

温州市历史暴雨时空分布及环流关联分析

陈文聪^{1,2}, 王潇雅^{1,2*}, 司 波^{1,2}

¹温州市气象局, 浙江 温州

²温州市台风监测预报技术重点实验室, 浙江 温州

收稿日期: 2026年7月8日; 录用日期: 2026年8月6日; 发布日期: 2026年8月14日

摘 要

本研究利用NCEP/NCAR逐日海平面气压场资料及国家地面观测站降水资料, 采用Lamb-Jenkinson环流分型法, 分析了温州市历史暴雨与大气环流的特征, 并探讨了环流型与暴雨发生的关联。结果表明: 温州暴雨日数呈西多东少的空间分布; 夏季暴雨最为频发, 冬季最少, 季节差异显著; 年暴雨日数在研究时段内无显著变化趋势。温州区域的主导环流为反气旋型(A)、反气旋性混合型(AE)和平直偏东型(E、NE)。年代际分析显示, 研究期内A型环流出现频率显著下降; 四季间环流型频率差异明显, 且与季节内影响系统密切相关。反气旋型及其混合型环流(如AE、AN)诱发暴雨的能力极弱; 平直气流型环流与暴雨发生的关系表现出显著的风向依赖性; 在气旋型与偏东南风共同作用的环流配置下, 温州地区出现暴雨的概率最高。

关键词

温州市, 暴雨, 环流分型, Lamb-Jenkinson

Analysis of the Spatiotemporal Distribution and Circulation Correlations of Historical Rainstorms in Wenzhou

Wencong Chen^{1,2}, Xiaoya Wang^{1,2*}, Bo Si^{1,2}

¹Wenzhou Meteorological Bureau, Wenzhou Zhejiang

²Wenzhou Key Laboratory of Typhoon Monitoring and Forecasting Technology, Wenzhou Zhejiang

Received: July 8, 2026; accepted: August 6, 2026; published: August 14, 2026

*通讯作者。

文章引用: 陈文聪, 王潇雅, 司波. 温州市历史暴雨时空分布及环流关联分析[J]. 地球科学前沿, 2026, 16(8): 1177-1185. DOI: 10.12677/ag.2026.168105

Abstract

Based on daily sea-level pressure field data from NCEP/NCAR and precipitation data from national surface weather stations, this study used the Lamb-Jenkinson method to analyze the characteristics of historical rainstorms and atmospheric circulation and to explore the relationship between the two in Wenzhou. The results show that rainstorms in Wenzhou are more frequent in the west than in the east; summer is the most frequent season for rainstorms, while winter sees very few, showing a marked difference; the annual number of rainstorm days has not changed significantly over time. The dominant circulation patterns in Wenzhou are anticyclonic types (A, AE) and directional types (E, NE). Interdecadal analysis shows a significant decline in the frequency of Type A circulation during the study period; there are relatively marked differences in the frequency of circulation types across the four seasons in Wenzhou, which are significantly related to intraseasonal influencing systems. Anticyclonic types (such as AE and AN) have extremely low potential to trigger rainstorms; the relationship between directional types and rainstorms exhibits significant wind-direction dependence; the highest rainstorm probability occurs when low-pressure systems combine with southeasterly winds.

Keywords

Wenzhou City, Rainstorm, Circulation Classification, Lamb-Jenkinson

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

中国是一个多暴雨的国家，其中又以东南沿海的暴雨出现最为频繁，且常常带来严重的洪涝等次生灾害[1][2]。从上个世纪起国内不少专家学者就针对暴雨做了系统性的理论研究，发现暴雨是时空尺度系统相互作用的产物，主要由中尺度系统造成[3]，而中小尺度系统是在天气尺度系统作用下生成和发展的，且天气尺度系统又受到大气环流系统的制约，所以许多大暴雨都是出现在大尺度环流发生明显调整的时期[4]，大尺度环流条件对暴雨的发生发展有明显的制约作用[1]。近年来，随着大气探测技术以及计算机运算能力的改善和发展，中国气象学者在暴雨的多尺度作用机理和预报方法与技术方面积累了丰富的成果，但在大尺度环流演变对暴雨科学和预报的关联方面的研究还有待进一步深入[5]。

分型统计方法考虑了各类天气环流的特点并采用一组因子反映暴雨形成的过程，是目前较为常用的预报暴雨和强对流天气的方法[4]。环流分型方法可以大致分为主观和客观两大类，主观的分型方法比较直观且具有可解释的物理意义，但由于其主要依靠经验，在实际应用和推广中存在限制[6]；客观分型方法相较主观分型方法有不依赖经验、可迁移的特点，常见有主成分分析(PCA) [7]以及其衍生出各类经验正交分解(EOF)等方法，如郑艳等人[8]利用多变量经验正交分解法(MVEOF)对浙江的低涡暴雨日的环流场进行分型，并探讨了各环流型的差异，蔡志颖等人[9]对浙江所有历史致暴雨涡旋进行合成分析，以了解致暴雨涡旋的环流形势。基于以往研究，Jenkinson 等[10]通过定义指数及分类标准将 Lamb [11]主观的分类方法客观化得到了 Lamb-Jenkinson 分型法，该方法既有操作性强的优点，结果又有明确的天气气候学意义，因而在国内外相关研究中被广泛应用[12]-[15]。

温州市作为长江三角洲城市群中心城市之一，地处浙江省最南端，三面环山，东临东海，境内多山

地丘陵,是中国暴雨多发和因暴雨致灾较严重的地区之一[16]。本研究围绕不同天气系统影响下温州暴雨成因的难题,利用地面气象站观测数据和再分析资料,采用 Lamb-Jenkinson 客观分型法,系统分析温州地区暴雨与大尺度环流的历史演变特征及不同大气环流系统影响下暴雨发生的情况,探讨暴雨与大气环流型之间的联系,以期能够为温州市暴雨预报预警提供科学依据。

2. 资料及方法

2.1. 资料

本研究中使用的日平均海平面气压资料来源于美国国家海洋和大气管理局(NOAA)提供的 NCEP/NCAR 再分析数据集[17],空间分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$;地面降水资料由浙江省气候中心提供,涵盖温州市主要县(市、区)的 8 个国家气象观测站(其中苍南站因建站较晚故在本研究中未使用相关资料),降水数据按每日 08~20 时和 20~08 时两个时段累计记录,在使用前经处理统一对齐至世界时(UTC)并进行拼接。上述资料时间跨度为 1971 年至 2024 年,另外如无特别说明下文中所述时间均为世界时。

2.2. 方法

朱艳峰等人[7]的研究证实,除高原地区外, Lamb-Jenkinson 环流分型法在中国各区域均能清晰识别出相应的环流配置型,表明该方法在我国大部分地区具有良好适用性。因此,本研究采用该方法对大气环流进行分型。具体实施的第一步为区域界定与格点划分,综合考虑温州市所处的位置和再分析数据的分辨率,以(120°E , 27.5°N)作为环流分型区域的中心点,在($105^\circ\sim 135^\circ\text{E}$, $17.5^\circ\sim 37.5^\circ\text{N}$)的范围内的网格上每隔 5° 纬度和 10° 经度选取共 16 个差分格点,具体如图 1 所示。

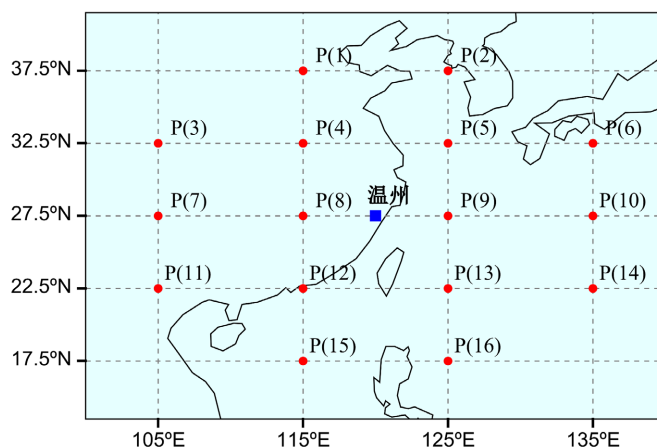


Figure 1. The distribution of 16 differential grid points, with the blue square indicating the location of Wenzhou

图 1. 16 个差分格点的分布,其中蓝色方块表示温州市所在位置

利用上述格点对应的海平面气压值,使用(1)~(6)式分别计算环流指数 u 、 v 、 V 、 ξ_u 、 ξ_v 、 ξ ,其中 $P(n)$ 表示第 n 个格点的海平面气压值, α 、 α_1 、 α_2 分别是 $P(8)$ 、 $P(12)$ 、 $P(4)$ 的纬度值, V 是地转风, u 、 v 分别是地转风的纬向和经向分量, ξ_u 是 u 的经向梯度, ξ_v 是 v 的纬向梯度, ξ 则为地转涡度,最后使用(7)式计算地转风 V 的方向 θ 。

$$u = \frac{1}{2} [P(12) + P(13) - P(4) - P(5)] \quad (1)$$

$$v = \frac{1}{4} \frac{1}{\cos \alpha} [P(5) + 2P(9) + P(13) - P(4) - 2P(8) - P(12)] \tag{2}$$

$$V = \sqrt{u^2 + v^2} \tag{3}$$

$$\begin{aligned} \xi_u &= \frac{1}{2} \frac{\sin \alpha}{\sin \alpha_1} [P(15) + P(16) - P(8) - P(9)] \\ &\quad - \frac{1}{2} \frac{\sin \alpha}{\sin \alpha_2} [P(8) + P(9) - P(1) - P(2)] \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned} \xi_v &= \frac{1}{4} \frac{1}{2 \cos^2 \alpha} [P(6) + 2P(10) + P(14) - P(5) - 2P(9) - P(13) + P(3) \\ &\quad + 2P(7) + P(11) - P(4) - 2P(8) - P(12)] \end{aligned} \tag{5}$$

$$\xi = \xi_u + \xi_v \tag{6}$$

$$\begin{cases} v < 0, & \theta = \arctan \frac{u}{v} \\ v > 0, & \theta = \arctan \frac{u}{v} + 180^\circ \end{cases} \tag{7}$$

根据地转风速、风向及地转涡度之间的关系，参考 TRIGO 等人的做法将环流类型分为平直气流型、旋转型和混合型共计 3 大类、26 小类[18]，不含无定义型[19]，具体划分如表 1 所示。表中平直气流型，代表该地区受某种方向的地转风控制，认为气流本质上呈直线运动，共 8 类；旋转型即纯气旋型，表示受反气旋(高压，A)或气旋(低压，C)控制；混合型则表示该地区受高(低)压控制下叠加某种方向的地转风气流影响，兼具平直气流和气旋的双重特征，共 16 类。

Table 1. Lamb-Jenkinson Circulation Type
表 1. Lamb-Jenkinson 环流分型

判断指标		环流类型	子类环流类型
$ \xi \leq V$		平直气流型	N、NE、E、SE、S、SW、W、NW
$ \xi \geq 2V$	$\xi > 0$	旋转型	C
	$\xi < 0$		A
$V < \xi < 2V$	$\xi > 0$	混合型	CN、CNE、CE、CSE、CS、CSW、CW、CNW
	$\xi < 0$		AN、ANE、AE、ASE、AS、ASW、AW、ANW

3. 温州历史暴雨概况

根据中国气象局发布的降水量等级标准(GB/T 28592-2012)，本文将 24 小时内降雨量 ≥ 50 毫米定义为暴雨，并基于 1971~2024 年期间温州地区 8 个国家气象站的降水观测数据，对其间发生的暴雨日数的时空分布及变化特征进行了统计分析，结果如图 2 所示。从各站年平均暴雨日数(图 2(a))可以看出，温州地区国家站暴雨日数均值为 5 天，空间分布呈现西部(文成、泰顺)较多、东部(乐清、洞头)较少的特征，与本地的地形特征具有一定一致性。其中，泰顺站暴雨发生频次最高，达 6.1 天；洞头站最少，为 3.8 天。其余各站暴雨发生频次差异不显著，均维持在均值附近。从全市各月累计暴雨日数(图 2(b))来看，整个研究期内温州地区平均每月暴雨日数为 76.1 天，并且表现出明显的季节性集中特征。5~9 月为暴雨高发期，该时段内累计出现 776 天暴雨，占全部暴雨日数的 85%；其中 8 月份暴雨发生频次最高，达 203 天。相

反, 冬季暴雨发生频率极低, 1 月、2 月和 12 月暴雨日数合计仅 12 天, 1 月份为全年最少, 仅 2 天。在年际变化方面(图 2(c)), 温州地区年平均暴雨日数为 16.9 天, 线性趋势分析显示, 该序列呈微弱上升趋势(斜率为 0.021), 但未通过显著性检验($p > 0.05$), 表明研究时段内年暴雨日数的上升倾向在统计上不显著, 仍以年际波动为主。暴雨日数最多的年份为 1990 年, 共出现 27 天; 最少年为 2020 年, 仅为 6 天。

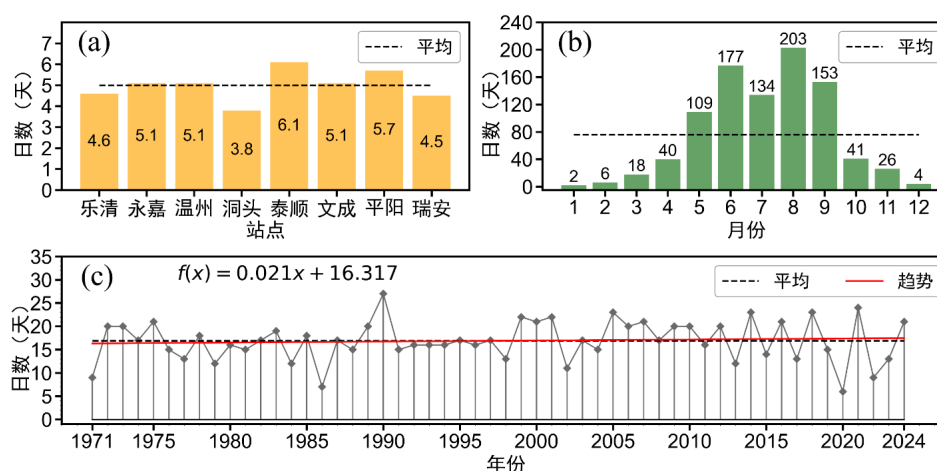


Figure 2. Statistics on historical rainstorms in Wenzhou, including the annual average number of rainstorm days at each station (a), the cumulative number of rainstorm days by month (b), and the number of rainstorm days over the years (c)

图 2. 温州历史暴雨情况统计, 包含各国家站年平均暴雨日数(a), 各月份累计暴雨日数(b), 历年暴雨日数(c)

4. 历史环流型特征分析

4.1. 环流型年代际变化

为深入探究各环流型的出现频率及其时间变化特征, 采用 Lamb-Jenkinson 方法对 1971~2024 年区域内逐日大气环流进行客观分型, 并以 10 年为时间尺度对主要环流型的发生频率进行统计, 结果如图 3 所示。图中剔除了发生频率低于 1% 的 8 种环流型(包括 CW、N、CN、CNW、NW、AW、AN、ANW)。统计结果表明, 在 1971~2024 年期间, 26 种环流型均有出现, 其中绝大多数发生频率低于 5%。频率超过 5% 的环流型共有 9 种, 分别为: A (17.1%)、E (13.9%)、AE (11.3%)、NE (9.6%)、ANE (7.7%)、SW (7.2%)、C (6.6%)、SE (5.5%) 和 S (5.2%)。这些环流型的累计频率超过 84%, 尤其以前四种(A、E、AE 和 NE)占比最高, 超过 50%, 表明上述少数几种环流型就能基本代表本地的大气环流形势, 即温州区域的主导环流型为反气旋型(A)、反气旋性混合型(AE)和平直偏东型(E、NE)。从年代际变化来看, 各环流型所占比例随时间均存在不同程度变化。反气旋型(A)和反气旋性混合型(AE)环流出现频率呈下降趋势, 其中 A 型从 1970 年代的 20.8% 持续下降至 2010 年代的 14.6%, 变化幅度达 6.2%, 降幅显著, ANE 型也下降了 2.2%; 据丁一汇等人的研究[20], 自 20 世纪 80 年代以来中国冬季气温先后经历了显著的增暖期及随后的变暖趋缓期。与此同时, 东亚冬季大气环流也表现出协同的年代际变化特征, 尤其体现在西伯利亚高压的减弱趋势上, 表明 A 型和 ANE 型环流发生频率的下降, 很可能与全球变暖存在关联。同一时期, E 型和 NE 型等平直气流型环流发生频率呈现上升趋势, 其在 2010 年代的合计占比相较 1970 年代累计增加了约 4%。此外, 气旋型(C)及气旋性混合型(CSW、CSE)环流发生频次也略有上升, 其中 C 型环流的发生频率从 1970s 的 5.4% 提高至 2010s 的 7.3%, 增幅为 1.9%。

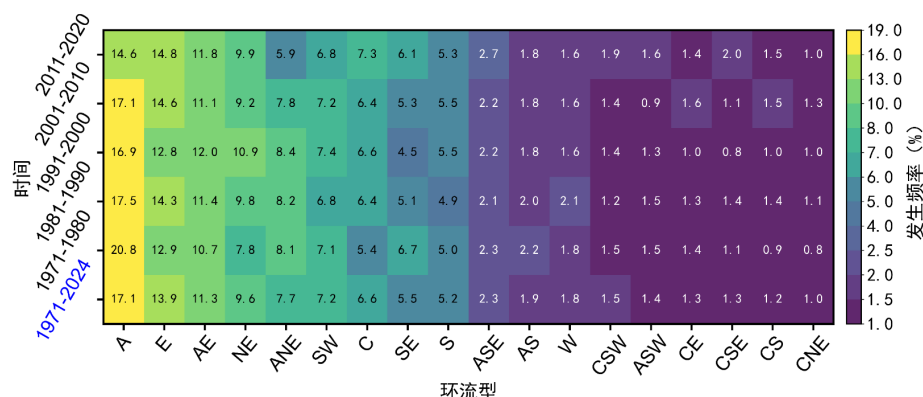


Figure 3. Frequency and interdecadal variations of the major circulation types (18 types) in Wenzhou from 1971 to 2024. The labels on the figure indicate the proportion of each circulation type

图 3. 1971~2024 年温州地区历史主要环流型(18 类)发生频率及年代际变化, 其中图上的标签表示环流型所占比例

4.2. 主导环流型季节变化

围绕主要环流型随季节更替的变化特征, 对主要的几种环流型的出现情况进行分季统计, 其中四季划分参考杨诗芳等人针对浙南地区气候特征划定的标准[21]: 春季为 3~5 月、夏季为 6~8 月、秋季为 9~11 月、冬季为 12 月至次年 2 月。从图 4 中可以发现各种环流型的发生频率有较为明显的季节差异。春季为冬夏环流的过渡季节, 冷暖空气交汇频繁, 主要影响系统包括锋面系统和弱冷高压等, 环流型分布较为多样, 以反气旋型(A)、反气旋性混合型(AE)和平直气流型(E、NE、S、SE)为主, 合计占比达 65.3%; 同时, 也会受到江淮气旋等低压系统影响, 气旋型环流(C)的出现频率也达到 6.4%, 不容忽视。夏季主要受西太平洋副热带高压、大陆热低压和热带气旋等系统影响和控制, 暖湿气流活跃。该时期环流型以气旋型(C)和平直偏南型气流(S、SE、SW)为主, 合计发生频率为 57.6%, 而反气旋型环流(A)进入全年最低发期, 仅占 3.3%。秋季与冬季均受强大干冷的蒙古-西伯利亚冷高压的影响, 温州位于高压南侧, 盛行偏东风, 两季环流型频率分布较为相似, 均以反气旋型(A)、反气旋性混合型(AE、ANE)和平直偏东型环流(E、NE)为主, 5 类环流型在秋、冬两季占比分别可达 82.3%和 91.8%。相较而言, 冬季冷高压更为强盛, 因此反气旋型及反气旋性混合型环流占比高于秋季, 分别为 65.1%(冬)和 39.7%(秋); 与之相反, 平直偏东型环流在秋季占比更高, 达 42.6%(秋)和 26.7%(冬)。

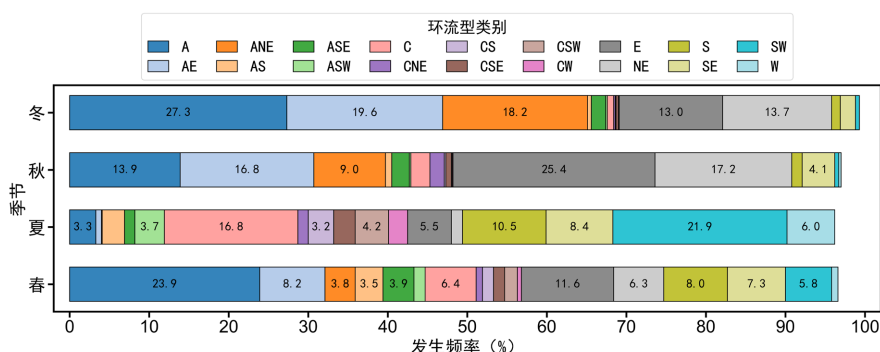


Figure 4. Frequency of major circulation types (18 types) by season in Wenzhou from 1971 to 2024. The labels on the figure indicate the proportion of each circulation type

图 4. 1971~2024 年温州地区各季节主要环流型(18 类)发生频率, 其中柱状图上的标签表示环流型所占比例

5. 环流型与暴雨的关系

为了探究环流型与暴雨日之间的关联，本研究统计了各环流型在区域暴雨日中的出现频次及频率。其中区域暴雨日定义为：8 个国家气象站中任一站点日降水量达到暴雨量级，则该日记为一次区域暴雨日。同时，参考陈龙等人的方法[22]，定义 P1 为某一环流型下的暴雨日数占该型总日数的比例，P2 为所有环流型下的暴雨日数占总日数的比例，通过计算比值 $P1/P2$ 评估各类环流型对暴雨发生的影响：若 $P1/P2 > 1$ ，表明该环流型更易诱发暴雨；反之当 $P1/P2 < 1$ ，则表示该环流型下降雨不易达到暴雨量级。从图 5 中可以看出，反气旋型(A)和反气旋性混合型环流(如 AE、AN 等)在所有暴雨日中的出现频率均未超过 2%；其中，ANW 和 AW 型在整体环流构成中占比为零，表明在研究时段内两种环流型背景下未出现暴雨事件。同时这些环流型对应的 P1/P2 值均小于 1，最大仅为 0.8 (AN)。以上结果均表明这些环流型出现时暴雨发生的概率极低。平直气流型环流与暴雨发生的关系表现出显著的风向依赖性。偏东(E、NE)和偏南(S、SE、SW)环流型在暴雨日中的发生频率要显著高于其他风向，占比均超过 5%，其中 E 型最高，达 14.5%；而偏北及偏西类环流(N、NW、W)发生频率均在 1.5%以下，这一分布特征与温州地区东北 - 西南走向的地形及海陆位置密切相关，同时也指示暴雨的水汽输送主要来源于东南方向。值得注意的是，这 8 类平直气流型的 P1/P2 值差异不显著，均接近于 1，说明平直气流型环流整体上对于暴雨的触发能力相对中性。在所有环流型中，气旋型环流(C)在暴雨日中出现频率最高，占比达 23.1%，气旋性混合型环流(如 CE、CSW 等)的出现频率相对较低，普遍在 7%以下。但这两大类环流型的 P1/P2 值均大于 1，其中 CSE (5.1)、CS (4.3)、CE (3.7)和 C (3.5)位列所有环流型前四位，表明其暴雨诱发能力显著更强，是暴雨发生的关键环流背景类型。综上所述，在低压辐合系统与偏东南风水汽输送共同作用的环流配置下，温州地区发生暴雨的概率最高。这一结果与段晶晶等[23]在一次台风降水过程的观测结论一致，即浙江雨强最强时伴有低压环流的生成。此外，这一环流配置的暴雨增幅效应可能与温州特定的地形特征密切相关，西北 - 东南走向的山脉对东南气流具有抬升作用，从而显著增强局地降水[24]。

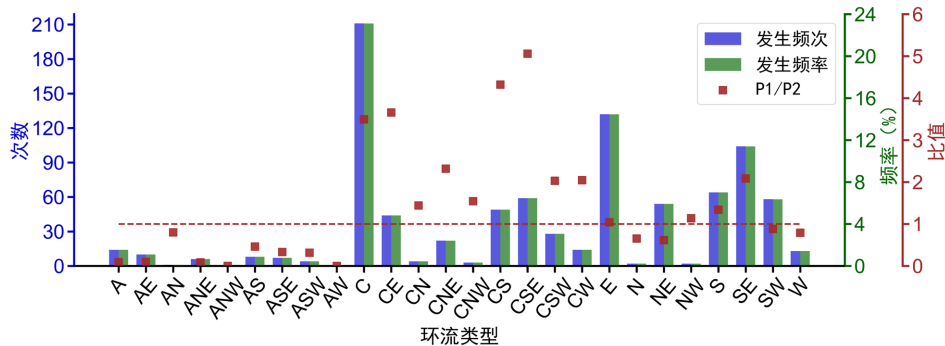


Figure 5. The number of occurrences, frequency, and P1/P2 values for each circulation type corresponding to rainstorm days in Wenzhou from 1971 to 2024, where the red dashed line indicates that P1/P2 equals 1
图 5. 1971~2024 年温州地区暴雨日对应的各环流型发生频次、频率和 P1/P2 分布，其中红色虚线表示 P1/P2 为 1

6. 结论

本文基于再分析数据集和温州地面国家气象站观测资料，采用 Lamb-Jenkinson 环流分型方法分析了 1971~2024 年温州市暴雨日和大气环流形势的特点及其之间的关系，得到以下结论。

(1) 温州地区年均暴雨日数为 5 天，空间分布呈现出西多东少的异质性特征，与当地地形分布具有较高的一致性。暴雨事件的发生时间显著集中于 5 月至 9 月，其中 8 月为暴雨最为频发的月份，而 1 月则

极少出现。从长期变化趋势来看,温州的年暴雨日数呈现出不显著的上升趋势;在观测期内,年暴雨日数最大达 27 天,最小为 6 天。

(2) 温州地区大气环流以 A、E、AE 和 NE 型为主,其出现频率居于主导地位,合计占比超过 50%。从年代际尺度看,反气旋型及反气旋性混合型环流(A、ANE)的出现频率呈下降趋势,该变化与全球变暖背景下冬季气温上升、西伯利亚高压减弱的气候背景相一致;与此相反,平直气流型环流(E、N)以及气旋型与气旋性混合型环流(C、CSW、CSE)的出现频率则呈现上升态势。

(3) 温州地区春季受多类天气系统共同作用,环流型分布呈现出多样化特征,反气旋型(A)、反气旋性混合型(AE)、气旋型(C)以及平直气流型(E、NE、S、SE)均占有一定比例,共同构成该季节主要环流背景。夏季环流则以气旋型(C)及平直偏南型(S、SE、SW)为主要特征,反气旋型(A)出现频率降至全年最低。秋季与冬季在环流型频率分布上较为相似,均以反气旋型(A)、反气旋性混合型(AE、ANE)和平直偏东型(E、NE)环流为主;相较而言,冬季冷高压势力显著增强,因此 A、AE 和 ANE 型环流所占比例高于秋季;与之相应,E、NE 型环流在秋季的出现频率较冬季更高。

(4) 反气旋型(A)和反气旋性混合型(如 AE、AN 等)环流背景下暴雨发生的概率显著偏低。平直气流型环流与暴雨发生的关联呈现显著的风向依赖性特征:其中偏东(E、NE)与偏南(S、SE、SW)环流型在暴雨日中的出现频率显著高于其他风向亚型,但平直气流型环流整体上对于暴雨的触发能力相对中性。气旋型环流(C)在暴雨日中出现频率最高,气旋性混合型环流(如 CE、CSW 等)的出现频率相对较低,但这两大类环流型的暴雨诱发效能显著更强。

同时,本研究仍存在一定的局限性。受区域站观测资料长度限制,本文仅采用了国家观测站的数据,其在空间覆盖范围及代表性方面尚有不足。后续研究可通过引入多源数据,加强对现有结论的验证。此外,基于环流指数和环流型构建暴雨事件的预测模型,并将其应用于业务预报实践,也是未来值得深入探索的方向。

基金项目

温州市气象科技联合项目:基于环流分型的浙南海雾智能预报技术研究(LQ2025001)。

参考文献

- [1] 丁一汇. 暴雨和中尺度气象学问题[J]. 气象学报, 1994(3): 274-284.
- [2] 陈雪, 陈农, 尹宜舟, 等. 1991-2023 年中国致灾气旋暴雨特征及致灾影响[J]. 海洋预报, 2026, 43(3): 82-92.
- [3] 丁一汇. 中国暴雨理论的发展历程与重要进展[J]. 暴雨灾害, 2019, 38(5): 395-406.
- [4] 陶诗言, 丁一汇, 周晓平. 暴雨和强对流天气的研究[J]. 大气科学, 1979(3): 227-238.
- [5] 罗亚丽, 孙继松, 李英, 等. 中国暴雨的科学与预报: 改革开放 40 年研究成果[J]. 气象学报, 2020, 78(3): 419-450.
- [6] 钟利华, 曾鹏, 史彩霞, 等. 西江流域面雨量与区域大气环流型关系[J]. 应用气象学报, 2017, 28(4): 470-480.
- [7] 朱艳峰, 陈德亮, 李维京, 等. Lamb-Jenkinson 环流客观分型方法及其在中国的应用[J]. 南京气象学院学报, 2007(3): 289-297.
- [8] 郑艳, 蔡志颖, 张程明, 等. 浙江低涡暴雨环流分型及其优选集合动力因子研究[J]. 暴雨灾害, 2025, 44(5): 700-712.
- [9] 蔡志颖, 郑艳, 张程明, 等. 近 43a 影响浙江并引发区域性暴雨的大气涡旋统计特征[J]. 暴雨灾害, 2025, 44(2): 215-225.
- [10] Jenkinson, A.F. and Collison, F.P. (1977) An Initial Climatology of Gales over the North Sea. Synoptic Climatology Branch Memorandum No. 62. Meteorological Office.
- [11] Lamb, H.H. (1950) Types and Spells of Weather around the Year in the British Isles: Annual Trends, Seasonal Structure of the Year, Singularities. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **76**, 393-429.
<https://doi.org/10.1002/qj.49707633005>

- [12] Pope, R.J., Savage, N.H., Chipperfield, M.P., Arnold, S.R. and Osborn, T.J. (2014) The Influence of Synoptic Weather Regimes on UK Air Quality: Analysis of Satellite Column NO₂. *Atmospheric Science Letters*, **15**, 211-217. <https://doi.org/10.1002/asl2.492>
- [13] 邓伟涛, 段雯瑜, 何冬燕, 等. 夏季淮河流域大气环流型在降水趋势预测中的应用[J]. 大气科学学报, 2015, 38(3): 333-341.
- [14] Li, M., Wang, L., Liu, J., Gao, W., Song, T., Sun, Y., *et al.* (2020) Exploring the Regional Pollution Characteristics and Meteorological Formation Mechanism of PM_{2.5} in North China during 2013-2017. *Environment International*, **134**, Article ID: 105283. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105283>
- [15] 周咪, 曾永康, 李将永, 等. 大气环流型及挥发性有机物对广东佛山市臭氧污染的影响[J]. 环境科学学报, 2023, 43(10): 215-225.
- [16] 赵庆良, 王军, 许世远, 等. 沿海城市社区暴雨洪水风险评价——以温州龙湾区为例[J]. 地理研究, 2010, 29(4): 665-674.
- [17] Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., *et al.* (1996) The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **77**, 437-471. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:tnyrp>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:tnyrp>2.0.co;2)
- [18] Trigo, R.M. and DaCamara, C.C. (2000) Circulation Weather Types and Their Influence on the Precipitation Regime in Portugal. *International Journal of Climatology*, **20**, 1559-1581. [https://doi.org/10.1002/1097-0088\(20001115\)20:13<1559::aid-joc555>3.0.co;2-5](https://doi.org/10.1002/1097-0088(20001115)20:13<1559::aid-joc555>3.0.co;2-5)
- [19] Jones, P.D., Hulme, M. and Briffa, K.R. (1993) A Comparison of Lamb Circulation Types with an Objective Classification Scheme. *International Journal of Climatology*, **13**, 655-663. <https://doi.org/10.1002/joc.3370130606>
- [20] 丁一汇, 柳艳菊, 梁苏洁, 等. 东亚冬季风的年代际变化及其与全球气候变化的可能联系[J]. 气象学报, 2014, 72(5): 835-852.
- [21] 杨诗芳, 毛裕定. 浙江省近 50 年气温变化及四季划分[J]. 浙江气象, 2008, 29(4): 1-6.
- [22] 陈龙, 智协飞, 覃军, 等. 影响武汉市空气污染的地面环流形势及其与污染物浓度的关系[J]. 气象, 2016, 42(7): 819-826.
- [23] 段晶晶, 钱燕珍, 姜嘉俊, 等. 台风“卡努”影响下浙江东北部暴雨增强成因[J]. 干旱气象, 2020, 38(5): 737-746.
- [24] 梁洁华, 程正泉, 陈浩, 等. 登陆福建台风致粤东暴雨的环流特征[J]. 热带气象学报, 2025, 41(4): 495-503.