

广东省年降水量分布及大尺度地形对其影响*

叶芝林, 周买春

华南农业大学水利与土木工程学院, 广东 广州 510642

摘要: 通过对广东省 1951—2018 年期间 86 个雨量站降水量观测资料统计分析, 广东省年降水量呈阶段性、不显著性、总体增加的趋势变化, 而且各地区在不同时期的增长率不同, 如中心城市的总体增长率约为全省的 1.6 倍。Pearson-III 型分布曲线和正态分布曲线对比分析表明, 广东省年降水量地理分布的特征明显强于其时间分布特征(两种分布曲线的 NS 拟合度, 在地理上分别为 0.965 和 0.845; 在时间上, 年内分别为 0.357 和 0.670, 年际分别为 0.582 和 0.547); 年降水量区域分布、年内分布和年际分布的 C_v 值(分别为 0.111, 1.643 和 0.138)表明, 广东省年降水量的季节变化, 虽然时间长度上偏于对称(如每年雨、旱季的时间均约为 6 个月), 但降水量值上差异明显, 其峰谷比远超过其空间上和年际间的峰谷比。根据年降水量-区域累积面积分布曲线, 广东省年降水区型与其大尺度地形相对应, 包括: ① 粤东、粤西沿海、珠江三角洲等平原地区和中部分远丘陵区为多雨/富雨区, ② 中部分远丘陵区到粤北山区的交接地带及其向粤东、粤西两侧山区的延伸为平雨区, ③ 粤东、粤西、粤北山区的背风区和雷州半岛地区为少雨/较少雨区; 尤其从东雷州半岛、至粤西山区、至粤北山区前麓及到粤东武夷山区前麓一带, 年降水量与站点高程呈显著的对数关系, 此处水汽趋于稳定并分层, 形成了多雨区与少雨区的过渡带、分隔带。

关键词: 地形尺度; 年降水; 时空分布; 广东省

中图分类号: P461 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-0137(2023)04-0045-09

Distribution of annual precipitation in Guangdong and influence of large-scale topography

YE Zhilin, ZHOU Maichun

College of Water Conservancy and Civil Engineering, South China Agricultural University,
Guangzhou 510642, China

Abstract: By analyzing precipitation data from 1951 to 2018 at 86 meteorological stations in Guangdong Province, it is found that the precipitation slightly increases overall, with an annual period, and the increasing rates are different from year to year and from region to region, for example, the increasing rate of annual precipitation in central cities is 1.6 times of that of the whole province. Objective function values of Nash-Sutcliffe efficiency coefficient of Pearson-III distribution and normal distribution are 0.965 and 0.845 respectively for its geographical distribution, 0.357 and 0.670 for its yearly temporal distribution, and 0.582 and 0.547 for decadal temporal distribution, implying that the annual precipitation in Guangdong is featured more geographically than temporally. The C_v values of the geographical, yearly, and decadal temporal distributions are 0.111, 1.643, and 0.138, respectively,

* 收稿日期: 2022-10-18 录用日期: 2022-11-15 网络首发日期: 2023-03-31

基金项目: 国家自然科学基金(41171029); 广东省水利科技创新项目(2009-42);
华南农业大学校长科学基金(7600-K07050)

作者简介: 叶芝林(1996年生), 女; 研究方向: 水土保持及水资源; E-mail: zhilin_ye@163.com

通信作者: 周买春(1965年生), 男; 研究方向: 水文学及水资源; E-mail: mczhou@scau.edu.cn

indicating that the seasonal precipitation varies significantly, despite similar duration length (i.e., 6-month rainy and 6-month dry seasons each year) it has a large peak-to-valley ratio which is far more than the ratios of spatial and temporal distributions. According to the area-cumulation of annual precipitation, regional rainfall patterns in Guangdong correspond to the three step-topography: 1) Plain to mid-hilly regions including the east coast, west coast, Pearl River Delta, and Qingyuan county are areas rich in rainfall; 2) The transitional regions from mid-hilly to northern mountain areas, and their two wing extensions are areas with medium rainfall; 3) Leeward regions of eastern, western and northern mountain areas and Leizhou Peninsula are areas poor of rainfall. In particular, there is a belt from the east Leizhou Peninsula to the western mountains, then to the front of northern mountains, and the eastern front of Wuyi mountains in Guangdong, forming a transitional zone separating areas of rich in rainfall and poor in rainfall, where annual precipitation is related logarithmically to ground elevations.

Key words: topographical scale; annual precipitation; spatial and temporal distributions; Guangdong Province

位于东亚大陆亚热带季风气候区,受惠于西太平洋(包括南海)丰富的暖湿气流,广东省降水量充沛,雨、旱季分明(雨季4~9月,旱季10月~翌年3月)。受地形影响,广东省降水时空分布不均,雨季迎风山麓河流暴涨暴落,流域性暴雨则造成平原地区大江大河洪水滔滔,沿海地区台风暴雨汹涌;当秋冬甚至秋冬春连旱时,中小河流断流、水库干涸。新中国成立以来,广东省大力发展水利事业,以蓄水工程为主,配水工程为辅,适应当地地形,建设水库8 231座(其中大型水库39座、中型342座、小型7 580座,全国水库数量排名第三)(广东农村统计年鉴编辑委员会,2021),因应用水需求,构建了“五纵五横”水资源配置骨干网等。丰富的降水量和水资源的合理利用支撑了改革开放以来广东省国民经济的快速增长,形成了独特的区域性:珠江三角洲降水丰富,三江汇集,孕育了以制造、交通运输和服务业为主的粤港澳大湾区和富饶的桑基鱼塘;漫长的海岸分布着港口、码头、石化和能源基地;粤东、粤西、粤北山区发展雨养、灌溉农业,盛产各类水果、反季节蔬菜和优质稻米。除当地河流、植被蒸散发的水汽,广东省降水更多的是来自海洋的暖湿气流,水汽的运动和分布主导了广东降水的形成和尺度,水汽与不同尺度的地形相互作用形成了广东降水的分布格局。本文基于广东地区大尺度视角,分析广东省年降水量的年际、年内变化和地区分布特征,以及大尺度地形对其影响,期望对广东省农业区划和产业布局提供水资源参考。

1 数据来源与分析方法

1.1 数据来源

降水量数据来源于中国气象数据网广东省86个雨量站的日观测资料(<http://data.cma.cn/>)。随着经济社会的发展,广东省气象基准站点建设不断增加,早期1951年设立的4个中心城市站(广州、韶关、汕头、湛江)降水资料系列最长;1960年开始,广东省雨量站增加至66个,资料系列也相对较长;而自1972年始,86个雨量站网覆盖全省,降水资料系列完整。如图1以不同颜色深浅实点标示的各时期雨量站位置分布。与其他研究成果比较:①以刘永林(2015)24个相同地点的站点统计,得出1960—2013年期间年均降水量为1 743 mm,与其统计值(1 745 mm)相一致;②以林爱兰(2014)86个相同地点的站点统计,得到1961—2005年期间年均降水量为1 775 mm(1961—1971年期间为66个站点平均),与其统计值(1 785 mm)接近;③广东省水文局(2012)以全省442个雨量站统计1956—2000年期间多年平均降水量为1 771 mm,本文以86个雨量站计算同时期全省多年平均降水量为1 783 mm,两者相差12 mm(相对误差0.68%)。据此认为广东省86个气象基准站雨量数据可靠、具有良好的代表性。总体上86个雨量站全省分布均匀,能够较好地反映区域降水量特征。本文仅在分析降水量的年际变化采用1951—2018年时间序列的降水量数据,其余均采用全省86个雨量站1972—2018年降水量数据分析。

数字高程模型(DEM, digital elevation model)采用由美国国家航空航天局实验室(LPDAAC,

land processes distributed active archive center at national aeronautics and space administration)发布的全球数据集第3版SRTM(shuttle radar topography mission vision 3),按精度分为SRTM1(分辨率1",约30 m)和SRTM3(分辨率3",约90 m)(刘远等,2017),本文采用已更新的SRTM1亚洲区数据集

(<https://lpdaac.usgs.gov/>)。河网水系来源于世界数字河网图(DCW, digital chart of the world developed by ESRI)(<http://www.maproom.psu.edu/dcw/>)。结合广东省县图集的行政区划、城镇、居民集聚点(广东省地名委员会,1989),将STRM1 DEM和DCW套绘于图1,接着截取广东省及其周边部分区域。

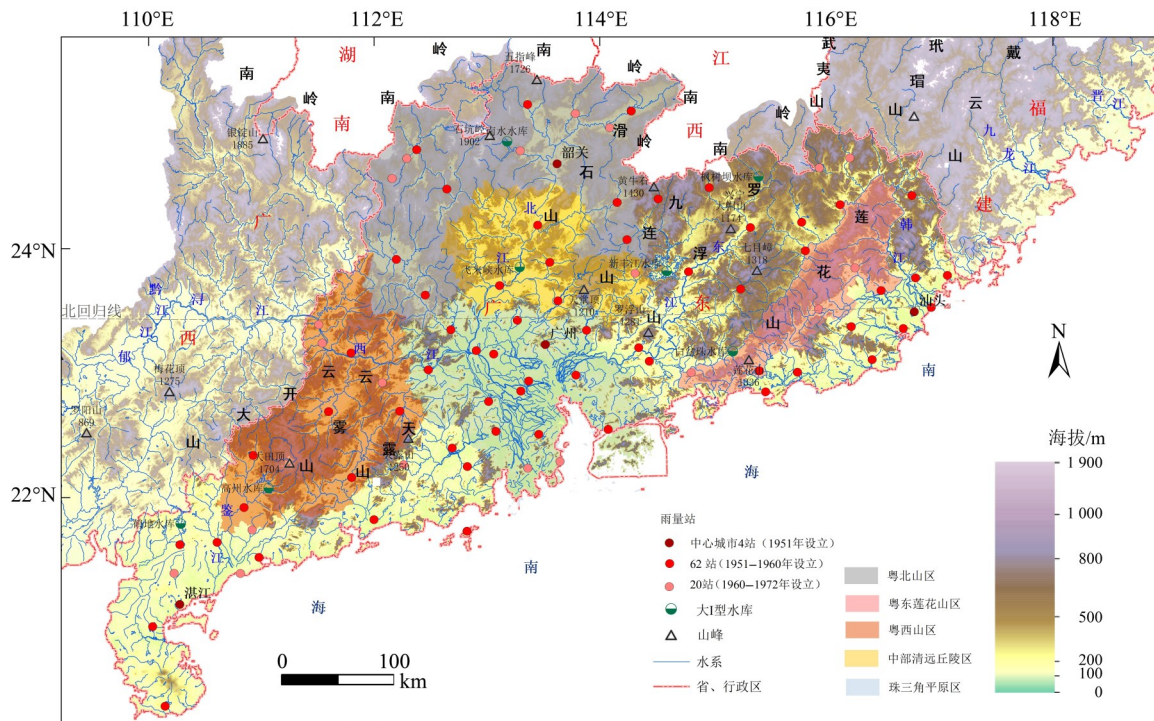


图1 广东省地形、水系、雨量站点分布

Fig. 1 Distribution of Topography, water system and base precipitation stations in Guangdong

1.2 分析方法

1.2.1 年降水量时空密度分布曲线 采用广东省86个雨量站1972—2018年期间的日降水量数据,统计各雨量站多年平均降水量。以普通克里金插值法(Ordinary Kriging)(Matheron, 1963; 侯景儒, 1990; 宋丽琼等, 2008)得到广东省多年平均降水量分布栅格图(分辨率 $2.35\text{ km} \times 2.35\text{ km}$)及等值线图。以一定的间隔分级统计年降水量,并累积降水量的区域面积得到年降水量的密度分布曲线,其斜率反映区域降水量变化的程度。

在我国水文统计上,常用Pearson-III型曲线和正态分布曲线对降水量、径流量和水位(潮位)等水文序列进行频率分析。同样,本文以Pearson-III型曲线对广东省年降水量的年际间、年内和地区分布进行分析,并以正态分布曲线对比:①与常规的水文分析采用频率分布不同,本文采用密度分布,以期反映分布对统计参数取值的敏感度;②以年降水量面积为权重,按矩法计算其统计参

数初值,包括年际间、年内平均降水量(平均法)或空间分布平均降水量(普通克里金插值法) \bar{P} 、方差 σ 、变差系数 $C_v = \sigma/\bar{P}$ 和偏态系数 C_s ;③以Nash效率系数(NS, Nash-Sutcliffe efficiency coefficient)最大为目标函数,采用SCE-UA全局最优化方法(Duan et al., 1994)对Pearson-III型曲线进行率定,优化确定的 C_v 、 C_s 值。SCE-UA方法率定过程中,参照詹道江(2010)逐步放宽 C_v 和 C_s 的变动范围(各地区不等)直到最优值为止,其中 C_v 变动上界达140%初值, C_s 变动上界达300%初值。

1.2.2 降水年型、区型的划分 以SCE-UA算法对86个雨量站1972—2018年间平均降水量的Pearson-III型曲线进行率定,按照年降水量频率 P 将广东省的降水年型划分为特丰水年($P \leq 10\%$)、丰水年($10\% < P \leq 25\%$)、偏丰水年($25\% < P \leq 40\%$)、平水年($40\% < P \leq 60\%$)、偏枯水年($60\% \leq P < 75\%$)、枯水年($75\% < P \leq 90\%$)及特枯水年($P > 90\%$),如图2所示。

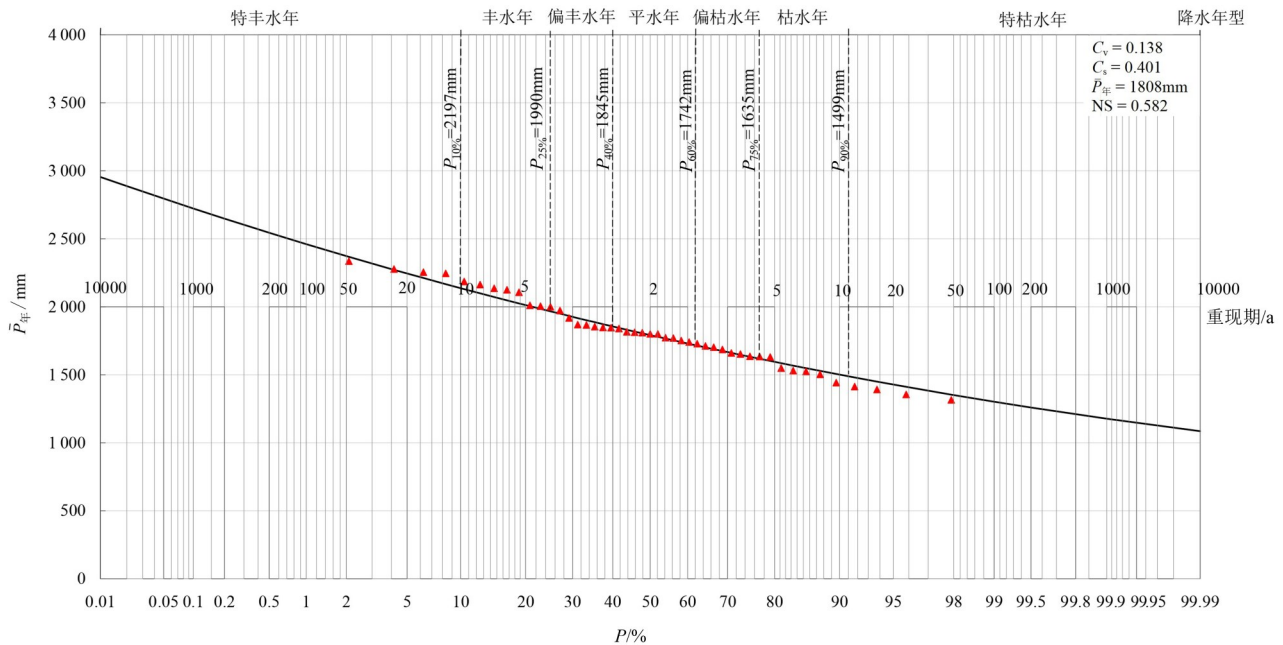


图2 频率曲线划分的广东省降水年型

Fig. 2 Annual precipitation patterns in Guangdong divided by frequency curves

根据年降水量-区域累积面积分布曲线,把累积面积50%的年降水量定义为空间分布中值,大于中值的区间称为上半阉区,反之称为下半阉区。参照降水年型的划分方法,将上半阉区按累积面积分别划为平雨区上半阉区($40% < P \leq 50%$)、较多雨区($25% < P \leq 40%$)、多雨区($10% < P \leq 25%$)和富雨区($P \leq 10%$);广东省年降水量区域分布Pearson-III型曲线呈正偏($C_s > 0$),年降水量的上半阉区变化范围比下半阉区宽广(如图3),为保持区型划分的年降水量区间值一致性和对称性,用相同的区间值将下半阉区划为平雨区下半阉区、较少雨区、少雨区和贫雨区;年降水量贫雨区面积较小,合并到少雨区;平雨区上半阉区和平雨区下半阉区组成平雨区。

2 降水量年际变化及年内分配

2.1 降水量的年际变化

广东省年降水量年际变化总体上呈增加趋势,但与年份相关关系不显著,如图4所示,中心城市4站年降水量与年份的相关系数 $R^2 = 0.058$,全省 $R^2 = 0.003$,即不具持续性和一致性而失去统计意义。又如增加幅度除年代不同外,还与统计的站点有关:①按中心城市4站统计(如图4方框线),除1960—1971年代严重偏少外,($\bar{P} = 1484$ mm,对应图2属特枯水年),其他年代均有所增加,

1972—2018年($\bar{P} = 1704$ mm)比1951—1971年($\bar{P} = 1537$ mm)平均增加167 mm,增幅达10.9%;②按全省86个雨量站统计(如图4圆圈线),年降水量1993—2018年($\bar{P} = 1816$ mm)比1972—1992年($\bar{P} = 1797$ mm)平均增加19 mm,增幅为1.1%,远小于中心城市4站的同期平均增加值95 mm,为增幅5.7%,但在1972—2018年,中心城市 $\bar{P} = 1704$ mm,全省 $\bar{P} = 1808$ mm(对应图2分别为偏枯水年和平水年),即中心城市年降水量小于全省平均但增幅远大于全省平均。由年降水量趋势线可见,中心城市年平均增加3.4 mm,全省年平均增加2.2 mm,中心城市的增长率约为全省的1.6倍。

城市空间和地面粗糙度增加,以及增加碳排放量造成温室效应,是促进城市降水量增加的主要原因之一。与中心城市相比,广东省其他地区(尤其粤东、西两翼和粤北山区)的经济社会发展有限、城市化程度较低,表现在年降水的增量上低于中心城市。年降水量与年份相关系数 R^2 较低又表明年降水量这种增长趋势并不是很明显(刘永林等,2015;崔珏等,2013;王春林等,2015;郑腾飞等,2017)。以全省86站1972—2018年多年平均降水的年际变化与Pearson-III型密度分布曲线拟合,其NS值为0.582(见图2),拟合度一般,以正态分布曲线作对照(图略),其NS值为0.547,拟

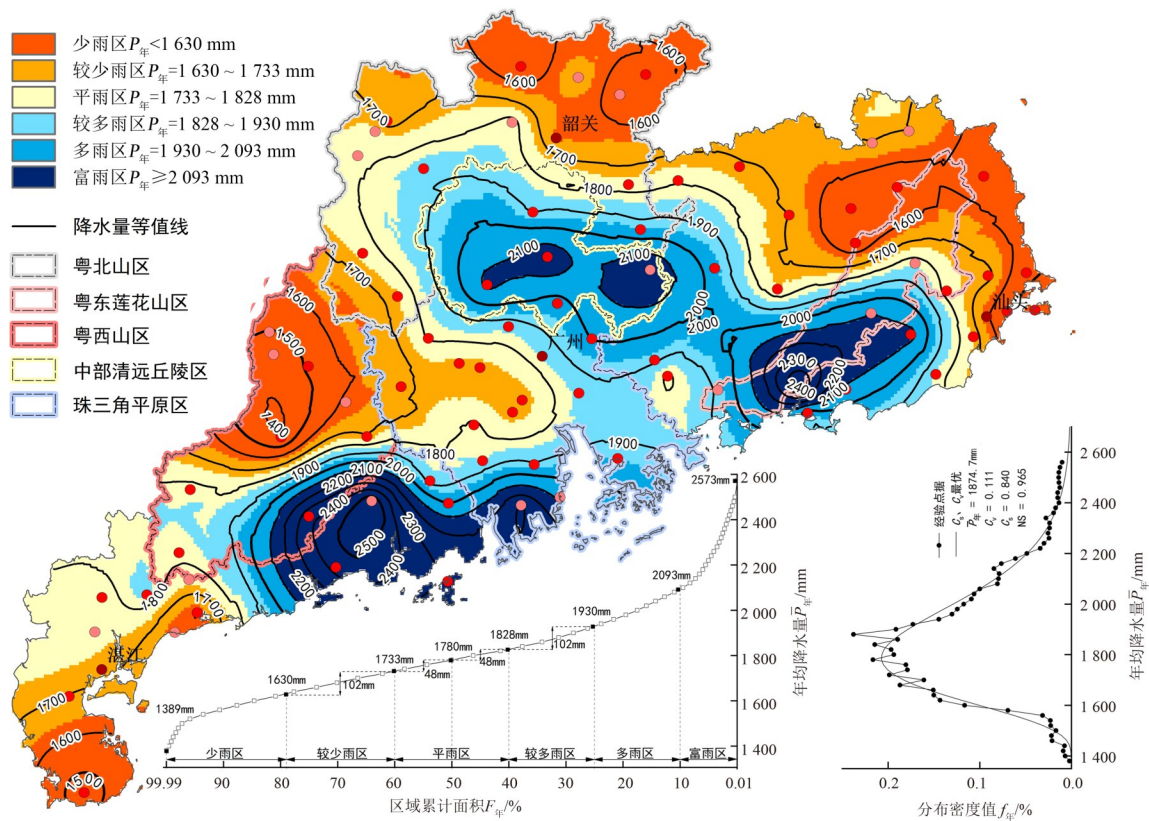


图3 广东省年降水量等值线图、降水区型及密度分布

Fig. 3 Annual precipitation contours, regional precipitation patterns and density distribution in Guangdong

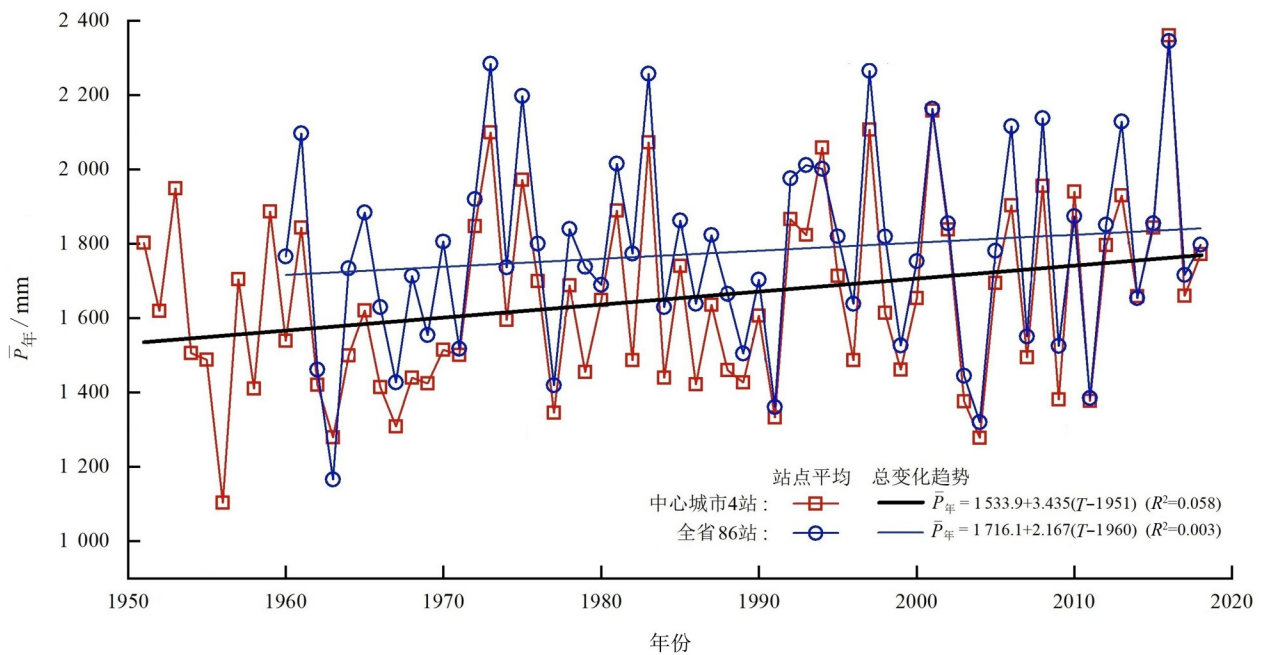


图4 广东省年降水量的年际变化

Fig. 4 Variation in decade years of annual precipitation in Guangdong

合度也不高,表明年降水量的年际变化规律并不显著。概率分布并不能反映年降水量的增加/减少趋势,只能反映一种平稳随机过程(即统计参数的不变性);年降水量的年际变化属于“超尺度”,对其而言,目前统计数据年限较短,还无法得出一个长期的统计规律。

实际上年降水量的年际变化普遍存在年代间的震荡过程(年份跳跃和年代段的连续增加/减少)。例如,86站计算的全省年降水量年际变化分段如图4所示:1963—1973年上升,经1973—1977年跳跃下降后,1977—1983年又上升;然后1983—1991年下降,1991—1997年跳跃上升,1997—2011年又下降;最近2011—2018年又呈上升。地球(或某个大区域)降水量的年际变化趋势(长周期)、年代交替上升与下降(中长周期)和年间震荡与多数学者的研究成果(赵亮等,2011;廖义善等,2014)相符,具有不确定性。这也许是太阳轨迹及活动周期连带影响地球气候,也许是日地间的某种相互作用(Brook et al., 2018;方精云等,2011;Hays et al., 1976),相关古今气候的变化研究众多,但尚未有较为清晰的结论。

2.2 降水量的年内分配

广东省全年雨、旱季分明,4~9月为雨季,10~3月为旱季,其中雨季多年平均降水量为1431 mm(占全年79%),旱季降水量多年平均降水量为

377 mm(占全年21%)。根据广东省降水类型,雨季分为前、后汛期,历时均约3个月,降水量分别占雨季的54.4%和45.6%,前汛期对应锋面雨,历时长、频次密、峰值大(如小满至夏至期间的“龙舟水”),后汛期对应热带气旋雨和频发的强对流天气,从前汛期到后汛期之间有一个明显的伏旱期。雨、旱转季期间,初秋降温 and 不时南下的冷空气带来秋季风降水,如多数年份的10月中旬至11月上旬有一轮降水小高峰(或称“入秋水”,由于历时较短且各年入秋时间及冷空气强弱不同,经多年平均后在图5中表现有所“矮化”),甚至这段时间仍可能有少数台风发生。

全省多年平均日降水量对Pearson-III型密度分布曲线(即年降水量的年内分布)的拟合如图5左下角,其NS值为0.357,拟合度较低;相反,拟合正态分布的NS值为0.670(图略),拟合度相对较好。然而,无论是正态分布还是Pearson-III型分布,年际、年内降水分布曲线拟合度均不高,表明两种线型均不足以描述其时间分布的统计规律,正如前述的年际变化一样,其年内分布或许也没有较强的规律,或许是所使用的分布适用性不强;但从 $C_{v,年内} > C_{v,年际}$ 来看,降水量的年内分布比年际分布更不均匀,年内降水量的变化包含季节性的水汽运动过程,而年际降水概化了年内降水的过程。全省不同区域的地理、地形特征多样复杂,水汽

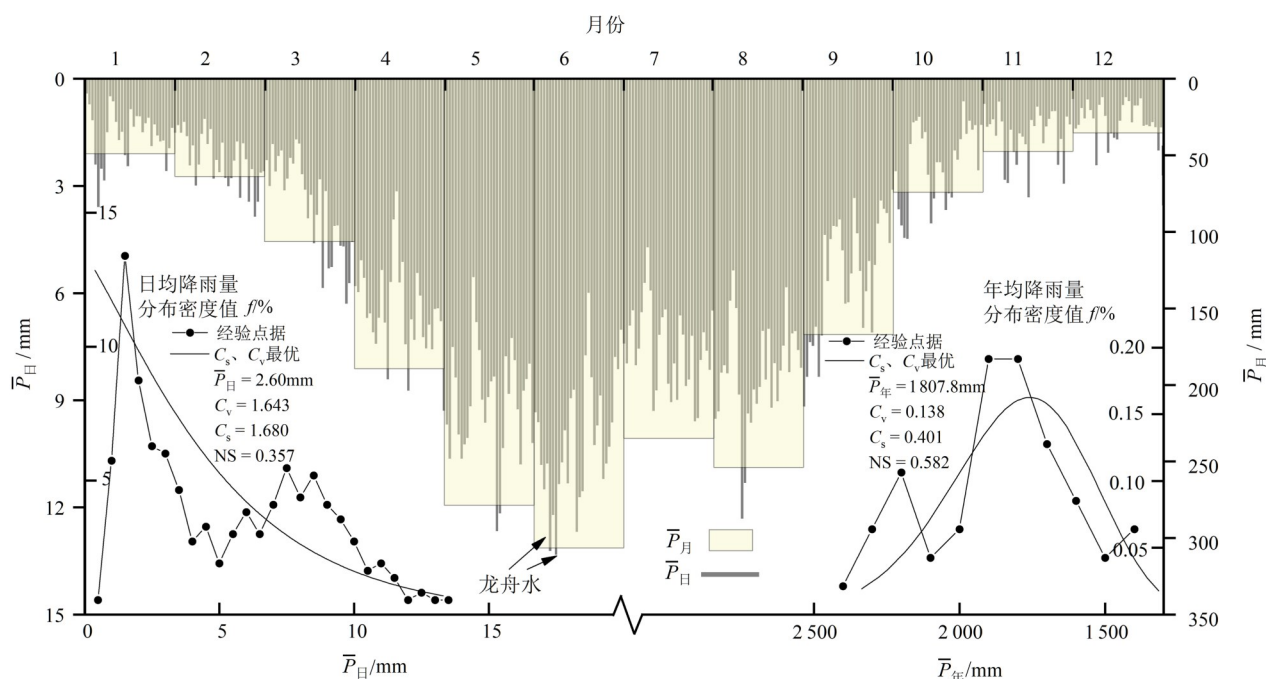


图5 1972—2018年广东省多年平均日、月降水过程及其概率分布

Fig. 5 Processes and probability distribution of daily and monthly precipitation annually in Guangdong from 1972 to 2018

运动与不同区域地形相互作用,其次降水过程具有差异,有必要进一步根据全省地理、地形特征划分的典型区域分析其季节性降水的分布。

3 年降水区域分布及大尺度地形的影响

除当地河流、植被蒸散发的水汽,广东省降水更多的是来自海洋的暖湿气流,水汽的运动和分布主导了广东降水的形成和尺度,水汽与不同尺度的地形相互作用形成了广东降水的分布格局。本节从广东省大尺度视角,分析广东省年降水量区域分布特征,以及大尺度地形对其影响。

3.1 年降水区域分布特征

广东省年降水量空间分布具有明显地域性,其年降水区型的分布与广东省大尺度地形相对应。如图3所示,根据年降水量-区域累积面积分布曲线划分的降水区型,平雨区多年平均降水量为1 733~1 828 mm,对应地理上的中部清远丘陵到粤北山区的交接地带及其延伸到粤东、粤西山区的两侧(第2阶梯区),占全省面积约20%。以平雨区为界,以南为较多雨区、多雨区和富雨区,其多年平均降水量超过1 828 mm,对应地理上的粤东、粤西沿海平原地区、中部清远丘陵区、珠三角平原(第1阶梯区),尤其是粤东莲花山区和粤西山区的迎风坡以及中部清远丘陵区(粤北山区前麓,或其“迎风坡”)为广东省的富雨区,占全省面积约10%,其降水中心年降水量超过2 093 mm,分布在珠江三角洲周围。除雷州半岛地区,平雨区以北为较少雨区和少雨区,对应地理上的粤东、粤西、粤北山区的背风坡等地区(第3阶梯区),其多年平均降水量低于1 733 mm,其中粤东莲花山区背风坡的兴梅盆地、粤西山区云开大山和云雾山之间的罗定盆地、粤北山区中部的高山区以及雷州半岛的最南端为广东省的少雨区,分列在广东省四周,占全省面积约21%,年降水量低于1 630 mm。相对其他少雨区,雷州半岛位于广东最南端,介于南海和北海之间,隔琼州海峡与海南岛相望,地势平坦,河川短小,虽属热带季风气候区,在前汛期当遭遇大陆性干冷气团时降水有限,形成了雷州半岛前汛期的旱情;后汛期主要为台风降水,其降水量与台风路径和频次有关,雷州半岛后汛期降水量有限。

广东省年降水量空间分布具有明显偏态性。广东省年降水量区域分布与Pearson-III型分布曲线

和正态分布曲线(图略)的拟合度较高,其NS值分别达0.965和0.845,其中Pearson-III型分布曲线更高的拟合度,表明年降水量的地区偏态分布更明显;由年降水量-区域累积面积分布曲线和 $C_s = 0.840$ (正偏),也反映了年降水区型的地理分布偏于多雨/富雨区。

全省多年平均降水量 C_v 值表明(年内分布1.643,远大于区域分布0.111和年际分布0.138,分别见图3和图5)广东省年降水量的季节变化远超其空间变化和年际变化;NS值表明,与年内分布相比,Pearson-III型分布曲线对广东省年降水量的区域分布和年际分布与拟合程度相对好些;由于降水量的年内分布较强偏于多雨季节,与地区分布也偏于多雨/富雨区两者具有很好的一致性,因果关系明确,当然地区分布对季节分布具有抹平效应,这在两种分布的 C_s 值得到了很好反映(年内分布为1.680,区域分布为0.840);由于前述原因,年际分布的 C_s 值不具有解释条件。

3.2 大尺度地形对年降水分布的影响

统计分析表明,广东省年降水量区域分布与3个大尺度地形阶梯区关系密切,那么广东省年降水量的实测值是否与测站的地面高程相关,从而构成了它们统计特征的因果关系呢?为此将各测站的实测多年平均降水量与其地面高程的散点绘于图6,以45°斜线将测站分布大致分为2组:

组I:雨量站的地面平均高程为41.6 m,对应区域主要为粤东、粤西沿海平原地区、中部清远丘陵区、珠三角平原(第1阶梯区),代表珠三角平原雨量站的散点聚集于组I下端,其年降水量在1 600~2 000 mm之间,代表粤东、粤西沿海平原区和中部清远丘陵区降水中心雨量站的散点分散于组I上端,其年降水量超过2 000 mm。组I雨量站年均降水量与高程相关性不明显($R^2 = 0.090$),表明了来自海洋的暖湿的水汽通过东南季风和台风等进入大尺度地形的第1阶梯区,该区域水汽充足,呈聚集且紊乱分布,在低海拔地区不足以分层,受中部清远丘陵到粤北山区的交接地带及其延伸到粤东、粤西山区的两侧(第2阶梯区)的粤东莲花山区、粤西云雾山区及粤北山区地形抬升的影响,在其迎风坡处形成了降水中心。

组II:雨量站的地面平均高程为138.0 m,对应区域主要为粤东、粤西、粤北山区的背风区和雷州半岛地区(第3阶梯区),其年降水量变化幅度较大,为1 350~1 950 mm。该组的年均降水量与

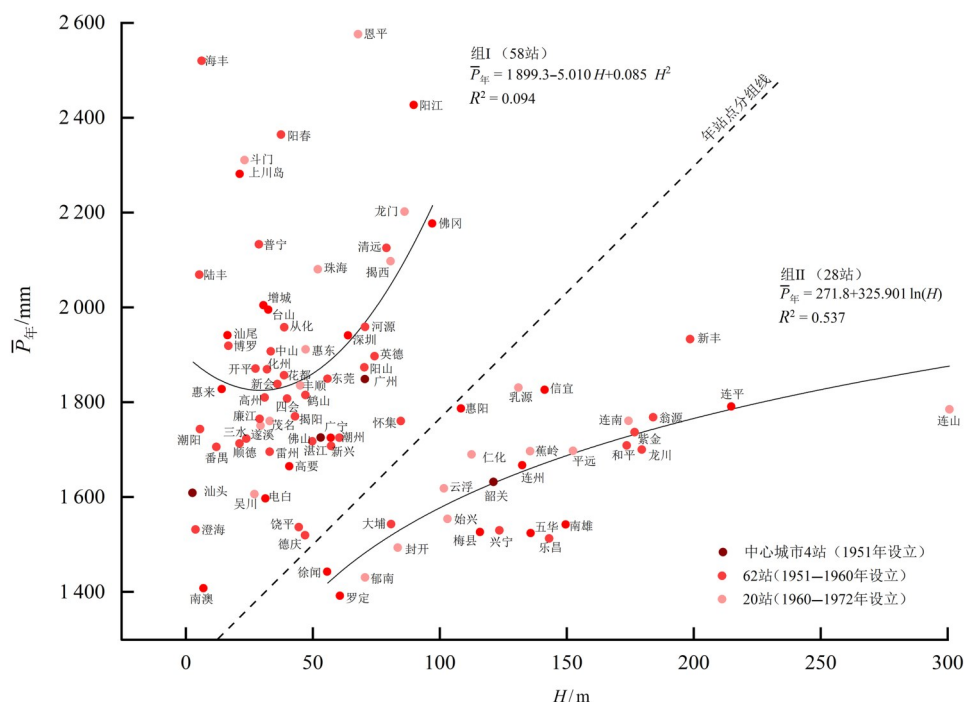


图6 广东省各雨量站年降水量与站点地面高程散点图

Fig. 6 Scatter plot of annual precipitation and elevation of precipitation stations in Guangdong

雨量站高程呈显著的对数关系($R^2 = 0.549$), 与“大气中水汽密度和风速随高程呈对数分布”(Brutsaert, 1983; Zhou et al., 2006)和“大气压和空气密度随高度呈对数线性变化(詹江道等, 2010)”等结论相一致。分布在组II拟合曲线下端的雨量站为粤东、粤西山区及雷州半岛, 中端为粤东、粤西山区与粤北山区的过渡地带, 上端为粤北山区。表明来自海洋的水汽经前两级大尺度地形地面摩擦作用的影响下, 在粤北山区前坡分层, 第3阶梯区的水汽的输送动力减弱, 水汽大大减少。尤其是雷州半岛-粤西山区-粤北山区前麓及粤东武夷山山区前麓一带, 年降水量与站点高程呈显著的对数关系, 表明此处水汽趋于稳定并分层, 形成了多雨区与少雨区的过渡带、分隔带。

通过对比组I、II雨量站分布特征, 得出广东省年降水量与高程存在一定的关系相关, 但广东省大尺度地形造成的年降水分布差异(组I、II间比较)远大于高程造成的差异(同区域内不同高程间比较), 证明了大尺度地形通过影响水汽的运动, 与其相互作用形成了广东降水分布格局。

4 结论

1) 广东省年降水量年际变化总体上呈增加趋势, 但与年份线性关系不显著($R^2 = 0.003$), 与

Pearson-III型分布曲线和正态分布曲线拟合度不高(NS分别为0.582和0.547), 表明年降水量的年际变化规律并不显著, 其概率分布只能反映一种平稳随机过程。年降水量的年际变化属于“超尺度”, 对其而言, 目前统计数据年限较短, 还无法得出一个长期的统计规律。

2) 通过Pearson-III型分布曲线和正态分布曲线对比分析表明, 广东省年降水量地理分布的特征明显强于其时间分布特征(两种分布曲线的NS拟合度, 在地理上分别为0.965和0.845; 在时间上, 年内分别为0.357和0.670, 年际分别为0.582和0.547); 年降水量区域分布、年内分布和年际分布的C_v值(分别为0.111、1.643和0.138)表明, 广东省年降水量分布季节变化, 虽然在时间上偏于对称分布(如每年雨、旱季的时间均约为6个月), 但量值上峰值明显, 峰谷值差异远超过其空间上和年际间的差异。

3) 根据年降水量~区域累积面积分布曲线, 广东省年降水区型与其大尺度地形的相对应, 包括: ①粤东、粤西沿海、珠江三角洲等平原地区和中部清远丘陵区为多雨/富雨区(即第1阶梯区), 该区域水汽充足, 呈聚集且紊乱分布, 在低海拔地区不足以分层; ②中部清远丘陵区到粤北山区的交接地带及其向粤东、粤西两侧山区的延伸为

平雨区(即第2阶梯区),由于该区域地形抬升,消耗了大量水汽后在第1阶梯区形成了丰富的地形雨;③粤东、粤西、粤北山区的背风区和雷州半岛地区为少雨/较少雨区(即第3阶梯区),经前两级大尺度地形地面摩擦作用的影响下,第3阶梯区的水汽输送动力减弱,水汽大大减少,温度下降空气下沉又进一步减弱降水机制。从东雷州半岛、至粤西山区、至粤北山区前麓及至粤东武夷山山区前麓一带,年降水量与站点高程呈显著的对数关系,此处水汽趋于稳定并分层,形成了多雨区与少雨区的过渡带、分隔带。

4) 区域水资源配置格局除了考虑水与当地社会、经济、生态、环境等要素外,还应根据区域年降水量分布特征进行规划布局,以提高水资源

的利用效益。在大尺度地形中,可通过跨流域、跨省调水工程(如环北部湾调水工程等)解决少雨区因降水量时空分布不均造成的区域性缺水问题,这主要是在国家层面实现;但在相对小尺度地形中,更多地通过修建蓄水工程解决地方季节性用水问题。因此,对于地方性水资源配置布局须因地制宜,同时也要充分考虑当地降水量分布和过境水量等因素。

5) 广东省年降水量分布受水汽来源和区域地形作用的影响,其分布格局是前、后汛期及早季降水的叠加。由于降水空间分布与气团尺度有关,后续有必要以前汛期锋面雨、后汛期热带气旋雨和对流雨、旱季季风雨为尺度,进一步研究不同尺度的区域地形对不同尺度降水的影响。

参考文献:

- 崔珏,周买春,刘远,等,2013.泗合水流域径流变化趋势及其影响因素分析[J].水电能源科学,31(8):22-26.
- 方精云,朱江玲,王少鹏,等,2011.全球变暖、碳排放及不确定性[J].中国科学:地球科学,41(10):1385-1395.
- 广东农村统计年鉴编辑委员会,2021.广东农村统计年鉴(2021)[M].北京:中国统计出版社.
- 广东省地名委员会,1989.广东省县图集[M].广州:广东省地图出版社.
- 广东省水文局,2012.广东省水文志[M].北京:中国水利水电出版社.
- 侯景儒,1990.地质统计学的理论与方法[M].北京:地质出版社.
- 廖义善,李定强,卓慕宁,等,2014.近50年广东省降雨时空变化及趋势研究[J].生态环境学报,23(2):223-228.
- 林爱兰,谷德军,郑彬,等,2014.广东前汛期暴雨水汽输送异常变化特征[J].热带气象学报,30(6):1001-1010.
- 刘永林,延军平,岑敏仪,2015.广东省降水非均匀性与气候变化的响应关系[J].中山大学学报(自然科学版),54(5):138-146.
- 刘远,周买春,2017.基于HYDRO1K、SRTM3和ASTER GDEM的韩江流域水文地形信息对比[J].中国农村水利水电,(2):98-103.
- 宋丽琼,田原,邬伦,等,2008.日降水量的空间插值方法与应用对比分析——以深圳市为例[J].地球信息科学,10(5):566-572.
- 王春林,邹菊香,麦北坚,等,2015.近50年华南气象干旱时空特征及其变化趋势[J].生态学报,35(3):595-602.
- 詹道江,徐向阳,陈元芳,2010.工程水文学[M].4版.北京:水利水电出版社.
- 赵亮,徐影,王劲松,等,2011.太阳活动对近百年气候变化的影响研究进展[J].气象科技进展,1(4):37-48.
- 郑腾飞,刘显通,万齐林,等,2017.近50年广东省分级降水的时空分布特征及其变化趋势的研究[J].热带气象学报,33(2):212-220.
- BROOK E J, BUIZERT C, 2018. Antarctic and global climate history viewed from ice cores[J]. Nature, 558(7709): 200-208.
- BRUTSAERT W, 1983. Evaporation into the atmosphere[M]. Netherlands: Springer.
- DUAN Q Y, SOROOSHIAN S, GUPTA V K, 1994. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models[J]. J Hydrol, 158(3/4): 265-284.
- HAYS J D, IMBRIE J, SHACKLETON N J, 1976. Variations in the earth's orbit: Pacemaker of the ice ages[J]. Science, 194(4270): 1121-1132.
- MATHERON G, 1963. Principles of geostatistics[J]. Eco Geol, 58(8): 1246-1266.
- ZHOU M C, ISHIDAIRA H, HAPUARACHCHI H P, et al, 2006. Estimating potential evapotranspiration using Shuttleworth-Wallace model and NOAA-AVHRR NDVI data to feed a distributed hydrological model over the Mekong River basin[J]. J Hydrol, 327(1/2): 151-173.

(责任编辑 秦社彩)