

余青松,罗婉,杨令,等. 资水流域柘桃区间中小河流域面雨量算法比较分析[J]. 中低纬山地气象,2023,47(2):69-74.

资水流域柘桃区间中小河流域面雨量算法比较分析

余青松,罗 婉,杨 令,曾婷婷,邹锦明

(湖南省益阳市气象局,湖南 益阳 413000)

摘 要:为探析国家气象信息中心多源融合格点降水实况产品在中小河流域面雨量计算中的可行性,该文以湖南省资水流域柘桃区间为例,利用泰森多边形法、算术平均值法、克里金插值法以及国家气象信息中心多源融合格点降水实况产品,以 2020 年 9 月的主要降水过程为代表,对 4 种方法计算的面雨量结果进行比较分析。结果表明:(1)4 种方法的计算结果相关性显著,均能较好反应出不同强度降水及不同子流域之间的差异。大多数情况下算术平均值法的结果偏大,多源融合格点实况法的结果偏小,插值法和泰森多边形法的结果介于二者之间。(2)当地面雨量站分布密集或降水空间分布均匀时,4 种方法计算结果的标准差较小;当地面雨量站分布稀疏或降水空间分布不均时,4 种方法的结果标准差较大,此时采用多源融合格点实况法比算术平均值法、泰森多边形法更合理可靠。(3)对于地形地貌复杂多变的山区,尤其是暴雨以上强降水天气,降水空间分布十分不均,实际计算中小河流域面雨量时,针对不同的子流域、不同的天气过程,应当根据天气系统及降水空间分布综合分析,合理利用多种方法才能准确把握面雨量的大小和可能的误差。

关键词:资水流域;中小河流域;面雨量算法

中图分类号:P426.61+3 **文献标识码:**B

Comparative Study of Areal Rainfall Algorithms for Small and Medium Rivers in Zhetao Area of Zishui River Basin

YU Qingsong, LUO Wan, YANG Ling, ZENG Tingting, ZOU Jinming

(Yiyang Meteorological Bureau of Hunan Province, Yiyang 413000, China)

Abstract: Taking the Zhetao section of the Zishui River Basin in Hunan Province as an example, the application of the multi - source observed precipitation products developed by National Meteorological Information Center in the area rainfall calculation of small and medium rivers is discussed. The main precipitation process in September, 2020 were calculated based on 4 different algorithms namely Tyson polygon, arithmetic mean, Kriging interpolation, merging of multi - source observed precipitation products. The results show that: (1) The calculation results of the four methods have significant correlations, all can reflect the differences between intensities of precipitation and sub - basins. In most cases, the result of the average method is larger, the result of the merging of multi - source observed precipitation products is smaller, and the results of the Kriging interpolation and Tyson polygon are somewhere in between. (2) For precipitation above moderate rainfall, when the local area rainfall stations are densely distributed or the distribution of precipitation is uniform, the standard deviation of the results is smaller; when the local area rainfall stations are sparsely distributed or the precipitation is unevenly distributed, the standard deviation is larger. At this time, the merging of multi - source observed precipitation products is more reliable than others. (3) For mountainous areas with complex and changeable topography, especially those with heavy rainfall or above, the spatial distribution of precipitation is very uneven. In the actual calculation of areal

收稿日期:2022-05-17

第一作者简介:余青松(1973—),男,工程师,主要从事应用气象服务工作,E-mail:815160690@qq.com。

资助项目:湖南省气象局预报预测专项(XQKJ22C006),湖南省气象局重点课题(XQKJ20A006)。

rainfall, for different sub-basins and weather processes, a comprehensive analysis should be made based on the weather system and the spatial distribution of precipitation. A variety of methods should be reasonably used to accurately grasp the magnitude and possible errors of the areal rainfall.

Key words: Zishui River Basin; small and medium river; algorithms of areal rainfall

0 引言

江河流域面雨量是气象服务、水文预测、灾害风险评估中 1 个重要的指标^[1-4],实际工作中面雨量算法最常使用的有算术平均值法、泰森多边形法、等值线法、空间插值法等^[5-9]。目前我国关于河流水面雨量研究主要集中在大江大河流域,关于中小河流域面雨量计算的方法讨论仍较少。随着气象防灾减灾工作精细化要求的日益提高,开展中小河流域面雨量预报与实况计算工作十分必要。一次降水过程的降水量空间分布往往十分不均,受地形等各种因素影响,地面雨量站观测网络布局稀疏不一,且站点数目有限,难以反应出降水量的真实空间分布情况。因此基于雨量站点的泰森多边形法、算术平均值法、空间插值法等算法难以满足精细化的发展要求。袁定波等^[10]在泰森多边形法的基础上,考虑地形空间要素对降水量分布的影响,对雅砻江流域面雨量进行了估算。随着卫星、雷达等监测手段在气象防灾减灾中的广泛应用^[11-13],已有研究者利用卫星、雷达降水反演产品计算河流水面雨量。王兆礼等^[14]对 TRMM 卫星降水反演数据在珠江流域的适用性进行了分析,发现该反演产品对降水量整体上有高估的现象,总体而言,产品数据的精度较高。近年来国家气象信息中心基于新一代多普勒天气雷达(CINRAD)、实时卫星反演降水(CMORPH)、地面气象区域站观测数据,发展了 1 套多源融合技术,形成了覆盖全国范围逐小时的高分辨率(5 km × 5 km)格点降水实况产品^[15],徐靖宇等^[16]已用该产品计算了资水流域面雨量。遗憾的是该产品在中小河流域面雨量计算方面应用仍相对较少。

为进一步探讨国家气象信息中心多源融合 5 km × 5 km 格点降水实况产品在中小河流域面雨量计算中的可用性,本文以湖南省资水流域柘桃区间为例,利用泰森多边形法、算术平均值法、克里金空间插值法、国家气象信息中心多源融合 5 km × 5 km 格点降水实况产品等方法,基于气象部门雨量站观测数据,以 2020 年 9 月的主要降水过程为例计算了资水流域柘桃区间中小河流域面雨量,并利用统计方法对各种算法的优劣进行了比较分析,以期

中小河流域面雨量实际计算业务提供理论指导。

1 资水流域柘桃区间中小河流域划分

国家气候中心中小河流洪水和山洪灾害风险普查技术规范规定:中小河流为流域面积 < 3000 km² 的河流。目前 ArcGIS、GlobalMapper、Surfer 等商业 GIS 软件均有基于 DEM 数据的中小河流河网和流域划分功能,其中 ArcGIS 河网和流域划分流程最为复杂,涉及水流流向计算、提取洼地、分析填充洼地的阈值、填充洼地、生产河网和集水流域等步骤^[6,17],GlobalMapper、Surfer 等软件操作相对简单,只涉及到填充洼地阈值和中小河流域面积阈值的设定。利用中国科学院地理科学与环境研究所提供的 30 m 分辨率 DEM 数据,经过对比分析,在 200 km² 为中小河流域面积阈值的前提下,3 种软件生成的河网和流域边界差异甚微,因此 3 种软件生成的流域边界均能用于计算中小河流域面雨量。本文选取 Surfer 生成的流域边界计算流域面雨量。

图 1 为资水流域柘桃区间主要 1 级支流及其分区图,等制图为等高线图。区间共分为 15 个子流域,流域面积处于 200 ~ 1000 km² 之间,水系为国家基础地理信息中心 1:25 万公众版基础地理数据(非涉密),结合水系与地形综合判断,进一步证明了流域划分的合理性。

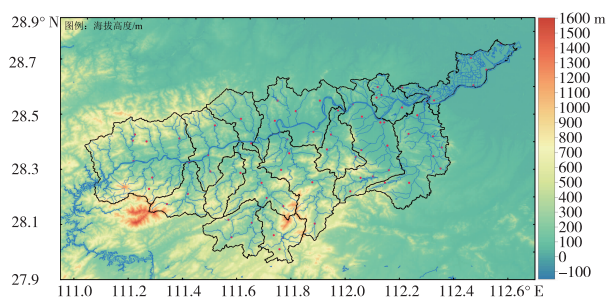


图 1 资水流域柘桃区间地形、水系图

Fig. 1 Topography and river map of Zhetao area in Zishui Basin

区间共有地面雨量站点 70 个,利用 ArcGIS 创建各子流域泰森多边形,并计算各雨量站权重系

数,图2为各子流域泰森多边形划分图,其中圆点代表地面雨量站。

2 资水流域柘桃区间中小河流流域面雨量算法

2.1 算术平均值法

算术平均值法是计算流域面雨量最简单的方法。设某个流域范围共有 n 个雨量站,第 i 个雨量站 24 h 内观测降水量值为 R_i ,则该流域 24 h 面雨量 R 计算公式为:

$$R = \sum_{i=1}^n R_i / n \quad (1)$$

算术平均值法计算简便,但缺点也明显,没有考虑降水分布不均的影响,实践表明当雨量站点空间分布密集时该方法可信度较高,当气象站点空间分布稀疏时该方法可信度不高。

2.2 泰森多边形法

泰森多边形法最早由气象学家泰森提出。泰森多边形划分方法如下:将所有相邻的雨量站连成三角形,作这些三角形各边的垂直平分线,每个雨量站周边的若干垂直平分线围成了 1 个多边形,且 1 个多边形范围内仅有 1 个雨量站,该多边形便称之为泰森多边形,多边形范围即为雨量站控制范围。

设某个流域范围共有 n 个雨量站,第 i 个雨量站的泰森多边形面积为 S_i ,该流域的总面积为 S ,第 i 个气象站 24 h 内观测降水量值为 R_i ,则该流域面雨量值 R 计算式为:

$$R = \sum_{i=1}^n S_i \times R_i / S \quad (2)$$

泰森多边形法相对算术平均值法较好地考虑了雨量站控制面积的权重,目前被广泛用于计算流域面雨量。

2.3 克里金插值法

通常降水量空间分布是不均匀的,泰森多边形法虽然考虑了不同雨量站的权重,但未考虑降水量空间分布的差异。空间插值法可将雨量站观测数据插值到规则的二维网格上,从而反推降水量的空间分布情况。克里金插值法、反距离权重法、样条函数法等是常用的插值方法,江清霞等^[18]计算发现克里金插值法相对其他插值方法误差较小,本文采用该方法进行插值。

设某个流域内共有 n 个地面区域气象站,第 i 个气象站 24 h 内观测降水量值为 R_i ,则待插值格点 (x, y) 处的降水量值 $R(x, y)$ 计算式为:

$$R(x, y) = \sum_{i=1}^n \lambda_i R_i \quad (3)$$

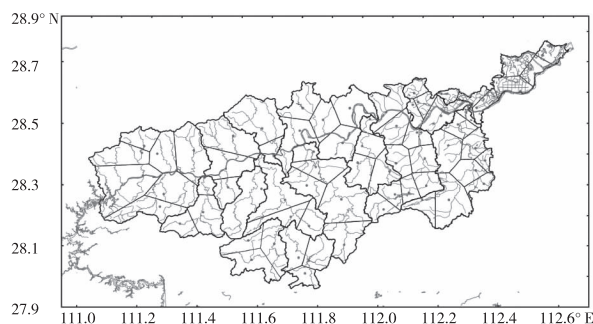


图2 资水流域柘桃区间中小河流子流域泰森多边形划分

Fig. 2 Tyson Polygon Division of small and medium river Sub-basins in Zhetao area of Zishui Basin

λ_i 为待定权重系数,由无偏约束条件确定。为了方便比较和计算,插值网格和国家气象信息中心多源融合格点降水时空产品的网格保持一致,横纵坐标方向经纬度间隔均为 0.05° ,由流域范围内的格点值求算术平均得到该流域面雨量。

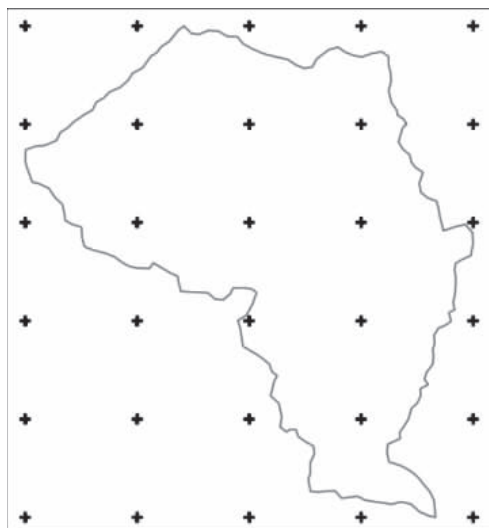


图3 空间插值格点示意图

Fig. 3 Schematic diagram of spatial interpolation grid

2.4 多源融合格点降水实况产品

虽然克里金插值法能一定程度反映降水量的空间分布情况,但并没有考虑实际天气系统演变、地形等因素的影响,因此其插值结果能否真实反应实际降水量的空间分布仍有待研究。随着卫星遥感技术的发展,基于卫星反演降水产品日益丰富,如 TRMM、GPM、CMORPH 等产品在河流流域面雨量计算中应用愈加广泛^[12,13]。近年来国家气象信息中心融合全国地面近 4 万个自动气象站逐小时降水量数据、雷达定量降水估计、卫星反演降水产品等,形成了投入日常业务使用的覆盖全国范围的 5

km × 5 km 格点降水实况产品,该产品每小时更新 1 次,时空分辨率高,但目前在中小河流域面雨量计算方面应用尚少。潘旸等^[14]比较了国家气象信息中心多源融合反演降水产品和卫星反演降水产品之间的误差,发现 5 km × 5 km 三源融合降水产品精度高于 CMORPH。为了进一步探讨该产品在中小河流域面雨量计算中的可用性,本文利用该产品计算了资水流域柘桃区间各子流域面雨量。

资水流域柘桃区间多源融合格点降水实况产品格点分布如图 4,经纬度间隔均为 0.05°。对某个子流域,该子流域范围内全部格点降水量的算术平均值即为该子流域面雨量值。为了方便,以下称该方法为格点实况法。

3 资水流域柘桃区间中小河流域面雨量计算结果比较

基于气象部门地面雨量站观测数据,以 2020 年 9 月资水流域柘桃区间降水过程为例,利用上述 4 种方法分别计算各子流域逐日面雨量,按子流域对计算结果进行比较分析。

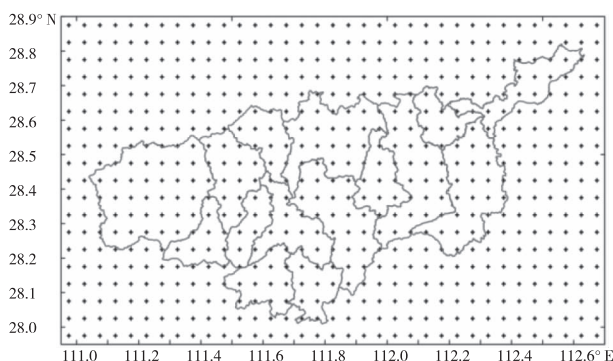


图 4 国家气象信息中心多源融合格点降水实况产品 5 km × 5 km 格点分布

Fig. 4 5 km × 5 km grid point of multi - source observed precipitation products developed by National Meteorological Information Center

3.1 各计算方法结果 Pearson 相关系数

为了分析各方法计算结果的相关性,以 2020 年 9 月的 13 次明显降水天气为例,分别计算各子流域 24 h 面雨量,将各日期(08—08 时)面雨量视为 1 个时间序列,分别计算各计算方法得到的时间序列之间的 Pearson 相关系数,各子流域相关系数如表 1 所示。

表 1 资水流域柘桃区间各中小河流域面雨量各计算方法相关系数
Tab. 1 Correlation coefficient of calculation methods for surface rainfall of various small and medium rivers in zhetao area of Zishui River Basin

子流域名称	多边形法—平均值法	多边形法—格点法	插值法—格点法
资水资阳区段	0.997	0.718	0.985
资水东坪—江南段	0.999	0.992	0.990
泝水乐安上游	0.996	0.940	0.962
泝水清塘上游	0.999	0.934	0.964
资水桃花江—志溪段	0.977	0.928	0.980
资水敷溪—沾溪段	0.999	0.997	0.991
桃花江	0.998	0.984	0.981
善 溪	0.990	0.937	0.988
志 溪	0.996	0.947	0.963
沾 溪	0.995	0.961	0.964
资水江南—羊角段	0.994	0.965	0.984
沂 溪	0.989	0.963	0.964
泝水下游	0.992	0.983	0.967
滔 溪	1	0.841	0.935
麻 溪	0.995	0.994	0.963

由表 1 可知,整体而言,多边形法和平均值法计算结果之间的相关系数最高,多边形法与格点法,插值法与格点实况法之间的相关系数相对较低,且部分子流域相关系数低于 0.9。这表明,对于大部分子流域,4 种面雨量计算方法的结果相关性较高,均能较好地反应不同强度降水及各子流域降水强度之间的差异,部分子流域受雨量站数据质量影

响,个别情况下多边形法、平均值法计算结果和插值法、格点法结果存在较大差别。

目前泰森多边形法、平均值法是实际工作中计算面雨量应用最广泛的方法,表 2 的结果表明采用国家气象信息中心开发的多源融合 5 km × 5 km 格点实况产品计算中小河流域面雨量是可取的,具有较高可信度,尤其是在地面观测网络稀疏或者观

测资料缺失的情况下,该方法更有优势。

3.2 各计算方法结果平均值比较

为了比较各子流域各计算方法结果之间的差异,分别比较各计算结果平均值,如图5所示(不同颜色代表不同计算方法)。由图5可知,多数情况下格点法计算结果偏小,平均值法计算结果偏大,插值法和泰森多边形法计算结果介于二者之间。这说明国家气象信息中心多源融合格点降水实况产品在中小河流流域面雨量计算上,与地面雨量站观测结果之间仍存在差异,这主要是由个别子流域雨量站少,或者雨量站数据失真造成的。实际业务中最常使用的平均值法由于没有考虑降水的空间分布差异,结果常常偏大,因此在具体情况下综合多种方法的结果比单独使用平均值法的结果更可靠。

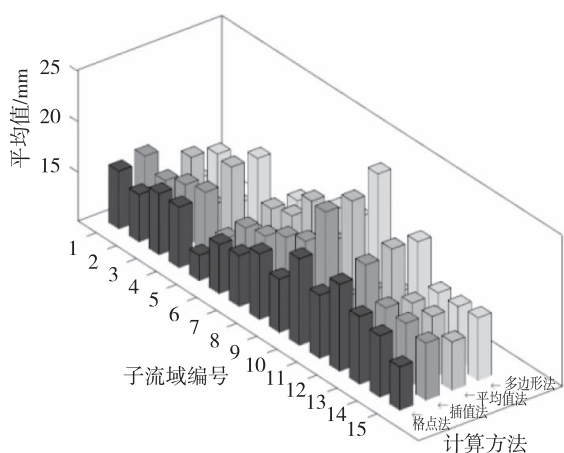


图5 2020年9月主要降水过程资水柘桃区间各中小河流域面雨量各计算方法平均值比较

Fig. 5 Comparison of the different calculation methods for the area rainfall during the main precipitation process in September 2020

3.3 各子流域计算结果标准差比较

为了比较各计算方法结果的离散程度,图6给出了各子流域中雨以上降水过程4种计算结果的标准差分布(不同颜色代表不同子流域)。

由图6可知,对于中雨以下强度降水(24 h 面雨量 10 mm 及以上),大部分子流域面雨量标准差较小。对于中雨(24 h 面雨量 10 mm 及以上)以上降水过程,大部分子流域标准差均较大。这主要是由于随着降水量级增加,而降水空间分布不均程度也随之增加,泰森多边形法、算术平均值法没有考虑降水空间分布差异,故与多源融合格点实况产品存在较大差异。对于暴雨(24 h 面雨量 50 mm 及以上)天气,地形是影响降水分布的重要因素,地形起

伏较大的流域,降水空间分布往往十分不均,标准差往往较大。另外地面雨量站分布不均也是导致各方法结果存在差异的因素,当地面雨量站分布稀疏时,算术平均值法、泰森多边形法不能真实反应降水的实际分布情况;当地面区域气象站分布密集时,4种方法均能较好体现降水的实际分布情况,故标准差也较小。

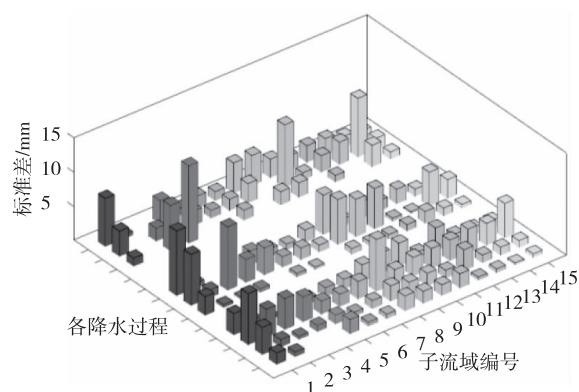


图6 2020年9月资水柘桃区间中雨以上过程各子流域面雨量各计算方法结果标准差比较

Fig. 6 Comparison of standard deviation of different calculation for the area rainfall in September 2020

在实际工作中,对于强降水天气,采用多种方法计算面雨量是十分必要的,尤其是地形地貌特征复杂的山区、地面雨量站稀疏的地区,利用国家气象信息中心多源融合格点实况产品比泰森多边形法、算术平均值法更有优势。值得指出的是,暴雨以上强降水天气,降水空间分布往往十分不均,多源融合格点实况产品对中小河流域强降水空间分布反演的可信度仍有待讨论,由于本文计算样本有限,对此没有讨论。这些问题将是值得继续研究的课题。

4 结论

(1)泰森多边形法、算术平均值法、克里金插值法、多源融合格点实况法的计算结果相关性显著,均能较好反应出不同强度降水过程及不同流域之间的差异。大多数情况下算术平均值法的结果偏大,多源融合格点实况法的结果偏小,插值法和泰森多边形法的结果介于二者之间。

(2)对于中雨以下降水,由于降水空间分布差异较小,4种方法的结果标准差也较小。对于中雨以上降水,当地面雨量站分布密集或降水空间分布相对均匀时,4种方法的标准差较小;当地面雨量站分布稀疏或降水空间分布不均时,4种方法的标准

差较大,此时采用多源融合格点实况法比算术平均值法、泰森多边形法更合理可靠。

(3)在地形地貌复杂多变的山区,暴雨以上强降水天气降水空间分布往往十分不均,多源融合格点实况产品对降水实际分布的反演可信度仍有待研究。实际计算中小河流域面雨量时,4 种方法各有优劣,对于不同的子流域、不同的天气过程,应当根据天气系统及降水空间分布综合分析,合理利用多种方法才能准确把握面雨量的大小和可能的误差。

参考文献

- [1] 唐杰,徐靖宇,刘红武. 湖南省中小河流域洪水预报模型的研究与应用[J]. 湖北农业科学, 2020, 59(15): 145-150.
- [2] 陈华,霍蓓,曾强,等. 雨量站网布设对水文模型不确定性影响的比较[J]. 水科学进展, 2019, 30(1): 34-44.
- [3] 成爱芳,苏谢卫,黄蓉,等. 渭河流域典型支流致洪临界面雨量确定——以千河流域为例[J]. 地球环境学报, 2019, 10(6): 601-609.
- [4] 吴秀兰,江远安,余行杰,等. 基于 FloodArea 的新疆依格孜牙河流域山洪灾害风险区划[J]. 干旱气象, 2019, 37(4): 663-669.
- [5] 方慈安,潘志祥,叶成志,等. 几种流域面雨量计算方法的比较[J]. 气象, 2003, 29(7): 23-26.
- [6] 王志,赵琳娜,张国平,等. 汶川地震灾区堰塞湖流域面雨量计算方法研究[J]. 气象, 2010, 36(6): 7-12.

- [7] 李武阶,王继竹,郭英莲,等. 金沙江中下游流域面雨量特征分析[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(6): 846-853.
- [8] 郭洁,宋雯雯,郑昊,等. 渡河流域面雨量时空分布特征及雨季转换指标[J]. 干旱气象, 2019, 7(3): 370-376.
- [9] 廖春花,刘红武,张永峰,等. 多种细网格模式对湖南水库流域面雨量的预报检验[J]. 气象科技, 2018, 46(4): 724-728.
- [10] 袁定波,艾萍,洪敏,等. 基于地理空间要素的雅砻江流域面雨量估算[J]. 水科学进展, 2018, 29(6): 779-787.
- [11] 姚熠,段莹,李光一,等. 卫星遥感资料在山区洪涝灾害监测及决策服务中的应用[J]. 中低纬山地气象, 2022, 46(2): 76-81.
- [12] 叶勤玉,张强,李小龙,等. 基于 GRACE 数据的长江流域地表水储量变化[J]. 中低纬山地气象, 2021, 44(6): 31-37.
- [13] 李栩婕,马中元,肖云,等. 袁河流域地面雨量与雷达回波强度对比分析[J]. 气象水文海洋仪器, 2021, 38(4): 41-43.
- [14] 王兆礼,钟睿达,赖成光,等. TRM 卫星降水反演数据在珠江流域的适用性研究——以东江河北江为例[J]. 水科学进展, 2017, 27(2): 174-182.
- [15] 潘昶,谷军霞,宇婧婧,等. 中国区域高分辨率多源降水观测产品的融合方法试验[J]. 气象学报, 2018, 76(5): 755-766.
- [16] 徐靖宇,周长青,陈静静,等. 基于网格降水产品的资水流域实况面雨量计算方法研究[J]. 地球科学前沿, 2019, 9(10): 921-927.
- [17] 徐海军,魏义长,许澍,等. 河南省内四大流域边界提取与水系分析[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(6): 125-132.
- [18] 江清霞. 基于 GIS 的沙澧河流域面雨量算法对比分析[J]. 气象与环境科学, 2014, 37(2): 94-99.

(上接第 68 页)

参考文献

- [1] 钟思玲,宋贞富,陈红艳,等. 蜂糖李品种特性及栽培技术要点[J]. 现代园艺, 2019(8): 11-12.
- [2] 王康. 镇宁六马镇蜂糖李基本性状及栽培技术研究[J]. 农家参谋, 2019(1): 70.
- [3] 韩威. 贵州蜂糖李栽培管理技术规程[J]. 现代园艺, 2000(15): 71-72.
- [4] 吴严胜. “蜂糖李”适应栽培区域探讨[J]. 农家科技, 2019(9): 76.
- [5] 姚源山,梁平,丁泳尹,等. 东坡农场引种蜂糖李花而不实的气候原因分析[J]. 贵州科学, 2022, 40(3): 5-8.
- [6] 代立芹,李春强,魏瑞江,等. 河北省冬小麦气候适宜度及其时空变化特征分析[J]. 中国农业气象, 2011, 32(3): 399-406.
- [7] 梁平,王洪斌,龙先菊,等. 黔东南州种植太子参的气候生态适宜性分区[J]. 中国农业气象, 2008, 29(3): 329-332.

- [8] 梁平,谷晓平,孟平红,等. 贵州芥蓝种植生产的气候适宜度研究[J]. 中国农学通报, 2018, 34(25): 100-114.
- [9] 段海来,千怀遂,李明霞. 中国亚热带地区柑桔的气候适宜性[J]. 应用生态学报, 2010, 21(8): 1915-1925.
- [10] 黄桔梅,谷晓平,于飞. 贵阳市主要蔬菜品种的气候适宜性区划[J]. 中国农业气象, 2011, 32(增刊1): 144-147.
- [11] 魏瑞江,李春强,姚树然. 农作物气候适宜度实时判定系统[J]. 气象科技, 2006, 34(2): 229-232.
- [12] 张静,冯金侠,卞新民. 作物生态适宜性变权评价方法[J]. 南京农业大学学报, 2006, 29(1): 13-17.
- [13] 赖纯佳,千怀遂,段海来,等. 淮河流域小麦—水稻种植制度的气候适宜性[J]. 中国农业科学, 2011, 44(14): 2868-2875.
- [14] 段莹,廖留峰,杨娟,等. 基于 GIS 的石漠化区域光伏项目建设适宜容量估算[J]. 中低纬山地气象, 2021, 45(6): 26-30.
- [15] 孙飞飞,顾欣. 黔东南相当暴雨日数与雨日数的气候变化[J]. 中低纬山地气象, 2018, 42(4): 60-64.