC AR4 simulations [J]. *Climate Dynamics*, 2008, 31(1):79-105.
- [6] Anonymous. Meteorological drought (accepted by the AMS Councils 2 February 1997) [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 78(5):847-849.
- [7] Schwalm C R, Anderegg W R L, Michalak A M, et al. Global patterns of drought recovery [J]. *Nature*, 2017, 548(7666):202-205.
- [8] Lesk C, Rowhani P, Ramankutty N. Influence of extreme weather disasters on global crop production [J]. *Nature*, 2016, 529(7584):84.
- [9] Doughty C E, Metcalfe D B, Girardin C A J, et al. Drought impact on forest carbon dynamics and fluxes in Amazonia [J]. *Nature*, 2015, 519(7541):78-82.
- [10] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales [C]. California: Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology, 1993: 179-184.
- [11] Hayes M, Svoboda M, Wall N, et al. The Lincoln declaration on drought indices [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2011, 92(4):485-488.
- [12] Zargar A, Sadiq R, Naser B, et al. A review of drought indices [J]. *Dossiers Environment*, 2011, 19(1):333-349.
- [13] Wang D, Hejazi M, Cai X, et al. Climate change impact on meteorological, agricultural, and hydrological drought in central Illinois [J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(9): 1995-2021.
- [14] Leng G, Tang Q, Rayburg S. Climate change impacts on meteorological, agricultural and hydrological droughts in China [J]. *Global and Planetary Change*, 2015, 126(126):23-34.
- [15] Hao Z, AghaKouchak A. Multivariate Standardized Drought Index: A parametric multi-index model [J]. *Advances in Water Resources*, 2013, 57(9):12-18.
- [16] Mo K C. Model-Based Drought Indices over the United States [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 2008, 9(6): 1212-1230.
- [17] 张苗苗. 基于 SPI 的近 51 a 晋北地区旱涝变化及干旱事件时空特征研究 [J]. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(03):138-144.
- [18] Park S, Im J, Jang E, et al. Drought assessment and monitoring through blending of multi-sensor indices using machine learning approaches for different climate regions [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 216:157-169.
- [19] 柳媛普, 王素萍, 王劲松, 等. 气候变暖背景下西南地区干旱灾害风险评估 [J]. *自然资源学报*, 2018, 33(02): 325-336.
- [20] Dallmann I, Millock K. Climate Variability and Interstate Migration in India [J]. *Cesifo Economic Studies*, 2017, 63(4):560-594.
- [21] Young D J N, Stevens J T, Earles J M, et al. Long-term climate and competition explain forest mortality patterns under extreme drought [J]. *Ecology Letters*, 2017, 20(1):78-86.
- [22] 王华, 陈慧华, 唐力生, 等. 气候变暖背景下广东冬种生产季气候资源和气象灾害的时空变化 [J]. *应用生态学报*, 2018, 29(01):93-102.
- [23] Son K H, Bae D H. Drought analysis according to shifting of climate zones to arid climate zone over Asia monsoon region [J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 529: 1021-1029.
- [24] Hao Z, AghaKouchak A, Nakhjiri N, et al. Global integrated drought monitoring and prediction system [J]. *Scientific Data*, 2014, 1.
- [25] Kottek M, Grieser J, Beck C, et al. World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated [J]. *Meteorologische Zeitschrift*, 2006, 15(3):259-263.
- [26] Mann H B. Nonparametric Tests Against Trend [J]. *Econometrica*, 1945, 13(3):245-259.
- [27] Kendall M G. Rank correlation methods [M]. London: Griffin, 1975.
- [28] Yue S, Pilon P, Cavadias G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series [J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 259(1):254-271.
- [29] Sheffield J, Wood E F, Roderick M L. Little change in global drought over the past 60 years [J]. *Nature*, 2012, 491(7424):435-438.
- [30] Damberg L, AghaKouchak A. Global trends and patterns of drought from space [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2014, 117(3-4):441-448.
- [31] Easterling D R, Evans J L, Groisman P Y, et al. Observed variability and trends in extreme climate events: A brief review [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2000, 81(3):417-426.
- [32] IPCC. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2014.