

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.

高原切变线的客观识别与时空分布的统计分析

刘自牧¹ 李国平^{1,2}

¹ 成都信息工程大学大气科学学院, 成都 610225

² 南京信息工程大学气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044

摘 要 本文利用计算机客观识别技术, 稳定地识别出高原切变线并分析了高原切变线的气候特征。通过对比三套常用的高分辨率再分析资料 (ERA-Interim、NCEP CFSR 和 JRA-55) 在高原地区中低层大气的适用性, 筛选出与高原地区 500 hPa 风场较为吻合的 NCEP CFSR (National Centers for Environmental Prediction Climate Forecast System Reanalysis) 再分析资料作为基础数据, 根据人工判识切变线的基本标准与计算机几何学知识, 定义了高原切变线的客观识别标准。对客观识别出的 2005~2015 年高原切变线与《青藏高原低涡切变线年鉴》中的结果进行对比分析与验证, 并在此基础上统计分析了近 11 年高原切变线的气候特征。高原切变线年均生成 49.4 条, 其中东部型切变线年均 38 条, 是高原切变线的基本型; 高原切变线维持时间多为 6 h; 切变线两侧的水平散度、垂直涡度和总变形三个物理量的大值区均出现在 94°~95°E。客观识别高原切变线的方法可以较为高效地识别高原切变线, 为高原切变线研究提供了新的途径。

关键词 高原切变线 客观识别 CFSR 再分析资料 时空分布 气候特征

文章编号 1006-9895(2019)01-0013-14

中图分类号 P445

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1704.17209

Objective Identification of the Tibetan Plateau Shear Line and Statistical Analysis of Its Spatiotemporal Evolution Features

LIU Zimu¹ and LI Guoping^{1,2}

¹ School of Atmosphere Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

² Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

Abstract This study aims to objectively and efficiently identify the TPSL (Tibetan Plateau shear line) and analyze the climatic characteristics of the TPSL. Based on comparison of the applicability of three high resolution reanalysis datasets (ERA-Interim, NCEP CFSR, and JRA-55) commonly used in the Tibetan Plateau area, the CFSR reanalysis dataset is selected as the basic dataset. According to the basic standard for manual identification of shear line and knowledge of computer geometry, an objective identification standard for TPSL is determined. The objectively identified TPSLs during 2005–2015 are compared with the TPSLs shown in the Tibetan Plateau Vortex and Shear Line Yearbook. On the basis of the comparison and verification, climatic characteristics of the TPSL in the recent 11 years are statistically analyzed. The annual average number of TPSLs is 49.4, among which 38 are eastern-type, which is also the basic type of TPSL. The

收稿日期 2017-08-05; 网络预出版日期 2018-05-07

作者简介 刘自牧, 1991 年出生, 男, 硕士研究生, 主要从事天气动力学、高原天气方面的研究。E-mail: 495067026@qq.com

通讯作者 李国平, E-mail: liguoping@cuit.edu.cn

资助项目 国家重点研究发展计划项目 2018YFC1507200, 国家自然科学基金项目 41675057、41675042、41765003

Funded by National Key R&D Program of China (Grant 2018YFC1507200), National Natural Science Foundation of China (Grants 41675057, 41675042, 41765003)

maintenance time of the TPSL is 6 h usually. Areas of large total deformation, vertical vorticity, and horizontal divergence all are located between 94°–95°E. The objective TPSL identification method can efficiently identify the TPSL, and provides a new way to study the TPSL.

Keywords Tibetan Plateau shear line, Objective identification, CFSR reanalysis dataset, Spatiotemporal evolution, Climatic features

1 引言

青藏高原的特殊地形和地气相互作用,对东亚地区乃至全球气候都产生着影响(叶笃正和高由禧,1979)。青藏高原切变线(简称高原切变线,有时也简称切变线)是青藏高原特有的天气系统,高原切变线通常指 500 hPa 等压面上 3 站以上风向对吹的辐合线,长度大于 5 个经/纬度,地面 24 小时变温、变压很小。夏季高原暴雨、冬季高原暴雪都与高原切变线活动密切相关。在有利的环流形势下,该系统的东移发展以及与其他天气系统的相互作用,往往对高原下游地区天气产生重要影响(何光碧等,2009)。近年来对高原切变线的研究取得了不少成果。何光碧等(2009)分析高原切变线观测事实指出,高原切变线主要出现在海拔较高或地形坡度陡峭的地区,高原切变线活动频数及其所带来的降水频数比高原低涡更多。高原切变线一般呈现为横切变线和竖切变线两种形式。高原横切变线一般少动,维持时间较长,降水量较大。高原竖切变线主要形成于伊朗高压和西太平洋副热带高压西伸脊之间的青藏高原地区(朱乾根,1992),与降水带有很好的对应关系。因此,对高原切变线的深入研究不仅是高原天气研究的一个重要科学问题,对提高青藏高原及周边地区天气预报、气候预测水平也有重要实际意义。

青藏高原自然条件恶劣,天气变化复杂,且高原气象观测站稀疏,尤其是在高原西部地区十分缺乏探空气象资料,使高原天气系统的研究受到很大限制。以往认为横切变线只存在于高原东部,而青藏高原气象科学研究拉萨会战组(1981)统计表明横切变线是横贯整个高原的。随着高分辨率再分析资料的迅速发展,越来越多的学者开始应用再分析资料对天气系统以及高原天气系统进行客观识别研究(林志强等,2013;马嘉理和姚秀萍,2015;林志强,2015;Zhang et al.,2016;张博和李国平,2017),但关于高原切变线客观识别的研究还不多见(Zhang et al.,2016)。本文首先通过对比目前常用的三套高分辨率再分析资料在高原地区的适用

性,筛选出一套对高原地区 500 hPa 风场描述效果较好的再分析资料,再结合天气学、计算机几何学等知识,建立一种高原切变线客观识别方法。对识别出的高原切变线与《青藏高原低涡切变线年鉴》(彭广等,2005~2015)(以下简称《年鉴》)进行对比分析与验证,统计分析了近 11 年高原切变线的气候学特征,希望对深化目前研究较少的这类高原天气系统的科学认识和业务应用有所裨益。

2 资料选取和对比

青藏高原由于其特殊的自然地理环境,气象观测较为缺乏。近年来,随着再分析资料尤其是高分辨率再分析资料在研究高原中尺度天气系统的逐步运用(Feng et al.,2014,2016;李国平等,2014;Zhong et al.,2014;Lin,2015;荀学义等,2011),为高原气象学的研究提供了新的途径。尽管再分析资料在一定程度上可以弥补目前高原地区观测资料“总体偏少并且西部更少”的缺陷,但由于高原地区的复杂性,再分析资料在高原地区的质量仍不够理想,特别是对于研究中小尺度天气系统的可靠性仍存不少疑问。为在现有资料条件下推进高原切变线客观识别的研究工作,我们首先将目前应用较广的三套高分辨率再分析资料(ERA-Interim、NCEP CFSR 和 JRA-55)与气象探空观测资料进行对比分析,筛选出一套与实况最吻合的再分析资料,作为进一步开展高原切变线客观识别与统计工作的资料基础。

本研究选取的三套高分辨率再分析资料为:欧洲中期数值预报中心(ECMWF)ERA-Interim 资料,美国国家环境预报中心(NCEP)CFSR 资料,以及日本气象厅 JRA-55 资料。CFSR 数据时间范围为 1979 年 1 月至 2010 年 12 月;NCEP 为了延续 CFSR 数据可用的时间长度,采用与 CFSR 同样的模式,继续推出 2011 年之后的数据,命名为 CFSv2 (Climate Forecast System Version2)。CFSR、CFSv2 两套数据无论是数据格式、分辨率还是模式方法都是相同的,本文选取的 2005~2015 年数据,2011

年之前为 CFSR 数据，2011 年之后为 CFSv2 数据，以下将两者统称为 CFSR 数据。本文主要选取三套数据中的风场资料，时间间隔均为每 6 h 一次(0000 UTC、0600 UTC、1200 UTC、1800 UTC)，其中前两套资料空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (经度 \times 纬度)，JRA-55 资料空间分辨率为 $1.25^\circ \times 1.25^\circ$ (经度 \times 纬度)。本文选取 2005~2015 年 500 hPa 再分析风场资料与源自国家气象信息中心的探空资料进行对比分析，自西向东选取定日 (28.6°N , 87.1°E)、拉萨 (29.7°N , 91.1°E)、那曲 (31.5°N , 92.1°E)、林芝 (29.6°N , 94.5°E)、玉树 (33.0°N , 97.0°E)、昌都 (31.2°N , 97.2°E)、巴塘 (30.0°N , 99.1°E)、达日 (33.8°N , 99.6°E)、甘孜 (31.7°N , 100.0°E)、红原 (32.8°N , 102.6°E) 10 个站点每日的风场来代表高原地区风场的情况。利用线性插值法，将再分析资料的格点数据插值到选取的探空站点。由于再分析资料是一日 4 次(0000 UTC、0600 UTC、1200 UTC、1800 UTC)，观测资料为一日 2 次(0000 UTC、1200 UTC)，本文选用了再分析资料的 0000 UTC、1200 UTC 两个时次与对应的观测资料进行对比验证。具体方法是，风速(风向)的平均值：一年内所选取 10 个站点每日两个时次的风速(风向)平均值，再对 10 个站点的风速(风向)进行平均；风速的平均偏差 (E_{MB})：先计算出各站点逐时次再分析资料与实况资料风速的年平均偏差，再求 10 个站点年平均偏差的平均值作为该再分析资料一年内的平均偏差。风速的平均绝对偏差 (E_{MA})、相关系数 (R) 的求法与平均偏差的算法类似。通过计算平均偏差、平均绝对偏差、相关系数等统计指标对三套再分析数据与站点观测

值进行评估。

$$E_{\text{MB}} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - y_i)}{n}, \quad (1)$$

$$E_{\text{MA}} = \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - y_i|}{n}, \quad (2)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (3)$$

其中， n 是时间序列长度， (x_1, x_2, \dots, x_n) 和 (y_1, y_2, \dots, y_n) 分别表示再分析数据和台站观测数据。

高原切变线可定义为 500 hPa 等压面上 3 站以上风向对吹的辐合线。不难看出，风场是切变线识别的最重要因子。因此本文从风场着手，利用风速的平均值、平均绝对误差、相关系数等统计方法，将三套高分辨率再分析资料的 500 hPa 风场数据分别与气象台站的风观测资料进行对比。结果如表 1 所示，三套再分析资料与观测资料均较吻合，ERA-Interim 资料和 CFSR 资料对高原 500 hPa 风速的表现程度总体要比 JRA-55 资料好。另外，如表 2 所示，CFSR 资料对高原 500 hPa 风向的刻画能力均优于另外两套再分析资料。因此本文选用 CFSR 资料对高原切变线进行客观识别。

3 高原切变线客观识别方法

3.1 高原切变线识别标准

以往对高原切变线的识别通常采用人工识别的方式，尽管人工识别高原切变线这一方法工作量

表 1 2005~2015 年再分析资料风速与实况对照表

Table 1 Comparison of wind speeds between reanalysis data and observations during 2005–2015

年份	平均值/ m s^{-1}				平均偏差/ m s^{-1}			平均绝对偏差/ m s^{-1}			相关系数		
	观测资料	ERA-Interim	CFSR	JRA-55	ERA-Interim	CFSR	JRA-55	ERA-Interim	CFSR	JRA-55	ERA-Interim	CFSR	JRA-55
2005	7.86	7.72	7.99	7.48	-0.14	0.13	-0.38	0.75	0.96	1.28	0.92	0.92	0.91
2006	8.07	7.76	7.8	8.55	-0.31	-0.27	0.48	0.89	0.935	1.87	0.95	0.96	0.93
2007	7.55	7.68	7.61	7.79	0.13	0.06	0.24	0.83	0.74	0.85	0.93	0.94	0.92
2008	8.48	8.33	8.75	8.95	-0.15	0.27	0.47	0.72	0.91	1.73	0.96	0.91	0.9
2009	7.14	7.46	7.56	6.96	0.32	0.42	-0.18	1.22	1.08	0.87	0.92	0.91	0.94
2010	8.41	8.15	8.54	8.11	-0.26	0.13	-0.3	0.97	0.89	0.95	0.93	0.95	0.93
2011	8.36	8.08	7.94	7.44	-0.28	-0.42	-0.92	0.69	0.88	1.54	0.95	0.92	0.9
2012	7.93	8.14	7.99	7.74	0.21	0.06	-0.19	0.94	0.58	0.71	0.93	0.95	0.91
2013	8.34	8.22	8.59	7.53	-0.12	0.25	-0.81	0.73	0.96	1.71	0.94	0.93	0.92
2014	8.25	8.14	8.49	7.94	-0.11	0.24	-0.31	0.81	0.97	1.43	0.96	0.95	0.91
2015	8.16	7.95	8.54	7.74	-0.21	0.38	-0.42	0.84	0.93	1.07	0.95	0.95	0.93

表 2 2005~2015 年再分析资料风向与实况对照。记北风风向为 0° ，并沿顺时针方向风向度数逐渐增大

Table 2 Comparison of wind directions between reanalysis data and observations during 2005–2015. The northerly wind direction is 0° , the values of wind direction increase clockwise

年份	年平均风向			
	观测资料	ERA-Interim	CFSR	JRA-55
1982	254.3°	256.1°	254.6°	258.1°
1983	255.1°	258.5°	254.7°	260.7°
1984	256.2°	254.3°	254.8°	262.7°
1985	254.6°	249.9°	257.7°	261.5°
1986	254.4°	251.8°	253.0°	258.1°
1987	252.9°	257.8°	254.8°	259.0°
1988	253.1°	257.2°	255.4°	260.7°
1989	251.7°	255.2°	249.1°	257.5°
1990	255.7°	259.1°	254.9°	257.2°
1991	250.9°	251.3°	254.6°	251.8°
1992	254.2°	256.4°	253.3°	258.3°

较大，但是由于可以结合周围的天气情况，且较为全面地分析各种环流形势，所以得到的结果比较可靠，因此人工识别仍是目前高原切变线识别的主要方式。随着计算机和人工智能技术的不断发展，客观识别技术已开始逐渐的运用在气象研究及业务工作中，可以预见天气系统的客观识别技术在未来还有很大发展空间。作为探索性研究，本文尝试寻找一种快速并且较为准确和有效的高原切变线客观识别的方法，以减轻人工识别方法所带来的繁重工作量。

本文确定的高原切变线客观识别区域为($21^\circ \sim 46^\circ\text{N}$, $72^\circ \sim 109^\circ\text{E}$)，并把高原主体区域($28^\circ \sim 38^\circ\text{N}$, $85^\circ \sim 105^\circ\text{E}$)作为切变线的主要活动范围。以 92.5°E 为界，根据高原切变线生成时刻的中点位置，可以将其分为西部型切变线和东部型切变线。根据高原切变线形态又可以分为横切变线和竖切变线。横、竖切变线的划分是以切变线生成时刻的形态而定，高原竖切变线指切变线与经线的夹角 $< 45^\circ$ 的高原切变线，反之则为高原横切变线。由于高原切变线为带状天气系统，可以将其看作由若干风切变点组合而成，而风切变点又可以通过风分解法来确定，具体方法为：将风向分解为南北分量和东西分量，然后根据两站风向分量是否出现辐合来判断风切变点。

识别切变点，需要从风场着手，切变点的具体类型如图 1 所示：(a) 南北两侧经、纬向风均反向型切变点；(b) 南北两侧经向风反向，纬向风同向型切变点；(c) 南北两侧纬向风反向，经向风同向，

且存在风速辐合型切变点；(d) 东西两侧经、纬向风均反向型切变点；(e) 东西两侧纬向风反向，经向风同向型切变点；(f) 东西两侧经向风反向，纬向风同向，且存在风速辐合型切变点。前三种属于横切变点类型，后三种属于竖切变点类型。若满足以上任意一种类型，即可称为切变点，若连续的切变点能达到 5 个经、纬距，各切变点的平均涡度大于 0，以满足高原切变线为气旋性切变的定义，且中点位于高原主体区域内，则可初步判识为存在高原切变线。

由于再分析资料格点较气象观测站点分布较密集。若运用再分析资料对高原切变线进行客观识别时，仍沿用传统的基于气象探空资料的人工识别条件，即 500 hPa 等压面上 3 站以上风向对吹的辐合线作为高原切变线，易出现误判的情况。目前对于高原切变线的定义尚无对风速的要求，故我们有必要对高原切变线及其周围的风速给出一些附加条件，并通过这些条件对高原切变线及其周围风速进行再次判定，若前文初步判识的高原切变线上的切变点有一半以上符合附加条件，则被认定为高原切变线。横切变线的附加条件有：(1) 统计《年鉴》中切变线两侧的最大风速，结果显示其值均在 4 m s^{-1} 以上，由于观测站点稀疏，不少切变线仅由 3 个站点确定，所以统计的该最大风速的最小值也能代表切变线两侧风速的阈值，进而把切变点两侧风速之和大于 7 m s^{-1} 作为附加条件，以保证风切变具有一定强度。(2) 结合风廓线雷达探测切变线周围风场的变化特征(杨成芳等, 2012)，以及多个切变线个例的研究结果(师锐和何光碧, 2011；何光碧和师锐, 2014；李山山和李国平, 2017a)，我们统计分析了切变线周围经、纬向风场规律，设定切变点南、北两侧一个纬距范围内，经向风分量同向时，经向风速之差大于 6 m s^{-1} ，经向风反向时，且两侧风速之差大于 4 m s^{-1} 为附加条件。(3) 切变线两侧风速大小呈交替变化，两侧风速越大，风场的辐合也越强(杨成芳等, 2012)。大风速带中风具有较强的脉动特征(刘小红和洪钟祥, 1996；宋丽莉等, 2009)，为避免将大风速带中的湍流辐合识别为切变线，设定当切变线两侧风速之和大于 25 m s^{-1} ，切变点两侧一个纬距范围内，经向风速之差需大于 10 m s^{-1} 为附加条件，以过滤掉大风速带中的湍流辐合。若横切变点要通过附加条件判定，则需先通过条件(1)、(2)，若切变点满足两侧风速之

和大于 25 m s^{-1} ，则也需要满足条件 (3)。根据大气环流特征，中高纬度的对流层冬、夏季均为西风，冬强夏弱，而北半球的强度变化尤为显著(朱乾根, 1992)，从《年鉴》统计的冬、夏半年高原切变线两侧最大风速频率分布表来看，夏季最大风速普遍要比冬季低 $2\sim 4\text{ m s}^{-1}$ ，因此以上附加条件在判定冬季高原切变线时，阈值需增加 3 m s^{-1} 。高原竖切变线的附加条件有：(1) 切变点两侧风速之和大于 4 m s^{-1} 。(2) 切变点东、西两侧一个经距范围内纬向风之差大于 2 m s^{-1} 。

由于风场存在着大小和方向的变化，且风速、风向的组合形式较多，所以在同一条切变线上，也

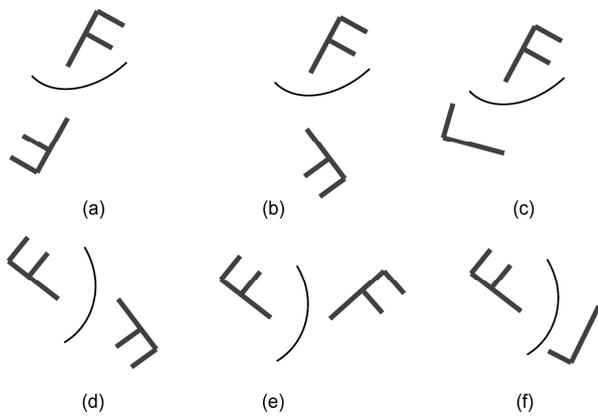


图 1 高原切变线切变点类型
Fig. 1 Types of shear point of the TPSL (Tibetan Plateau shear line)

可能同时存在着多种风切变点的情况。本文的做法是先识别连续的横(竖)切变点，然后再将初步识别出的切变线按照以上附加条件进一步判定，若满足附加条件的切变点占切变点数量的一半以上，才确定为高原横(竖)切变线。识别流程如图 2。

以上高原切变线识别过程均由计算机自动完成。识别过程首先分别从识别区域的每个格点出发，判断其是否满足各切变点类型，并按横(竖)切变线的 6 个方向循环判断，直至没有符合的切变点，若达到切变线最小长度，则初步判识为切变线；其次将初步识别的切变线按附加条件进一步判定，从而识别出该切变线；然后再继续判定下一个格点，并跳过已被认定为切变线上的格点。该方法能保证识别范围内所有格点均不被遗漏，同时也不会被重复识别。然而此方法还存在一定缺陷(如对环流场的全局性考虑不够)，今后在客观识别的基础上，需要结合天气情况、预报员经验等主客观相结合的方式加以完善，以进一步提高识别的准确性。

3.2 高原切变线维持时间及移动方向的判定

由于高原切变线为带状天气系统，几何形状可近视为一条直线，所以本文沿用了《年鉴》使用切变线中点来判定、表达切变线中心位置的做法。以客观识别高原切变线方法为基础，将高原切变线中点作为切变线位置对识别出的切变线进行跟踪。若

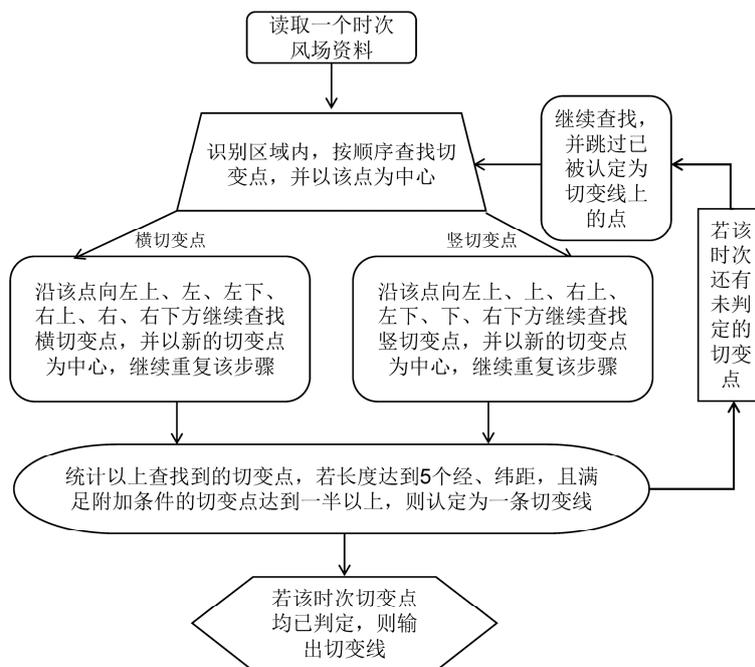


图 2 客观识别高原切变线流程图
Fig. 2 The flow chart of objective TPSL identification

任意时刻 500 hPa 层次中出现切变线就可记为一次高原切变线过程。一次高原切变线活动过程的维持时间可能只有一个时次,也可能持续 2 天以上(师锐和何光碧, 2011)。根据青藏高原气象科学研究拉萨会战组(1981)统计的高原切变线最大移速为 1~3 纬度/12 h,对已识别出的高原切变线按照时间顺序逐条判定,对于出现在 24 h 以内的两条切变线,若中点之间的距离小于 600 km,则将其认定为同一条切变线,并继续追踪下一时次的高原切变线,直到没有匹配的切变线为止,并将前后时次切变线中点的连线记为该条切变线的移动方向。

3.3 高原切变线两侧物理量强度的判定

高原切变线活动期间有正涡度、辐合上升运动与之配合,并且切变线两侧的风场强弱与切变线发展过程有很好的对应关系(何光碧和师锐, 2014)。高守亭(2007)指出变形场对于伸长轴上的气流汇合有很好的指示意义,并给出了两次因切变线引发的暴雨两个例分析结果:对流层低层变形场的大值带与切变线无论位置还是走向都几乎是一致的,并且变形场的大小与降水强度有很好的对应关系。李山山和李国平(2017b)指出变形场大值区的强度和位置与切变线有较好的对应关系。因此,本文拟探讨切变线上总变形指数的强度,该指数的计算公式如下:

$$F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}, \quad (4)$$

$$F_1 = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}, \quad (5)$$

$$F_2 = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}, \quad (6)$$

其中, F 表示总变形指数, F_1 表示伸缩变形, F_2 表示切变变形。切变线上不仅有切变变形,还有伸缩变形,由于 F_1 、 F_2 与坐标轴的旋转有关,而总变形与坐标轴旋转无关,如果切变线发展状态不变,而发生旋转,虽然 F_1 、 F_2 的值会发生改变,但是总变形的值不变。因此,总变形指数可以很好地反映横、竖切变线上的切变变形和伸缩变形。Farrell(1989)研究非均匀气流中扰动稳定性问题时指出,适当配置下,变形场的大小与切变流的辐合强弱呈正相关。总变形还可以通过转换为涡度对切变线的发展起到促进作用(李山山和李国平, 2017b)。因此,变形场的大小与切变线的发展具有紧密联系。

对于风场研究,(垂直)涡度、(水平)散度这

两个传统诊断量一直受到人们关注。郁淑华等(1997)研究指出,高原切变线的活动可以使暴雨增强,使暴雨增强的主要机制是对流层流场的辐合、上升运动、正涡度、水汽通量辐合等。何光碧和师锐(2014)指出正涡度带与辐合带、切变线位置和走向均较一致,涡度带和散度带的范围和强度变化与切变线的生消吻合较好。因此,本文将切变线上的散度($\delta = \partial u / \partial x + \partial v / \partial y$)和涡度($\zeta = \partial v / \partial x - \partial u / \partial y$)也作为其特征物理量进行探讨。

根据泰勒展开风场,大气水平风场由旋转项、辐散项、变形项、平流项组成,其中高原切变线的散度大小,可以直接反应切变线辐合强弱,从而最为直观的反映切变线上的辐合强弱;总变形可以反映气流的伸缩变形和切变变形,变形气流有利于切变线的生成和维持,可以较好的指示高原切变线的发展状况;高原上涡度中心与涡度带的发生和发展不仅与切变线的形成和发展密切相关,而且先于高原切变线生成,有预测切变线发展及移动的先兆意义(赵桂香等, 2007)。高守亭等(2015)从涡度、散度与总变形相互作用的角度探讨了低涡暴雨系统发展演变过程。分析表明,虽然旋转风、辐散风和变形风有明确的物理意义,但实际中两两又相互转化,难以完全分离。总变形不仅可以通过与涡度的相互作用直接促进低涡发展,而且还可通过与散度的相互作用间接促进低涡发展。本文希望同时计算高原切变线上散度、涡度与总变形三者的大小,从而更为全面、客观地研究高原切变线与各物理量之间的关系。

4 高原切变线客观识别结果的验证

根据上述高原切变线客观识别方法,我们建立了客观识别高原切变线数据集,并根据切变线生成时刻的位置和形态,将其分为东、西部型切变线和横、竖切变线。

客观识别统计结果如图 3 所示,东部切变线占 7 成左右,西部切变线约占 3 成;横切变数量远远大于竖切变,竖切变仅占全部切变线的 3.9%,而 2005~2015 年的高原切变线统计《年鉴》中,横切变线有 407 条,竖切变线为 24 条,竖切变线占全部切变线的 5.6%,客观识别切变线与《年鉴》的横、竖切变线比例较为吻合。

以下将客观识别结果与《年鉴》的人工识别结果作对比分析。图 4 为高原切变线《年鉴》、客观

识别东部型切变线、客观识别切变线逐年出现频数的对比图。如图所示，2010、2011、2013 年客观识别切变线数量与《年鉴》较为吻合，2005、2006、2007、2008、2012、2014、2015 年客观识别东部型切变线与《年鉴》较为吻合。客观识别结果比《年鉴》中的高原切变线略多，而客观识别的东部型切

变线与《年鉴》较为吻合。《年鉴》中高原切变线年均 39.2 条，客观识别切变线年均 49.4 条，客观识别东部型切变线年均 38 条。统计 2005~2015 年《年鉴》中东部型切变线共 422 条、西部型切变线 9 条，仅占《年鉴》中高原切变线总数的 2.09%，分别出现在 2003 年 1 条、2004 年 3 条、2006 年 1 条、2007 年 1 条、2012 年 1 条、2015 年 2 条。由于《年鉴》使用的气象探测资料中，高原探空站点呈现“东多西少”的不均匀分布规律（李国平等，2014），因此《年鉴》中切变线主要为东部型切变线。NCEP/NCAR 再分析资料是基于多源资料的融合，能够弥补高原观测站点尤其是西部站点稀疏的不足，这可能是客观识别切变线数量比《年鉴》多的一个主要原因。

为验证客观识别切变线的可靠性，我们把切变线生成时刻和生成源地作为吻合率的判定依据，对比客观识别、《年鉴》两套数据集，将切变线出现时间在 24 h 以内，且生成位置在合理范围内的切变线记为一条吻合的切变线，可定义切变线吻合率=吻合条数/《年鉴》中高原切变线条数。图 4 中折线表示逐年切变线吻合率。与《年鉴》吻合的切变线为 218 条，《年鉴》共有 431 条切变线，吻合率为 50.6%，其中 2005、2006、2007、2008、2014 年客

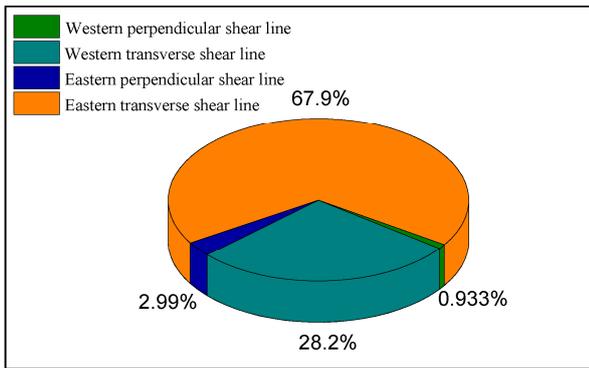


图 3 2005~2015 年运用 CFSR 资料客观识别各类高原切变线所占比例。绿、浅蓝、蓝、黄分别代表西部竖切变线、西部横切变线、东部竖切变线、东部横切变线占总切变线比例

Fig. 3 Percentages of the total TPSLs accounted for by individual types based on application of the objective method on the CFSR data from 2005 to 2015. Green, light blue, blue, and yellow represent the western perpendicular shear line, western transverse shear line, eastern perpendicular shear line, and eastern transverse shear line, respectively

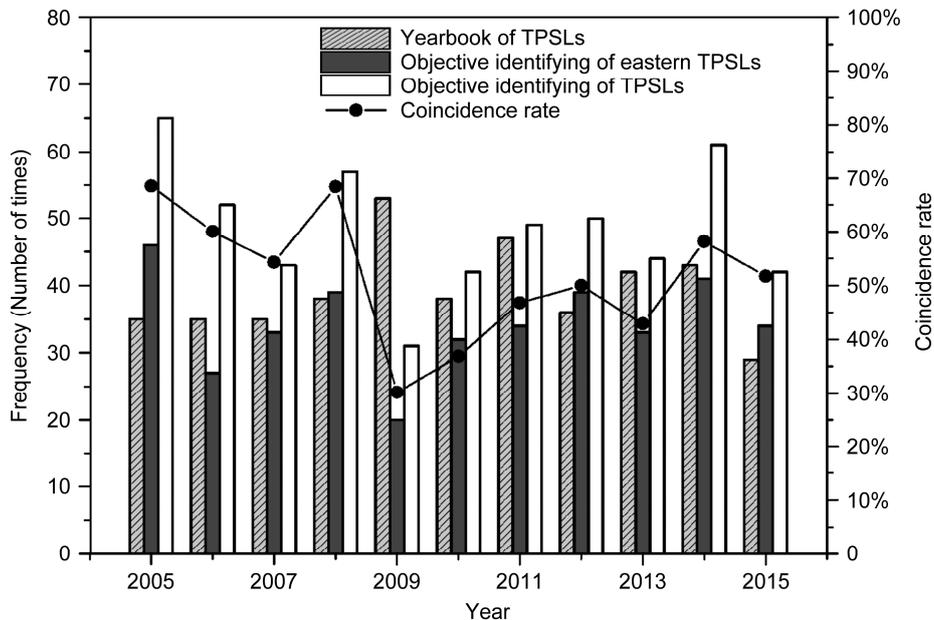


图 4 2005~2015 年客观识别的切变线、东部型切变线和《年鉴》中的切变线生成频数（柱）及客观识别切变线与《年鉴》中切变线的吻合率（折线）

Fig. 4 Frequency (bars) of generation shear lines, eastern type shear lines identified by the objective method, the TPSLs derived from Tibetan Plateau Vortex and Shear Line Yearbook and coincidence rate (curve line) between shear lines identified by the objective method and the TPSLs derived from Tibetan Plateau Vortex and Shear Line Yearbook during 2005–2015

观识别结果与《年鉴》吻合率在 60%左右。客观识别的东部型切变线为 346 条,《年鉴》的东部型切变线为 422 条,两者相吻合的有 192 条,吻合率为 45.4%,其中 2005、2007、2008、2014 年东部型切变线客观识别结果与《年鉴》吻合率在 50%以上。总体而言,基于 CFSR 再分析资料的切变线客观识别能较好地识别出高原切变线,识别的切变线生成时间与《年鉴》较为一致。

5 高原切变线的空间分布

在第 3 节客观识别切变线与《年鉴》对比验证的基础上,以下利用客观识别结果对切变线生成源地、切变线纬向变化、切变线逐月分布、切变线上

物理量强度变化做进一步统计分析。

5.1 高原切变线源地

由于客观识别使用的再分析资料空间分辨率较高,能够比人工识图方式更加准确地识别出切变线的中点位置,可使确定切变线中点位置的随意性(人为性)大为降低。图 5a 表示高原切变线生成时刻的中点位置,切变线在整个高原范围内均有出现,但也存在明显的高发区。西部型切变线分布较为集中,大值区位于(34°~36°N, 85°~90°E),并且有两个高发中心分别位于(34.5°N, 86°E)和(34.5°N, 87.5°E)附近;东部型切变线分布较为分散,高发区域主要位于(31°~34°N, 94°~98°E)和(30°~37°N, 102°~105°E)。大值中心位于西藏

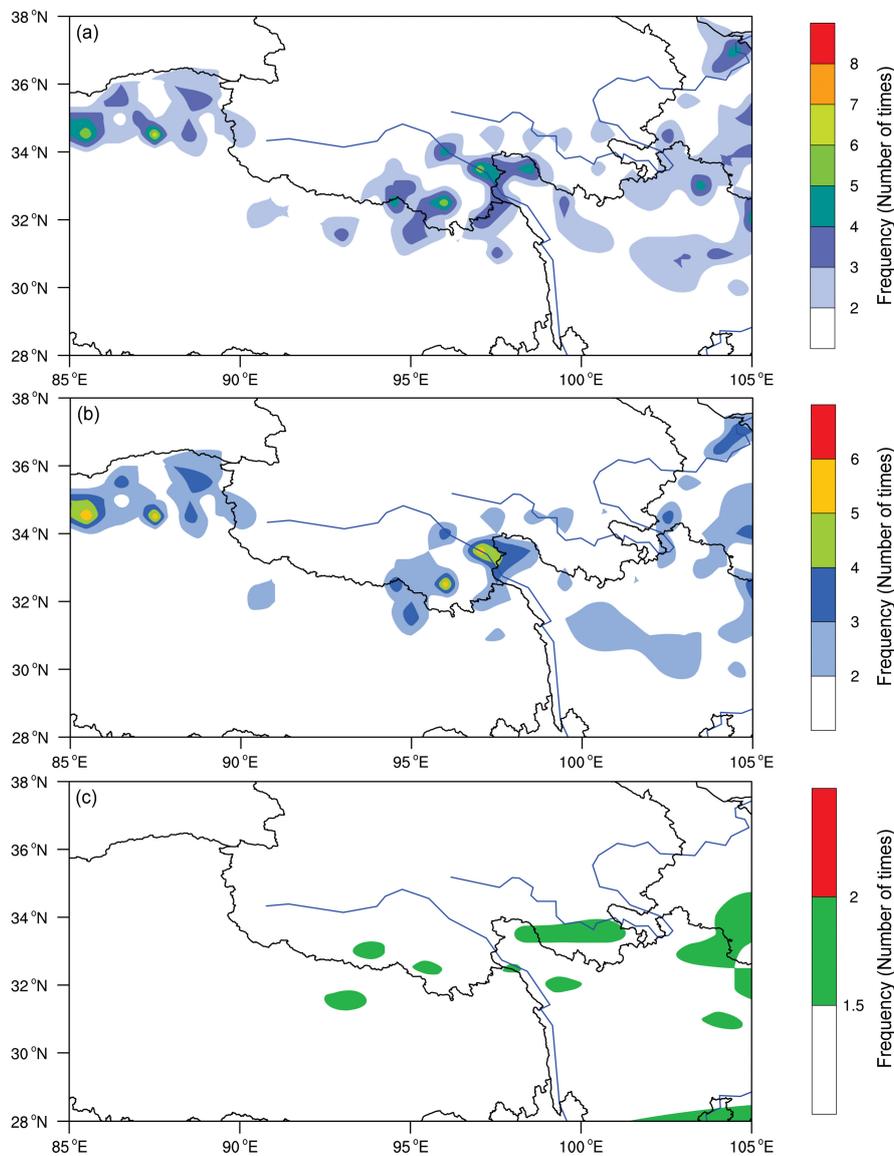


图 5 2005~2015 年客观识别高原切变线生成频数的空间分布: (a) 全年; (b) 夏季; (c) 冬季

Fig. 5 Spatial distributions of the TPSL occurrence frequency identified by the objective method during 2005–2015: (a) Annual; (b) summer; (c) winter

边坝、丁青和青海玉树、石梁一带，与何光碧等（2009）统计的横切变线主要出现在 $30^{\circ}\sim 33^{\circ}\text{N}$ 之间这一结论较为吻合。图 5b 为夏季高原切变线的生成位置，夏季高原切变线占全年切变线的 81.2%，因此，夏季高原切变线源地与全年切变线源地特征基本保持一致。 102°E 以西切变线较全年偏少，分布更为分散； $(31^{\circ}\sim 34^{\circ}\text{N}, 94^{\circ}\sim 98^{\circ}\text{E})$ 范围为高原切变线的高发区，其大值中心分别在玉树、囊谦附近；另一个高原切变线高发区位于 $(34^{\circ}\sim 36^{\circ}\text{N}, 85^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{E})$ ，并且大值中心与全年特征一致。图 5c 为冬季高原切变线的生成位置，冬季切变线数量较少，占全年切变线的 18.8%，与郁淑华等（2013）统计的 22.4% 基本吻合。因此，冬季切变线没有高发区，主要以东部型切变线为主；东部型切变线经向分布较为集中，主要在 $31^{\circ}\sim 34.5^{\circ}\text{N}$ 之间，而纬向分布则较为分散。

5.2 高原切变线生成频数及切变线上物理量强度的变化

为进一步分析高原切变线的空间分布特征，我们将客观识别切变线按不同经度进行统计，并选取总变形、涡度、散度作为切变线上特征量强度的判定标准。如图 6 所示，切变线在 90°E 、 101°E 为两个低发带； 97°E 、 105°E 为高发带。沿 101°E 向东，切变线呈爆发式的增长，这可能是由于其北部的川西高原上小高压底部的偏东气流与南部南支槽前的西南气流或西太平洋副热带高压西侧的偏南气流在此交汇（姚秀萍，2014），有利于形成切变线；另一方面，通过分解总变形方程可讨论各项对高原切变线的生成贡献，得出总变形扭转项和水平气压梯度项的贡献最大（李山山和李国平，2017b）。而在高原的东侧边缘，由于陡峭地形的作用，有利于出现较大的水平风的垂直切变和垂直运动的水平切变，以及高原东侧陡坡剧增的水平气压梯度力，均有利于高原切变线在高原东侧的生成，从而导致高原东部切变线生成频数较多。

切变线上总变形、散度、涡度沿经向的强度变化趋势总体一致，总变形与涡度的变化较为吻合，涡度的变化幅度大于前两者。从 87°E 到 92°E 切变线上各物理量强度逐渐增强，三者强度的最大值均出现在 $94^{\circ}\sim 95^{\circ}\text{E}$ ，特征量强度在 98°E 以东迅速减弱。夏季高原大地形的强加热作用和频繁旺盛的对流活动及伴随的潜热释放的影响，在高原主体上方出现整层强烈的上升气流，同时也促使低层补充气

流辐合、产生强的正涡度，随着天气系统源地逐渐远离高原主体区域，高原上这种特殊的热力、动力效应也逐渐减小（杨伟愚等，1992），这可能是切变线上各物理量强度在 98°E 以东相对较小的原因。

6 高原切变线的时间变化

6.1 高原切变线的月变化

图 7 为逐月切变线发生频数及切变线上特征量强度。 $5\sim 9$ 月为高原切变线的高发月，其中 5 月生成的切变线数量最多，为 119 条，其余各月均在 80 条左右； $1\sim 3$ 月、 $10\sim 12$ 月为切变线的低发月。4 月过后，切变线发生频数迅速增加，并在 5 月达到全年最高值。冬半年切变线主要集中在 $2\sim 4$ 月，夏半年主要集中在 $5\sim 9$ 月，这与郁淑华等（2013）统计的 1998~2010 年高原切变线结果较为吻合。从切变线上各特征量强度来看，总变形、涡度、散度的冬半年变化趋势较为一致；夏半年总变形相对较小，基本维持在 $10\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 。冬半年的总变形强度比夏半年要大，冬半年的涡度、散度较夏半年要小，因此冬季切变线上主要以变形风为主，夏季切变线上主要以旋转风和辐合风为主，涡度和散度两者变化趋势较为一致，其中涡度随时间变化更为明显，自 5 月开始切变线涡度逐渐增强，在 7、8 月涡度达到最大值 ($11\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$)，9 月到次年 1 月涡度逐渐减弱，1 月切变线涡度最弱，为 $6\times 10^{-5}\text{ s}^{-1}$ 。

池艳珍等（2013）研究对流层中层西风环流的冬、夏半年特征时指出，西风呈现“冬季强、夏季弱”的特点，且冬季大风速中心位于 28°N 附近，位于高原南侧，强度能达 12 m s^{-1} ；沿风速中心向北，西风风速显著减小，这使得高原范围内产生强的纬向风的经向切变，从而使总变形中的切变变形量增大。由于夏季偏西风显著减弱，中心风速值仅为 6 m s^{-1} ，且位于 30°N 以北的高原主体上方，所以夏季高原范围内的纬向风速的经向变化较小，这可能是导致冬季切变线虽然较少，但切变线上总变形却比夏季大的重要原因。

6.2 高原切变线的维持时间和移动方向

图 8 反映的是 2005~2015 年客观识别切变线在高原上的维持时间，维持时间 6 h 的占 7 成，有 428 条；维持时间 12 h 的不足 2 成，为 76 条；维持时间 18 h 以上的更少，只有一成。这与以往关于高原切变线生命史以 12 h 为主的认识有所差异（彭广等，2005~2015；何光碧等，2009），为了进一

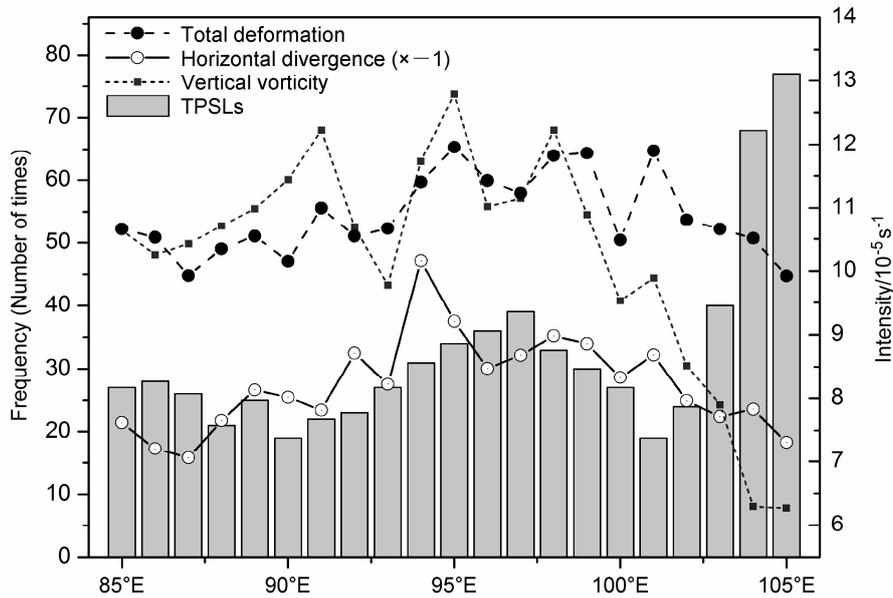


图 6 2005~2015 年区域 (28°~38°N, 85°~105°E) 内客观识别高原切变线生成频数 (柱) 及特征量强度 (折线) 的纬向变化。频数为对应经度切变线生成数量的总和; 总变形、水平散度 (×-1)、垂直涡度是各经度切变线所对应要素的平均值

Fig. 6 Zonal variations of the TPSL occurrence frequency (bars) and intensities (curve lines) of the associated physical quantities over region (28°-38°N, 85°-105°E) based on results of the objective identification method during 2005-2015. The TPSL frequency shows the total number of TPSLs along the corresponding longitude. The total deformation, horizontal divergence (×-1), and vertical vorticity associated with the TPSL are their corresponding averages along the given longitude

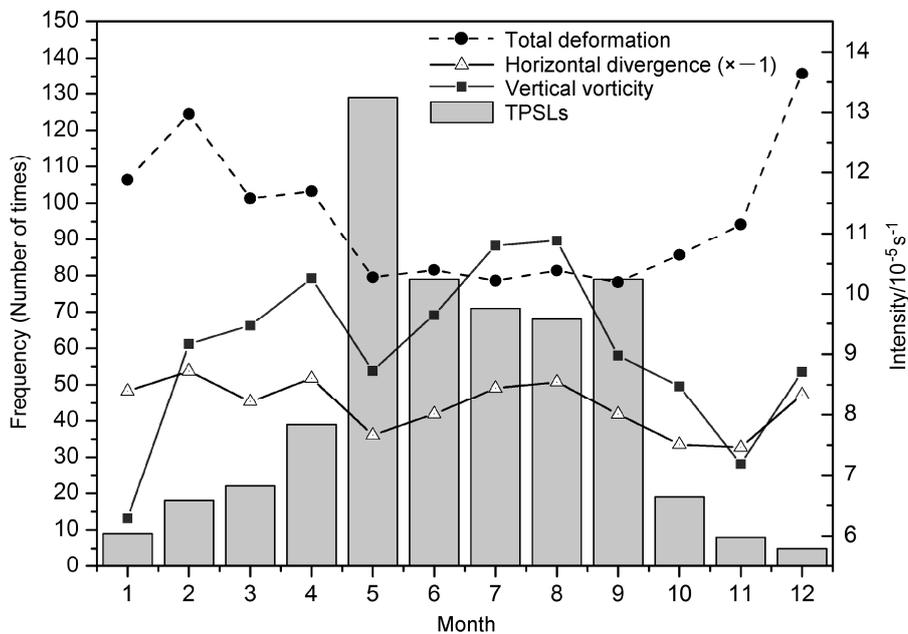


图 7 2005~2015 年区域 (28°~38°N, 85°~105°E) 内逐月客观识别高原切变线生成频数 (柱) 及特征量强度 (折线) 变化。频数为对应月份生成切变线数量的总和; 总变形、散度、涡度是各月份生成切变线上对应要素的平均值

Fig. 7 Monthly changes of the TPSL occurrence frequency (bars) and intensities (curve lines) of associated physical quantities averaged over region (28°-38°N, 85°-105°E) during 2005-2015. The frequency shows the total number of TPSLs in the given month; the total deformation, horizontal divergence, and vertical vorticity associated with the TPSL represent their corresponding averages in the given month

步验证本文客观识别方法，我们选取 CFSR 资料中 0000 UTC、1200 UTC 两个时次，把时间间隔调为 12 h，然后运用同样的客观识别方法，把识别出来的高原切变线维持时间与《年鉴》作对比。图 9a 为时间分辨率为 12 h 的客观识别结果，图 9b 为 2005~2015 年《年鉴》中高原切变线的维持时间。图 9 可见，客观识别切变线的维持时间与《年鉴》的维持时间较为吻合，大部分切变线维持时间均在 24 h 以内，客观识别维持 12 h 的切变线占 6 成，《年鉴》占 5 成；维持 24 h 的均为 2 成；维持时间在 36 h 及以上的切变线较少，并且切变线维持时间越长，数量越少。何光碧等（2009）运用中国气象局下发的 MICAPS 系统再现历史探空和地面资料，统计了 2000~2007 年高原切变线维持时间，其中维持时间 12 h 的占 71.5%，随着时间增加，出现次数迅速减少。通过对比，进一步验证了客观识别方法的可行性和可靠性，即说明 12 h 的客观识别结果与《年鉴》和何光碧等（2009）的统计结果具有较好的一致性。对比图 8、图 9，即使运用同样的识别方法，运用不同时间尺度的资料，识别出的切变线最小生命史所占比例也存在一定差异，造成该差异的原因可能是由于中尺度天气系统的生命史一般不长，如选取常规探空时间尺度（12 h）作为再分析资料的时间分辨率来统计切变线，可能会漏掉一些短生命史的切变线，即使用 12 h 一次的再分析资料可能无法识别出一些维持时间仅有 6 h 的切变线，而使用 6 h 一次的再分析资料可识

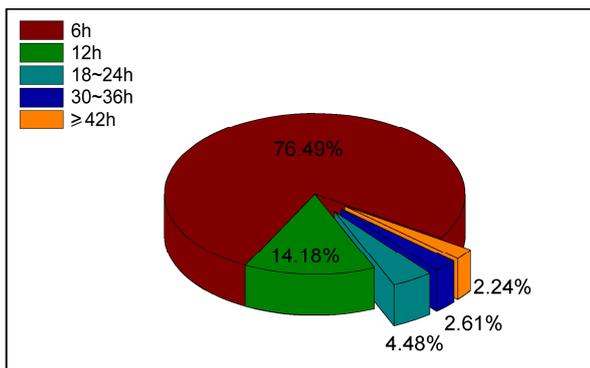


图 8 2005~2015 年客观识别的高原切变线维持时间概率分布。红色、绿色、浅蓝色、蓝色、黄色分别代表切变线维持时间 6 h、12 h、18~24 h、30~36 h、42 h 以上所占总切变线的比例

Fig. 8 Probability distribution of the TPSSL maintenance time identified by the objective method during 2005-2015. Red, green, light blue, blue, and yellow represent the percentages of TPSSLs with maintenance time of 6 h, 12 h, 18-24 h, 30-36 h and 42 h in the total TPSSLs, respectively

别出维持时间为 6 h 及以上的切变线，符合高原切变线生命史较短这一特点。基于上述分析，使用 12 h 时间分辨率的资料比使用 6 h 资料的高原切变线识别结果会明显减少。当然，识别切变线所用资料的最佳时间分辨率仍是一个值得探讨的问题，期待今后能够应用更高时间分辨率（如 4 h 或 3 h）的再分析资料或时间分辨率加密的探空观测资料来进一步确定。

为分析高原切变线的移动方向，将 2005~2015 年维持时间在 6 h 以上的客观识别切变线进行统计，以生成和消亡时刻切变线中点的连线方向作为切变线移动方向。如图 10 所示，有超过一半以上的高原切变线向东移动，向东南、向南、向西南方向移动的切变线分别各占一成以上，较少的切变线向东北、向西移动，向北、向西北方向移动的切变

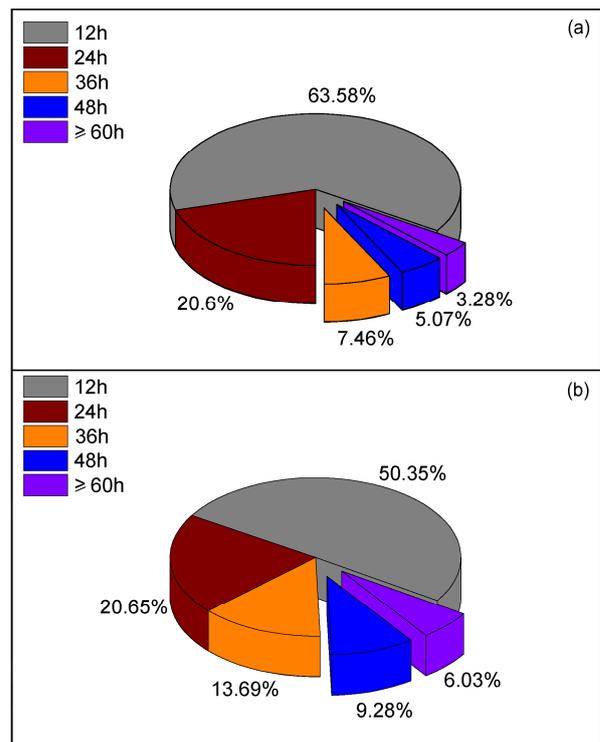


图 9 (a) 2005~2015 年使用时间分辨率为 12 h CFSR 资料的客观识别高原切变线维持时间概率分布；(b) 2005~2015 年《年鉴》中高原切变线维持时间概率分布。灰色、红色、黄色、蓝色、紫色分别代表切变线维持时间 12 h、24 h、36 h、48 h、60 h 及以上所占切变线的比例

Fig. 9 (a) Probability distributions of the maintenance time identified by the objective method based on CFSR data at the temporal resolution of 12 h during 2005-2015; (b) probability distributions of the maintenance time of the TPSSLs derived from Tibetan Plateau Vortex and Shear Line Yearbook during 2005-2015. Gray, red, yellow, blue, and purple represent percentages of TPSSLs with maintenance time of 12 h, 24 h, 36 h, 48 h, 60 h, and above in the total TPSSLs, respectively

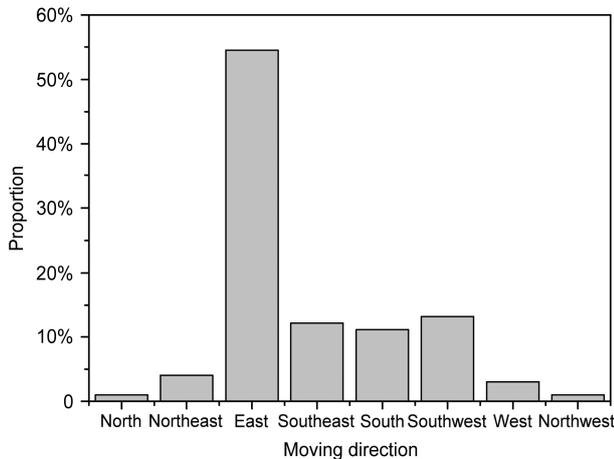


图 10 2005~2015 年各移动方向的高原切变线占总切变线比例

Fig. 10 Proportion of TPSLs for different moving directions in the total TPSLs during 2005–2015

线极少。

7 结论与讨论

通过上述分析, 本研究得到以下主要结论:

(1) 对比 ERA-Interim、CFSR、JRA-55 这三套再分析资料, 在高原地区 500 hPa 风场上 CFSR 再分析资料的表现更优。

(2) 本文建立的高原切变线客观识别方法, 在生成频数、月分布等方面与《年鉴》人工统计结果相近, 是一种有效的客观识别方法。

(3) 客观识别东部型切变线的高发区位于西藏边坝、丁青和青海玉树、石梁一带, 客观识别西部型切变线高发区位于 $34^{\circ}\sim 36^{\circ}\text{N}$, $85^{\circ}\sim 90^{\circ}\text{E}$ 。

(4) 散度、涡度和总变形这三个物理量强度与高原切变线的位置和生成时间联系较为紧密。切变线上各物理量强度的大值区出现在 $94^{\circ}\sim 95^{\circ}\text{E}$, 三个物理量强度在 98°E 以东迅速减弱。冬季切变线上主要以变形风为主, 夏季切变线上主要以旋转风和辐合风为主。

(5) 就识别准确率而言, 由于再分析资料与《年鉴》使用的资料在时空分辨率上有较大不同, 客观识别结果与《年鉴》在切变线数量上尚存在一定差异, 总吻合率为 50.5%, 客观识别的西部型切变线较《年鉴》要多。客观识别切变线维持时间(生命史)主要为 6 h, 而《年鉴》统计出的主要为 12 h。

作为探索性研究, 本文初步建立的客观识别方

法可以高效、定量地识别高原切变线。该方法在一定程度上避免了人工识别带来的主观偏差, 减轻了识别的工作量, 为统计分析高原切变线提供了一种新的技术手段。高分辨率再分析资料在高原地区的刻画能力及可靠性评估(尤其是在高原西部、大气低层以及对于中小尺度系统)也是一个值得重视的问题, 可能需要使用逐步增多的高原观测资料加强检验以及多源资料的综合比较、融合来逐渐改进。识别切变线时的附件条件及阈值也还需要根据高原切变线研究的最新认识及更多样本的统计结果加以优化。而客观识别与人工识别结果的差异, 有待今后客观识别方法的发展和高原探空资料加密后进一步验证。通过不断完善客观识别技术, 向客观识别为主同时结合天气情况、预报员经验或主观意见的方向发展, 从而使高原天气系统识别结果逐步做到既高效又准确。另外, 高原切变线与高原低涡的并发关系以及切变线的垂直伸展范围等也是值得探索的问题。

参考文献 (References)

- 池艳珍, 刘丹妮, 何金海, 等. 2013. 东亚—太平洋地区环流场和热力场由冬向夏转换的过程特征及其可能机制 [J]. 高原气象, 32 (4): 983–992. Chi Yanzhen, Liu Danni, He Jinhai, et al. 2013. Features of transformation on circulation and thermal fields over East Asia–Pacific regions from winter to summer and its possible mechanism [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 32 (4): 983–992, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00094.
- Farrell B F. 1989. Transient development in confluent and diffluent flow [J]. J. Atmos. Sci., 46 (21): 3279–3288, doi:10.1175/1520-0469(1989)046<3279:TDICAD>2.0.CO;2.
- Feng Xinyuan, Liu Changhai, Rasmussen R, et al. 2014. A 10-yr climatology of Tibetan Plateau vortices with NCEP climate forecast system reanalysis [J]. Journal of Applied Meteorology & Climatology, 53 (1): 34–46, doi:10.1175/JAMC-D-13-014.1.
- Feng Xinyuan, Liu Changhai, Fan Guangzhou, et al. 2016. Climatology and structures of Southwest vortices in the NCEP climate forecast system reanalysis [J]. J. Climate, 26 (21): 7675–7701, doi:10.1175/JCLI-D-15-0813.
- 高守亭. 2007. 大气中尺度运动的动力学基础及预报方法 [M]. 北京: 气象出版社, 169–176. Gao Shouting. 2007. Dynamical Foundation and Prediction Methods of Mesoscale Motions in Atmosphere (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 169–176.
- 高守亭, 冉令坤, 李小凡. 2015. 大气中尺度动力学基础及暴雨动力预报方法 [M]. 气象出版社, 78–81. Gao Shouting, Ran Lingkun, Li Xiaofan. 2015. Dynamical Foundation of Mesoscale Motions in Atmosphere and Dynamical Prediction Methods of Rainstorm (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 78–81.
- 何光碧, 高文良, 屠妮妮. 2009. 2000~2007 年夏季青藏高原低涡切变线

- 观测事实分析 [J]. 高原气象, 28 (3): 549–555. He Guangbi, Gao Wenliang, Tu Nini. 2009. The observational analysis of shear line and low vortex over the Tibetan Plateau in summer from 2000 to 2007 [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 28 (3): 549–555.
- 何光碧, 师锐. 2014. 三次高原切变线过程演变特征及其对降水的影响 [J]. 高原气象, 33 (3): 615–625. He Guangbi, Shi Rui. 2014. Analysis on evolution characteristics of three Plateau shearlines and their effect on precipitation [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 33 (3): 615–625, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2013.00023.
- 李国平, 赵福虎, 黄楚惠, 等. 2014. 基于NCEP资料的近30年夏季青藏高原低涡的气候特征 [J]. 大气科学, 38 (4): 756–769. Li Guoping, Zhao Fuhu, Huang Chuhui, et al. 2014. Analysis of 30-year climatology of the Tibetan Plateau vortex in summer with NCEP reanalysis data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (4): 756–769, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13235.
- 李山山, 李国平. 2017a. 一次鞍型场环流背景下高原东部切变线降水的湿 Q 矢量诊断分析 [J]. 高原气象, 36 (2): 317–329. Li Shanshan, Li Guoping, 2017a. Diagnostic analysis based on wet Q -vector of a shear line with rain on the east side of Qinghai–Xizang Plateau under the saddle pattern circulation background field [J]. Plateau Meteorol, 36 (2): 317–329, doi: 10.7522/j.issn.1000-0534.2016.00025
- 李山山, 李国平. 2017b. 一次高原低涡与高原切变线演变过程与机理分析 [J]. 大气科学, 41 (4): 713–726. Li Shanshan, Li Guoping. 2017b. Evolution and mechanism analysis of a plateau vortex and plateau shear line [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 41 (4): 713–726, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1611.16179.
- Lin Zhiqiang. 2015. Analysis of Tibetan Plateau vortex activities using ERA-Interim data for the period 1979–2013 [J]. J. Meteor. Res., 29 (5): 720–734, doi:10.1007/s13351-015-4273-x.
- 林志强. 2015 南支槽的客观识别方法及其气候特征 [J]. 高原气象, 34 (3): 684–689. Lin Zhiqiang. 2015. Objective identify method and climatic characteristics of southern branch trough [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 34 (3): 684–689, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2014.00016.
- 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 (6): 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 (6): 1580–1588, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00153.
- 刘小红, 洪钟祥. 1996. 北京地区一次特大强风过程边界层结构的研究 [J]. 大气科学, 20 (2): 223–228. Liu Xiaohong, Hong Zhongxiang. 1996. A study of the structure of a strong wind event in the atmospheric boundary layer in Beijing area [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 20 (2): 223–228, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1996.02.12.
- 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. R
- 彭广, 李跃清, 郁淑华, 等. 2005–2015. 青藏高原低涡、切变线年鉴 [M]. 北京: 科学出版社. Peng Guang, Li Yueqing, Yu Shuhua, et al. 2005–2015. The Tibetan Plateau Vortex and Shear Line Yearbook (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press.
- 青藏高原气象科学研究拉萨会战组. 1981. 夏半年青藏高原 500 毫巴低涡切变线的研究 [M]. 北京: 科学出版社, 1–122. Lhasa Group of Tibetan Plateau Meteorology Research. 1981. Research of 500 mb Vortex and Shear Lines Over the Tibetan Plateau in Summer (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 1–122.
- 师锐, 何光碧. 2011. 移出与未移出高原的高原切变线背景环流对比分析 [J]. 高原气象, 30 (6): 1453–1461. Shi Rui, He Guangbi. 2011. Contrast analysis on background circulation of plateau shear line moving out and not moving out of the Tibetan Plateau [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 30 (6): 1453–1461.
- 宋丽莉, 吴战平, 秦鹏, 等. 2009. 复杂山地近地层强风特性分析 [J]. 气象学报, 67 (3): 452–460. Song Lili, Wu Zhanping, Qin Peng, et al. 2009. An analysis of the characteristics of strong winds in the surface layer over a complex terrain [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67 (3): 452–460, doi:10.11676/qxxb2009.045.
- 杨成芳, 阎丽凤, 周雪松. 2012. 利用加密探测资料分析冷式切变线类大暴雨的动力结构 [J]. 气象, 38 (7): 819–827. Yang Chengfang, Yan Lifeng, Zhou Xuesong. 2012. Analysis on dynamic structure of cold wind shear heavy rainstorm by intensified observational data [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 38 (7): 819–827.
- 杨伟愚, 叶笃正, 吴国雄. 1992. 夏季青藏高原热力场和环流场的诊断分析. III: 环流场稳定维持的物理机制 [J]. 大气科学, 16 (4): 409–426. Yang Weiyu, Ye Duzheng, Wu Guoxiong. 1992. The influence of the Tibetan Plateau on the summer thermal and circulation fields over East Asia. III: Physical mechanisms of maintaining the stable circulation fields [J]. Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 16 (4): 409–426, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1992.04.04.
- 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.
- 叶笃正, 高由禧. 1979. 青藏高原气象学 [M]. 北京: 科学出版社, 122–126. Ye Duzheng, Gao Youxi. 1979. The Qinghai–Xizang Plateau Meteorology (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 122–126.
- 郁淑华, 何光碧, 滕家谟. 1997. 青藏高原切变线对四川盆地西部突发性暴雨影响的数值试验 [J]. 高原气象, 16 (3): 306–311. Yu Shuhua, He Guangbi, Teng Jiamo. 1997. The numerical experiments of influence of shear line over Qinghai–Xizang Plateau on a sharp heavy rain in west Sichuan basin [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 16 (3): 306–311.
- 郁淑华, 高文良, 彭骏. 2013. 近 13 年青藏高原切变线活动及其对中国降水影响的若干统计 [J]. 高原气象, 32 (6): 1527–1537. Yu Shuhua, Gao Wenliang, Peng Jun. 2013. Statistical analysis of shearline activity in QXP and its influence on rainfall in China in recent 13 years [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 32 (6): 1527–1537, doi:10.7522/j.issn.1000-0534.2012.00149.
- Zhang Xia, Yao Xiuping, Ma Jiali, et al. 2016. Climatology of transverse shear lines related to heavy rainfall over the Tibetan Plateau during boreal

- summer [J]. *J. Meteor. Res.*, 30 (6): 915–926, doi:10.1007/s13351-016-6952-7.
- 张博, 李国平. 2017. 基于CFSR资料的青藏高原低涡客观识别技术及应用 [J]. *兰州大学学报 (自然科学版)*, 53 (1): 106–111. Zhang Bo, Li Guoping. 2017. An objective identification of the Tibetan Plateau vortex based on climate forecast system reanalysis data [J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences) (in Chinese)*, 53 (1): 106–111, doi:10.13885/j.issn.0455-2059.2017.01.016.
- 赵桂香, 程麟生, 李新生. 2007. “04.12”华北大到暴雪过程切变线的动力诊断 [J]. *高原气象*, 26 (3): 615–623. Zhao Guixiang, Cheng Linsheng, Li Xinsheng. 2007. The dynamical diagnosis of snowstorm over North China in December 2004 [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 26 (3): 615–623, doi:10.3321/j.issn:1000-0534.2007.03.025.
- Zhong Rui, Zhong Linhao, Hua Lijuan, et al. 2014. A climatology of the southwest vortex during 1979–2008 [J]. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 7 (6): 577–583, doi:10.3878/AOSL20140042.
- 朱乾根. 1992. 天气学原理和方法 [M]. 北京: 气象出版社, 561–562.
- Zhu Qian’gen. 1992. *Principles and Methods of Synoptic Meteorology (in Chinese)* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 561–562.
- 荀学义, 胡泽勇, 吴学宏, 等. 2011. 三套位势高度再分析资料在青藏高原地区的对比分析 [J]. *高原气象*, 30 (6): 1444–1452. Xun Xueyi, Hu Zeyong, Wu Xuehong, et al. 2011. Comparative analyses of three geopotential height reanalysis data in Qinghai–Xizang Plateau [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 30 (6): 1444–1452.