

太湖流域梅雨的划分及其典型年异常成因分析*

吴娟^{1**}, 梁萍², 林荷娟¹, 吴志勇³, 钱琦雯⁴

(1: 太湖流域管理局水文局(信息中心), 上海 200434)

(2: 上海市气候中心, 中国气象局上海市气候变化应对重点开放实验室, 上海 200030)

(3: 河海大学水文水资源学院, 南京 210098)

(4: 南京信息工程大学, 南京 210044)

摘要: 针对目前尚缺乏客观的流域梅雨划分指标的现状, 本文依据最新的梅雨监测国家标准与 NCEP/NCAR 再分析资料, 利用 1986—2016 年太湖流域水文年鉴逐日雨量整编资料, 重新划分了太湖流域入/出梅日期, 计算了梅雨特征量, 构建了梅雨洪水指数 (*RFI*), 并对梅雨期超设计、超警戒洪水年的环流异常成因进行分析。研究表明: (1) 新标准下太湖流域多年平均在 6 月 17 日入梅, 7 月 11 日出梅, 梅雨期长度 24 d, 梅雨量 266.8 mm; 与历史序列相比, 新标准确定的梅雨量一致率较高, 其次是入梅时间和出梅时间。(2) 雨日数和副高脊线北跳时间是影响入/出梅确定的两个重要因素, 新标准将 1992、2013 年定为空梅, 1986、1987、1989、1996、2005 年历史入/出梅日期向后调整, 1988、2007 年出梅日期向前调整, 更为合理地反映了梅雨的高温高湿气候特征, 客观性较强。(3) 梅雨量越大, 雨强越大, 太湖水位越高, 流域越易涝; 以梅雨洪水指数作为参考因子, 考虑到影响太湖洪水形成的两个关键因子(梅雨期起涨水位、最大 7 d 降水量占梅雨量的比例), 对入梅起涨水位异常偏高、因集中强降雨引起太湖洪水的指示意义较强。(4) 高低纬环流配置关系密切, 来自西太平洋经南海的偏南气流、印度洋经孟加拉湾的西南暖湿气流汇合后与来自北方的冷空气在太湖流域交汇, 太湖流域垂直上升运动异常强烈, 触发降雨层结不稳定能量释放, 导致暴雨持续形成洪水。

关键词: 太湖流域; 梅雨监测指标; 降雨强度; 梅雨洪水指数

Meiyu determination and causes of typical abnormal Meiyu years in Taihu Basin*

Wu Juan^{1**}, Liang Ping², Lin Hejuan¹, Wu Zhiyong³ & Qian Qiwen⁴

(1: Bureau of Hydrology Information Center of Taihu Basin Authority, Shanghai 200434, P.R. China)

(2: Shanghai Climate Center, Key Laboratory of Cities' Mitigation and Adaptation to Climate Change in Shanghai, CMA, Shanghai 200030, P.R. China)

(3: College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, P.R. China)

(4: Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, P.R. China)

Abstract: In order to tackle lacking objective standard problems of Meiyu determination, the Meiyu onset date, ending date, length and rainfall were calculated, based on the latest national standard of Meiyu monitoring indices, NCEP/NCAR reanalysis data, and daily precipitation data from 1986 to 2016. The rainfall-flood index (*RFI*) was constructed, while the circulation characteristics and causes were analyzed for the designed and alarm flood years. (1) According to the new standard, the multi-year average Meiyu onset date was on June 17th, and the ending date was on July 11st. The multi-year average Meiyu length was 24 days, and the rainfall was 266.8 mm. The results demonstrated that the Meiyu rainfall under the new standard has good relationships with the historical record, which was followed by Meiyu onset date, length and ending date. (2) Both the Meiyu onset and ending date were affected by rain days and the western Pacific subtropical high ridge jumping time. Based on the latest national standard, the Meiyu did not occur in 1992 and 2013, the Meiyu onset and ending dates in 1986, 1987, 1989, 1996, 2005 were suggested to put off,

* 2020-03-18 收稿; 2020-05-12 收修改稿。

国家重点研发计划项目(2018YFC0407900, 2017YFC1502301)和国家自然科学基金项目(41790471, 41775047)联合资助。

** 通信作者; E-mail: wujuan3412@163.com.

while the ending dates in 1988 and 2007 were suggested to put forward. The high temperature and humidity characteristics of Meiyu for the new standard was more obvious and reasonable. (3) The more intensity index was, the more easily designed and alarm flood occurred. After considering two reference factors: extremely high starting water stage before Meiyu season, as well as proportion between maximum 7 d accumulated precipitation and Meiyu rainfall, the *RFI* had important indicative significance for flood in Taihu Basin. (4) The warm moisture transport from the west Pacific via South China Sea, and the warm moisture transport from Indian Ocean via the Bay of Bengal, interact with cold air from the north in Taihu Basin. Vertical movement was strong over Taihu Basin. The instability energy releasing was triggered, resulting in continuous rainstorm and flood.

Keywords: Taihu Basin; Meiyu monitoring indices; rainfall intensity; rainstorm-flood index

梅雨通常是指每年初夏 6、7 月份在中国长江中下游流域、日本中南部、韩国南部等地出现的连阴雨现象^[1]。梅雨是一个区域气候学概念,区域内不同省(市)的梅雨起始日期可能不一致,但区域入梅日期应为该区域内集中降雨的开始和大气环流转变的时间^[2]。各省(市)在制定本地区入/出梅标准时,有的以降雨实况为标准,有的以大气环流特征为标准,有的同时考虑降雨和大气环流的变化^[3],当符合了各自制定的标准,相应地区就入/出梅了。然而,即使采用同一类标准,区域内各省(市)所处的地理位置不同、梅雨监测的具体指标不同,导致了计算的入/出梅日期差异较大、可比性较差,对梅雨预测产生了一定影响。为解决这些问题,《梅雨监测指标》(GB/T 33671-2017)(以下简称“国标”)于 2017 年 12 月正式实施^[4]。国标将梅雨监测区域分为江南区、长江中下游区和江淮区,通过制定雨日雨期、西太平洋副热带高压(以下简称“副高”)脊线位置、日平均气温等标准,综合反映梅雨期降雨过程多、雨强大、高湿闷热的气候特征^[5]。

从气候分区来看,太湖流域属于长江中下游区,总面积为 37097.8 km²,行政区划分属江苏、浙江、上海、安徽三省一市,其中江苏省 19310.7 km²、浙江省 12386.1 km²、上海市 5176.0 km²、安徽省 225.0 km²。梅雨是太湖流域汛期重要的降水来源,正常梅雨量可占汛期降水量的 30%~40% 成,梅雨是太湖流域洪涝灾害的主要降雨类型^[6],3 次流域性大洪水(1991、1999、2016 年)均由异常偏多的梅雨造成,导致太湖水位长时间超警戒甚至超设计^[7]。长期以来,由于缺少针对太湖流域的入/出梅标准,太湖流域的历史入/出梅日期主要根据江苏、浙江、上海入/出梅日期综合而定,通常以第一个省(市)当年宣布的入梅日定为流域入梅日,以最后一个省(市)当年宣布的出梅日定为流域出梅日。然而,流域各省(市)宣布入/出梅日期大多是根据预报综合分析而定,由于存在预报误差,加上没有考虑地域差异,导致太湖流域部分历史入/出梅日期与实际差异很大,个别年份甚至出现入梅当日流域无雨或持续高温干旱仍不出梅的不合理现象,严重影响了梅雨期水文分析评价工作。

为了进一步做好梅雨期水文预测预报工作,在建立适用于太湖流域相对统一的入/出梅标准的基础上,准确预测水情变化趋势,对太湖流域防汛调度、水资源调度具有十分重要的指导意义,对深入研究梅雨期气象水文变化规律、水利工程精细调度与科学决策具有重大的应用价值。本研究重新划分了国标实施前(1986-2016 年)的太湖流域入/出梅日期(以下简称“新标准”),并与历史梅雨特征量(以下简称“历史”)比较,进一步分析导致梅雨期超设计、超警戒洪水的环流异常成因,以期为太湖流域水文分析评价提供标准参考,为气象水文预测预报、水旱灾害防御提供技术支撑。

1 数据来源与研究方法

1.1 测站选择

本研究采用资料连续、分布均匀、稳定监测的 81 个水文测站(包括雨量站、水位站、潮位站、闸坝站)的年鉴雨量整编资料计算太湖流域日平均降水量。太湖流域日平均降水量由 7 个水利分区(湖西区、武澄锡虞区、阳澄淀泖区、太湖区、浙西区、杭嘉湖区、浦东浦西区)通过面积权重法计算所得。各水利分区日平均降水量分别由分区代表站通过算术平均法计算所得,其中:湖西区 17 站、武澄锡虞区 10 站、阳澄淀泖区 11 站、太湖区 8 站、浙西区 15 站、杭嘉湖区 11 站、浦东浦西区 9 站,具体站点见图 1。大气环流资料为美国国家环境预报中心和国家大气研究中心(NCEP/NCAR)逐日再分析资料集中的各层位势高度场、水平风场和水汽场,资料水平分辨率为 2.5°×2.5°^[8-9]。Mann-Kendall 趋势检验法是提取序列变化趋势最为有效的工具,被广泛应用于气候参数和水文序列变化趋势的分析中,计算原理见参考文献[10];周期分析采用小波分析法,见参考

文献[11].

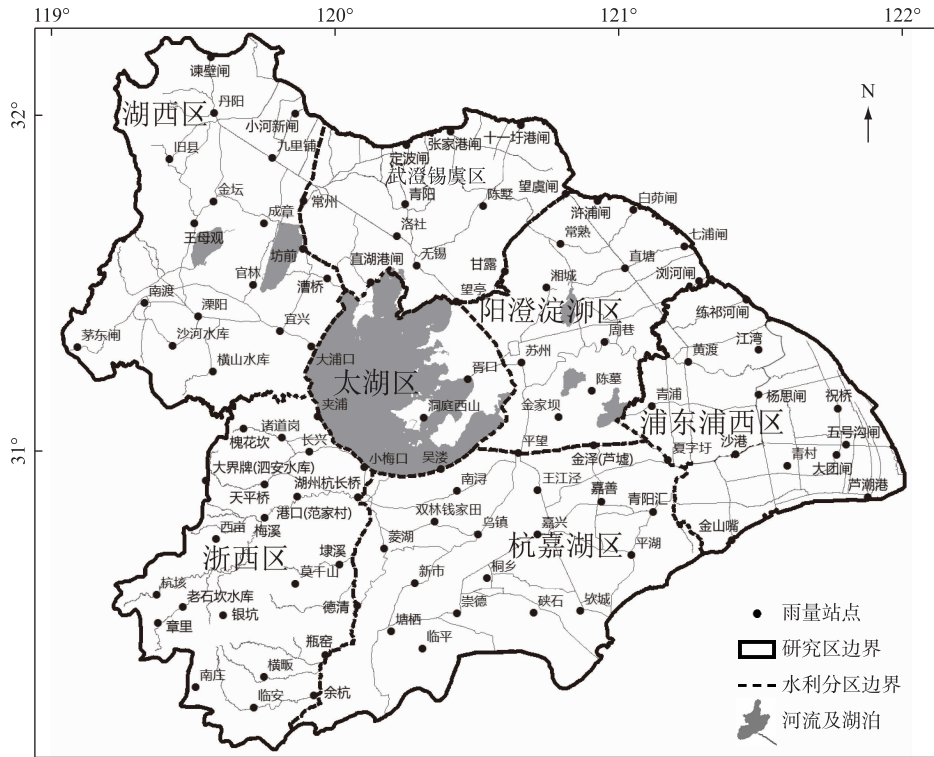


图1 太湖流域梅雨监测站点位置

Fig.1 Spatial distribution of the Meiyu monitoring stations in Taihu Basin

1.2 梅雨划分标准

国标确定区域入/出梅日期、雨期主要是以区域内各监测站的降水条件、副高脊线、日平均温度等为辅助条件^[12]. 针对太湖流域的梅雨确定, 本文在国标统一指标的基础上, 采用适用于流域的日降水量阈值确定雨日, 并增加梅雨平均雨强指标以适应流域洪水预报分析的实际需要. 具体如下:

1) 雨日: 定义太湖流域出现小到中雨及以上降水过程、流域日平均降水量 ≥ 2.0 mm、1/3 以上监测站出现 ≥ 0.1 mm 的降水为 1 个雨日.

2) 雨期: 从第 1 个雨日算起, 往后 1~10 个雨日占相应时段总日数的比例 $\geq 50\%$, 则第 1 个雨日为入梅日期, 7 月 20 日之后不再有新的雨期开端日. 从雨期的最后 1 个雨日算起, 往前 2 日、3 日、……、10 日的雨日数占相应时段内总日数的比例 $\geq 50\%$, 则最后 1 个雨日为雨期结束日; 当雨期进入 8 月后, 以第 1 个非雨日的前 1 天为雨期结束日, 最后 1 个雨期结束日的次日为出梅日. 雨期要求任何连续 10 d 的雨日比例 $\geq 40\%$ 、雨日数 ≥ 6 d 且梅雨连续 5 d 及以上的非雨日等条件.

3) 辅助条件: 梅雨最早开始于 5 月下旬, 日平均气温 $\geq 22^\circ\text{C}$. 梅雨期内副高第 1 次北跳, 脊线 5 d 滑动位置位于 $19^\circ\text{N} \sim 26^\circ\text{N}$. 当副高脊线 5 d 滑动位置有 1 候超过 28°N 且没有继续出现雨日, 而是高温干热天气, 则梅雨期结束.

4) 空梅和二度梅: 6~7 月之间无法确定有效梅雨期定义为空梅. 进入梅雨期之后, 在第 1 个雨期结束后又出现持续性降水, 且副高脊线 5 d 滑动位置位于 $19^\circ\text{N} \sim 26^\circ\text{N}$, 则进入第 2 个雨期, 定义为二度梅.

1.3 梅雨洪水指数

太湖是太湖流域防洪和水资源管理的调蓄中心, 太湖水位是流域防汛抗旱调度的依据^[13]. 当太湖洪峰水位超过设计水位 4.66 m (镇江吴淞高程, 下同), 定义为超设计洪水; 当太湖洪峰水位超过警戒水位

3.80 m,但不超过设计水位 4.66 m 的洪水,定义为超警戒洪水. 梅雨期发生超设计或超警戒洪水,对太湖流域防汛形势影响很大^[14]. 梅雨期持续较强降水通常导致太湖水位呈稳定上升趋势,最高水位一般发生在梅雨期末. 根据历年梅雨期防汛经验,梅雨期起涨水位、梅雨量、雨强均对太湖最高水位影响很大. 其中,最大 7 d 降水量占梅雨量的比例、梅雨期平均雨强是形成洪水的指标,可分为两种机制:一是最大 7 d 降水量占梅雨量比例较低,但梅雨期长度偏长,导致太湖水位缓慢抬升形成洪水,如 1991、1996 年;二是最大 7 d 降水量占梅雨量的比例很高(即梅雨期降水时间分布高度集中),配合较大的平均雨强,导致太湖水位快速抬升形成洪水,如 1995、2011 年. 因此,采用梅雨期起涨水位、梅雨量、梅雨期平均雨强、最大 7 d 降水量占梅雨量比例构建梅雨洪水指数,如下:

$$RFI = \frac{Z_0}{\bar{Z}_0} + \frac{P}{\bar{P}} + \frac{L}{\bar{L}} + \frac{I}{\bar{I}} + \frac{R}{\bar{R}} - 5 \quad (1)$$

式中,RFI 为梅雨洪水指数, Z_0 、 P 、 L 、 I 、 R 分别为起涨水位、梅雨量、梅雨期长度、梅雨期雨强、最大 7 d 降水量占梅雨量比例. \bar{Z}_0 、 \bar{P} 、 \bar{L} 、 \bar{I} 、 \bar{R} 分别为多年平均起涨水位、梅雨量、梅雨期长度、梅雨期雨强、最大 7 d 降水量占梅雨量比例. 根据《太湖洪水与水量调度方案》确定的防洪控制水位(3.10、3.50 m)、调水限制水位(3.00、3.30 m)、警戒水位(3.80 m),以及《太湖超标准洪水应急处理预案》确定的超标准洪水调度水位(4.65、4.80 m)之间的差值综合制定 RFI 阈值. $RFI \leq -0.70$,表示太湖最高水位可能偏低,甚至可能低于调水限制线(3.30 m); $-0.70 < RFI \leq 0$,表示最高水位较适宜,低于调水限制线,超过警戒水位的可能性不大; $0 < RFI \leq 1.0$,表示最高水位可能会超过警戒水位,但不会超过设计水位; $RFI > 1.0$,表示最高水位可能超过设计水位.

2 梅雨特征分析

2.1 新标准下的梅雨气候特征

根据新标准确定的 1986—2016 年梅雨特征值序列(附表 1),给出梅雨气候特征值,如表 1 所示. 新标准下多年平均入梅日期为 6 月 17 日,出梅日期为 7 月 11 日,梅雨期长度 24 d,梅雨量为 266.8 mm. 入梅异常偏早年份为 1991 年,异常偏晚为 2005 年,与陈丽娟等^[15]的研究基本一致;出梅异常偏早为 1988 年,出梅异常偏晚为 2009 年,与罗小杰^[16]、梁萍等^[17]的研究基本一致. 1991 年梅雨期最长,达到 46 d. 1999 年太湖流域梅雨量最大,为 679.1 mm. 2000 年梅雨期平均雨强(梅雨量除以梅雨期长度)最小,为 5.5 mm/d. 梅雨期二度梅有 3 个年份,分别为 1991、1999、2009 年;空梅有 2 个年份,分别为 1992、2013 年,与项瑛等的研究一致^[18].

表 1 新标准下梅雨特征量的气候特征

Tab.1 Climate features of characteristic variables for Meiyu under new standard

	入梅日期	出梅日期	梅雨期长度/ d	梅雨量/ mm	梅雨期平均雨强/ (mm/d)
气候平均	6 月 17 日	7 月 11 日	24	266.8	11.6
极小值 (年份)	最早 5 月 19 日 (1991)	最早 6 月 23 日 (1988)	10 (2001)	77.1 (2000)	5.5 (2000)
极大值 (年份)	最晚 7 月 5 日 (2005)	最晚 8 月 3 日 (2009)	46 (1991)	679.1 (1999)	20.7 (2001)

新标准下梅雨特征量之间的相关关系见表 2. 入梅日期与出梅日期的相关系数为 0.30,未通过 0.01 的显著性检验,说明太湖流域出梅是否提前或推迟,与入梅偏早或偏晚并没有显著对应关系. 入梅日期与梅雨期长度、梅雨量之间的相关系数分别为-0.48、-0.54,均通过了 0.01 的显著性水平检验,说明入梅早的年份,梅雨期易偏长、梅雨量易偏多. 出梅日期与梅雨期长度、梅雨量之间的相关系数分别为 0.66、0.47,均通过了 0.01 的显著性水平检验,说明出梅早的年份,梅雨期易偏短、梅雨量易偏少. 梅雨量与梅雨期长度、平均雨强的相关系数分别为 0.82、0.55,均通过了 0.01 的显著性水平检验,说明梅雨量越大,梅雨期越长、雨强越大.

表 2 新标准下梅雨特征量的相关关系
Tab.2 Relationships between characteristic variables for Meiyu under new standard

	入梅日期	出梅日期	梅雨期长度	梅雨量
出梅日期	0.30			
梅雨期长度	-0.48 *	0.66 *		
梅雨量	-0.54 *	0.47 *	0.82 *	
梅雨期平均雨强	-0.22	-0.09	0.03	0.55 *

* 表示在显著性水平 $\alpha = 0.01$ 下趋势性显著,下同.

2.2 与历史梅雨的对比

图 2 为太湖流域逐年梅雨统计量(入梅日期、出梅日期、梅雨期长度、梅雨量)历史与新标准对比. 总体上,新标准划分的梅雨量与历史序列相关性很好,相关系数达到 0.90,其次是入梅日期(0.64)、梅雨期长度(0.62),出梅日期相关性较差,相关系数为 0.46. 具体而言,新标准平均入梅日期为 6 月 17 日,较历史偏晚 4 d,新标准与历史入梅异常年的一致率(与各自的气候态相比,同时为负距平或同时为正距平的年数占总年数的比例,下同)为 79.3%;选取入梅较早(晚)的 10 个年份进行比较,新标准确定的入梅较早(晚)的年份与历史确定的入梅较早(晚)年份的相同比例为 7/10(5/10). 新标准出梅日期为 7 月 11 日,较历史偏晚 3 d,异常年一致率为 79.3%;选取出梅较早(晚)的 10 个年份进行比较,新标准确定的出梅较早(晚)的年份与历史确定的出梅较早(晚)年份的相同比例为 7/10(5/10). 新标准梅雨期长度为 24 d,较历史偏少 1 d,异常年一致率为 71.0%,选取梅雨期偏短(长)的 10 个年份进行比较,新标准确定的梅雨期偏短(长)的年份与历史梅雨期偏短(长)年份的相同比例为 6/10(5/10). 新标准梅雨量为 266.8 mm,较历史偏多 19.2 mm,异常年一致率为 83.9%,选取梅雨量偏少(多)的 10 个年份进行比较,新标准确定的梅雨量偏少(多)的年份与历史梅雨量偏少(多)年份的相同比例为 6/10(8/10). 由此可见,新标准确定的梅雨统计量与历史序列相比,梅雨量一致率较高,其次是入梅时间、出梅时间;从一致率分布来看,入梅偏早、出梅偏早、梅雨偏多年份一致率较高.

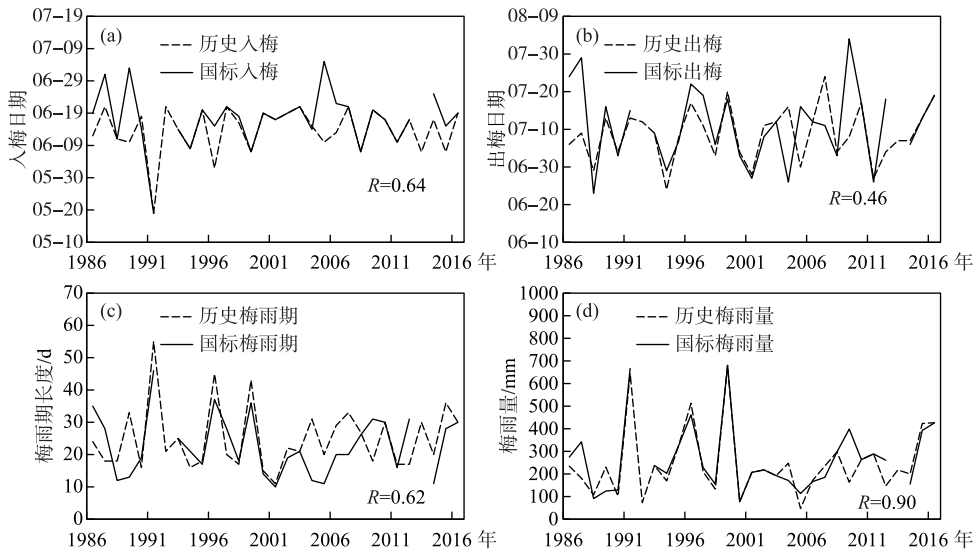


图 2 新标准与历史入梅日期(a)、出梅日期(b)、梅雨期长度(c)和梅雨量(d)的对比

Fig.2 Meiyu onset data(a), ending date(b), length(c) and rainfall(d) comparison between the new standard and historical data

进一步对比图 2 发现,2000 年以后,新标准计算的出梅日期、梅雨期长度、梅雨量与历史差异较大;与历史入梅日期相比,新标准有 10 个年份偏晚 2~25 d;与历史出梅日期相比,新标准有 11 个年份较历史偏晚

2~26 d、12 个年份较历史偏早 1~20 d. 由于 1986、1987、1988、1989、1992、1996、2005、2007、2013 年差异明显(表 3),对这些年进行具体分析. 新标准下流域历史入梅日期偏早与副高脊线位置、雨带不稳定有关,导致部分时段未达到 1/3 以上监测站出现 ≥ 0.1 mm 的降水要求,或者不满足“没有连续 5 d 及以上的非雨日”的要求. 以 2013 年为例,历史梅雨期为 6 月 7 日—7 月 7 日,从降水条件来看,6 月 8—22 日、6 月 28 日—7 月 4 日,流域每天降雨量均不足 2.0 mm,未达到 1/3 以上监测站出现 ≥ 0.1 mm 的降水要求,6 月 23—27 日共计 5 d 有明显降雨,未达到“雨日数 ≥ 6 d”的要求,导致无法确定有效雨期,按新标准计算应为空梅. 历史出梅日期偏早可能与流域各省市出梅标准未能考虑到流域总体降水仍满足雨期要求有关. 以 1986 年为例,历史梅雨期为 6 月 12 日—7 月 6 日,而流域 7 月 7—23 日持续出现强降水,仍然满足雨期要求.

总体而言,雨日数和副高脊线北跳时间是影响入/出梅确定的两个重要因素. 由于初夏流域降水强度较弱,未达到雨日数的标准,新标准将 2013 年定为空梅,1987、1989 和 2005 年历史入梅日期向后调整更加合理. 另外,梅雨期作为副高北跳伴随的副热带季风降水阶段,是大气环流突变的重要表现形式. 因此,流域梅雨和副高北跳密切相关,1992 年由于副高北跳偏晚,造成空梅;而 1986、1996 年,新标准下入梅日期发生在副高脊线北跳到 19°N 之后,更为合理. 此外,1988、2007 年未达到雨日数的标准,新标准将历史出梅日期向前调整更加合理. 由此可见,新标准确定区域入/出梅日期、雨期的主要依据是区域降雨条件,客观性较强,有利于太湖流域入/出梅日期的标准化、规范化. 这与梅雨期作为流域安全度汛关键时段联系更加紧密,可为气象水文预测预报、水利工程精细调度与科学决策提供更好的技术支撑.

对新标准下 1986—2016 年梅雨特征量变化规律和成因机制进行分析,对 1986—2016 年入梅日期、出梅日期、梅雨期长度、梅雨量进行 Mann-Kendall 趋势检验,出梅日期、梅雨期长度无明显变化趋势,入梅日期呈偏晚趋势,梅雨量呈上升趋势,但未通过 0.1 水平上的显著性检验. 对梅雨特征量进行小波分析,入梅日期呈现 3~4 a、7~8 a 准周期振荡,出梅日期呈现 3~4 a、10 a 准周期振荡. 太湖流域梅雨期长度、梅雨量年际变化显著,1980s 后期,梅雨期长度及梅雨量异常位相正负相间,以准 2 a 周期振荡为主. 此后的梅雨呈现准 7~8 a 振荡,1990s 中后期,梅雨量明显偏多、梅雨期偏长;2000—2007 年,梅雨期偏短、梅雨量偏少、梅雨强度偏弱;而从 2008 年开始,梅雨期长度、梅雨量呈现增加的趋势. 上述太湖流域梅雨的准 2 a 和准 7~8 a 周期振荡与长江梅雨变化基本一致^[5]. 与 1986—1999 年梅雨特征量相比,新标准计算的 2000—2016 年太湖流域入梅日期偏晚 3 d、出梅偏早 2 d、梅雨期偏少 5 d、梅雨量偏少 63.2 mm. 太湖流域年代际变化可能与气候变暖背景下梅雨的“非典型性”变化有关^[19-20]. 2000 年以来,北太平洋海温年代际振荡(PDO)处于负位相,且拉尼娜事件频繁发生,热带西太平洋海温增高,利于副高偏强、偏西、偏北,导致水汽输送通道偏西、偏北,从而不利于太湖流域降水偏多^[21].

3 梅雨洪水典型年异常成因分析

1986—2016 年,梅雨期发生超设计洪水共有 3 个年份,分别为 1991、1999、2016 年,梅雨期较常年明显偏长,幅度为 10~22 d,梅雨量偏多 59.6%~154.5%. 发生超警戒洪水共有 6 个年份,其中:1987、1996、2008、2015 年梅雨期较常年偏长 2~13 d,梅雨量偏多 11.6%~73.1%;1995、2011 年梅雨期分别偏短 7、6 d,但梅雨量分别偏多 22.8%、8.3%. 梅雨期太湖最高水位与梅雨量和梅雨期平均雨强的相关性均很好,相关系数分别为 0.91 和 0.81,说明太湖高水位与梅雨量偏多、强度偏强密切相关(图 3).

分别构建 2 个指数(梅雨量、梅雨期长度)、3 个指数(梅雨量、梅雨期长度、梅雨期平均雨强)、4 个指数(梅雨量、梅雨期长度、梅雨期平均雨强、起涨水位)与实际超警戒幅度的关系,相关系数分别为 0.85、0.88、0.90(图 4a~c);在 4 个指数的基础上,梅雨洪水指数 *RFI* 增加了最大 7 d 降水量占梅雨量比例指数,与太湖水位超警戒幅度的相关性更高,相关系数为 0.93(图 4d). 文中定义的 *RFI* 指标包含了梅雨特征量和起涨水位等,是气象与水文因子的综合指标,为气象与水文学科的交叉融合提供了实例. 该指标与《太湖洪水与水量调度方案》《太湖超标准洪水应急处理预案》特征水位相匹配,可为流域防洪提供有力支撑. 同时,对指标中不同因子的分析,也为不同梅雨特征量对太湖水位超警戒幅度的贡献率分析提供了基础. 经对比,*RFI* 对 1995、2011 年集中强降水引起的超警戒洪水,2016 年因入梅起涨水位异常偏高引起超设计洪水均未发生误判,指示效果优于其他洪水指数,有一定的应用价值.

表 3 太湖流域入/出梅日期差异明显年份对比
Tab.3 Differences comparison of Meiyu onset, ending date between the new standard and historical data

年份	历史		新标准		差异原因	入梅	出梅
	入梅日期	出梅日期	入梅日期	出梅日期			
1986	6-12	7-6	6-19	7-24	副高脊线第 1 次北跳到 20°N 时间为 34 候 ^[22] , 6 月 19 日满足雨期开始日的要求.	入梅	出梅
1987	6-21	7-9	7-1	7-29	副高脊线到 20°N 以北时间为 36 候 ^[23] , 6 月 24-30 日连续 7 d, 流域每天降水量均不足 0.5 mm, 不满足“没有连续 5 d 及以上的非雨日”的要求.	入梅	出梅
1988	6-11	6-29	6-11	6-23	—	—	出梅
1989	6-10	7-13	7-3	7-16	6 月 18-25 日连续 8 d, 流域每天降水量均不足 0.3 mm, 不满足“没有连续 5 d 及以上的非雨日”的要求.	入梅	出梅
1992	6-21	7-12	—	—	6-7 月之间, 副高北跳异常晚, 雨日数不满足标准, 无法有效确定梅雨期, 为空梅.	入梅	出梅
1996	6-2	7-17	6-15	7-22	副高脊线到 20°N 以北时间为 32 候, 6 月 15 日满足雨期开始日的要求.	入梅	出梅
2005	6-10	6-30	7-5	7-16	6 月 11-25 日、6 月 30 日-7 月 4 日每天降水量均不足 1.9 mm, 不满足“没有连续 5 d 及以上的非雨日”的要求.	入梅	出梅
2007	6-21	7-24	6-21	7-11	—	—	出梅
2013	6-7	7-7	—	—	6-7 月之间, 雨日数不满足标准, 无法有效确定梅雨期, 为空梅.	入梅	出梅

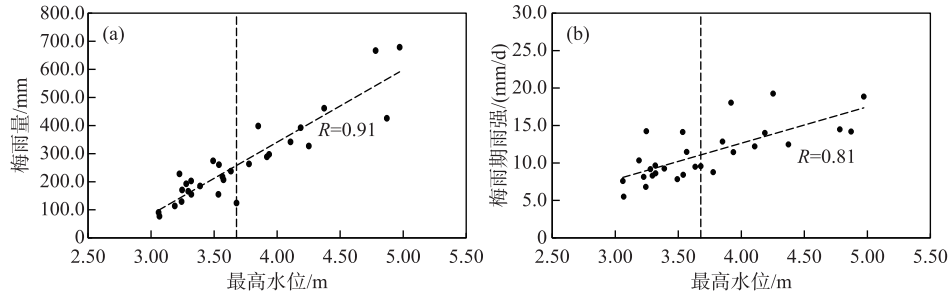


图3 太湖最高水位与梅雨量(a)、梅雨期平均雨强(b)以及超警幅度的相关性
(竖线表示太湖警戒水位 3.80 m)

Fig.3 Relationships between the highest water stage of Lake Taihu and Meiuyu rainfall (a) and average rainfall intensity (b)

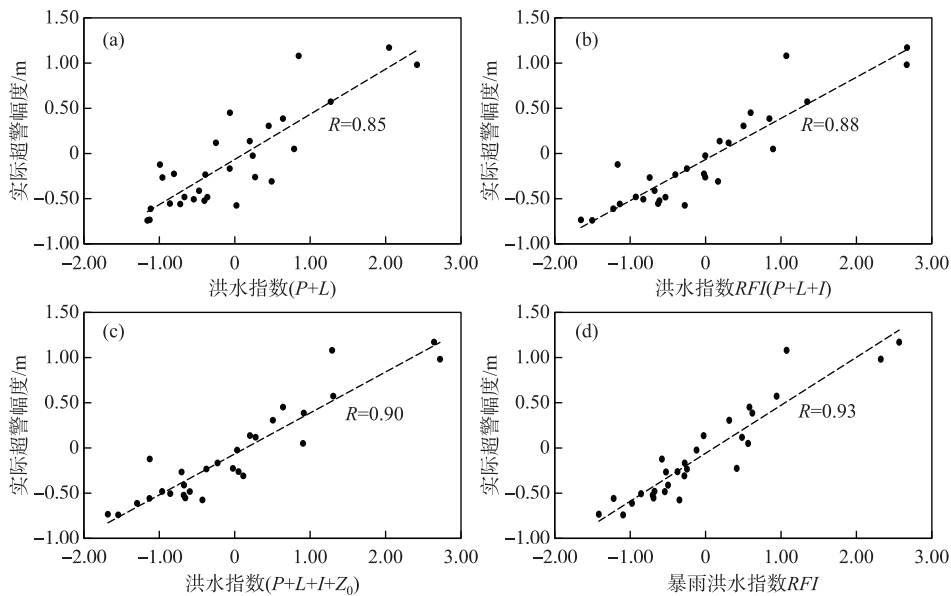


图4 梅雨特征量组合因子与太湖实际超警幅度的相关性

Fig.4 Relationships between characteristic variables for Meiuyu and exceeding value of the alarm water stage of Lake Taihu

对1986—2016年梅雨强度指数 M 、梅雨洪水指数 RFI 进行Mann-Kendall趋势检验,均呈上升趋势,但未通过0.1水平上的显著性检验。从年际变化来看, M 、 RFI 与梅雨量变化基本一致。与 M 相比, RFI 还考虑到影响太湖洪水形成的两个关键因子(梅雨期起涨水位、最大7d降水量占梅雨量的比例),对流域防洪更具指示意义,可为太湖流域防洪减灾提供更有力的支撑。例如,1995、2011年等因集中强降雨和太湖水位快速抬升引起超警戒洪水,2016年因入梅起涨水位异常偏高、强降雨发生时段集中引起超设计洪水, RFI 的指示意义较 M 更强。以 RFI 作为参考因子判断太湖洪水的可能性有一定的指示意义。当 $RFI>0$ 时,发生超警戒洪水的概率较大,概率为90%,其中:当 $RFI>1$ 时,发生超设计洪水,概率达到100%。1999年 RFI 最大,为2.57(表4)。

梅雨期降水是不同纬度、高低空天气系统有利配置的结果。在有利的水汽条件下,气流辐合与暴雨落区有直接联系^[24]。影响太湖流域梅雨的主要天气系统主要有:副热带高压、阻塞高压、低涡切变线以及与

高空环流相对应的地面准静止锋^[25]. 本研究选取高度场、风场与水汽场等大气变量,分析超设计、超警戒洪水典型年大气环流形势异常成因. 为进一步理解造成太湖洪峰的典型梅雨年的环流背景,对上述9个洪水年环流形势进行合成分析. 500 hPa 高度合成场(图 5a)在贝加尔湖以东、鄂霍次克海以西为阻塞高压,高压脊较深厚,有利于北方冷空气频繁南侵到太湖流域,5840 gpm 等值线控制长江中下游较大的区域,太湖流域处于 5840 gpm 等值线西北边缘. 来自西太平洋经南海的偏南气流、印度洋经孟加拉湾的西南暖湿气流汇合后(图 5b),与北方弱冷空气相结合,从副高西北侧进入太湖流域,为降水提供了有利条件(图 5c). 从 500 hPa 垂直速度合成场(图 5d)可见,太湖流域位于垂直上升运动大值区,进一步计算发现垂直上升运动较常年同期偏强 70%左右,垂直速度大值区与副高西北侧暖湿气流风速正距平区基本吻合.

表 4 超设计、超警戒洪水年太湖最高水位与梅雨洪水指数(RFI)的对比

Tab.4 Comparison of the highest water stage of Lake Taihu and rainfall-flood index (RFI) for the designed and alarm flood years

年份	实况最高水位/m	梅雨强度指数 M	暴雨洪水指数 RFI
1987	4.11	0.5	0.31
1991	4.78	2.57	2.32
1995	4.25	0.3	0.58
1996	4.37	1.33	0.94
1999	4.97	2.39	2.57
2008	3.94	0.21	0.03
2011	3.92	0.06	0.48
2015	4.19	0.77	0.62
2016	4.88	0.99	1.07

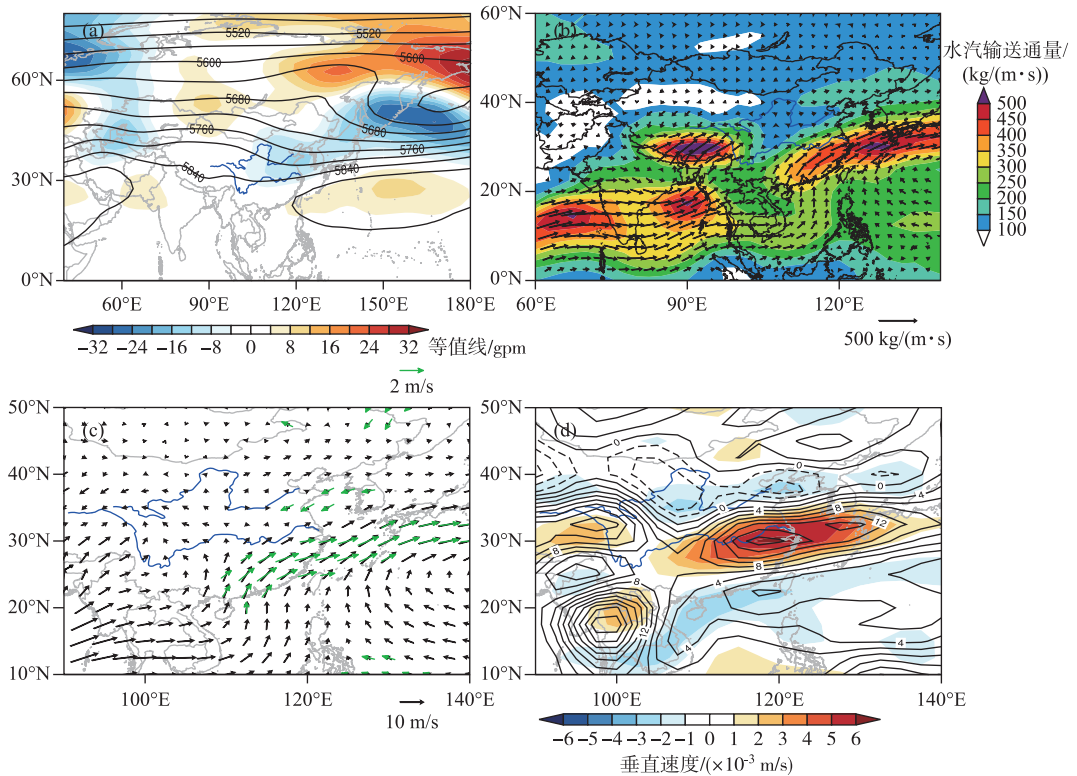


图 5 梅雨洪水典型年 500 hPa 位势高度合成场及距平场(阴影)(a);对流层整层(300~1000 hPa)水汽输送通量合成场(b);850 hPa 风场合成场及距平场(绿色箭头表示风速正距平大于 1 m/s)(c);500 hPa 垂直速度合成场及距平场(阴影)(d)

Fig.5 Composite of 500 hPa geopotential height and its anomalies (shading) (a), integrated moisture transport fluxes (b), 850 hPa wind field and anomalies (green wind barb stands for positive anomaly more than 1 m/s) (c), 500 hPa vertical velocity and its anomalies (shading) (d)

4 结论

依据《梅雨监测指标》国家标准,采用 1986—2016 年降水量等资料,重新划分了太湖流域的历年入/出梅日期、梅雨量,构建了梅雨洪水指数 *RFI*,并分析了导致梅雨期超设计、超警戒洪水的异常环流成因,结论如下:

1) 新标准下多年平均入梅日期为 6 月 17 日,出梅日期为 7 月 11 日,梅雨期长度 24 d,梅雨量为 266.8 mm. 太湖流域入梅早的年份,梅雨期易偏长,梅雨量易偏多;出梅早的年份,梅雨期易偏短,梅雨量易偏少. 入梅异常偏早年份为 1991 年,异常偏晚为 2005 年;二度梅有 3 个年份,分别为 1991、1999、2009 年;空梅有 2 个年份,分别为 1992、2013 年. 上述结论为太湖流域入/出梅划分提供了参考依据,并可为梅雨期气象水文规律研究、水利工程调度模拟提供线索.

2) 与历史序列相比,新标准确定的梅雨量一致率较高,其次是入梅时间、出梅时间,入梅偏早、出梅偏早、梅雨偏多年份一致率较高. 雨日数和副高脊线北跳时间是影响入/出梅确定的两个重要因素,新标准将 1992、2013 年定为空梅,1986、1987、1989、1996、2005 年历史入/出梅日期向后调整,1988、2007 年出梅日期向前调整,修正后的太湖流域入/出梅日期突出了梅雨高温高湿的气候特征,客观性较强,故更加合理.

3) 梅雨期太湖最高水位与梅雨量、梅雨期平均雨强的相关性均较好,梅雨量越大,雨强越大,太湖水位越高. 梅雨期发生超设计洪水共有 3 个年份,超警戒洪水共有 6 个年份. 以梅雨洪水致指数 *RFI* 作为参考因子,考虑到影响太湖洪水形成的两个关键因子(梅雨期起涨水位、最大 7 d 降水量占梅雨量的比例),对入梅起涨水位异常偏高、因集中强降雨引起太湖洪水的指示意义较强.

4) 梅雨期降水与不同纬度、高低空天气系统有利配置关系密切. 贝加尔湖以东、鄂霍次克海以西为阻塞高压,利于北方冷空气频繁南侵到太湖流域,来自西太平洋经南海的偏南气流、印度洋经孟加拉湾的西南气流的西南暖湿气流汇合后持续向北输送,冷暖空气在太湖流域汇合. 太湖流域垂直上升运动异常强烈,高值区域与副高西北侧暖湿气流风速正距平区域基本吻合,触发降雨层结不稳定能量释放,形成暴雨洪水.

5 附录

附表 I 见电子版(DOI: 10.18307/2021.0118).

6 参考文献

- [1] Liang P, Tang X, Ke XX *et al.* Review of study on influencing factors of China Meiyu. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2007, **27**(4): 464-471. [梁萍, 汤绪, 柯晓新等. 中国梅雨影响因子的研究综述. 气象科学, 2007, **27**(4): 464-471.]
- [2] Liang P, Ding YH, He JH *et al.* A study of determination index of regional Meiyu over the Yangtze-Huaihe basin. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2010, **34**(2): 418-428. [梁萍, 丁一汇, 何金海等. 江淮区域梅雨的划分指标研究. 大气科学, 2010, **34**(2): 418-428.]
- [3] Shen Y, Liang P. An Investigation on the partition of Mei-Yu season in the mid-lower reaches of the Changjiang river in 2006. *Meteorological Monthly*, 2007, **23**(7): 112-118. [沈愈, 梁萍. 2006 年长江中下游地区梅雨季节划分的探讨. 气象, 2007, **23**(7): 112-118.]
- [4] Zhou B, Liang P, Wang DQ *et al.* Meiyu monitoring indices. GB/T 33671-2017. [周兵, 梁萍, 王东阡等. 梅雨监测指标. GB/T 33671-2017.]
- [5] Liang P, Chen LJ, Ding YH *et al.* Relationship between long-term variability of Meiyu over the Yangtze river and ocean and Meiyu's predictability study. *Scientia Meteorologica Sinica*, 2018, **76**(3): 379-393. [梁萍, 陈丽娟, 丁一汇等. 长江梅雨的长期变率与海洋的关系及其可预报性研究. 气象学报, 2018, **76**(3): 379-393.]
- [6] Liu Y, Wang YT, Chen YF *et al.* Spatial-temporal evolution characteristics of plum rains in Taihu Lake basin. *Hydrology*, 2011, **31**(3): 36-43. [刘勇, 王银堂, 陈元芳等. 太湖流域梅雨时空演变规律研究. 水文, 2011, **31**(3): 36-43.]
- [7] Wu HY. Comparison and analysis of the typical plum rains caused flood disaster in Taihu Lake basin. *Hydrology*, 2000, **20**(4): 54-57. [吴浩云. 太湖流域典型年梅雨洪涝灾害比较分析. 水文, 2000, **20**(4): 54-57.]
- [8] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R *et al.* The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2002, **83**(12): 4173-4174.

- logical Society*, 1996, **77**(3): 437-471. DOI: 10.1175/1520-0477(1996)0770437:tnyrp>2.0.co;2.
- [9] Kistler R, Collins W, Saha S *et al.* The NCEP-NCAR 50-year reanalysis; Monthly means CD-ROM and documentation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, **82**(2): 247-267. DOI: 10.1175/1520-0477(2001)0820247:tnnyrm>2.3.co;2.
- [10] Mann HB. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 1945, **13**(3): 245. DOI: 10.2307/1907187.
- [11] Chen X, Li DL. The features of Meiyu under the new standard. *Journal of the Meteorological Science*, 2016, **36**(2): 165-175. [陈旭, 李栋梁. 新标准下江淮梅雨特征的分析. *气象科学*, 2016, **36**(2): 165-175.]
- [12] Zhao JH, Chen LJ, Xiong KG. Climate characteristics and influential system of Meiyu to the south of the Yangtze River on the new monitoring rules. *Acta Meteorologica Sinica*, 2018, **76**(5): 680-698. [赵俊虎, 陈丽娟, 熊开国. 基于新监测指标的江南入梅早晚的气候特征及影响系统分析. *气象学报*, 2018, **76**(5): 680-698.]
- [13] Ji HP, Wu HY, Wu J. Variation of inflow and outflow of Lake Taihu in 1986-2017. *J Lake Sci*, 2019, **31**(6): 1525-1533. DOI: 10.18307/2019.0612. [季海萍, 吴浩云, 吴娟. 1986-2017年太湖出、入湖水量变化分析. *湖泊科学*, 2019, **31**(6): 1525-1533.]
- [14] Wu HY. Formulation and application of flood regulation scheme in the Taihu Basin. *J Lake Sci*, 2000, **12**(1): 19-24. DOI: 10.18307/2000.0104. [吴浩云. 太湖流域洪水调度方案的制定与实践. *湖泊科学*, 2000, **12**(1): 19-24.]
- [15] Chen LJ, Zhao JH, Gu W *et al.* Advances of research and application on major rainy seasons in China. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2019, **30**(4): 385-400. [陈丽娟, 赵俊虎, 顾薇等. 汛期我国主要雨季进程成因及预测应用进展. *应用气象学报*, 2019, **30**(4): 385-400.]
- [16] Luo XJ. The analysis of temporal evolution and anomalous circulation characteristics of Meiyu under the new standard. *Climate Change Research Letters*, 2017, **6**(2): 130-153. [罗小杰. 新标准下梅雨特征量的时间演变及异常梅年环流特征分析. *气候变化研究快报*, 2017, **6**(2): 130-153.]
- [17] Liang P, Ding YH. Does non-occurrence of Meiyu take place in Yangtze-Huaihe basins during summer of 2009? *Plateau Meteorology*, 2011, **30**(1): 53-64. [梁萍, 丁一汇. 2009年是空梅吗? *高原气象*, 2011, **30**(1): 53-64.]
- [18] Xiang Y, Lu P, Cheng T *et al.* Evolution characteristics of the Jiangsu plum rain in recent 54 years and its monitoring analysis in 2014. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2016, **36**(5): 681-688. [项瑛, 卢鹏, 程婷婷等. 近54 a江苏梅雨演变特征及2014年梅雨监测分析. *气象科学*, 2016, **36**(5): 681-688.]
- [19] Liang P, He JH. Review for climate change of Meiyu over the Yangtze-Huaihe basins. *Plateau Meteorology*, 2008, **27**: 8-15. [梁萍, 何金海. 江淮梅雨气候变化研究进展. *高原气象*, 2008, **27**: 8-15.]
- [20] Ding YH, Liang P, Liu YJ *et al.* Multiscale variability of Meiyu and its prediction: A new review. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2020, **125**(7): e2019JD031496. DOI:10.1029/2019jd031496.
- [21] Jiang W, Gao H. New features of Meiyu over middle-lower reaches of Yangtze River in the 21st century and the possible causes. *Meteorological Monthly*, 2013, **39**(9): 1139-1144. [蒋薇, 高辉. 21世纪长江中下游梅雨的新特征及成因分析. *气象*, 2013, **39**(9): 1139-1144.]
- [22] Duan HX, Li YH, Liu YY. Comparative analysis on atmospheric circulation anomalies of heavy drought event in Northern China in 1986 and 1997. *Arid Zone Research*, 2015, **32**(5): 966-976. [段海霞, 李耀辉, 刘芸芸. 我国北方1986年和1997年干旱事件环流异常对比分析. *干旱区研究*, 2015, **32**(5): 966-976.]
- [23] Ye TS. Twice northward jumps of WPSH and its relationship with summer rainfall in eastern China under global warming [Dissertation]. Langzhou: Langzhou University, 2015: 10-11. [叶天舒. 全球变暖背景下西太平洋副热带高压的北跳及与我国东部夏季降水的关系[学位论文]. 兰州: 兰州大学, 2015: 10-11.]
- [24] Zhu XL. Characteristics and causes analysis of abnormal Meiyu in China in 2018. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2019, **42**(3): 29-33. [赵晓琳. 2018年我国梅雨特征及梅雨期降水异常成因分析. *气象与环境科学*, 2019, **42**(3): 29-33.]
- [25] Xu XF, Qi LB. Analysis on the synoptic situations of first heavy rain of Meiyu period in the Yangtze River Delta during 2001-2013. *Atmospheric Science Research and Application*, 2014, (1): 42-50. [徐秀芳, 漆梁波. 长三角地区梅汛期首场暴雨天气形势分析. *大气科学研究与应用*, 2014, (1): 42-50.]

附表 I 1986—2016 年太湖流域新标准下梅雨特征量的统计

Supplement Tab. I Feature quantities of Meiyu in Taihu Basin during 1986–2016 under the new standard

年份	入梅日期	出梅日期	梅雨期长度/d	梅雨量/mm	备注
1986	6-19	7-24	35	274.8	
1987	7-1	7-29	28	342.2	
1988	6-11	6-23	12	91.2	
1989	7-3	7-16	13	124.5	
1990	6-14	7-3	19	129.4	
1991	5-19	7-15	46	667.0	二度梅
1992	—	—	—	—	空梅
1993	6-14	7-9	25	237.7	
1994	6-8	6-29	21	203.0	
1995	6-20	7-7	17	327.6	
1996	6-15	7-22	37	461.7	
1997	6-21	7-19	28	228.1	
1998	6-18	7-6	18	155.3	
1999	6-7	7-18	36	679.1	二度梅
2000	6-19	7-3	14	77.1	
2001	6-17	6-27	10	207.1	
2002	6-19	7-8	19	218.1	
2003	6-21	7-12	21	192.7	
2004	6-14	6-26	12	171.1	
2005	7-5	7-16	11	113.8	
2006	6-22	7-12	20	166.4	
2007	6-21	7-11	20	185.0	
2008	6-7	7-3	26	297.7	
2009	6-20	8-3	31	398.7	二度梅
2010	6-17	7-17	30	263.6	
2011	6-10	6-26	16	288.9	
2012	6-17	7-18	31	261.1	
2013	—	—	—	—	空梅
2014	6-25	7-6	11	155.5	
2015	6-15	7-13	28	392.6	
2016	6-19	7-19	30	425.9	