

DOI: 10.5846/stxb201304120691

王春林, 邹菊香, 麦北坚, 陈慧华, 唐力生, 段海来. 近 50 年华南气象干旱时空特征及其变化趋势. 生态学报, 2015, 35(3): 595-602.

Wang C L, Zou J X, Mai B J, Chen H H, Tang L S, Duan H L. Temporal-spatial characteristics and its variation trend of meteorological drought in recent 50 years, South China. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(3): 595-602.

近 50 年华南气象干旱时空特征及其变化趋势

王春林^{1,2,*}, 邹菊香^{2,3}, 麦北坚⁴, 陈慧华¹, 唐力生¹, 段海来¹

1 广东省气候中心, 广州 510080

2 南京信息工程大学, 南京 210044

3 广东省汕头市气象局, 汕头 515041

4 广东省鹤山市气象局, 鹤山 539700

摘要: 采用标准化前期降水指数(SAPI)和常年平均相对湿度指数(M)构建的逐日气象干旱指数(DI), 根据华南(广东、广西)174个气象站资料分析了近 50 年(1961—2010 年)气象干旱时空特征及其气候变化趋势。结果表明: (1) 华南近 30 年(1981—2010 年)总旱日频率平均为 26.0%, 其中轻旱、中旱、重旱和特旱日分别为 12.3%、8.1%、4.2%和 1.4%。(2) 各等级旱日频率具有非汛期(10 月至次年 3 月)高于汛期(4 月至 9 月)、广西高于广东的特征。(3) 近 50 年华南最早的 5a 依次为: 1963、1991、2004、2009、1977。(4) 气候变化趋势分析表明, 1 至 9 月降水和月干旱指数(MI)以增加趋势为主, 各等级旱日数以减少趋势为主, 其中 7 月份 MI 增加趋势及各等级旱日减少趋势均达到 0.1 显著水平; 而 10 至 12 月降水和 MI 以减小趋势为主, 各等级旱日数以增加趋势为主, 其中 11 月份 MI 减小趋势及中旱、重旱、总旱日增加趋势均达到 0.05 显著水平。(5) 年总旱日趋于增加, 减少的站点数各占 60%、40%, 有 11% 的站点达到 0.1 以上显著水平。各等级旱日显著增加的站点大多集中在广西, 而旱日显著减少的站点主要集中在广东, 表明广西干旱总体上重于广东的格局可能进一步加剧。目的为进一步开展华南气候变化影响评估、水资源利用及应对气候变化提供基础。

关键词: 标准化前期降水指数(SAPI); 逐日气象干旱指数(DI); 气象干旱; 华南

Temporal-spatial characteristics and its variation trend of meteorological drought in recent 50 years, South China

WANG Chunlin^{1,2,*}, ZOU Juxiang^{2,3}, MAI Beijian⁴, CHEN Huihua¹, TANG Lisheng¹, DUAN Hailai¹

1 Guangdong Climate Center, Guangzhou 510080, China

2 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China

3 Shantou Meteorology Bureau of Guangdong Province, Shantou 515041, China

4 Heshan Meteorology Bureau, Heshan 539700, China

Abstract: Using the daily meteorological drought indicator (DI) constructed by standardized antecedent precipitation index (SAPI) and year round average relative moisture index (M), based on meteorological data of 174 stations of South China (includes Guangdong and Guangxi Province), temporal and spatial characteristics and its variation trend of meteorological drought in recent 50 years in South China was analyzed in the paper. Main results are: (1) Recent 30 years (1981—2010) average drought days frequency of all levels in South China is 26.0%, where light, middle, severe and extreme drought days accounts for 12.3%, 8.1%, 4.2% and 1.4% respectively. (2) Drought days of each level in non-flood season (October to March) are more than flood season (April to September), and Guangxi is more than Guangdong. (3) The most

基金项目: 公益性行业(气象)专项(GYHY201106021); 国家 973 计划(2013CB430206); 广东省科技计划(2012B020314006); 干旱气象科学研究基金(IAM201303)

收稿日期: 2013-04-12; **网络出版日期:** 2014-04-03

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wangcl@grmc.gov.cn

dry 5 years in recent 50 years in South China are 1963, 1991, 2004, 2009 and 1977. (4) According to linear trends analysis, rainfall and monthly drought index (MI) from January to September mainly show increasing trend, and drought days of each level mainly show decreasing trend, where increasing trend of MI and decreasing trend of drought days of each level in July are statistically significant ($\alpha=0.1$); while rainfall and MI from October to December mainly show decreasing trend, and drought days of each level mainly show increasing trends, where decreasing trend of MI and increasing trends of middle and severe drought days of November are statistically significant ($\alpha=0.05$). (5) Stations of increasing and decreasing trends of annual drought days account for 60% and 40% respectively, where 11% stations are statistically significant over 0.1 level. Stations with statistically significant increasing trend of drought days of each levels are mostly in Guangxi Province, while stations with statistically significant decreasing trend of drought days are in Guangdong Province, indicating that the overall pattern that drought in Guangxi is more severe than in Guangdong may further aggravate in the future. The study can provide a base for further study on climate change evaluation, water resources utility and coping strategies of climate change as well.

Key Words: standardized antecedent precipitation index ($SAPI$); Daily meteorological drought indicator (DI); Meteorology drought; South China

华南地处低纬,濒临南海,受低纬度热带天气系统和中高纬度天气系统的交替影响,天气气候复杂多变。华南虽然年降水比较充沛,属于湿润气候区^[1],但时空分布不均,兼之太阳辐射强、气温高、土壤蒸发和作物蒸腾强烈,区域性、季节性干旱十分突出,华南沿海地区是我国五大气象干旱中心之一^[2-4],也是气候变化敏感区和脆弱区之一。在全球变化背景下,极端干旱气候事件呈频发趋势,全球水资源和水循环研究已经成为全球变化科学的新的战略重点^[5]。

文献中对华南干旱的研究可分为阶段降水评估和逐日干旱监测评估两类。降水评估类研究包括对华南区域代表站点年度^[6]、季度^[7-8]、汛期(前汛期)^[9-10]等不同时间尺度降水的分析评定,研究方法包括极差法^[6]、距平法^[8-9]、标准化降水指数^[7,10]等。逐日干旱监测评估研究近年日益得到重视,广东干旱逐日监测评估中发展了逐日土壤水分模拟方法^[11-14],近年随着综合气象干旱指标 CI ^[15] 及其改进指标^[16] 在全国气象干旱监测评估中广泛应用^[3-4,17-18],王春林等^[19] 从气象干旱定义“降水持续偏少导致的水分亏缺现象”出发,考虑干旱累积效应^[2],提出基于标准化前期降水指数($SAPI$)的逐日气象干旱指标,克服了基于“等权累加”建立的标准化降水指数(SPI)和综合干旱指数(CI)等指标由于前期降水移出计算窗口而导致的“不合理旱情加剧”问题^[19]。鉴于 $SAPI$ 本质上是标准化变量,不能充分刻画干旱频率季节性、区域性差异,王春林等^[20] 基于 $SAPI$ 和常年平均相对湿度指数(M)构建了逐日干旱指数(DI),并基于 DI 编制出版了《广东省气象干旱图集》^[20]。 DI 干旱指标通过广东省气象局业务准入评审,成为广东省气象部门现行气象干旱指标标准。本文采用 DI 分析华南区域近 50 年干旱时空特征及其气候变化趋势,期望对进一步开展气候变化影响评估、水资源利用及应对气候变化研究具有参考意义。

1 资料与方法

1.1 研究区域及资料

本文中的华南包括广东和广西两省。气象资料包括广东 86 个、广西 88 个地面气象站从建站至 2010 年的逐日降水和可能蒸散,其中可能蒸散通过逐日气温、日照时数、相对湿度、风速等资料采用 FAO Penman-Monteith 公式^[15] 计算。资料来自广东省气象信息中心。

1.2 逐日干旱指数 DI

单站逐日气象干旱指数 DI 表征逐日气象干旱强度,可以刻画逐日气象干旱发生、发展和结束过程。 DI 定义为:

$$DI_i = SAPI_i + \bar{M}_i \quad (1)$$

式(1)中 $SAPI_i$ 是第 i 日前期降水指数 API 的标准化变量 $SAPI^{[19]}$, $SAPI$ 计算方法参见《气象干旱等级》国家标准^[15]附录 C 标准化降水指数 SPI, 历史样本资料为近 30 年(1981—2010 年)逐日 API。API 计算公式为:

$$API_i = P_i + kAPI_{i-1} \quad (2)$$

式中, API_i 为第 i 日 API, P_i 为当日降水量(mm), API_{i-1} 为前一日的 API, k 为衰减系数, 取经验值 0.955。每个站从建站开始逐日滚动计算 API, 初始 API 设为 0。建站开始后的头 4 个月 API 受边界效应影响舍弃不用。

式(1)中 $\bar{M}_i$ 为第 i 日常年平均相对湿度指数, $\bar{M}_i$ 根据 30a(1981—2010 年)逐日降水和可能蒸散量计算^[15]:

$$\bar{M}_i = \frac{\bar{P}_i}{\bar{PE}_i} - 1 \quad (3)$$

式中, $\bar{P}_i$ 为第 i 日 30a(1981—2010 年)平均降水量(mm), $\bar{PE}_i$ 为第 i 日 30a(1981—2010 年)平均可能蒸散量(mm), 采用 FAO Penman-Monteith 方法计算^[15]。为了增强 $\bar{M}_i$ 年变化曲线平滑性, 对 $\bar{P}_i$ 、 $\bar{PE}_i$ 做 2 次 30d 滑动平均处理。 $\bar{M}_i$ 理论范围为 -1 至 ∞ , 为了避免因为 $\bar{PE}_i$ 接近于 0 时候导致 $\bar{M}_i$ 趋于 ∞ , 当 $\bar{M}_i > 0$ 时采用双曲正切函数式(4), 约束 $\bar{M}_i$ 变化范围为 -1—1:

$$\bar{M}_i = \frac{e^{2\bar{M}_i} - 1}{e^{2\bar{M}_i} + 1}, \text{当 } \bar{M}_i \geq 0 \quad (4)$$

$\bar{M}_i$ 表征某地常年平均干湿程度及其年变化动态。华南代表性站点 30a(1981—2010 年)平均逐日相对湿度指数年变化曲线表明(图 1), 华南各地干湿季节性变化显著, 2—3 月自北向南渐次进入湿润季节($\bar{M}_i > 0$), 10 月以后自北向南渐次进入相对干季($\bar{M}_i < 0$)。区域平均湿润天数($\bar{M}_i > 0$)达 64%。

逐日气象干旱等级划分标准如表 1。

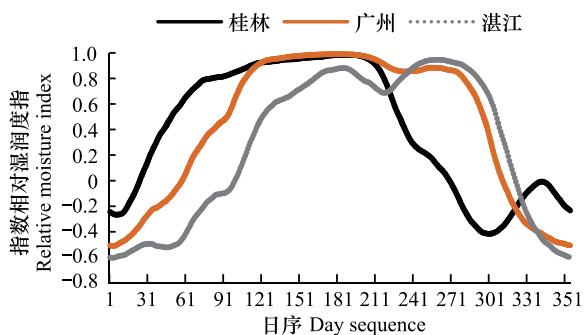


图 1 华南代表站点 30a(1981—2010 年)平均逐日相对湿度指数 $\bar{M}$

Fig.1 Daily relative moisture index averaged over 30 years from 1981 to 2010 in representative stations of South China

表 1 气象干旱等级标准

Table 1 Criteria of meteorological drought

干旱等级 Drought level	逐日干旱指标 Criteria of daily drought	逐月干旱指标 Criteria of monthly drought
无旱 none dry	$-0.5 < DI^*$	$-0.5 < MI^{**}$
轻旱 light dry	$-1.0 < DI \leq -0.5$	$-1.0 < MI \leq -0.5$
中旱 middle dry	$-1.5 < DI \leq -1.0$	$-1.5 < MI \leq -1.0$
重旱 severe dry	$-2.0 < DI \leq -1.5$	$-2.0 < MI \leq -1.5$
特旱 extreme dry	$DI \leq -2.0$	$MI \leq -2.0$

* DI : 日气象干旱指数 DI (Daily drought Index); ** MI : 月干旱指数 MI (Monthly drought Index)

1.3 月干旱指数 MI 与年干旱指数 YI

月干旱指数 MI 和年干旱指数 YI 表征月、年尺度气象干旱强度, 其定义为某站月/年内小于 0 的 DI 之和除以月/年总天数, 即:

$$MI = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n DI_i, \text{当 } DI_i < 0 \quad (5)$$

式中, n 为月内总天数, DI_i 为逐日干旱指数。 YI 计算公式同式(5), n 为年内总天数, YI 等同于年内各月 MI 的算术平均。 MI 、 YI 用于监测评估月、年尺度气象干旱程度。月气象干旱等级划分标准见表 1。统计表明各等

级旱月频率与旱日频率比较接近,因此本文仅讨论各等级旱日频率,旱月频率不重复介绍。

2 结果与分析

2.1 旱日频率年变化特征

华南平均轻旱、中旱、重旱和特旱日频率分别为 12.3%、8.1%、4.2%和 1.4%,总旱日频率为 26.0%(表 2),低于基于 SPI 指标的理论频率(轻旱、中旱、重旱和特旱日频率分别为 15%、9.2%、4.4%和 2.3%)^[15],这与华南地区总体上比较湿润,年内湿润时段居多有关。

表 2 近 30 年(1981—2010 年)华南逐月平均降水量、旱日频率及干旱指数

Table 2 Monthly rain, drought days and drought index of South China (1981—2010)

月份 Month	降水/mm Precipitation	MI/YI	旱日频率 dry days frequency/%				合计 Sum
			轻旱 Light dry	中旱 Middle dry	重旱 Severe dry	特旱 Extreme dry	
1	45.1	-0.63	19.4	17.3	9.0	3.4	49.0
2	69.1	-0.49	16.7	12.2	6.9	2.2	38.0
3	99.0	-0.33	14.2	8.4	3.5	1.1	27.1
4	157.2	-0.25	10.6	6.2	2.8	0.7	20.3
5	244.0	-0.20	8.7	4.5	1.8	0.8	15.9
6	295.9	-0.12	6.5	2.6	0.8	0.2	10.1
7	246.6	-0.10	6.0	1.8	0.4	0.0	8.2
8	224.5	-0.15	8.1	3.3	1.0	0.2	12.6
9	141.1	-0.19	9.0	4.4	1.6	0.5	15.5
10	64.2	-0.33	13.7	8.3	3.7	1.1	26.9
11	46.7	-0.55	16.4	14.6	8.9	2.3	42.3
12	30.8	-0.62	17.8	14.2	10.1	3.9	46.0
年均 Annual mean	1664.3	-0.33	12.3	8.1	4.2	1.4	26.0

各等级旱日频率具有和降水相反的年变化特征(图 2),汛期(4—9 月)旱日频率低于非汛期(10 月至次年 3 月)。年内最早的 3 个月为 11、12 月和次年 1 月,这 3 个月平均降水都少于 50 mm,平均月干旱指数 MI 都小于-0.5,旱日频率都大于 40%。值得注意的是,1 月份旱日频率最高(49%)、MI 最小(-0.63),比降水最少的 12 月(30.8 mm)滞后 1 个月,表明 DI 指标能够表征气象干旱相对枯水时段的滞后效应。

2.2 旱日频率空间分布特征

华南各等级旱日频率分布总体比较一致,均呈西高东低分布(图 3)。各等级旱日频率高于年平均的区域,即轻旱日频率>12%、中旱日频率>8%、重旱日频率>4%、特旱日频率>1.5 的区域,主要分布在广西除桂林以外的大部分区域、广东雷州半岛及沿海地区。年干旱指数 YI 分布图反映了华南气象干旱综合情况,YI<-0.3 区域和上述各等级旱日频率较高区域相对应。YI<-0.4 区域包括广西西南部的百色、崇左、南宁地区和广东的雷州半岛地区,为华南最早区域。

比较年干旱指数 YI 与年降水量分布细节发现,YI<-0.3 的偏旱区域和年降水量少于 1600 mm 的少雨区

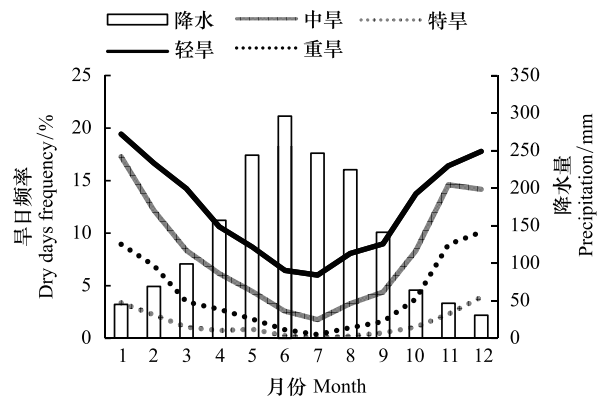


图 2 近 30 年(1981—2010 年)华南逐月平均旱日频率和降水量
Fig.2 Monthly drought days and rain of South China (1981—2010 mean)

域并不完全一致。华南有 5 个年降水量大于 2000 mm 的降水集中区,即广西的防城-钦州、桂林和广东的阳江、清远、汕尾,值得注意的是这 5 个降水集中区中,广东汕尾、广西防城-钦州 2 个区域 YI 较低,汕尾附近重旱频率较高(图 3),表明这 2 个区域尽管年降水较多,但季节分配不均,具有旱涝并重特点。

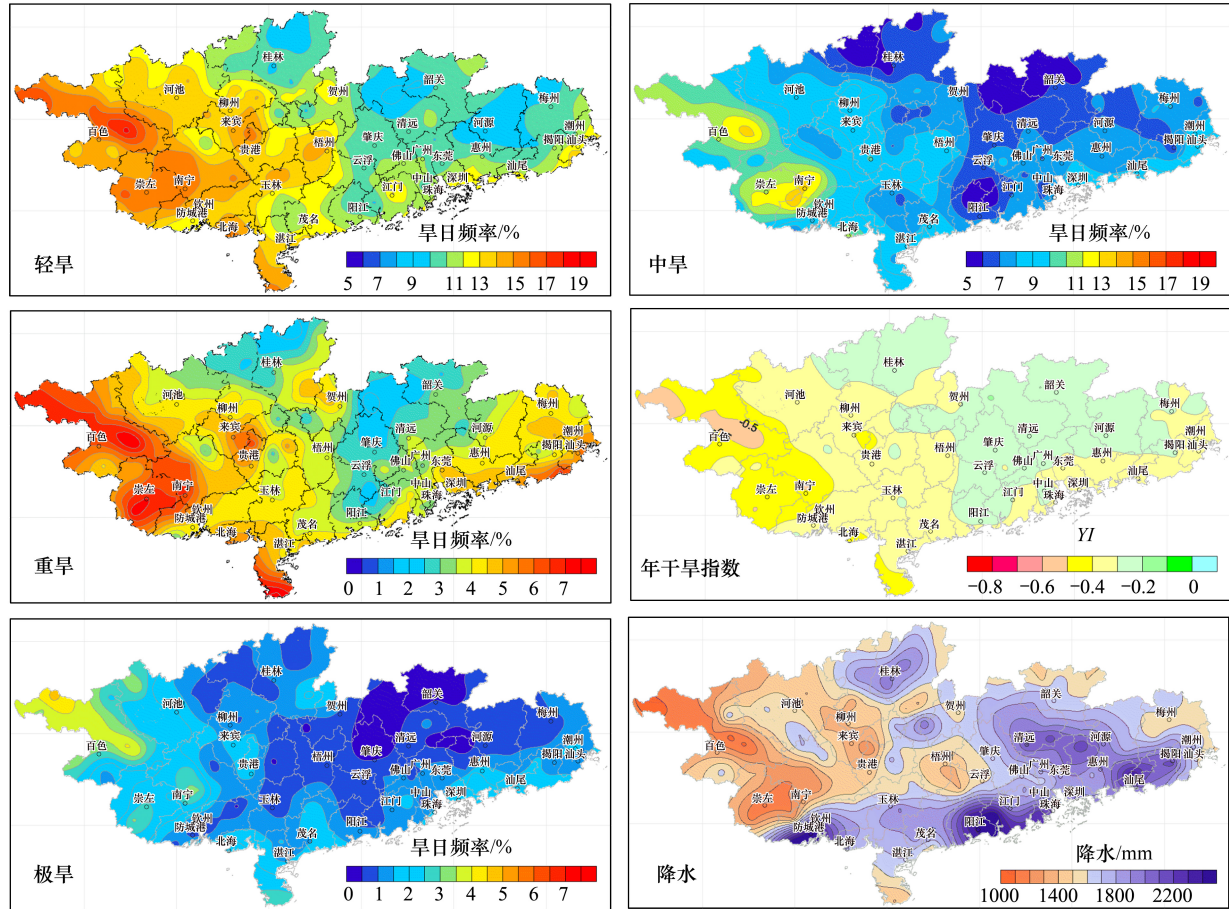


图 3 近 30 年(1981—2010 年)平均华南轻旱,中旱,重旱,极旱日频率年干旱指数(YI)及降水分布

Fig.3 Spatial distributions of drought days (%) at light,middle, severe and extreme level,Year drought index and rain in South China averaged over 1981—2010

2.3 近 50 年干旱变化趋势

近 50 年(1961—2010 年)华南最早的 5a($YI \leq -0.5$)为:1963、1991、2004、2009、1977,次旱的 8 年依次为($YI \leq -0.4$):1996、2005、1966、1989、2007、1971、1992、1980(图 4)。

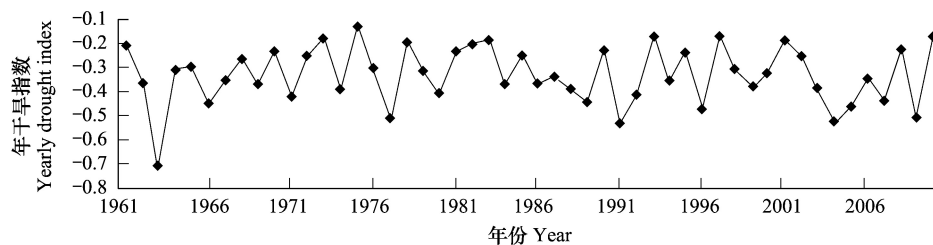


图 4 华南 1961—2010 年年干旱指数(YI)

Fig.4 Yearly drought index(YI) of South China (1961—2010)

趋势分析表明,近 50 年华南年平均降水量呈增加趋势,增加强度为 14.1mm/10a,轻旱、特旱日呈减少趋势,中旱、重旱呈增加趋势。尽管上述变化趋势都没有达到显著性水平(表 3),但具有季节性、区域性差异。

从季节性差异看,1—9月降水和 *MI* 以增加趋势为主,各等级旱日以减少趋势为主,其中7月份 *MI* 增加趋势、各等级旱日减少趋势均达到0.1以上显著水平(表3,图5);而10—12月降水和 *MI* 以减小趋势为主,各等级旱日以增加趋势为主,其中10月份降水减少趋势达到0.05显著水平,11月份 *MI* 减小趋势及中旱、重旱、总旱日增加趋势达到0.01显著水平(表3,图5)。

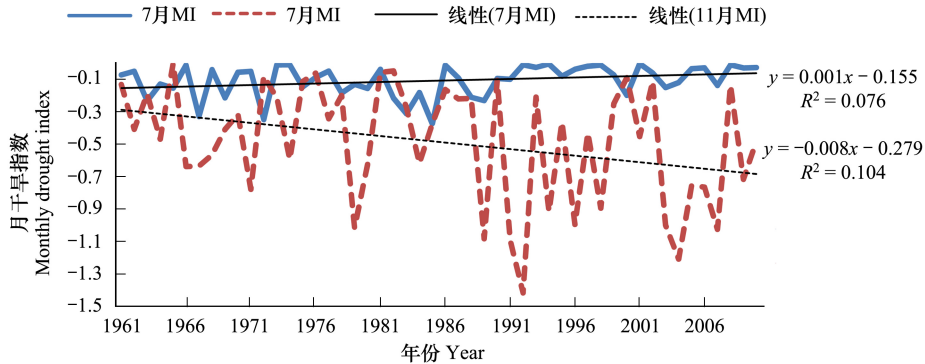


图5 近50年(1961—2010年)华南7月、11月月干旱指数(*MI*)变化趋势

Fig.5 Linear trends of monthly drought index (*MI*) of July and November (1961—2010) of South China (1961—2010)

表3 近50年(1961—2010年)华南平均降水、旱日数及干旱指数变化趋势

Table 3 Linear trends of monthly drought days at each level of South China (1961—2010)

月份 Month	降水 Rain (mm/10a)	月/年干旱 指数 <i>MI/YI</i> (/10a)	各等级旱日数变化趋势 Linear trends of monthly drought days/ (d/10a)				
			轻旱 Light dry	中旱 Middle dry	重旱 Severe dry	特旱 Extreme dry	合计 Sum
1	2.75	0.01	-0.26	0.01	0.07	-0.05	-0.22
2	1.98	0.00	-0.23	-0.09	0.13	0.05	-0.13
3	4.55	0.03	-0.14	-0.21	-0.17	-0.14	-0.65
4	-6.91	0.02	0.07	-0.05	-0.07	-0.16 *	-0.21
5	1.98	0.02	0.06	-0.02	-0.12	-0.23 *	-0.30
6	12.97	0.03	-0.06	-0.11	-0.14 *	-0.14 *	-0.45
7	11.52	0.02 **	-0.31 *	-0.11 *	-0.04 **	-0.02 **	-0.48 *
8	-3.21	-0.00	0.02	0.00	0.00	-0.01	0.02
9	1.09	0.01	0.02	-0.02	-0.04	-0.04	-0.08
10	-9.10 **	-0.03	0.22	0.32	0.23 *	0.03	0.79
11	-3.13	-0.08 **	0.27	0.75 **	0.61 **	0.11	1.75 **
12	-0.38	-0.05	0.05	0.09	0.48	0.19	0.81
年均 Annual mean	14.00	-0.02	-0.28	0.58	0.95	-0.40	0.84

* $\alpha=0.1$ 显著性, ** $\alpha=0.05$ 显著性

从区域分布看,年总旱日趋于增加、减少的站点数各占60%、40%,有11%的站点达到0.1以上显著性检验,不同等级旱日数变化趋势空间分布不同(图6)。

轻旱日趋于增加、减少的站点数各占49%、51%,其中增加趋势显著的有5个站(均在广西),减少趋势显著的有5个站(大部分在广东)(图6)。

中旱日趋于增加、减少的站点数各占68%、32%,其中增加趋势显著的有17个站(广西中东部),减少趋势显著的有1个站(茂名)(图6)。对各站11月份中旱日趋势分析表明,有92%站点呈增加趋势,其中58个站通过0.1信度检验(图略)。

重旱日趋于增加、减少的站点数各占86%、14%,其中增加趋势显著的有30个站(分布在广西中东部和广东的北部),减少趋势显著的没有(图6)。对各站11月份重旱日趋势分析表明,有91%站点呈增加趋势,其中

59 个站通过 0.1 信度检验(图略)。

特旱日趋于增加、减少的站点数各占 36%、64%,其中增加趋势显著的有 7 个站(集中在广西的崇左、南宁、桂林及广东的东部地区),减少趋势显著的有 10 个站(分布在广东东部和北部地区)(图 6)。

综上,各等级旱日显著增加的站点大多集中在广西,旱日显著减少的站点主要集中在广东,表明广西旱于广东的格局可能进一步加剧。

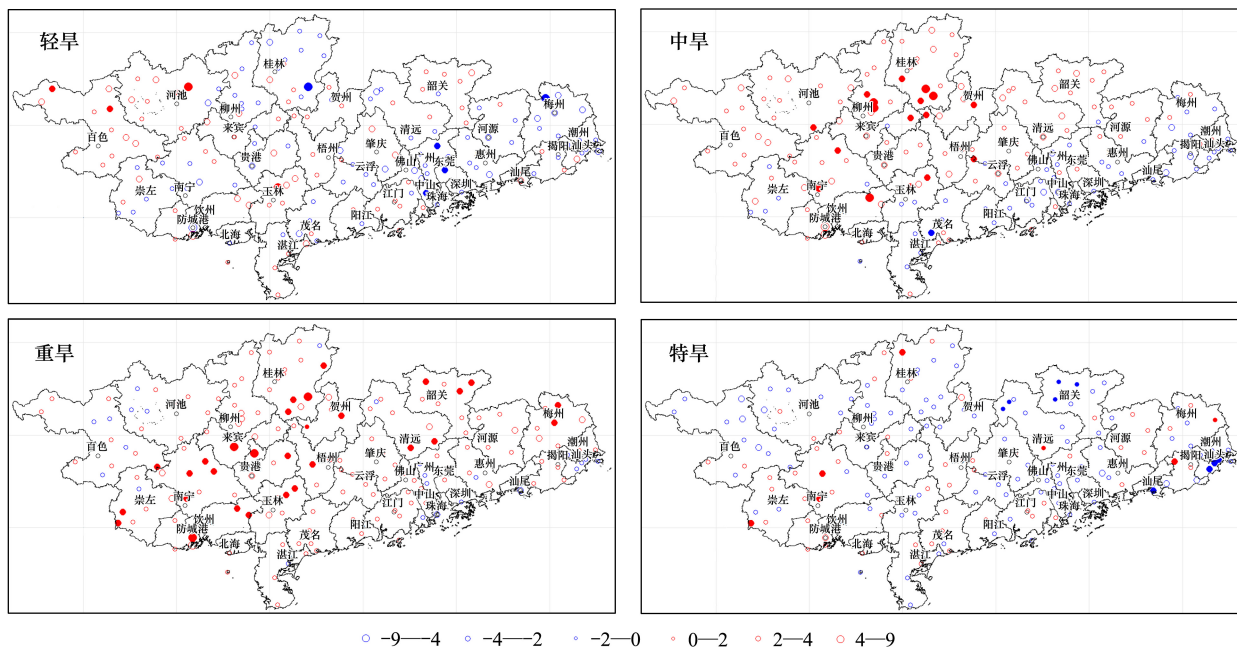


图 6 1961—2010 年华南各等级旱日趋势空间分布(实心表示达到 0.1 显著水平)

Fig.6 Spatial distributions of linear trends (d/10 a) in dry days at each level of South China during 1961—2010

3 结论与讨论

(1) 华南近 30 年(1981—2010 年)基于 DI 指标的总旱日频率平均为 26.0%,其中轻旱、中旱、重旱和特旱日分别为 12.3%、8.1%、4.2% 和 1.4%。各等级旱日频率低于基于 SPI 指标的理论频率(总旱日频率 30.8%)^[14-15],表明华南气候总体上比较湿润。

(2) 华南各等级旱日频率,具有非汛期(10 月至次年 3 月)高于汛期(4 月至 9 月)、广西高于广东的特征,表明 DI 指标由于引进平均相对湿润度指数,克服了 $SAPI$ 、 SPI 等标准化降水指数局限,能够表征气象干旱季节性、区域性特点。 DI 指标和 $SAPI$ ^[19]、改进的综合干旱指数 CI_{new} ^[16]、土壤水分模拟的指标^[11,13-14]一样,能够表征气象干旱相对枯水时段的滞后效应。

(3) 近 50 年(1961—2010 年)华南最早的 5a($YI \leq -0.5$)依次为:1963、1991、2004、2009、1977,与基于年降水量极差法^[6]、季度和汛期降水距平^[7-9]分析的干旱年基本一致。

华南平均年干旱指数 YI 没有显著的年际变化趋势,降水量有增加趋势,轻旱、特旱日呈减少趋势,中旱、重旱呈增加趋势,但未达到 0.1 信度水平。

(4) 气候变化趋势分析表明,从季节差异看,1 至 9 月降水和 MI 以增加趋势为主,各等级旱日数减少趋势为主,其中 7 月份 MI 增加趋势及各等级旱日减少趋势均达到 0.1 显著水平;而 10 至 12 月降水和 MI 以减小趋势为主,各等级旱日数以增加趋势为主,其中 11 月份 MI 减小趋势及中旱、重旱、总旱日增加趋势均达到 0.05 显著水平。总体趋势和黄晚华等^[7]基于 SPI 对华南的研究结果一致。

(5) 从区域分布看,年总旱日趋于增加、减少的站点数各占 60%、40%,有 11% 的站点达到 0.1 以上显著性

检验。各等级旱日显著增加的站点大多集中在广西,而旱日显著减少的站点主要集中在广东,表明广西干旱总体上重于广东的格局可能进一步加剧。

气象干旱相对农业干旱、水文干旱和社会经济干旱具有先导性、基础性特点,气象干旱时空特征与所采用的指标体系密切相关,如何客观评价气象干旱指标适用性,学术界尚没有统一观点。进一步研究将结合土壤水分观测资料,分析 *DI* 指标敏感性特征和适用性特征,并结合农作物生育期、干旱灾情资料,开展旱涝灾害影响评估及风险区划研究。

参考文献(References):

- [1] 杨建平,丁永健,陈仁生,刘连友. 近 50 年来中国干湿气候界线的 10 年际波动. 地理学报, 2002, 57(6): 655-661.
- [2] 张书余. 干旱气象学. 北京: 气象出版社, 2008: 1-292.
- [3] 中国气象局. 中国气象干旱图集(1956—2009 年). 北京: 气象出版社, 2010: 1-117.
- [4] 中国气象局. 中国灾害性天气气候图集(1961—2006 年). 北京: 气象出版社, 2010: 1-110.
- [5] 袁文平,周广胜. 干旱指标的理论分析与研究展望. 地球科学进展, 2004, 19(6): 982-991.
- [6] 李晓娟,曾沁,梁健,纪忠萍,谢定升. 华南地区干旱气候预测研究. 气象科技, 2007, 35(1): 26-30.
- [7] 黄晚华,杨晓光,李茂松,张晓煜,王明田,代姝玮,马洁华. 基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近 58 年演变特征. 农业工程学报, 2010, 26(7): 50-59.
- [8] 简茂球,乔云亭,温之平. 华南季节干旱及连旱特征分析. 中山大学学报, 2008, 47(4): 118-121.
- [9] 吴尚森,梁建茵. 华南前汛期旱涝时空分布特征. 热带气象, 1992, 8(1): 87-92.
- [10] 林爱兰,吴尚森. 近 40 年华南汛期旱涝变化及趋势预测. 热带气象学报, 1996, 12(2): 160-165.
- [11] 王春林,董永春,李春梅,黄珍珠,何健. 基于 GIS 的广东干旱逐日动态模拟与评估. 华南农业大学学报, 2006, 27(2): 20-24.
- [12] 王春林,吴举开,黄珍珠,李春梅,郭晶. 广东干旱逐日动态监测模型及其应用. 自然灾害学报, 2007, 16(4): 36-42.
- [13] 郭晶,景元书,王春林,王华,陈慧华. 基于土壤水分平衡模型的广东干旱时空分布特征. 中国农业气象, 2008, 29(3): 353-357.
- [14] 王春林,郭晶,陈慧华,刘霞. 基于土壤水分模拟的干旱动态监测指标及其适用性特征. 生态学杂志, 2011, 30(2): 401-407.
- [15] 张强,邹旭恺,肖风劲,吕厚荃,刘海波,祝昌汉,安顺清. 气象干旱等级(GB/T 20481-2006), 中华人民共和国国家标准. 北京: 中国标准出版社, 2006: 12-17.
- [16] 王春林,郭晶,薛丽芳,丁丽佳. 改进的综合气象干旱指数 C_{Inew} 及其适用性分析. 中国农业气象, 2011, 32(4): 621-626.
- [17] 邹旭恺,张强. 近半个世纪我国干旱变化的初步研究. 应用气象学报, 2008, 19(6): 679-687.
- [18] 翟盘茂,邹旭恺. 1951—2003 年中国气温和降水变化及其对干旱的影响. 气候变化研究进展, 2005, 1(1): 15-18.
- [19] 王春林,陈慧华,唐力生,段海来,孙春健. 基于前期降水指数的气象干旱指标及其应用. 气候变化研究进展. 2012, 8(3): 157-163.
- [20] 王春林,陈慧华,唐力生. 广东省气象干旱图集. 北京: 中国科学技术出版社, 2013: 1-138.