# 基于 ERA-5 高分辨率资料的高原低涡客观识别 方法研究

麦哲宁¹ 许东蓓¹ 孙继松²³ 燕若彤¹ 张雅馨¹ 常秉松¹ 丁

- 1 成都信息工程大学高原大气与环境四川省重点实验室,成都 610225
- 2 南京气象科技创新研究院,南京 210009
- 3 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

摘 要 利用 ERA5 的 500hPa 逐小时再分析资料(0.25°×0.25°),以高原低涡的天气学特征为依据,设计研究基于高时空分辨率网格资料的高原低涡客观识别算法,并对 1990~2019 年暖季的青藏高原低涡进行识别,建立高原低涡数据库。该算法通过客观标准提取低涡特征点、并采取 DBSCAN 算法进行特征点聚类分析,以相邻时次之间低涡的重合状况、临近程度和既往生命时长为依据对低涡进行追踪匹配,得到合理的低涡路径,将孤立的低涡连接成动态发展的低涡过程。利用《青藏高原低涡切变线年鉴》,针对 2017 年暖季(5~9月)低涡对比分析与本文的客观识别结果的异同,结果表明:客观识别低涡的月分布特征以及移出高原低涡的占比与《年鉴》相似,典型的长生命低涡能被正确识别,可见客观识别算法及其数据库具备一定的可靠性和实用性。但客观识别的低涡总数量多于《青藏高原低涡切变线年鉴》,并且源地为"西部型"的低涡也较多。究其原因,更精细的网格尺度能将低涡在更早的生命时期提取出来,可能会将《年鉴》中的"东部型"低涡进一步追溯到更靠西的位置。此外由于青藏高原西北部观测站点较为匮乏,导致生成于高原西北部的低涡在《年鉴》中未能体现出来,也是低涡数量存在差异的重要原因。

关键词 高分辨率资料 高原低涡 客观识别 对比检验

文章编号 中图分类号 P443 文献标识码

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2208.22119

## Objective Identification of the Tibetan Plateau Vortex Based on ERA-5 High Resolution Data

MAI Zhening<sup>1</sup>, XU Dongbei<sup>1</sup>, SUN Jisong<sup>2,3</sup>, YAN Ruotong<sup>1</sup>, ZHANG Yaxin<sup>1</sup>

收稿日期 2022-07-05; 网络预出版日期 xxxx-xx-xx

作者简介 麦哲宁,男,1996年出生,硕士研究生,主要从事灾害性天气形成机理研究。E-mail: maizhening@foxmail.com

通讯作者 许东蓓, E-mail: xdb@cuit.edu.cn

**资助项目** 国家自然科学基金项目 91937301

Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 91937301)

- 1 Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225
- 2 Nanjing Joint Institute for Atmospheric Sciences, Nanjing 210009
- 3 State Key Laboratory of Server Weather, Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081

Abstract Using ERA5 500hPa hourly reanalysis data (0.25°×0.25°), and based on the synoptic characteristics of the Tibetan Plateau vortex (TPV), an objective identification algorithm based on the grid data with high spatial and temporal resolution was designed to identify the TPV during the warm season from 1990 to 2019, and to establish the TPV database. The algorithm extracted the TPV feature points by objective criteria, and then adopted DBSCAN algorithm for feature points clustering. Based on the degree of overlap and distance between TPV occur in adjacent time and the lifespan, a reasonable path of the TPV was obtained to connect the isolated TPV into a dynamic vortex process. Then we made a comparison between the TPV which occur in the warm season of 2017 (from May to September) identified by the Tibetan Plateau Vortex and Shear Line Yearbooks (the Yearbook) and the objective identification in this paper. The results show: the monthly distribution characteristics of the objective identification TPV and the proportion of the TPV moving out of the plateau are similar to those in the Yearbook, and the typical long-life TPV can be correctly identified, which shows that the objective identification algorithm and its database have certain reliability and practicability. However, the total number of the objective identification TPV (OI-TPV) is more than that in the Yearbook, and there are also more OI-TPV originating from the western part of plateau than the Yearbook TPV (YB-TPV). The reason for this is that we can extract the vortex from earlier lifetimes thanks to a finer grid scale, which is possible to trace the "eastern type" vortex in the Yearbook further to the west. In addition, due to the lack of observation stations in the northwest part of the Tibetan Plateau, the TPV generated in this area are not reflected in the Yearbook, which is also an important reason for the difference in the number of the TPV.

Keywords High Resolution Data, Tibetan Plateau Vortex, Objective Identification, Contrast Test

## 1 引言

青藏高原是影响我国极端天气和气候事件的关键区(赵平等,2018)。其复杂而高耸的地形,通过对大气环流产生动力作用和热力作用,成为影响周边乃至全球大气环流中的重要一环(叶笃正和高由禧,1979; Ye,1981; 潘保田和李吉均,1996; 朱乾根等,2007; Zhang et al.,2014; Li et al.,2018)。高原低涡便是在这种特殊地形作用下的产物,它的发展变化往往会对下游地区灾害性天气的发生产生重要影响,如低涡东移出高原造成暴雨、雷暴等天气(李国平,2002; 姚秀萍等,2014,何光碧等,2016)。此外四川盆地易受西南涡的影响而带来强降雨(Fu et al.,2019; 肖红茹等,2021),而西南涡的形成与发展也与高原低涡息息相关(Li et al.,2017; 郁淑华和高文良,2017)。研究高原低涡的初生、演变和移动

特征以及与大尺度环流变化的关系等,对深刻认识高原天气系统生消机理,改善青藏高原以 东地区的灾害性天气预报预警水平都具有重要意义。

青藏高原上站点稀疏、观测资料缺乏导致所需高原天气系统数据集存在不完整(图 1),比如高原东部测站较西部多,若通过人工分析天气图的方式识别天气系统,可能会造成生成于高原西部的天气系统记录缺失。近年来我国有不少学者尝试采取客观识别的方式建立高原天气系统数据集并取得不俗成果(林志强等,2013;马嘉理和姚秀萍,2015;Zhang et al.,2016;张博等,2018;刘自牧和李国平,2019;关良和李栋梁,2019;张硕等,2019;Fu et al.,2020;Lin Z et al.,2020,2021)。相比以往人工翻阅天气图的方式,客观识别方法最大的优点是能在一定程度上克服人工识别带来的不确定性,减轻人工识别的工作负担。

已有的高原低涡客观识别大多基于时间分辨率为 6h 的模式资料,而基于 ERA5 资料的客观识别尚不多见。利用 1h 分辨率的资料进行低涡识别与追踪,可以更加客观准确地追踪到高原涡的源地、移动路径和生消特征,在此基础上建立 30 年高原低涡数据库。另外,仅用固定的识别标准会带来在某些低涡过程中临近时次多个低值系统(扰动)干扰的问题,对路径的判定造成影响,本文也将探讨这一问题的解决方案。

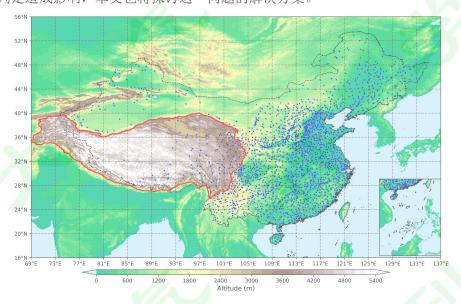


图 1 全国国家级地面气象观测台站分布

(站点地理坐标数据来源:国家气象科学数据中心;红色实线为青藏高原边界,边界数据来源见2.1)

Fig. 1 Distribution of national surface meteorological observation stations in China

(Source of geographic coordinate data: CMA Meteorological Data Centre; the solid red line shows the boundary of the Tibetan Plateau, see 2.1 for the source of boundary data)

### 2 资料与研究思路

#### 2.1 资料介绍

本文基于 ERA5 的 500 hPa 逐小时再分析资料进行客观识别, 时间跨度为 1990~2019 年

 $4\sim9$  月,水平分辨率为 0.25 °×0.25 °。 ERA5 相对于上一代再分析资料 ERA-Interim 而言,时间分辨率从 6 h 提高到 1 h,水平分辨率从 80 km 提高至 31 km (Hersbach et al., 2019, 2020; Han et al., 2021)。

青藏高原边界资料来源于国家青藏高原科学数据中心发布的青藏高原边界数据总集之子集 TPBoundary\_new(2021)(张镱锂等,2019)。作为验证客观识别数据库的参考依据,《青藏高原低涡切变线年鉴》(下文统称《年鉴》)由中国气象局成都高原气象研究所、中国气象学会高原气象学委员会编纂,涵盖了高原低涡与切变线当年的概况、路径、东移出高原影响及其引发的降水等资料信息,为我国青藏高原低涡、切变线的研究与应用提供了整体保障(彭广等,2017)。

#### 2.2 研究思路设计

客观识别的本质是特征提取与路径追踪。如图 2,步骤 a 与 b 属于"特征提取";步骤 c 与 d 属于"路径追踪"。设计思路是逐时次进行特征提取,得到每个时次的"准低涡";再通过对相邻时次准低涡的一一匹配,得到合理的低涡继承关系,即判断得出后一个时次(t)的低涡是前一个时次(t-1)的低涡的自然发展和延伸,从而组成一个完整的低涡序列。然后对所有低涡序列进行合理性判断,将不符合相关条件的过滤,最终建立数据库。

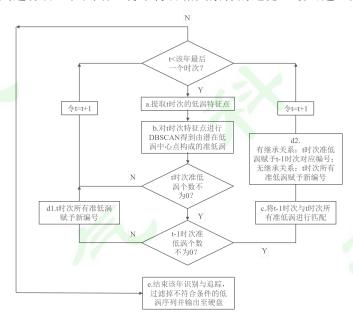


图 2 高原低涡客观识别程序流程

Fig. 2 Flow chart of the algorithm

## 3 高原低涡客观识别

#### 3.1 低涡特征的提取

高原低涡主要是出现在 500 hPa 上的低值系统,故针对 500hPa 层进行特征提取。总结

以往高原低涡的客观识别,有如下通用标准(林志强等,2013;张博等,2018;黄一航等,2018;刘自牧和李国平,2019;关良和李栋梁,2019):

- ①中心条件: 高原低涡的中心是位势高度的最小值或相对涡度最大值处;
- ②中心强度条件: 高原低涡中心位势高度小于 5870 gpm;
- ③闭合等高线条件: 高原低涡中心被至少一圈闭合等高线所包围;
- ④尺度条件: 高原低涡水平尺度为 400~500 km;
- ⑤气旋式条件: 高原低涡中心周围的风场呈气旋式旋转;
- ⑥归并条件:将同一时刻 400 或 500 km 以内所有准低压中心视为同一高原低涡系统;
- ⑦区域条件: 高原低涡发源于青藏高原范围内;
- ⑧持续时间条件: 高原低涡的持续时间在 12 或 18 h 以上。

对于任一时次 t, 特征提取有两个步骤:

步骤 a,提取特征点。取 6°N~64°N、46°E~154°E 涵盖了整个中国的矩形区域进行特征提取(图 3)。该区域相对于青藏高原区域向西延伸近 15°,是因为需要在步骤 e 中剔除发源地不在青藏高原地区(20°N~45°N,63°E~105°E)的低涡,避免将上游移动到青藏高原上的低涡误识别为高原低涡。向东侧延伸近 50°,则是便于后续开展移出高原的高原涡发展演变特征的研究。

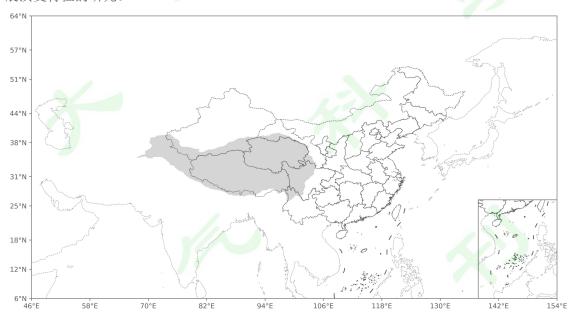


图 3 低涡特征提取的区域范围

Fig. 3 Area of the vortex feature extraction

在所选区域内,自西向东、自北向南遍历格点,若遍历到的待判定格点同时满足以下三个条件,则将其标记为特征点,并添加到集合 POT(potential,指潜在的低涡特征点)中,作为步骤 b 的输入:

条件 1,待判定格点位势高度值≤5870 gpm;条件 2,待判定格点被闭合等高线所包围 且处于位势高度低值中心;条件 3,待判定格点周围的风场满足气旋式旋转。 其中条件 2、3 借鉴 Bell and Bosart (1989) 判断气旋环流闭合与否的思路,采取"悬臂法"判断(图 4)。设当前待判定格点坐标为(m, n),向 8 个方向间隔 45°取长度为 r 的"悬臂", r 即"扫描半径"; z<sub>0</sub>为待判定格点的位势高度值,dz 为人为设定的最内圈闭合等高线与待判定格点的位势高度差值;k1、k2 和 k3 分别代表满足位势高度递增、等高线闭合以及风场气旋式旋转的悬臂数量;t1、t2 和 t3 作为上述变量的判定阈值。

这里举例说明如何利用"悬臂法"判断条件 2 和 3: 从正北方向的悬臂开始,以坐标(m-1, n)的格点为循环开端,判断(m-1, n)与前序格点(m, n)、最内圈闭合等值线位势高度值 z<sub>0</sub>+dz 的关系,记录该格点的纬向风速值;并移动到后序格点(m-2, n),重复上述过程,直至循环 到悬臂末端格点(m-r, n)。在该过程中,若悬臂上不存在任一格点,该格点的位势高度值小于前序格点,表明该方向上不满足位势高度递增条件,则 k1=k1+1;若悬臂上存在任一格点,该格点的位势高度值大于或等于包围待判定格点的最内圈闭合等值线的位势高度值 z<sub>0</sub>+dz,表明在该方向上限定距离内能达到最内圈闭合等高线,则 k2=k2+1;若整条悬臂上的平均纬向风速值小于 0,表明满足正北方向悬臂附近呈气旋式风场的条件,则 k3=k3+1;判断各悬臂气旋式风场的具体标准见表 1。

循环完当前悬臂后,按顺时针方向循环下一条,直至8个方向均判断完成。若k1、k2、k3 均达到各自判定阈值,则认为判定格点满足所有3个条件,将该格点标记为特征点,并将其坐标添加到集合POT中。选取单一扫描半径r=6°,将导致漏识别半径稍小的低涡。故新增扫描半径rs=4°,同时以两套标准进行特征点提取,可以较好地匹配不同尺寸低涡而又不至于产生过多误判。

m-r, n-r				m-r, n	15			m-r, n+r
	m-3, n-3			m-3, n			m-3, n+3	
		m-2, n-2		m-2, n		m-2, n+2		
			m-1, n-1	m-1, n	m-1, n+1			
m, n-r	m, n-3	m, n-2	m, n-1	m, n	m, n+1	m, n+2	m, n+3	m, n+r
			m+1, n-1	m+1, n	m+1, n+1			
		m+2, n-2	//A	m+2, n		m+2, n+2		
	m+3, n-3		1	m+3, n			m+3, n+3	
m+r, n-r				m+r, n				m+r, n+r

图 4 "悬臂法"示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the "Cantilever method"

#### 表 1 "悬臂法"判断气旋式风场的条件

Table 1	"Cantilever method"	to	judge t	the co	onditions	of c	cyclone	wind	field

	5 0		
悬臂方向	纬向风	经向风	经、纬向风
正北向	u<0	_	_
东北向	_		非 (u>0 和 v<0)
正东向	_	v>0	

东南向	_	_	非 (u<0 和 v<0)
正南向	u>0	_	_
西南向	_	_	非 (u<0 和 v>0)
正西向	_	v<0	_
西北向		_	非 (u>0 和 v>0)

步骤 b,特征点分簇。本文采用 DBSCAN(Density-Based Spatial Clustering of Applications with Noise) 算法进行特征点分簇。它是一种基于密度连通性质进行聚类的方法。该算法的核心在于定义密度相连的最大集合为"簇",通过 DBSCAN 能轻松地区分任意不同形状、大小的簇,且对噪声点有较好的适应性(Ester et al., 1996)。对提取出来的离散但又有明显分类的特征点,DBSCAN 的好处是聚类的时候无需预先指定簇的个数,且能得到不限个数的相邻的簇。为此需预设两个参数:邻域半径 Eps 和最小邻域包含点 MinPts。

经过试验,取 Eps=1、MinPts=4,即若所有以 1°为邻域半径范围内存在至少 4 个特征点,表明该区域存在较明显的低涡特征,将其视作准低涡。随后对步骤 a 的输出集合 POT进行聚类分析,将噪音点(密度连通区域之外的孤立点)剔除,得到不同的准低涡。然后将低涡特征点分别求平均得到一个坐标作为对应准低涡的低涡中心坐标。最后将 t 时次的准低涡添加到集合 NOW(指当前时次)中,这个集合包含了 t 时次所有提取出来的低涡中心坐标和对应的低涡特征点的坐标,将用于低涡的路径追踪。步骤 b 的效果可见图 5,特征点(图 5a)经过聚类分析,得到符合人类视觉区分的各准低涡(图 5b)。这些准低涡仍需经进一步判定以确定其具有真正的天气学意义。

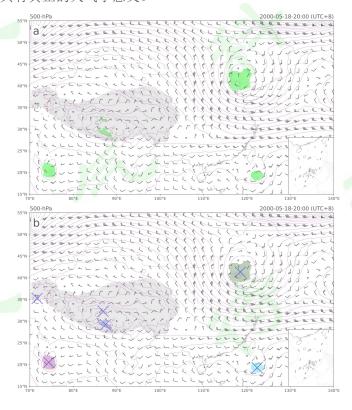


图 5 步骤 a 与步骤 b 的效果示意图

(a.绿色圆点为特征点; b.不同簇的特征点以不同颜色的圆点作区分,蓝色十字表示低涡中心,后文相同)

Fig. 5 Schematic diagram of the effect of step a and b

(a. Green dots represent the feature points; b. the feature points of different clusters are distinguished by dots of different colors, the blue crosses represent the center of the vortex, which is the same as the following)

#### 3.2 低涡的路径追踪

对于高原涡识别,仅有特定的识别标准会带来临近时次多个低压系统(扰动)干扰的问题,对路径的判定造成影响。步骤 c 和 d 的作用是将孤立的准低涡合理地连接成连续的低涡过程。步骤 c 判断相邻时次的不同低涡彼此之间的"继承关系",步骤 d 根据相邻时次之间低涡的继承关系为新识别的低涡进行编号。

步骤 c,继承关系分析(图 6)。执行步骤 c 的前提是 t-1 与 t 时次均有低涡,将 t-1 时次输出的集合 NOW 存作 PAST (指上一时次),t 时次输出记为 NOW,该步骤便是在 PAST 和 NOW 之间逐个判断各元素(低涡)以确定其继承关系。为了杜绝程序运行过程中低涡识别顺序的随机造成匹配影响,需先分别对 PAST 和 NOW 中的低涡元素进行降序排序,越靠前的低涡越先判断。PAST 中生命史越长、低涡特征点越多的低涡,越优先进行匹配,以防止距离较近或尺度较小的新生低涡"篡位"匹配造成低涡序列意外断裂。因为 NOW 是新识别的低涡,尚未匹配到任何一个低涡序列,无法判断其生命史长度,故其排序规则是:组成低涡的低涡特征点数量;若特征点数量相等,取低涡中心坐标的纬度值。

如图 6 所示,(i)PAST 和 NOW 的排序结束后,将 PAST 中未匹配到新识别低涡的低涡 P1、P2、P3···Pp 依次与未编号的 NOW 中的 N1、N2、N3···Nn 进行匹配,若 Pi 已有后续匹配或 Nj 已被编号,将其跳过。(ii)判断 Pi 与 Nj 的重合度是否足够高,以将 Nj 视作 Pi 合乎逻辑的继承低涡。根据两者间低涡特征点的重合个数,求出该值分别占 Pi 与 Nj 低涡特征点的比例;若两者比例之和≥0.5,表明 Nj 是 Pi 合理的延伸,执行(v),否则执行(iii)。重合度条件优先于(iii)中的较近距离条件,且具有排他性:只要 Nj 与 Pi 满足重合度条件,便结束当前对 Pi 的匹配。这是因为之前对 NOW 中低涡的排序,从而保证了有临近多个低涡的情况下选择半径大且重合度足够高的低涡作为继承者。

若未找到与 Pi 重合度足够高的 N<sub>j</sub>,并不能说明 P<sub>i</sub> 所在的低涡序列就此中断,因为步骤 a 与 b 可能将一个低涡 "拆分"成多个互相接近但又未聚类成一个完整低涡,均未能满足重合度条件。体现在天气图上是一个低涡所在的位势高度低值中心(闭合等高线)过于宽泛狭长,这种情况下程序可能将其识别为多个低涡。(iii)的目的是寻找可能由于此情况被"拆分"的低涡,依据是这些低涡之间是否"足够近"。具体做法是排除已编号的低涡后,将 NOW余下的低涡与 Pi 比较,若两者之间的距离足够近,则将两者添加到新集合 CLOSE\_NOW。若存在这种低涡,执行(iv),否则可认为 Pi 无法找到任何继承,返回(i)选择下一个未匹配的Pi 重新判断。(iv)将 CLOSE\_NOW 中的低涡合并为一个新的低涡 Nj 并加入到 NOW,其中该新 Nj 的低涡特征点是 CLOSE\_NOW 中所有低涡特征点的并集,同时将集合 CLOSE\_NOW

从集合 NOW 中剔除。(v)将 Nj 视为 Pi 的继承, 赋予和 Pi 相同的编号,这里的 Nj 可以是(ii)输出的与 Pi 重合度足够高的 Nj,或(iv)中合并被"拆分"的低涡。

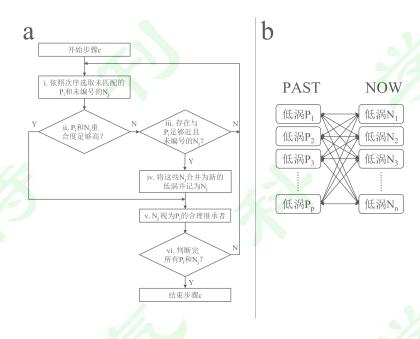


图 6 步骤 c 流程(a)及匹配示意图(b)

Fig. 6 a. Flow chart of step c; b. schematic diagram of vortex matching

步骤 d, 低涡编号处理。此步骤用于赋予新识别的低涡以编号,即处理其与现有低涡序列之间的关系。本算法建立低涡序列的方式是将所有同属一个低涡过程的低涡赋予相同编号,并将这些低涡按时间顺序堆叠到线性表中,并以低涡编号作标签加以区分(流程图略)。

#### 3.3 低涡数据库的构建

通过循环反复执行特征提取以及路径追踪,可完成对选取年份低涡的客观识别,最终得到该年的所有低涡序列。将该年的符合要求的低涡序列输出到文本文件中,构建低涡数据库;做法是将元素个数小于12的低涡序列剔除,即保留低涡时长为12小时及其以上的低涡过程,同时只保留第一个元素位于青藏高原边界线范围内的低涡序列,即尽量将外部区域移入高原的低涡或低压系统过滤,仅保留发源地位于青藏高原地区的低涡。高原低涡资料库按年份输出,格式是txt文本格式,包含图7中的低涡信息。

为了判断低涡的发源地是否位于高原地区,以及发展过程中是否移出高原,本文根据 2.1 提到的青藏高原边界文件,构建一个与 ERA5 资料同型的矩阵 BORDER,格点由数值 0 和 1 构成,位于青藏高原边界内的格点标记为 1,否则为 0;界定一个低涡位于高原地区内与否,判断该组成低涡的低涡特征点映射到矩阵 BORDER 上是否存在至少一个数值为 1 的格点,若是,视为该低涡位于高原地区内,否则位于高原地区之外。该方法不是简单地通过低涡中心位于高原边界内(青藏高原边界线或青藏高原矩形范围)与否判断,能有效地降低只取一个坐标作判断带来的偶然性(图 8)。

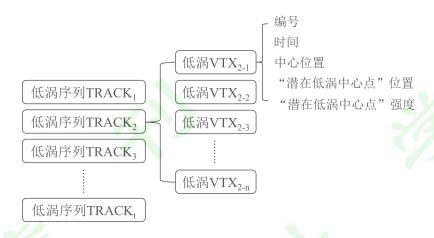


图 7 低涡序列数据结构示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the vortex sequence data structure

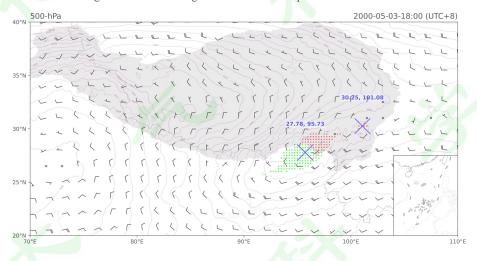


图 8 低涡与高原地区空间关系示意图

(红、绿色圆点分别表示特征点位于高原内、外)

Fig. 8 Schematic diagram of the spatial relationship between the vortex and the plateau area

(The red and green dots indicate that the feature points are located inside and outside the plateau respectively)

## 4 低涡客观识别效果检验

选取 2017 年暖季(5~9 月),对比分析《年鉴》与本文采用的客观识别方法得到的低 涡数量、月分布特征以及源地特征等,并讨论其差异原因。

#### 4.1 数量特征

如图 9 所示,在 2017 年暖季《年鉴》共识别到 31 个高原低涡,其中有 13 个移出青藏高原地区;而客观识别方法识别出了 63 个,移出个数为 17。《年鉴》的低涡高发月为 6 月,共 12 个,其次为 5、7 月,分别为 10、7 个;客观识别低涡的高发月为 7 月,共 18 个,其次为 5、6 月,分别为 17、16 个。8 月的客观识别低涡有 8 个,是《年鉴》的 4 倍,9 月《年鉴》未记录到高原低涡,客观识别分析出了 4 个。两者 5~7 月低涡整体数量均远大于 8、9

月,分别约占暖季低涡数量的 94%与 81%。另外,《年鉴》和客观识别均显示,移出高原地区的低涡主要在 5~7 月,分别约占全部移出的 100%与 94%,8 月均无高原低涡移出高原。

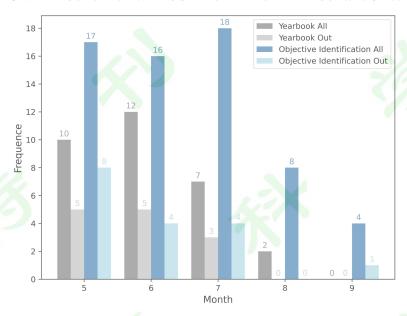


图 9 2017 年暖季《年鉴》低涡与客观识别低涡月际变化特征对比

(深、浅灰色柱分别表示《年鉴》低涡的总数量及移出数量,深、浅蓝色柱分别表示客观识别低涡的 总数量及移出数量)

Fig. 9 Monthly changes of the YB-TPV and the OI-TPV in warm season, 2017

(Dark and light gray columns represent the total and move-out number of the YB-TPV respectively, dark and light blue columns represent the total and move-out number of the OI-TPV respectively)

#### 4.2 源地特征

按照《年鉴》中的源地定义,将中心位置生成在 92.5 °E 以东 (包括 92.5 °E) 和 92.5 °E 以西的高原低涡分别定义为 "东部型"和 "西部型"高原低涡。由表 2 可看出,《年鉴》中 2017 年暖季低涡约有 2/3 属于"东部型"。客观识别相较于《年鉴》多识别出来的低涡多位于高原西北侧地区(图 10)。低涡绝大多数为"西部型",共有 56 个发源于 92.5 °E 以西,为"东部型"的 8 倍,各月的"西部型"客观识别低涡数量也远大于"东部型"。东、西部型低涡移出数量占比与总移出数量占比接近,在这一点上《年鉴》与客观识别低涡具有相似的规律。

表 2 2017 年暖季《年鉴》低涡与客观识别低涡不同源地及其移出特征对比

Table 2 Source type and moving out characteristics of the YB-TPV and the OI-TPV in warm season, 2017

	年鉴					客观识别			
	东部型		西部型		东部型		西部型		
	总数	移出	总数	移出	总数	移出	总数	移出	
5月	5	3	5	2	3	2	14	6	
6月	11	4	1	1	1	0	15	4	

7月	3	1	4	2	2	0	16	4
8月	1	0	1	0	1	0	7	0
9月	0	0	0	0	0	0	4	1
总	20	8	11	5	7	2	56	15
体								

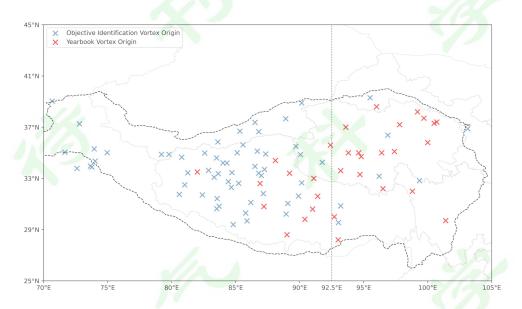


图 10 2017 年暖季《年鉴》低涡与客观识别低涡源地分布特征对比 (红色、蓝色分别表示《年鉴》低涡及客观识别低涡)

Fig. 10 Distribution characteristics of the YB-TPV and the OI-TPV in warm season, 2017

(Red and blue represent the YB-TPV and the OI-TPV respectively)

综上所述,客观识别低涡数量的月分布特征与《年鉴》相似,但数量远大于后者。两者的源地差异较大,客观识别中"西部型"低涡远多于《年鉴》。究其原因,《年鉴》的制定主要基于观测数据,由于青藏高原西北部观测站点严重匮乏,导致生成于西北部的低涡被漏识别,致使《年鉴》识别到的低涡比客观识别少,且源地为"西部型"低涡也明显偏少。Lin et al. (2020)通过对多种再分析资料进行高原低涡客观识别发现,更高分辨率的资料能识别出更多的低压系统。可见《年鉴》与客观识别低涡的差异与所用资料的时空分辨率不同也有一定关系。更精细的网格尺度能将低涡在更早的生命时期提取出来,可能会将《年鉴》中的"东部型"低涡进一步追溯到更靠西的位置。此外,低涡识别数量的差异也与具体的识别标准有一定关系。

#### 4.3 个例特征

《年鉴》采取人工统计天气图的方式分析高原低涡,时次为每日的 08 与 20 时,分析间隔为 12 h。将 2017 年暖季《年鉴》低涡与客观识别低涡作比较,若两者路径重合的时间占总持续时长 1/2 以上,则认为两者为同一低涡过程;路径重合指任一时次《年鉴》低涡的中心坐标位于客观识别低涡中心半径为 6°范围内,且环流场符合此处识别出低涡的标准,便

可认为两者属同一个低涡。根据此标准,得到个例对比结果。

用客观识别方法识别到 2017 年 23 个《年鉴》低涡,占《年鉴》低涡总数的 74%。其中不乏 C1717 与 C1737 这样典型的长生命史低涡过程(图 11)。按前文标准,编号为 C1718 和 C1719 的《年鉴》低涡实际同属一个低涡过程,即客观识别中编号为 06 的低涡。5 月 18 日 08 时 C1718《年鉴》低涡位于 33.5 °N,82.0 °E,同时刻的编号为 06 的客观识别低涡中心位于 35.4 °N,85.4 °E(图 12a)。编号为 06 的低涡半径约 6 个经纬距范围内并无其他低涡的环流以及风场特征,结合图 12b,只有 C1718 处在该范围内,而其所在位置既不满足低涡的闭合等高线低值中心原则,也不满足周围风场逆时针原则。

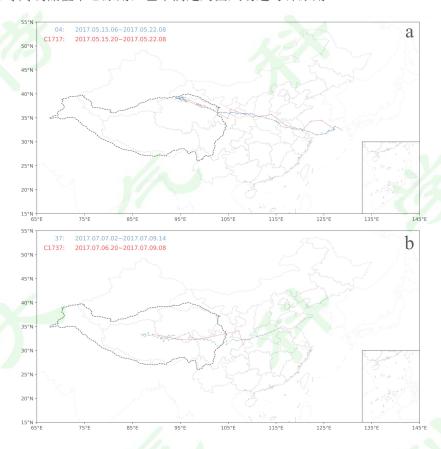


图 11 两个典型高原低涡移出个例的《年鉴》与客观识别路径对比示意图 (分别以红、蓝色区分《年鉴》及客观识别低涡,下同)

Fig. 11 Comparison of paths between two typical move-out-TPV drawn by the Yearbook and the objective identification

(Red and blue were used to distinguish the YB-TPV and the OI-TPV, the same as below)

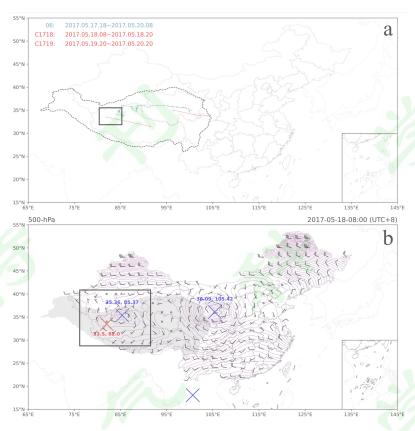


图 12 编号为 C1718、C1719 的《年鉴》低涡与编号 06 的客观识别低涡路径对比(a)及 2017 年 5 月 18 日 08 时两者中心位置示意图(b)

Fig. 12 a. Comparison of paths between the YB-TPV numbered C1718 and C1719 and the OI-TPV numbered 06;b. comparison of the center position of both at 08: 00 on May 18, 2017

## 5 总结与讨论

本文设计出一套适配高时空分辨率网格资料的低涡客观识别算法。该算法分为两个核心步骤:特征提取以及路径追踪,核心思想是对每个单独时次的再分析资料进行特征分析,提取出分成不同簇的低涡特征点,其次将相邻时刻之间的簇作匹配度分析,将孤立的低涡连接成动态的、发展的低涡过程。

本算法设定两套标准同步对格点进行特征提取,配合后续的路径追踪,做到尽可能不遗漏不同发展阶段的低涡。对低涡特征点进行 DBSCAN 聚类分析,可以较好区分不同形状和大小的簇,避免了用单个点作为低涡中心带来的不准确性。连接配对相邻时次的孤立低涡时不是简单地根据中心点距离进行判断,而是优先考虑两个低涡间的重合程度,能有效降低错误匹配。当遇到邻近多个低涡或低值系统干扰低涡连接匹配时,采用定义继承指数的方法,充分考虑前序低涡的既往生命时长及尺度,尽量避免新得到的低涡过程丢弃长生命史前序低涡的情况。以低涡特征点的平均位置代表低涡中心,能一定程度使低涡中心精确地位于闭合等高线的中心。同时用这些特征点与高原边界线的重合与否来定义低涡是否移出高原,能有效降低只用低涡中心进行判断而造成的误判。

本文客观识别采用资料的时间分辨率为 1h,格点也较前人使用的资料更为精细,故有可能将低涡在更早的生命时期提取出来,将《年鉴》中的"东部型"低涡进一步追溯到更靠西的位置。月际变化规律趋势与《年鉴》较为一致,典型的长生命低涡能被正确识别,因此可认为本文设计的高原低涡客观识别算法及其数据库具备一定的参考价值与实用意义。

#### 参考文献 (References)

- Bell G D, Bosart L F. 1989. A 15-year climatology of Northern Hemisphere 500 mb closed cyclone and anticyclone centers[J]. Monthly Weather Review, 117(10): 2142-2164. doi:10.1175/1520-0493(1989)117<2142:ayconh>2.0.co;2.
- Ester M, Kriegel HP, Sander J, et al. 1996. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise[C]//kdd. 96(34): 226-231.
- Fu S M, Mai Z, Sun J H, et al. 2019. Impacts of convective activity over the Tibetan Plateau on plateau vortex, southwest vortex, and downstream precipitation[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 76(12): 3803-3830. doi:10.1175/JAS-D-18-0331.1.
- Fu S M, Zhang J P, Tang H, et al. 2020. A new mesoscale-vortex identification metric: restricted vorticity and its application[J]. Environmental Research Letters, 15(12): 124053. doi:10.1088/1748-9326/abcac6.
- 关良,李栋梁. 2019. 青藏高原低涡的客观识别及其活动特征[J]. 高原气象,38(1): 55-65. Guan Liang,Li Dongliang. 2019. Objective identifying and activity characteristics of Qinghai-Tibetan Plateau vortex[J]. Plateau Meteorology(in Chinese), 38(1): 55-65. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2018.00067.
- 何光碧,曾波,郁淑华,等. 2016. 青藏高原周边地区持续性暴雨特征分析[J]. 高原气象, 35(4): 865-874. He Guangbi, Zeng Bo, Yu Shuhua, et al. 2016. Analysis of durative rainstorm characteristics occurred in the ambient area of Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteorology(in Chinese), 35(4): 865-874. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2015.00081.
- 黄一航,陈权亮,汪正林,等. 2018. 1979—2016年青藏高原低涡的变化特征研究[J]. 暴雨灾害, 37(2): 97-104. Huang Yihang, Chen Quanliang, Wang Zhenglin, et al. 2018. Variation characteristics of Tibetan Plateau vortex during 1979-2016[J]. Torrential Rain and Disasters(in Chinese), 37(2): 97-104. doi:10.3969/j.issn.1004-9045.2018.02.001.
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2019. Global reanalysis: goodbye ERA-Interim, hello ERA5[J]. ECMWF newsletter, 159: 17-24.
- Hersbach H, Bell B, Berrisford P, et al. 2020. The ERA5 global reanalysis[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 146(730): 1999-2049. doi: 10.1002/qj.3803.
- Han Y J, Yang Q K, Liu N N, et al. 2021. Analysis of wind-speed profiles and optical turbulence above Gaomeigu and the Tibetan Plateau using ERA5 data[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 501(4): 4692-4702. doi:10.1093/mnras/staa2960.
- 李国平. 2002. 青藏高原动力气象学 [M]. 北京: 气象出版社, 22-23. Li Guoping. 2002. Dynamic Meteorology

- of the Tibetan Plateau(in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 22-23.
- Li L, Zhang R H, Wen M. 2017. Genesis of southwest vortices and its relation to Tibetan Plateau vortices[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 143(707): 2556-2566. doi:10.1002/qj.3106.
- Li L, Zhang R H, Wen M, et al. 2018. Effect of the atmospheric quasi-biweekly oscillation on the vortices moving off the Tibetan Plateau[J]. Climate dynamics, 50(3): 1193-1207. doi:10.1007/s00382-017-3672-3.
- 林志强,周振波,假拉. 2013. 高原低涡客观识别方法及其初步应用[J]. 高原气象,32(06): 1580-1588. Lin Zhiqiang, Zhou Zhenbo, Jia La. 2013. Objective identifying method of Qinghai-Xizang Plateau vortex using NCEP/NCAR reanalysis dataset[J]. Plateau Meteorology(in Chinese),32(06): 1580-1588. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00153.
- Lin Z Q, Guo W D, Jia L, et al. 2020. Climatology of Tibetan Plateau vortices derived from multiple reanalysis datasets[J]. Climate Dynamics, 55(7): 2237-2252. doi:10.1007/s00382-020-05380-6.
- Lin Z Q, Yao X P, Guo W D, et al. 2021. Vertical structure of Tibetan Plateau Vortex in boreal summer[J]. Theoretical and Applied Climatology, 145(1): 427-440. doi:10.1007/s00704-021-03640-x.
- 刘自牧,李国平. 2019. 高原切变线的客观识别与时空分布的统计分析[J]. 大气科学, 43(1): 13-26. Liu Zimu, Li Guoping. 2019. Objective identification of the Tibetan Plateau shear line and statistical analysis of its spatiotemporal evolution features[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences(in Chinese), 43(1): 13-26. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1704.17209.
- 马嘉理,姚秀萍. 2015. 1981-2013年6-7月江淮地区切变线及暴雨统计分析[J]. 气象学报, 73(5): 883-894. Ma Jiali, Yao Xiuping. 2015. Statistical analysis of the shear lines and torrential rains over the Yangtze-Huaihe river region during June-July in 1981-2013[J]. Acta Meteorologica Sinica(in Chinese), 73(5): 883-894. doi:10.11676/qxxb2015.065.
- 潘保田,李吉均. 1996. 青藏高原: 全球气候变化的驱动机与放大器--III. 青藏高原隆起对气候变化的影响[J]. 兰州大学学报: 自然科学版, 32(1): 108-115. Pan Baotian, Li Jijun. 1996. Qinghai-Tibetan Plateau: A Driver and Amplifier of the Global Climatic Change——III. The effects of the uplift of Qinghai-Tibetan Plateau on Climatic Changes[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sicences, 32(1): 108-115.
- 彭广,李跃清,郁淑华. 2019. 青藏高原低涡切变线年鉴. 2017[M]. 科学出版社. Peng Guang, Li Yueqing, Yu Shuhua. 2019. The Tibetan Plateau Vortex and Shear Line Yearbooks. 2017[M]. Beijing: Science Press.
- 肖红茹, 王佳津, 肖递祥, 等. 2021. 四川盆地暖区暴雨特征分析[J]. 气象, 47(3): 303-316. Xiao Hongru, Wang Jiajin, Xiao Dixiang, et al. 2021. Analysis of warm-sector rainstorm characteristics over Sichuan Basin[J]. Meteorological Monthly(in Chinese), 47(3): 303-316. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2021.03.004.
- Ye D Z. 1981. Some characteristics of the summer circulation over the Qinghai-Xizang (Tibet) Plateau and its neighborhood[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 62(1): 14-19. doi:10.1175/1520-0477(1981)062<0014:scotsc>2.0.co;2.

- 叶笃正, 高由禧. 1979. 青藏高原气象学 [M]. 北京: 科学出版社. Ye Duzheng, Gao Youxi. 1979. Meteorology of the Tibetan Plateau(in Chinese) [M]. Beijing: Science Press.
- 姚秀萍,孙建元,康岚,等. 2014. 高原切变线研究的若干进展[J]. 高原气象,33(1): 294-300. Yao Xiuping, Sun Jianyuan, Kang Lan, et al. 2014. Advances on research of shear convergence line over Qinghai-Xizang Plateau[J]. Plateau Meteorology(in Chinese), 33(1): 294-300. doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00164.
- 郁淑华, 高文良. 2017. 高原低涡与西南涡结伴而行的不同活动形式个例的环境场和位涡分析[J]. 大气科学, 41(04): 831-856. Yu Shuhua, Gao Wenliang. 2017. Analysis of environmental background and potential vorticity of different accompanied moving cases of Tibetan Plateau vortex and southwest China vortex[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences(in Chinese), 41(04): 831-856. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1612.16213.
- 朱乾根,林锦瑞,寿绍文. 2007. 天气学原理和方法 (第四版)[M]. 气象出版社. Zhu Qiangen, Lin Jinrui, Shou Shaowen. 2007. Principles and methods of meteorology(4th edition)[M]. Beijing: China Meteorological Press.
- Zhang P F, Li G P, Fu X H, et al. 2014. Clustering of Tibetan Plateau vortices by 10–30-day intraseasonal oscillation[J]. Monthly Weather Review, 142(1): 290-300. doi:10.1175/MWR-D-13-00137.1.
- Zhang X, Yao X P, Ma J L, et al. 2016. Climatology of transverse shear lines related to heavy rainfall over the Tibetan Plateau during boreal summer[J]. Journal of Meteorological Research, 30(6): 915-926. doi:10.1007/s13351-016-6952-7.
- 张博,李国平,段炼,等. 2018. 基于客观识别技术的高原低涡近30 a气候特征[J]. 兰州大学学报:自然科学版,54(1): 104-111. Zhang Bo, Li Guoping, Duan Lian, et al. 2018. Climatic characteristics of Tibetan Plateau vortex based on the objective identification in the recent 30 years[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sicences, 54(1): 104-111. doi:10.13885/j.issn.0455-2059.2018.01.016.
- 赵平,李跃清,郭学良,等. 2018. 青藏高原地气耦合系统及其天气气候效应:第三次青藏高原大气科学试验[J]. 气象学报,76(6):833-860. Zhao Ping, Li Yueqing, Guo Xueliang, et al. 2018. The Tibetan Plateau surface-atmosphere coupling system and its weather and climate effects:The Third Tibetan Plateau Atmospheric Scientific Experiment[J]. Acta Meteorologica Sinica(in Chinese),76(6):833-860. doi:10.11676/qxxb2018.060.
- 张硕,姚秀萍, 巩远发. 2019. 基于客观判识的青藏高原横切变线结构及演变特征合成研究[J]. 气象学报, 77(6): 1086-1106. Zhang Shuo, Yao Xiuping, Gong Yuanfa. 2019. A synthetic study of the structure and evolution characteristics of a meridionally-oriented shearline over the Tibetan Plateau based on objective identification[J]. Acta Meteorologica Sinica(in Chinese), 77(6): 1086-1106. doi:10.11676/qxxb2019.058.
- 张镱锂. (2019). 2019. 青藏高原边界数据总集. 国家青藏高原科学数据中心. Zhang Y L. (2019). 2019. Integration dataset of Tibet Plateau boundary. National Tibetan Plateau Data Center. doi:10.11888/Geogra.tpdc.270099. CSTR: 18406.11.Geogra.tpdc.270099.