

基于空间插值逐日降水格点数据的福建省降水时空变化分析

庞冉^{1,2}, 王文¹, 武晶³, 余志明³

(1.河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 南京 210098;

2.中水淮河规划设计研究有限公司, 合肥 230601; 3.福建省水文水资源勘测局闽江河口水文实验站, 福州 350001)

摘要: 构建可靠的高时空分辨率降水数据集, 揭示全球变暖背景下的降水时空变化特征, 对于水资源管理与水土流失预防与治理至关重要。利用组合空间插值方法, 以福建省 1979—2018 年 400 余个站点观测逐日降水数据为原始数据源, 得到研究区 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 高空间分辨率逐日降水格点数据集。以此数据集为基础, 计算 8 个极端降水指数和 3 个降水集中程度指标, 分析福建省降水时空变化特征。结果表明: 提出的组合空间插值方法可以有效提高逐日降水插值精度, 并且数据精度高于目前常用的再分析与卫星遥感降水数据产品; 福建沿海地区、闽江下游 1 日最大降水量、5 日最大降水量、强降水量、降水总量、降水强度 5 个极端降水指标有大面积显著上升趋势; 全区域降水集中期以鹞峰山脉—闽江下游—戴云山脉一线为界, 西北地区早于 6 月 11 日, 东南地区则晚于 6 月 11 日, 与福建省前后汛期时段基本相符; 西北地区前汛期雨季有后推趋势, 东南地区后汛期雨量有增多趋势。

关键词: 逐日降水; 空间插值; 极端降水指数; 降雨集中程度; 气候变化

中图分类号: P339

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)01-0176-12

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.01.024

Spatial-temporal Variation of Precipitation in Fujian Province Based on Spatial Interpolated Gridded Daily Precipitation Data

PANG Ran^{1,2}, WANG Wen¹, WU Jing³, YU Zhiming³

(1.State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098;

2.China Water Huaihe Planning, Design and Research Company Limited, Hefei 230601; 3.Minjiang River Estuary

Hydrological Experimental Station, Bureau of Hydrology and Water Resources of Fujian Province, Fuzhou 350001)

Abstract: Constructing reliable precipitation datasets with high spatial and temporal resolution to reveal the temporal and spatial variation characteristics of precipitation in the context of global warming is crucial for water resources management and soil erosion prevention and governance. In this paper, a Combinedly Interpolated Precipitation (CIP) method was proposed. Using the daily precipitation data observed at more than 400 sites in Fujian Province from 1979 to 2018 as the data source, a $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ high spatial resolution daily precipitation grid point dataset was produced in the study area. Based on this data set, eight extreme precipitation indices and three precipitation concentration indices were calculated, and the temporal and spatial variation characteristics of precipitation in Fujian Province were analyzed. The results showed that the CIP method proposed in this paper could effectively improve the accuracy of daily precipitation interpolation, and the data accuracy was far higher than that of the commonly used reanalysis and satellite remote sensing precipitation data products. The five extreme precipitation indicators of the maximum one-day precipitation, the maximum five-day precipitation, the heavy precipitation, the total precipitation and precipitation intensity in Fujian coastal areas and the lower reaches of the Minjiang River, had significant upward trend in a large area. The precipitation concentration period (PCP) in the whole region was bounded by the Jiufeng Mountains-the lower reaches of the Minjiang River-Daiyun Mountains strip, that was, PCP on the northwest side of the strip was before June 11, whereas the southeastern side was after June 11, which was basically consistent

收稿日期: 2022-06-22

资助项目: 国家自然科学基金项目(41961134003)

第一作者: 庞冉(1996—), 女, 硕士, 助理工程师, 主要从事水文研究。E-mail: pangran_hhu@163.com

通信作者: 王文(1967—), 男, 博士, 教授, 主要从事流域水文过程模拟、水文遥感及全球变化研究。E-mail: wangwen@hhu.edu.cn

with the first rainy season in Fujian Province. The first rainy season in the northwest region had a backward trend, while the rainfall of the second rainy season in the southeast region had increasing trend.

Keywords: daily precipitation; spatial interpolation; extreme precipitation index; precipitation concentration; climatic change

摸清降水时空变化特征可以有效为水文预报、水资源规划与管理、水土流失预防与治理等提供参考依据。随着全球气候不断变暖,近些年很多地区降水强度、频次都趋于极端,由此导致的多种极端灾害事件也随之增加,对人民生活、经济发展和社会稳定产生严重影响。任正果等^[1]对中国气象数据网 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ CMA 栅格降水数据研究显示,1961—2011 年中国南方地区 5 日最大降水量(Rx5day)、强降水量(R95pTOT)、大雨日数(R20 mm)和降水强度(SDII)呈增加趋势,最长连续降雨日数(CWD)呈减小趋势;Tao 等^[2]研究表明,中国华南部分地区的 Rx1day 和 R95pTOT 有显著上升趋势,CWD 显著下降,而福建全域的降水强度总体都有上升趋势;江洁等^[3]对 1961—2017 年间站点日降水数据的分析发现,长江流域片、东南诸河片和珠海流域片平均降水、极端强降水和连续性强降水均增强;韦志刚等^[4]发现,华南区域平均而言极端降水量和强降水日数在 1961—2018 年除春季外的其他几个季节都呈增加趋势;郭湘宇等^[5]分析福建省 22 个气象观测站 1961—2013 年逐日降水量发现,福建省极端降水整体上呈现增加趋势;何泽仕等^[6]研究发现,福建省 1960—2013 年间台风暴雨降水量、台风暴雨天数也呈现不同程度的增加趋势;李欣欣等^[7]指出,福建省短历时强降水历史极值自 1961 年以来呈明显增多趋势,且主要集中在 21 世纪后。

在降水极值特征发生改变的同时,许多地区的降水集中程度也发生变化。国内外常用的降水集中程度指标主要有降水集中指数 CI ^[8]、降水集中度 PCD 与降水集中期 PCP^[9]。佟晓辉等^[10]利用 CI 指标对全国 1960—2011 年间日降水集中程度进行研究,指出我国 CI 值东高西低,东南沿海存在 CI 值显著减少的站点;王米雪等^[11]研究中国东南沿海逐日降水 PCD、PCP 的变化趋势,结果显示,福建省地区 PCD 内陆低于沿海,总体呈微弱上升趋势,PCP 北部晚于南部,总体呈上升趋势。

降水时空变化分析的基础是质量可靠的降水数据。目前降水数据获取的方式主要有站点观测、地面雷达观测、卫星遥感观测等。遥感观测具有高效、低成本的特点,但精度不高。比如全球降雨测量 GPM 和热带降雨测量 TRMM 2 种卫星降水数据在日尺度上与实测降水数据的相关性都 < 0.5 , RMSE 均 $> 13 \text{ mm/d}$ ^[12]。因此,基于站点观测数据,利用空间插值

方法获得格点降水数据,是获得具有可靠时空精度降水数据的重要途径。降水空间插值方法主要分为确定性方法和地统计方法^[13],确定性方法只考虑样本数据属性间的数学关系来对未测量点进行插值,主要有反距离加权法(IDW)、最近邻算法(NN)、趋势面分析、样条插值等,而地统计方法则主要指克里金插值及其衍生方法(如协同克里金、外部漂移克里金、回归克里金等)^[14]。由于日降水具有显著的空间变异性,且在空间上存在大面积零值区域,其空间插值比年降水与月降水量的插值更为困难^[15]。高歌等^[16]对比反距离加权法普通克里金方法在中国东部日降水量空间插值的应用效果发现,二者精度接近;姜晓剑等^[17]对比距离反比权重法(IDW)、协同克里金(CK)和薄盘样条法(TPS)3 种插值方法,在我国逐日基本气象要素的应用,认为 TPS 方法最优;Chen 等^[18]对比 5 种不同方法(最近邻方法、局部多项式、径向基函数、反距离加权及普通克里金方法)在中国日降水插值中的应用效果认为,普通克里金方法最优。由此可见,不同研究者对最优空间插值方法的分析结果有所不同,而且目前大部分的研究都倾向于对现有插值方法的单独应用,缺乏对多种插值方法的综合应用。

本文在对比多种空间插值方法的日降水插值精度基础上,提出 1 种组合空间插值方法,利用地面降水观测数据,插值得到 1 套精度较高的福建省 1979—2018 年 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 逐日降水格点数据,并将其与目前常用的再分析与卫星遥感降水数据产品进行对比分析。以此数据为基础对福建省极端降水指数(1 日最大降水量、5 日最大降水量、强降水量、降水总量、降水强度、最长连续无雨日数、最长连续降雨日数、侵蚀性降水日数)和降水集中程度指数(降水集中指数 CI 、降水集中度 PCD 和集中期 PCP)进行研究,揭示福建省 1979—2018 年降水时空变化特征。

1 研究数据

1.1 研究区概况

福建省位于中国东南沿海,陆地面积为 12.14 万 km^2 ,其中山地面积占 75%,丘陵面积占 15%(图 1)。福建省地势西北高、东南低,主要有武夷山脉、鹫峰山脉、玳瑁山脉、戴云山脉四大山脉。地处亚热带海洋性季风气候区,多年平均气温 $17 \sim 21^{\circ}\text{C}$,降水的水汽来源主要是东亚季风及夏秋台风,年平均降水量 $1\,400 \sim$

2 000 mm。沿海地区地形相对低平,降水偏少,而中、西部的山地使湿润水汽受地形抬升形成丰富的降水,因而降水量分布与海岸线大体平行,从东南沿海向西北内陆起伏式递增。

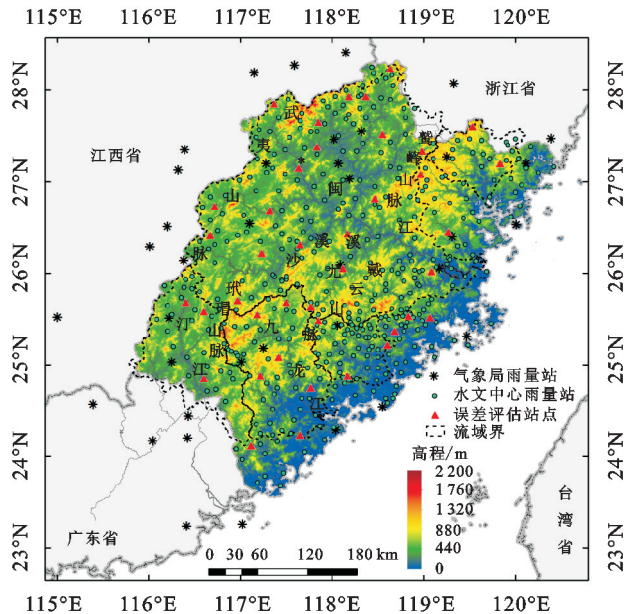


图 1 福建省高程与雨量站分布

1.2 降水数据来源

1.2.1 降水观测数据 本研究共使用 484 个站点的降水数据,其中福建省水文水资源勘测中心(以下简称水文中心)观测站 447 个(由福建省水文水资源勘测中心直接提供),中国气象局国家气象信息中心中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)(以下简称气象局)中国地面气候资料日志数据集(V3.0)国家基准气象站 37 个(22 个位于福建省内,15 个位于省外,用于提高省界附近降水插值精度)(图 1)。其中由三角形标识的 40 个站点(福建省水文中心提供的雨量站)数据用于精度评估。数据时间为 1979 年 1 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日。

水文中心雨量站由当日 8:00 至次日 8:00 累计降水表示当日降水,而气象局雨量站则由前日 20:00 至当日 20:00 累计降水表示当日降水。因此,利用气象局提供的 12 h 降水数据重新计算气象局站点的当日 8:00 至次日 8:00 降水数据。数据筛查发现,水文中心站点中有 123 个存在数据缺失,主要分布在闽江、晋江、九龙江及闽南沿海诸小河,而且其中 1/2 以上仅缺失 1985 年的逐日降水。利用对每个数据缺失站点的降水量采用其周边 5 个站的日降水数据,采用多元回归的方式进行缺失数据插补。

1.2.2 降水格点数据 本研究选择 3 种目前常用的格点降水数据作为参比数据,数据时段均为 2001 年 1 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日。

中国区域地面气象要素驱动数据集(CMFD)由国家

青藏高原科学数据中心发布(<http://data.tpcd.ac.cn/zh-hans/data/8028b944-daaa-4511-8769-965612652c49/>),时间分辨率为 3 h,空间分辨率为 0.1°×0.1°。该数据集的原始数据来自于国家气象局观测数据、全球再分析数据和卫星遥感数据(包括 Princeton 大学再分析数据、GLDAS 数据、GEWEX—SRB 辐射数据以及 TRMM 卫星降水观测数据)。

全球降水观测计划(GPM)多卫星降水联合反演产品(IMERG)是最新一代的卫星遥感降水数据。此数据充分借鉴 TRMM 时代已成熟的卫星降水反演算法,融合 GPM 卫星群观测的红外数据及被动微波数据,并通过校准分析进行数据校正,具有 30 min 时间分辨率和 0.1°×0.1°空间分辨率。IMERG 同时发布多个版本,包含 Early Run、Late Run、Final Run 子产品,其中 Final Run 产品质量最高。本文采用 IMERG V06B 的 Final Run 产品进行对比(<https://gpm.nasa.gov/data/IMERG/>)。

全球陆面数据同化系统(GLDAS)由美国航空航天局戈达德空间飞行中心(NASA/GSFC)、美国国家海洋和大气管理局(NOAA)和国家环境预报中心(NCEP)联合开发此系统同化地面观测与卫星观测数据,采用多个陆面模型生成陆面状态与通量数据。GLDAS 具有多个版本,本研究中使用的是由 GLDAS—2.1 数据集中 Noah 模型 0.25°×0.25°逐 3 h 降水驱动数据(https://disc.gsfc.nasa.gov/datasets/GLDAS_NOAH025_3H_2.1/summary?keywords=GLDAS),并处理为由北京时间当日 8:00 至次日 8:00 的逐日数据。

2 研究方法

2.1 空间插值与评估方法

2.1.1 单一空间插值方法 根据前人对逐日降水插值方法的研究成果,通过对比各种方法的普及程度、稳定性、计算难度等,本文对比 7 种单一插值方法的插值精度,从中优选出 3 种进行组合空间插值:

(1)反距离加权(IDW):以待插值点到每个已知点距离平方的倒数作为权重,用已知点数值的加权平均值作为待插值格点值。

(2)薄板样条(TPS):利用径向基函数对插值曲面进行拟合,同时满足插值表面总曲率最小和总弯曲能量最小。本文利用 R 语言中的 fields 程序包实现 TPS 插值。

(3)普通克里金(OK):基于地理数据空间自相关性的统计插值方法,利用 R 语言中的 gstat 程序包实现 OK 插值。

(4)外部漂移克里金(KED):其原理与 OK 相同,但 KED 可以考虑辅助变量对感兴趣变量空间分布的影响及采样数据在空间上的各向异性。本文选择高程作为辅助变量参与到感兴趣变量区域均值的计算中,半变异函数点对距离 h 取为日降水高值站点间平均距离的 $1/3$ 。

(5)广义加性模型(GAM):将感兴趣变量表示为其他相关变量非参数光滑函数的加和,可以揭示感兴趣变量与相关变量的非线性效应。本文中非参数光滑函数选择光滑样条函数,利用 R 语言中的 mgcv 程序包实现。

(6)不规则三角网(TIN):利用采样点和断线等要素形成相连接的三角形,进而构成不规则三角网,达到拟合感兴趣变量数值表面空间分布的目的。本文利用 R 语言中的 interp 程序包实现不规则三角网的构建及线性插值。

(7)最近邻算法(NN):在插值过程中用距离最近的 1 个采样值或较近的多个采样值的均值填充网格单元,从而得到感兴趣变量的空间分布。考虑到本文所用雨量观测站点密度较高且分布均匀,并通过对比不同参与插值样点数的插值效果,本文对每个网格单元用附近 3 个站点值进行平均。

2.1.2 组合空间插值方法 在对 2.1.1 节的多种单一插值方法进行精度评价的基础上,选用排名前 3 的单一插值方法 A、B、C,根据三者插值的均方根误差(RMSE)的倒数,计算三者的加权权重,采用加权平均的方式获得组合空间插值降水数据(combinedly interpolated precipitation, CIP)。具体实施过程为:

(1)利用除 40 个验证站点之外的其余 444 个站点 2001 年 1 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日逐日降水,分别用 7 种单一插值方法插值得到 7 套格点数据,并计算各套数据在预留的 40 个站点处的精度评价指标,选出精度排名前 3 的单一插值方法 A、B、C。

(2)站点分组:将 N 个站点(本文 484 个)分为 k 组(本文分 6 组),每组包含 N/k 个均匀分布于全区域的站点。

(3)将所有数据站点分为 k 组,并分 k 次,每次选择其中的 $k-1$ 组站点按 3 种方法 A、B、C 分别插值得到全部研究区插值结果,并计算不同插值方法在未参与插值计算的那组站点处的 RMSE。

(4)采用插值方法 A(单一插值方法中精度最高的一种)方法对 3 种方法在各站点的 RMSE 进行插值,得到 3 种方法 RMSE 空间分布。

(5)以 RMSE 空间分布作为依据,计算在网点 $[i, j]$ 处 3 种方法对应的权重,计算公式为:

$$W_X[i, j] = \frac{\frac{1}{R_X[i, j]}}{\frac{1}{R_A[i, j]} + \frac{1}{R_B[i, j]} + \frac{1}{R_C[i, j]}} \quad (1)$$

式中:在格点 $[i, j]$ 处, W_X 为方法 X 插值结果所占权重; R_X 为方法 X 插值结果的均方根误差(mm)。

将 W_X 和 R_X 中的 X 换成 A、B、C 后可分别计算得到 W_A 、 W_B 、 W_C ,即为求得的 3 种方法对应权重。

(6)利用全部站点分别进行 A、B、C 单一插值,得到单一空间插值结果 P_A 、 P_B 、 P_C 。

(7)利用步骤(6)计算得到的 3 种单一空间插值方法计算结果及步骤(5)中计算得到的每种方法的权重,求得组合空间插值结果 P_{CIP} 。

$$P_{CIP} = W_A * P_A + W_B * P_B + W_C * P_C \quad (2)$$

式中: P_{CIP} 为 CIP 方法插值结果(mm); P_A 、 P_B 、 P_C 为 A、B、C 单一空间插值方法结果(mm)。

组合空间插值方法技术路线见图 2。

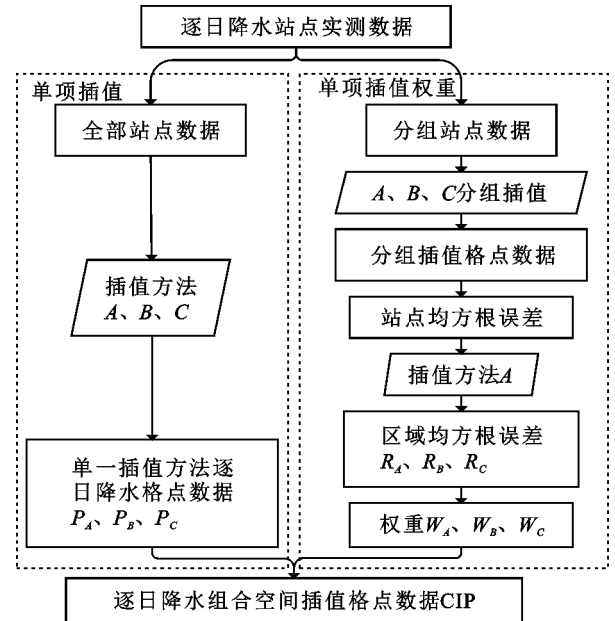


图 2 组合空间插值方法技术路线

2.1.3 插值精度评估方法 在对插值方法的质量评估中,预留 484 个站中 40 个水文中心雨量站点的数据,用于精度评估,其他 444 个雨量站点数据用于空间插值,质量评估指标有 3 个:

(1)确定性系数 DC ,衡量格点值与站点实测值之间吻合程度,计算方法为:

$$DC = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n [X_c(i) - X_0(i)]^2}{\sum_{i=1}^n [X_0(i) - \overline{X_0}]^2} \quad (3)$$

式中: $X_c(i)$ 为格点值(mm); $X_0(i)$ 为站点值(mm); $\overline{X_0}$ 为站点实测值的均值(mm); n 为格点个数。

(2)均方根误差(RMSE),是格点值与站点实测值偏差的平方和均值的平方根,反映计算值相对于实

测值的离散程度：

$$RMSE=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [X_c(i)-X_0(i)]^2}{n}}$$

(4)

(3)平均偏差(MBE),是格点值与实测值差值的平均值,判断计算值相对于实测值是否存在系统性正偏或负偏:

$$MBE=\frac{\sum_{i=1}^n [X_c(i)-X_0(i)]}{n}$$

(5)

2.2 降水时空变化特征分析方法

2.2.1 降水指数

(1)极端降水指数。为了研究全球气候变化特

征,世界气候研究计划(WCRP)成立了气候变化检测和指数联合专家组(ETCCDI)(http://etccdi.pacific-climate.org/list_27_indices.shtml),制定一套基于逐日气温与降水数据的气候特征核心指标(共 27 个),其中气温指标 16 个,降水指标 11 个。本文选择 1 日最大降水量(Rx1day)、5 日最大降水量(Rx5day)、强降水量(R95pTOT)、降水总量(PRCPTOT)、降水强度(SDII)、最长连续无雨日数(CDD)、最长连续降雨日数(CWD)7 个指标以及黄路平等^[19]提出的侵蚀性降水日数(R13mm)指标对福建省 1979—2018 年 CIP 逐日降水插值产品进行极端降水研究,指标详情见表 1。

表 1 极端降水指数

字母名	中文名	定义	单位
Rx1day	1 日最大降水量	年内最大 1 日降水量	mm
Rx5day	5 日最大降水量	年内最大 5 日降水量	mm
R95pTOT	强降水量	日降水量>95%分位值的年降水总量	mm
PRCPTOT	降水总量	年内日降水量之和	mm
SDII	降水强度	降水总量与降水日数(日降水量≥1.0 mm)比值	mm/d
R13mm	侵蚀性降水日数	年内日降水量≥13 mm 的日数	d
CDD	最长连续无雨日数	年内日降水量连续<1 mm 的最长时期	d
CWD	最长连续降雨日数	年内日降水量连续≥1 mm 的最长时期	d

(2)降水集中程度。降水集中指数(CI)(concentration index)。降水集中指数 CI 用来描述某时段内的降水量较大值出现的天数百分比和降水量百分比的分布规律^[8]。假定在某个气象站点上,某时段内的累积降水量百分比 Sum(P_i)与累积降水天数百分比 Sum(N_i)呈洛伦兹曲线分布(图 3),A、B 分别为 x 轴与实线洛伦兹曲线、实验洛伦兹曲线与虚线绝对平等线围成的多边形面积,采用基尼系数 B/(A+B)来表示该站点的降水集中指数 CI。

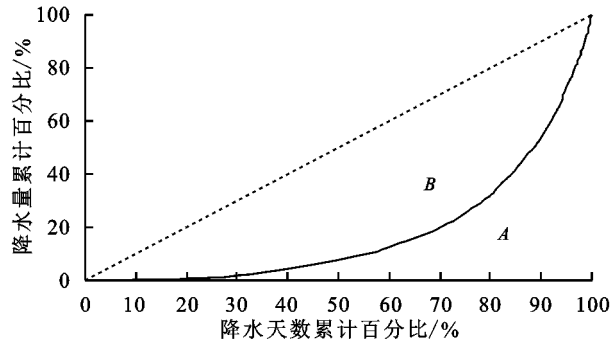


图 3 累积降水量百分比与累积降水天数百分比洛伦兹曲线
具体步骤为:以 1 mm 为间隔,将日降水量从 0.1~0.9,1.0~1.9 开始分组,直到降水量最大值为止共分为 n 组,计算各个分组中的降水天数(N_i)及其对应降水量(P_i)并累积求和。若降水天数的累积百分比 Sum(N_i)记为 X ,降水量的累积百分比 Sum(P_i)记为 Y ,两者关系式可表达为:

$$Y=aXe^{bx}$$

(6)

式中: a 和 b 均为常数,可用最小二乘法率定:

$$\ln a=\frac{\sum X_i^2\sum \ln Y_i+\sum X_i\sum X_i\ln X_i-\sum X_i^2\sum \ln X_i-\sum X_i\sum X_i\ln Y_i}{n\sum X_i^2-(\sum X_i)^2}$$

(7)

$$b=\frac{n\sum X_i\ln Y_i+\sum X_i\sum \ln X_i-n\sum X_i\ln X_i-\sum X_i\sum \ln Y_i}{n\sum X_i^2-(\sum X_i)^2}$$

(8)

将求得的系数 a 、 b 带入洛伦兹曲线,曲线与 x 轴的面积 A 为:

$$A=[\frac{a}{b}e^{bx}(x-\frac{1}{b})]_0^{100}$$

(9)

则降水集中指数(CI)为:

$$CI=\frac{5000-A}{5000}$$

(10)

降水集中指数(CI)值越大表明降水在年内分配越集中,反之降水集中指数越小则代表日降水在时段内分布越均匀,因此可以将 CI 指数分为 5 类,0~0.2 为极低浓度,0.2~0.4 为低浓度,0.4~0.6 为中等浓度,0.6~0.8 为高浓度,0.8~1.0 为极高浓度,不同国家间 CI 结果有很大不同,主要集中于中、高类别之间^[20],中国 CI 最大值常出现在珠江流域(0.8)^[21]。

降水集中度 PCD (precipitation concentration degree) 和集中期 PCP (precipitation concentration

period)。降水集中度(PCD)能够反映降水总量在研究时段内各个降水时段的集中程度,降水集中期(PCP)则反映研究时段中降水量最大的降水时段,在这 2 个指标刚提出时,降水时段是指月、旬(10 天)或候(5 天)。PCD 与 PCP 的计算原理是基于向量分析的,由图 4 可知,1 年对应 1 个圆周即 360° ,月(旬、候)降水量视为向量的长度,降水所在的不同月(旬、候)视为向量的方向,因此不同月(旬、候)降水向量 $\vec{A}$ 对应 1 个方位角度数 θ ^[9]。

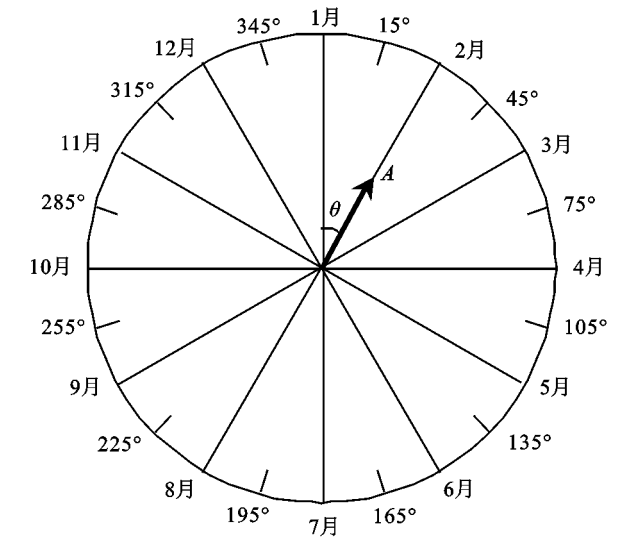


图 4 各月方位角范围及月中代表方位角

以降水时段为月举例,月降水 $r_i (i=1,2,\cdots,12)$ 可以分解为 1 个水平分量 $r_{xi}=r_i \cdot \sin \theta_i$ 和 1 个垂直分量 $r_{yi}=r_i \cdot \cos \theta_i$,则 12 个月降水在水平和垂直方向上的合成量可以分别表示为:

$$\begin{cases} R_x = \sum_{i=1}^{12} r_{xi} = \sum_{i=1}^{12} r_i \cdot \sin \theta_i \\ R_y = \sum_{i=1}^{12} r_{yi} = \sum_{i=1}^{12} r_i \cdot \cos \theta_i \end{cases} \quad (11)$$

式中: θ_i 为月降水 r_i 所在月对应的方位角度数; r_{xi} 、 r_{yi} 为 r_i 在水平和垂直方向上的分量; R_x 、 R_y 为年内所有 r_i 在水平和垂直方向上的合成降水。

总合成降水量为:

表 2 2001—2018 年 7 种单一插值方法逐日降水数据精度对比

评价系数	IDW	OK	TPS	KED	GAM	TIN	NN
DC	0.792	0.793	0.823	0.766	0.780	0.812	0.820
RMSE/(mm·d ⁻¹)	5.864	5.853	5.381	6.227	6.079	5.481	5.458
MBE/(mm·d ⁻¹)	-0.050	-0.034	-0.016	-0.578	-0.076	-0.053	-0.077

利用 2001 年 1 月 1 日至 2018 年 12 月 31 日的福建省及周边的 448 个站点(另外保留 40 个站点用于检验)逐日降水地面观测数据,分别采用 TPS、TIN、NN 方法以及本文的组合空间插值方法(CIP)进行了插值计算。4 种插值方法的降水插值结果以及现有其他降水数据产品在 40 个检验站点上的 DC、RMSE、MBE 的评估结果见图 5。

$$R = \sqrt{R_x^2 + R_y^2} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^{12} r_i \cdot \sin \theta_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{12} r_i \cdot \cos \theta_i\right)^2} \quad (12)$$

则降水集中度(PCD)可表示为总合成降水量(R)与总实际降水量(ω)的比值:

$$PCD = \frac{R}{\omega} = \frac{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^{12} r_i \cdot \sin \theta_i\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^{12} r_i \cdot \cos \theta_i\right)^2}}{\sum_{i=1}^{12} r_i} \quad (13)$$

将总合成降水量的方位角定义为降水集中期(PCP):

$$PCP = \tan^{-1} \left(\frac{R_x}{R_y} \right) \quad (14)$$

以日为降水时段,即以上公式中的 $i=1,2,\cdots,365$ (闰年为 366),则对应日平均方位角为 $0.986^{\circ}/d$ (闰年为 $0.984^{\circ}/d$)。本研究也将以日降水作为研究对象展示年内降水集中度和集中期分布特点。

2.2.2 Mann-Kendall 趋势检验方法 采用非参数 Mann-Kendall 趋势性检验方法(M-K 检验)^[22]对数据序列进行趋势性检验。M-K 检验的原假设(H_0)为数据序列来自独立且同分布的随机变量总体,没有单调趋势。根据 M-K 检验的秩相关系数 τ 及其 p ,本研究把趋势分为 7 个等级,即:当 τ 为正(负)值, $p<0.01$ 表示有很强上升(下降)趋势,趋势类型取 +3 (-3); $0.01<p<0.05$,表示有显著上升(下降)趋势,趋势类型取 +2 (-2); $0.05<p<0.1$,表示有弱上升(下降)趋势,趋势类型取 +1 (-1); $p>0.1$ 表示无显著变化,趋势类型取 0。

3 结果与分析

3.1 CIP 插值精度评价及其与其他产品的对比

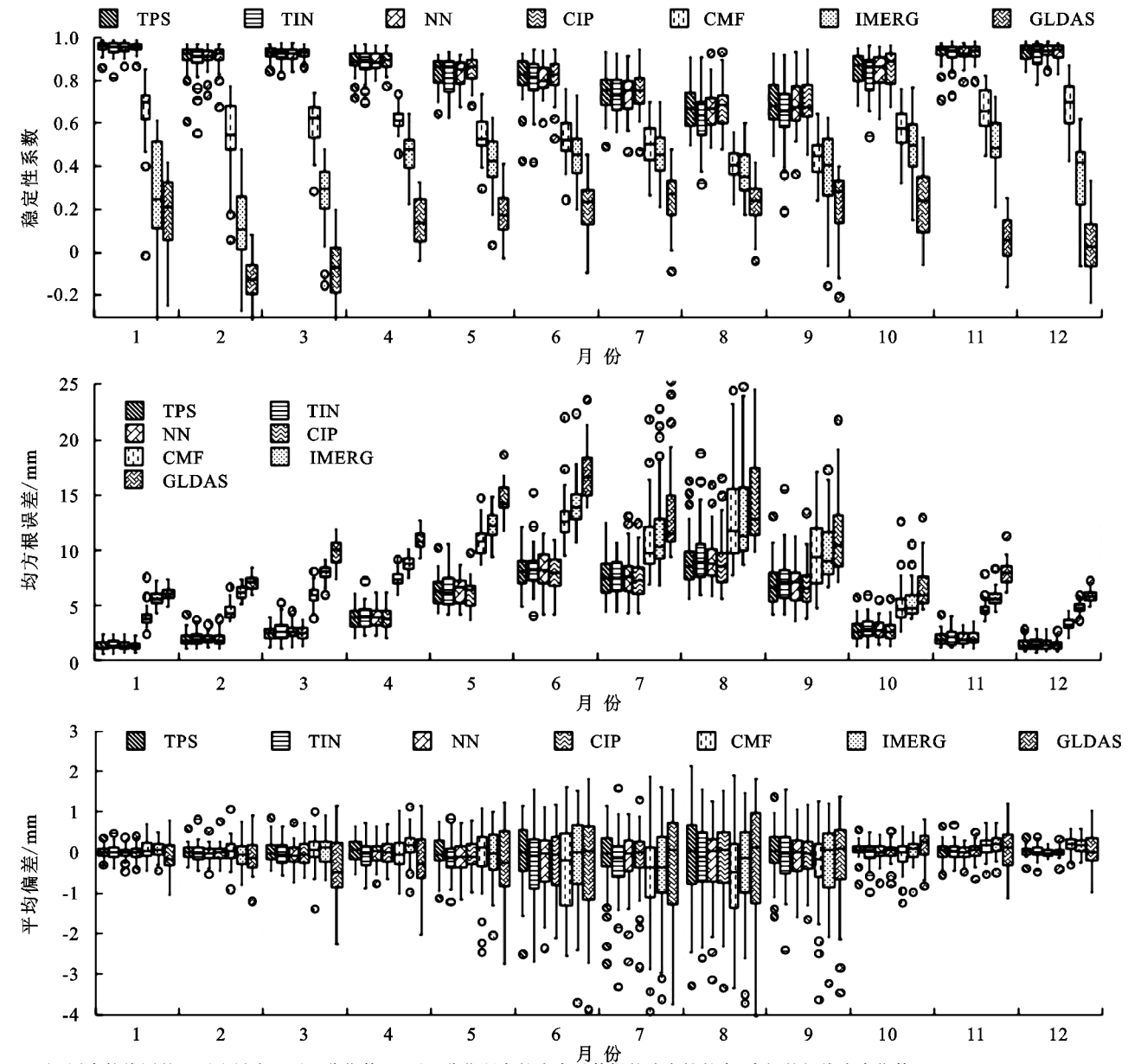
首先对 7 种单一插值方法进行插值精度评估,结果见表 2。综合考虑 DC、RMSE、MBE 3 种评价指标,插值精度位列前 3 的单一插值方法分别为 TPS、TIN、NN。

CIP 的 DC 中位数普遍有所提高,例如,在 6 月比 NN 提高 0.031,在 8 月比 TIN 提高 0.048,比 TPS 提高 0.022,上下四分位距离在各月都有缩小,缩小幅度最大在 5 月,比 TIN 缩小 0.059,插值结果的确定性显著提高。RMSE 中位数几乎在各月都比其他 3 种单一插值结果小,在 7 月比 TPS、TIN、NN 分别低 0.221,0.254,0.366 mm,9 月时更是比 TIN 和 NN 分

别低 0.562,0.501 mm,上下四分位数值也有一定程度缩小。MBE 中位数多月均值为 0.013 mm,比 TPS 的 0.034 mm 和 TIN 的-0.024 mm 都更接近 0 值,说明 CIP 方法的系统偏差更小,上下四分位距离在 7 月比 NN 缩小 0.122 mm,在 8 月比 TPS 缩小 0.216 mm,在 9 月比 TIN 缩小 0.225 mm,CIP 插值结果可以有效提高其他 3 种单一插值产品在夏季偏差的稳定性。由此可见,CIP 方法可以有效提高单一插

值结果的确定性及稳定性,降低误差,具有很好的实用性。

与 CMFD、IMERG、GLDAS 降水数据对比,CMFD、IMERG、GLDAS 产品的 DC 分别为 0.569,0.385,0.141,远低于基于大量地面观测数据插值生成的 CIP(0.858),RMSE 分别为 7.373,8.431,9.984 mm,远高于 CIP(4.370 mm),MBE 分别为-0.038,0.043,-0.036 mm,其绝对值大于 CIP(0.013 mm)。



注:图中箱线图的上、下边界为上下四分位数,上下四分位距离越小表示数据的稳定性越高;中间的短线为中位数。

图 5 不同逐日降水产品在 2001—2018 年不同月份的精度对比

为对比各单一空间插值结果及另 3 种降水格点数据产品的降水空间布局特点,以 2016 年 9 月 10 日降水为例,绘制降雨场三维立体图(图 6)。通过对比可以看出,4 种插值结果降水空间分布总体相似,但 TPS 插值表面十分光滑,容易丢失区域降水中心,并导致“高值低估,低值高估”的问题;TIN 因其计算方式的特点,插值表面粗糙,格点降雨极值与其格点内

站点降雨值很接近,导致极值点突出,与附近降雨场割裂,插值表面不够合理;NN 插值表面有明显的分块现象,在雨量站较为稀疏的地方,降水场的空间分布特点不明显;CIP 插值表面很好地综合前面 3 种插值方法的栅格降雨结果,同时尽可能规避上面提到的几个问题,插值表面光滑且能够明显展示降雨中心。此外,已有研究^[23]表明,CMFD 降水数据,对降水空

间分布的把握不够准确,常存在“高值低估,低值高估”的现象。IMERG 对小雨容易出现高估现象,对中雨估计精度最高,但对其他雨强的探测则表现得太不稳定^[24]。这 2 种数据对降水事件的空报率较高,在不同地区和时段的降水描述精度差异较大^[25]。GLDAS 是在全球尺度上的降水模拟,对局部地区的

细节描述无法达到可靠精度,而且 GLDAS 数据在日尺度上(由 3 h 数据加和)的虚假降水量较多^[26],因此在小范围内出现与实际降水分布情况不一致的问题,且影响以其作为数据源之一的 CMFD 数据,例如,图 6 中 CMFD 在福建中部和闽江入海口处的降水低估与 GLDAS 有一定的一致性。

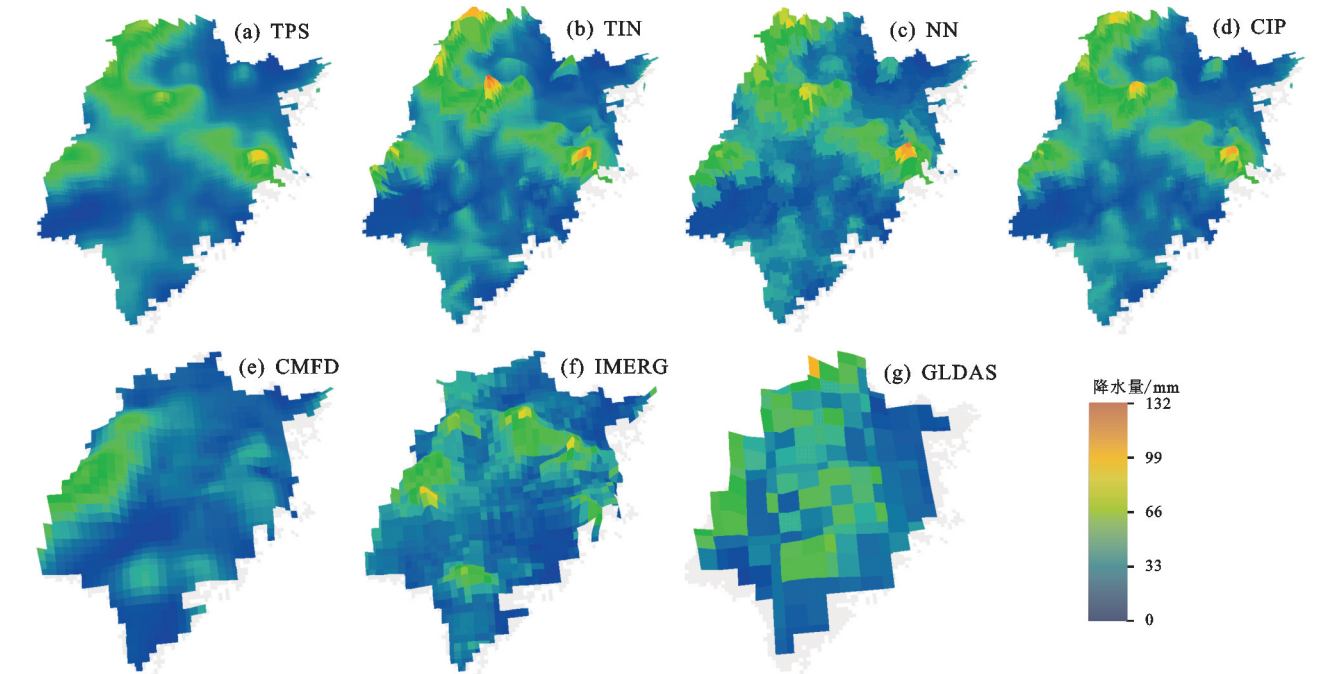


图 6 不同降水数据产品 2016 年 9 月 10 日降水场三维立体图

3.2 福建省降水时空变化特征

3.2.1 极端降水指数分析 采用 CIP 算法,利用全部 484 个站点的观测数据,制作 1979—2018 年福建省逐日降水格点数据。格点空间分辨率为 $0.05^{\circ}\times 0.05^{\circ}$ 。利用该数据集计算表 1 所列的 8 个极端降水数标。这些指标的趋势检验结果见图 7,线性变化率见图 8。1 日最大降水量(Rx1day)、5 日最大降水量(Rx5day)、强降水量(R95pTOT)、降水总量(PRCPTOT)、降水强度(SDII)5 个指标都有较大面积的区域显著增加的趋势,侵蚀性降水日数(R13mm)在全省范围内的变化趋势不显著,最长连续无雨日(CDD)、最长连续有雨日(CWD)则出现较大范围的显著减少趋势。

对 8 个指标的详细分析可以看出:Rx1day 主要在东北部山区(鹭峰山脉)和中西部山区(玳瑁山脉)及闽江入海口有显著增加趋势,变化率最高可达到 3.7 mm/a ;Rx5day 在闽江入海口有显著上升趋势,在东北部水系有极显著上升趋势,在南部水系有轻微下降趋势,正变化率高值出现在东北部水系,达 5.7 mm/a ,南部小范围出现负变化率,极值达 -3.5 mm/a ;R95pTOT 在福建东北部、闽江入海口都有极显著的上升趋势,在闽江支流尤溪和沙溪上游有显著上升趋势,东部沿海的正变化率较突出,局部地区达到 13.7 mm/a ;PRCPTOT 在东北部山区及闽江入海口处有

极显著上升趋势,全省大部分地区降水总量基本都呈现正变化率,最大值达到 23.6 mm/a 。SDII 主要在福建东北部、东部沿海及武夷山脉出现显著或极显著上升趋势,正变化率最大值达 $0.17\text{ mm}/(\text{d}\cdot\text{a})$;R13mm 整体无明显变化趋势,仅在东北部有零星显著上升趋势,但全省大部分地区的 R13mm 都呈现正变化率,变化率高值主要集中在各个山区,可达 0.47 d/a ;CDD 在东部沿海、中西部山区及西南部汀江流域有显著下降趋势,此外在闽江流域的支流都有广泛零星分布的轻微下降趋势,全省 CDD 都有一定负变化率,有显著下降趋势的地区负变化率更大,达到 -0.84 d/a ;CWD 在武夷山脉东南坡一带有极显著下降趋势,在汀江流域下游有零星分布的轻微上升趋势,变化率 $-0.22\sim 0.17\text{ d/a}$ 。

极端降水量指标(Rx1day、Rx5day、R95pTOT)、年降水总量(PRCPTOT)与降水强度(SDII)的变化结果与已有研究^[4]结果相似,这些指标主要在福建省东北部沿海有显著的大面积上升趋势,这部分地区夏季降水常由穿过台湾地区或从台湾地区北部海面登陆福州、厦门沿海一带的台风所引起,其暴雨频率高、量极大,易导致灾害性洪水的发生^[27],季倩倩^[28]研究表明,近 40 年来西北太平洋热带气旋的频数虽然没有显著变化,但登陆强度、生命期最大强度、破坏性

潜力都有明显增大趋势,这是导致沿海极端降水量显著上升的主要原因。此外随着全球变暖增强,东南季风携带的暖湿水汽含量增多^[29],在东北部山区抬升作用影响下形成的强降水也随之显著增多。结合沙溪、尤溪一带 Rx1day、R95pTOT 指标的显著上升、武夷山脉一带 SDII 指标的显著上升以及闽江入海口各项指标的显著上升,可以预见未来闽江流域发生由短时强降水引发的多支流同时达到较大级别洪水的概率将会上升。

福建省土壤侵蚀敏感性高度敏感和敏感区主要分布于丘陵山地区域,极敏感区更是在鹫峰山脉有零星分布,这些土壤侵蚀极敏感区(鹫峰山脉)、敏感区(九龙江上游山区)也是侵蚀性降水日数显著上升的地区,降水是引起土壤侵蚀的重要因子^[30],降水强度的增加加大水土流失的风险。

福建省全区域都存在一定程度最长连续无雨日数减少的情况,最长连续降雨日数的空间变化则有不同,对照极端降水量指标变化分布,有 3 个地区值得关注,分别是武夷山区、汀江流域、玳瑁山脉。武夷山区上升最显著的是降水强度指标,其他指标显著增加趋势分布零散,最长连续有雨日数呈现出极显著的下降,这意味着以对流雨为主要降水类型的武夷山区,其降水形式逐渐呈现间断性多次强降水。汀江流域 7 个指标都没有显著变化,但最长连续无雨日数呈显著减少趋势,说明该地区降水时间分配趋向均匀,长时间无降水的情况将有所缓解。玳瑁山脉降水强度类的极端降水指标都有显著的上升趋势,最长连续无雨日数呈现显著减少趋势,最长连续降水日数显著上升零星分布,可见该地区降雨呈现连续降水日延长,降水强度集中的特点。

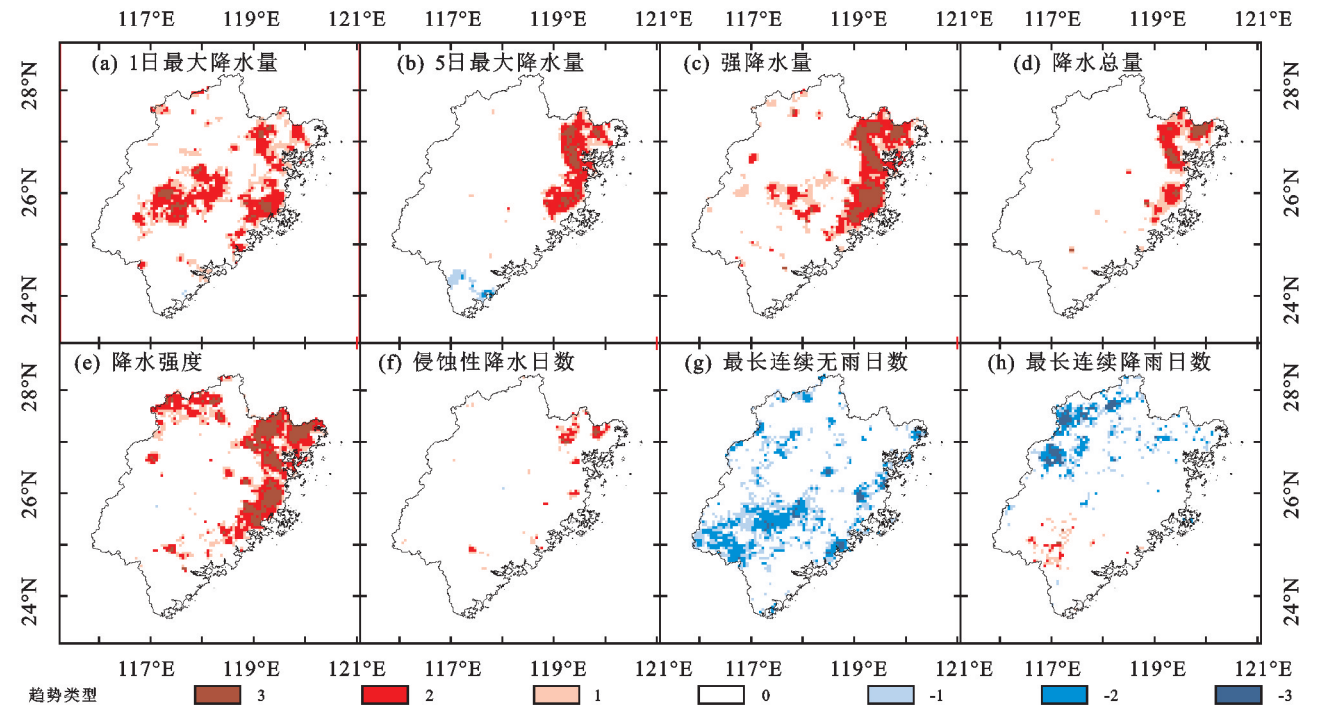


图 7 1979—2018 年福建省极端降水指数变化地 M-K 趋势检验

3.2.2 降水集中程度分析 图 9 为多年平均降水集中程度指标 CI、PCD、PCP 及其变化趋势。从图 9 可以看出,福建省多年平均降水集中指数(CI)的空间分布较为零散,其值在 0.59~0.79,区域内大部分地区 CI 值在 0.69 左右。CI 高值区位于主要受到热带气旋影响的东部沿海,CI 低值区主要位于受对流雨影响较多的山区,全区域 CI 时空变化趋势没有显著一致的规律,主要在东部及东北部水系有零星上升趋势,在汀江、鹫峰山脉有零星轻微下降趋势,正变化率较大的集中在东北部沿海、武夷山脉和鹫峰山脉,负变化率较大的集中在南部。多年平均降水集中度(PCD)的空间分布则更为均匀规律,其值在 0.27~0.51,PCD 高值区集中在

闽南沿海,其次是武夷山脉,低值区在东北沿海。闽南沿海降水集中于 7—9 月,其中 8 月是降水主要时期,武夷山脉降水集中于 4—6 月,其中 6 月是降水主要时期,其他地区降水相比较来说则较为均匀,全区域 PCD 值没有显著变化趋势,正变化率高值集中在沿海一带,与 CI 变化趋势类似是,PCD 在东部及东北部水系也有零星上升趋势。CI 与 PCD 由于计算机理不同,两者之间的相关性并不高^[20],从本文的研究结果来看,CI 更倾向于对降水强度的分布集中程度进行描述,如西南一带的负值区,与极端降水指数分析得到的结果一致,而 PCD 则更类似于对降水量在年内时间上的分布集中程度进行描述。

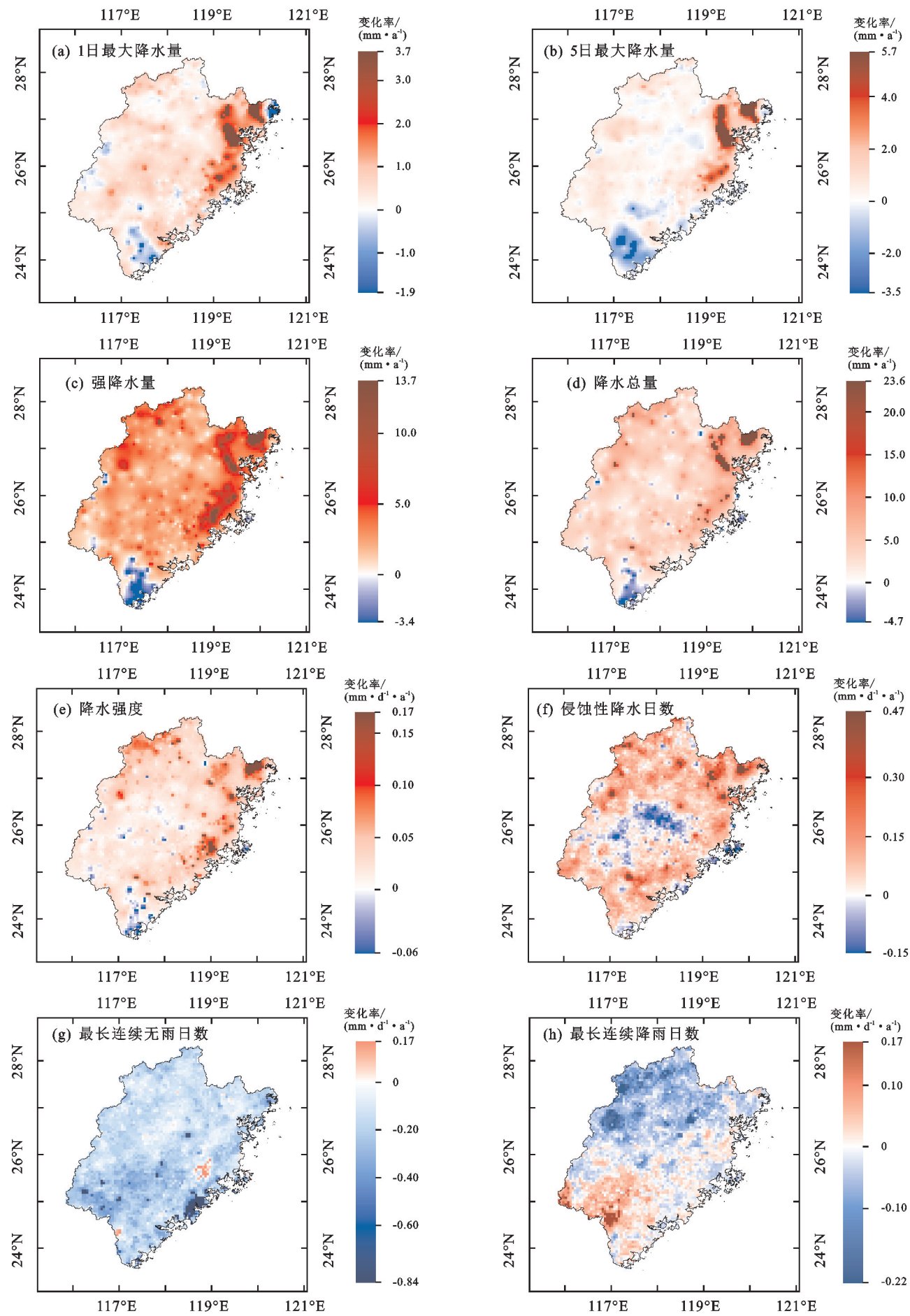


图 8 1979—2018 年福建省极端降水指数线性变化率

多年平均降水集中期 PCP 的值在 $130^{\circ}\sim190^{\circ}$ ，其对应时间为 5 月 12 日至 7 月 12 日，福建省常年前汛期雨季持续时间为 4 月 29 日至 6 月 25 日(福建省气候公报^[31])，由于 PCP 是一种降水向量合成的概念，受后汛期台风雨强度和发生时间不确定性的影响，降水集中期 PCP 较前汛期雨季后推一段时间是合理的。PCP 的空间分布很有特点，以一个清晰的与鹞峰山脉—闽江下游—戴云山脉的走向高度重合的 160° (6 月 11 日)条带为界，西侧降水集中期早于 6 月 11 日，东侧降水集中期晚于 6 月 11 日。6 月全省降水空间分布较为均匀，武夷山脉一带降水量达到顶峰，东部

沿海降水开始增多，因此 160° 条带以西降水集中在 6 月及以前，以东降水则集中在 6 月以后。从变化趋势上来看，PCP 在全区域都有显著或极显著的上升趋势，即降水集中期有后推趋势，这可以理解为，在主要受对流雨影响的地区，前汛期强降水出现的时间有推迟的趋势，在主要受热带气旋影响的地区，后汛期台风雨降水量增多、强度增大，使降水集中期后推，这与本文 3.2.1 节关于热带气旋和东南沿海极端降水变化趋势的相关结论是一致的。全省 PCP 变化率都为正值，高值集中在东北部沿海，主要是台风雨增多和鹞峰山脉地形抬高的共同作用造成的。

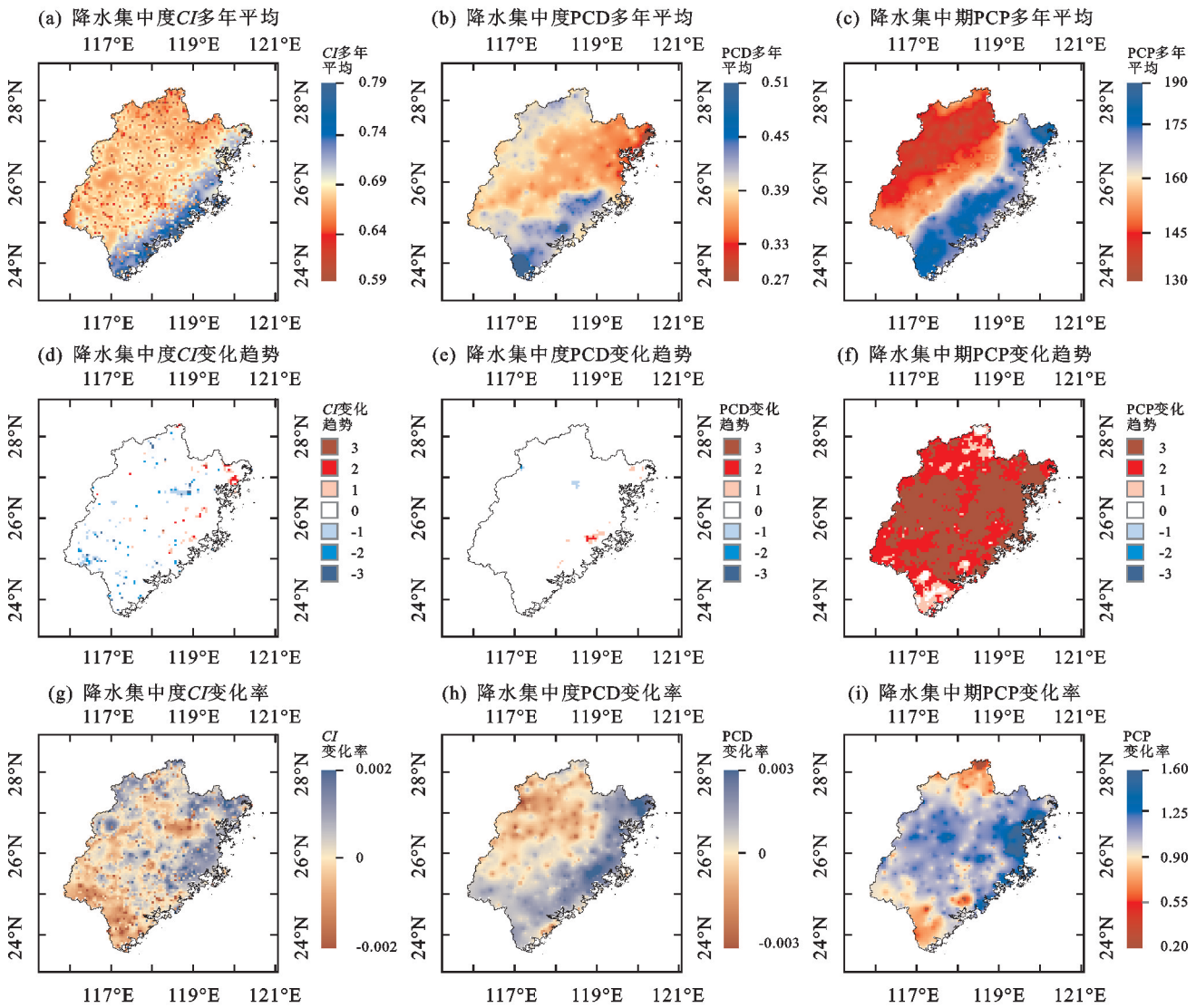


图 9 1979—2018 年福建省多年平均降水集中程度指标、变化趋势及线性变化率

4 结论

(1)对 7 种单一空间插值方法在日降水数据的插值精度对比表明，TPS 插值精度最优，其次为 TIN。对 TPS、TIN、NN 3 种方法进行综合，得到的综合插值降水数据(CIP)与其他数据产品相比，精度高于各单一插值方法，也大大高于现有常用降水格点数据产品GLDAS、CMFD，及 IMERG，在各数据集中具有最

高的确定性系数(各月各站点处 DC 值中位数的均值为 0.858)、最低的均方根误差(各月各站点处 RMSE 值中位数的均值为 4.37 mm)和很小的平均偏差。

(2)受东南季风暖湿水汽含量增加及夏季台风雨强度增大的影响，极端降水量指标(Rx1day、Rx5day、R95pTOT)、年降水总量(PRCPTOT)与降水强度(SDII)在福建省东北部、鹞峰山脉、闽江流域都有大

面积显著上升趋势。侵蚀性降水日数(R13mm)在土壤侵蚀极敏感区(鹫峰山脉)、敏感区(九龙江上游山区)有显著上升,结合极端降水指数的显著上升趋势,应注意预防水土流失,提高丘陵山地区域水土保持能力。最长连续无雨日(CDD)和最长连续有雨日(CWD)的变化趋势表现出不同区域降水形式的变化特征,武夷山区将呈现间断性多次强降水,汀江流域降水的时间分配将趋向均匀,玳瑁山脉将呈现连续降水日延长,降水强度集中的特点。

(3)降水集中指数(CI)倾向于对降水强度的集中程度进行描述,该值在福建省东部沿海取得极大值,在东北部的轻微上升趋势表示该区域台风雨强度增大,在汀江流域轻微下降趋势表示该地区降水趋向均匀,这与(2)中结果相同。降水集中度(PCD)倾向于对降水量的集中程度进行描述,在武夷山区和南部沿海取得极大值,展现两地区分别以对流雨、台风雨作为主要形式集中降水的特点。降水集中期(PCP)有显著的空间分布特点,鹫峰山脉—闽江下游—戴云山脉以西降水集中期为 5 月 12 日至 6 月 11 日,以东为 6 月 11 日至 7 月 12 日,与福建省前后汛期时段基本相符,全区域降水集中期显著上升表示前汛期雨季后推,后汛期雨量增多。

参考文献:

[1] 任正果,张明军,王圣杰,等.1961—2011 年中国南方地区极端降水事件变化[J].地理学报,2014,69(5):640-649.

[2] Tao Y Y, Wang W, Song S, et al. Spatial and temporal variations of precipitation extremes and seasonality over China from 1961—2013[J].Water,2018,10(6):e719.

[3] 江洁,周天军,张文霞.近 60 年来中国主要流域极端降水演变特征[J].大气科学,2022,46(3):707-724.

[4] 韦志刚,李娴茹,刘雨佳,等.1961—2018 年华南年和各季极端降水变化特征的比较分析[J].高原气象,2021,40(6):1513-1530.

[5] 郭湘宇,吴正方,杜海波,等.福建省极端降水时空变化特征及其环流因素分析[J].资源科学,2017,39(6):1084-1098.

[6] 何泽仕,郑巧雅,徐曹越,等.1960—2013 年福建省台风雨时空特征研究[J].人民珠江,2019,40(3):1-8,18.

[7] 李欣欣,白龙,林昕,等.福建省短历时强降水历史极值气候特征分析[J].海峡科学,2021(9):3-10.

[8] Javier M V. Spatial distribution of a daily precipitation concentration index in peninsular Spain[J].International Journal of Climatology,2004,24(8):959-971.

[9] Zhang L J, Qian Y F. Annual distribution features of precipitation in China and their interannual variations [J].Journal of Meteorological Research,2003,17(2):146-163.

[10] 佟晓辉,刘向培,贾庆宇,等.1960—2011 年中国日降水

集中程度的时空变化特征[J].气候与环境研究,2017,22(3):301-314.

[11] 王米雪,延军平.1960—2013 年中国东南沿海地区年内降水集中度和集中期的时空变化特征[J].水土保持通报,2016,36(2):277-282,287.

[12] 刘益锋,汪小钦,吴思颖,等.GPM 与 TRMM 卫星降雨数据在福建省的适用性对比分析[J].水土保持研究,2019,26(6):311-316.

[13] Piazza A D, Conti F L, Noto L V, et al. Comparative analysis of different techniques for spatial interpolation of rainfall data to create a serially complete monthly time series of precipitation for Sicily, Italy[J].International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation,2011,13(3):396-408.

[14] Goovaerts P. Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall [J].Journal of Hydrology,2000,228(1/2):113-129.

[15] Bárdossy A, Pegram G. Interpolation of precipitation under topographic influence at different time scales[J].Water Resources Research,2013,49(8):4545-4565.

[16] 高歌,龚乐冰,赵珊珊,等.日降水量空间插值方法研究[J].应用气象学报,2007,18(5):732-736.

[17] 姜晓剑,刘小军,黄芬,等.逐日气象要素空间插值方法的比较[J].应用生态学报,2010,21(3):624-630.

[18] Chen D L, Ou T H, Gong L B, et al. Spatial interpolation of daily precipitation in China: 1951—2005[J].Advances in Atmospheric Sciences,2010,27(6):1221-1232.

[19] 黄路平,毛政元,傅水龙,等.福建省长汀县降雨侵蚀力及其与水土流失的关系研究[J].自然灾害学报,2015,24(5):103-111.

[20] Núñez-González G. Comparison of the behavior of the precipitation concentration index on global and local scale[J].Theoretical and Applied Climatology,2020,139(6):631-638.

[21] Zhang Q, Xu C Y, Gemmer M, et al. Changing properties of precipitation concentration in the Pearl River basin, China [J].Stochastic Environmental Research and Risk Assessment,2009,23:377-385.

[22] Wang W, Chen X M, Shi P, et al. Detecting changes in extreme precipitation and extreme streamflow in the Dongjiang River Basin in southern China[J].Hydrology and Earth System Sciences,2008,12(1):207-221.

[23] 郭禹含,王中根,伍玉良.多源再分析降水数据在拉萨河流域应用对比研究[J].地理科学进展,2017,36(8):1033-1039.

[24] 王文种,黄对,刘宏伟,等.淮河上游区域 GPM IMERG 卫星降水数据应用评价[J].水电能源科学,2020,38(8):1-4.

[25] 许心怡,李建柱,冯平.不同降水产品在滦河流域径流模拟中的适用性[J].水力发电学报,2021,40(12):25-39.

子排放特征研究[J].农业环境科学学报,2020,39(6):1321-1331.

[11] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1978:466-532.

[12] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3 版.北京:中国农业出版社,2000:49-192.

[13] 田圣贤,冯盼,杨山,等.东北阔叶红松林腐殖质层土壤阳离子交换性能及其主要影响因素[J].生态学杂志,2018,37(9):2549-2558.

[14] 张倩,高明,徐畅,等.施氮对紫色土硝酸根和盐基离子耦合迁移的影响[J].水土保持学报,2013,27(1):111-115.

[15] 冯欢,张俊岭,张风华.不同复垦模式对土壤团聚体及水溶性阳离子的影响[J].水土保持研究,2018,25(6):94-99,108.

[16] 叶彦辉,刘云龙,韩艳英,等.氮沉降对西藏高山灌丛草甸土壤理化性质的短期影响[J].草地学报,2017,25(5):973-981.

[17] 邢旭光,马孝义,康端刚.盐阳离子类型及浓度对土壤持水及干缩开裂的作用效果[J].农业工程学报,2016,32(9):115-122.

[18] 宁应之,张惠茹,王芳国,等.模拟氮沉降对高寒草甸土壤纤毛虫群落的影响[J].生态环境学报,2018,27(1):1-9.

[19] 郭群.氮添加对内蒙古温带典型草原土壤的酸化效应及水分的影响[J].应用生态学报,2019,30(10):3285-3291.

[20] 汪文强,王子芳,高明,等.施氮对紫色土交换性酸及盐基饱和度的影响[J].水土保持学报,2014,28(3):138-142.

[21] 白雪,农梦玲,龙鹏宇,等.蔗田滴灌施肥土壤甲烷排放通量与活性有机碳含量的关系[J].华南农业大学学报,2020,41(3):31-37.

[22] 熊子怡,郑杰炳,王丹,等.不同施肥条件下紫色土旱坡地可溶性有机碳流失特征[J].环境科学,2021,42(2):967-976.

[23] 郭亚兵,毛晋花,王聪,等.氮、磷添加对热带森林土壤氮转化及损失影响的研究进展[J].生态学杂志,2021,40(10):3339-3354.

[24] 胡宗达,刘世荣,刘兴良,等.川西亚高山天然次生林不同演替阶段土壤—微生物生物量及其化学计量特征[J].生态学报,2021,41(12):4900-4912.

(上接第 187 页)

[26] 侯玉婷,南卓铜,潘小多.WRF 和 GLDAS 降水数据在黑河上游山区流域的比较与分析[J].兰州大学学报(自然科学版),2013,49(4):437-447.

[27] 陈胜品.福建省登陆台风与暴雨洪水关系分析[J].海峡科学,2010(10):173-176.

[28] 季倩倩.近 40 年西北太平洋登陆热带气旋强度变化特征研究[D]. 广东 湛江:广东海洋大学,2020.

(上接第 196 页)

[27] Davis K E R, Sangwan P, Janssen P H. Acidobacteria, Rubrobacteridae and Chloroflexi are abundant among very slow-growing and mini-colony-forming soil bacteria[J]. Environmental Microbiology,2011,13(3):798-805.

[28] 刘佳,陈晓芬,刘明,等.长期施肥对旱地红壤细菌群落的影响[J].土壤学报,2020,57(2):468-478.

[29] 王文晓,李小伟,黄文广,等.蒙古沙冬青根际土壤细菌群落组成及多样性与生态因子相关性研究[J].生态学报,2020,40(23):8660-8671.

[30] Li J Y, Fu Y L, Pike S M, et al. The Arabidopsis nitrate transporter NRT1.8 functions in nitrate removal from the xylem sap and mediates cadmium tolerance[J].Plant Cell,2010,22(5):1633-1646.

[31] 刘坤和,薛玉琴,竹兰萍,等.嘉陵江滨岸带不同土地利用类型对土壤细菌群落多样性的影响[J].环境科学,2022,43(3):1620-1629.

[32] Zhang Y G, Liu X, Cong J, et al. The microbially mediated soil organic carbon loss under degenerative succession in an alpine meadow[J].Molecular Ecology,2017,26(14):3676-3686.

[33] 张仲富,喻庆国,王行,等.植物群落和土壤理化性质对碧塔海湿地土壤细菌群落的影响[J].应用生态学报,2021,32(6):2199-2208.

[34] 王露莹,孙慧珍,杨雪.松花江下游滨岸带典型植被根际土壤细菌群落结构与功能多样性[J].环境科学,2022,43(4):2182-2191.

[35] Hou X L, Han H, Tigabu M. et al. Changes in soil physico-chemical properties following vegetation restoration mediate bacterial community composition and diversity in Changting, China[J].Ecological Engineering,2019,138:171-179.

[36] Rivett D W, Thomas B. Abundance determines the functional role of bacterial phylotypes in complex communities[J].Nature Microbiology,2018,3(7):767-772.

[37] 肖筱怡,靳振江,冷蒙,等.岩溶与非岩溶区水稻土团聚体细菌群落结构和功能类群比较[J].环境科学,2022,43(7):3865-3875.