

青藏高原天气动力学研究的新进展

李国平^{1, 2}

(1 成都信息工程大学大气科学学院, 成都 610225;

2 气象灾害预报预警与评估省部共建协同创新中心, 南京信息工程大学, 南京 210044)

摘要: 在主导中国青藏高原、西南地区的极端天气、气候事件, 以及东移引发中国东部夏季降水的天气系统中, 高原天气系统扮演着十分重要的角色, 其中以高原低涡、高原切变线和西南低涡为代表的高原低值天气系统(简称低值系统)最为常见。重点回顾了近10年以来高原低值系统天气动力学研究领域的若干新进展, 着力梳理了高原低涡动力学、高原切变线动力学、西南低涡的中尺度动力诊断研究、高原低涡与西南低涡耦合作用的动力分析、高原切变线与高原低涡关系的动力学解析、低频振荡对高原低涡的调制作用等高原天气动力学研究领域的前沿科学问题, 并基于最新研究成果和相关理论方法、技术手段的发展趋势, 展望并提出该领域有发展潜力的一些研究方向, 希冀对目前处于弱势的高原天气动力学研究的促进以及新的学科生长点、新概念、新理论的形成能有参考价值和启发意义。

关键词: 天气动力学进展, 青藏高原, 高原低涡, 高原切变线, 西南低涡

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2021.03.008

New Research Progress in Synoptic Dynamics of the Tibetan Plateau

Li Guoping^{1, 2}

(1 School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

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

Abstract: The plateau weather systems play a very important role in the extreme weather and climate events leading to the Tibetan Plateau (TP) and Southwest China, as well as in the weather system of summer precipitation in eastern China caused by the eastward movement. Among them, the Tibetan Plateau vortex (TPV), the Tibetan Plateau shear line (TPSL) and the Southwest vortex (SWV) are the most representatives of the low value of weather systems. This paper reviews some new developments in the field of synoptic dynamics of low value systems over the TP in the past 10 years, focusing on the study of TPV dynamics, TPSL dynamics, mesoscale dynamic diagnosis of SWV, dynamic analysis of coupling effect between TPV and SWV, dynamic analysis of relationship between TPSL and TPV, and intraseasonal oscillation on TPV. Based on the latest research results and the development trend of related theoretical methods and technical means, some research directions with potential development in this field are prospected and put forward, hoping to promote this weak research subject, as well as the formation of new discipline growth point, new concept and new theory with enlightening significance and reference value.

Keywords: advance in synoptic dynamics, Tibetan Plateau, Tibetan Plateau vortex (TPV), Tibetan Plateau shear line (TPSL), southwest vortex (SWV)

0 引言

青藏高原, 平均海拔超过4 km, 被称为地球“第三极”, 是世界上海拔最高、地形最复杂的高原。其面积超过250万 km², 约占我国陆地面积的 1/4, 是中纬度或北半球面积最大的高原。这里是全球气候变化

最为敏感的地区之一, 覆盖着近10万 km²的冰川, 是地球上除南极和北极以外冰雪储量最大的地区, 也是长江、黄河、恒河、湄公河等亚洲10多条大江大河的发源地, 有“亚洲水塔”的美誉。

夏季的青藏高原是一个强大的热源, 作为一个高耸入对流层中部大气的动力、热力和水汽扰动源, 对东亚大气环流、灾害性天气气候事件乃至全球气候变化都有重大影响。青藏高原是大气对流活动和灾害性天气系统的多发区, 影响长江流域暴雨过程的中尺度对流系统(MCS)的源地, 是中国长江流域及东亚季风、东亚梅雨水汽输送的“转运站”, 是中低纬季风

收稿日期: 2020年9月8日; 修回日期: 2020年9月25日
第一作者: 李国平(1963—), Email: liguoping@cuit.edu.cn
资助信息: 国家自然科学基金项目(91937301, 41675057, 41765003); 国家重点研发计划项目(2018YFC1507200)

能量与水份循环的“活跃区”，是大气波动、低频振荡的活跃区和重要源地之一，高原夏季还存在臭氧低谷中心。

天气学上，青藏高原在夏季是北半球同纬度地区气压系统出现最频繁的地区，其天气系统的多样性堪比低纬热带地区。这些极具高原特色的天气系统主要有青藏高压、高原低槽、高原切变线、高原低涡（简称高原涡）、西南低涡（简称西南涡）、西北低涡（简称西北涡）以及高原MCS等。

在第一次青藏高原气象科学实验（QXPME X）和第二次青藏高原大气科学试验（TIPEX）的基础上，以第三次青藏高原大气科学试验（TIPEX-III）为抓手，在财政部、科技部公益性行业（气象）经费项目、国家自然科学基金委重大计划、国家重点研发计划重点专项等的支持推动下，高原大气科学已成为备受关注的热门研究领域，在高原大气观测、高原天气相互作用、高原气候变化、高原大气物理、高原大气数值模拟、高原天气气候效应等方面取得了显著进展^[1-4]。由于青藏高原天气、大气动力学问题的复杂性，与高原气象学上述分支研究领域相比，由高原天气学、大气动力学交叉而形成的高原天气动力学研究队伍还不够稳定、兴旺，持续性研究及其标志性成果还不算多。由于地形复杂，涉及的问题很多，而观测资料缺乏，再分析资料和数值模式在高原的应用都有一些困难，因此现在的研究工作尚存较大局限性，还需要进行更多深入研究，可以说青藏高原天气动力学研究一直是高原大气科学的一个具有重要科学意义与业务应用价值但又迫切需要关注、加强的基础性领域^[5-8]。即使在与高原天气动力学密切相关的高原天气学研究中，也主要集中在个例研究^[9-12]、诊断计算与数值试验^[13-29]、加热作用^[30-36]、地形效应^[14, 37-38]以及近年来十分活跃的高原天气系统的客观识别与气候统计^[39-62]。

下面本文对近10年以来高原天气动力学研究领域取得的一些研究成果进行梳理，以期更清醒地认识该领域研究的现状与面临的问题，不忘初心地积极思考、主动开创高原天气动力学研究的未来。

1 高原低涡

高原涡是青藏高原主体独特的一种 α 中尺度天气（次天气尺度）系统。（1）从大气非线性波动的视角，高原涡可视为一种非线性惯性重力内波，其中具有涡眼（卫星云图上的空心特征）、暖心结构的TCLV（Tropical Cyclone-like Vortices，类热带气旋低涡）型高原涡（图1^[63]）在理论上可用非线性惯性重

力内波的奇异孤立波解加以解释^[64-65]。（2）从流体力学边界层涡旋的流场解视角，又可考虑高原涡这类低涡为受非绝热加热和摩擦强迫并满足热成风平衡的轴对称涡旋系统，采用Boussinesq近似，通过求解柱坐标系中涡旋模式的初值问题以分析热源强迫对低涡流场结构的影响^[66]，得出地面感热中心与低涡中心配置一致时，地面感热加热才会有利于低涡生成发展，反之感热加热对低涡发展起抑制作用，这一结果有助于弥合以前感热加热是否有利于高原涡的分歧^[67]。此外，还可以从理论上证明高原深厚边界层所产生的强动力抽吸泵对高原涡形成的重要作用^[68]。（3）从满足Rossby位涡守恒的涡旋波动视角，发现在高原涡这种涡度、散度共存的中尺度系统中，具有涡旋Rossby-惯性重力混合波动的特征，即低涡内部是涡旋Rossby波主导，而外围则由惯性重力波掌控，从而有助于在理论上认识卫星云图上高原涡外围云系的螺旋结构^[69-71]。

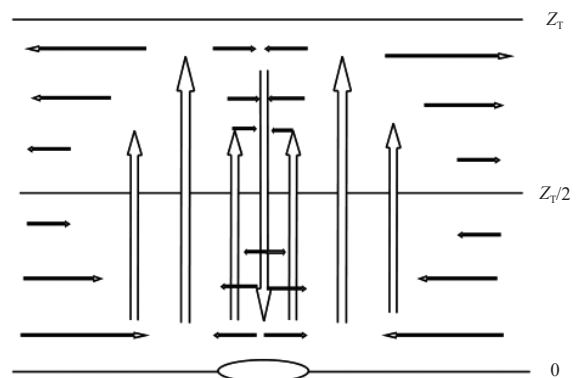


图1 TCLV型高原低涡流场垂直剖面结构示意图（ Z_T 为动力变性高度）^[63]

Fig. 1 Schematic diagram of vertical profile structure of TCLV Tibetan Plateau vortex (Z_T is a dynamic denaturation height) ^[63]

2 高原切变线

犹如赤道辐合带（ITCZ）对于热带天气系统的孕育作用，高原切变线是高原天气系统的“温床”（图2），其中高原横切变线是高原切变线的常态，指高原上纬向风的南北切变而形成一条近于纬向的切变线，按其水平尺度可视为 α 中尺度或次天气尺度系统。基于 z 坐标系下考虑地形的正压模式方程组，利用小参数法求得其一级近似解，据此可对包含地形坡度与不考虑地形坡度的切变波和涡旋波及其关系进行动力学理论分析，得出切变线上的波动包括切变波、惯性波和重力外波，属于双向传播的频散波。考虑地形坡度时，波动不稳定条件与波数有关，地形坡度对波动不稳定贡献大小取决于基本气流的纬向分布状况。

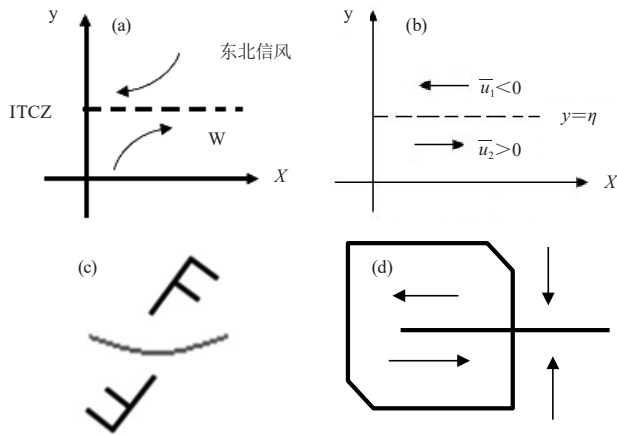


图2 赤道辐合带及高原横切变线两侧风场对比
(a) 赤道辐合带; (b) 赤道辐合带上的风速切变模式;
(c) 高原横切变线两侧风场; (d) 高原切变线两侧风场分解^[72]

Fig. 2 Comparison of wind field on both sides of equatorial convergence zone and Tibetan Plateau shear line
(a) equatorial convergence zone; (b) wind speed shear mode on ITCZ; (c) plateau shear line on both sides of the wind field; (d) decomposition of wind field on both sides of Tibetan Plateau shear line^[72]

在不考虑地形坡度时，基流存在南北切变且波长较长时，易出现切变波不稳定。涡旋波不稳定是切变波不稳定的一种特殊形式，即切变线上的波动可通过不稳定发展而形成低涡。这从理论上证明水平尺度较长的高原横切变线在一定条件下可诱发高原涡生成及东移，从而在高原主体及下游地区形成低涡暴雨等极端天气事件^[72]。

3 西南低涡

西南涡作为青藏高原周边天气影响力最大、在中国排名仅次于台风（TC）的暴雨天气系统。针对西南涡及其暴雨的中尺度分析技术方法匮乏的现实，引入对流涡度矢量、湿涡度矢量、湿螺旋度、水汽散度垂直通量等新型诊断物理量，并发展出二阶湿位涡、散度演化等诊断分析物理量。应用表明二阶湿位涡对降水落区有一定的指示作用，当湿位涡梯度增大到一定程度时，二阶湿位涡的水平分布与降水落区分布有较好对应关系。条件对称不稳定可能是西南涡强降水发展增强的一种机制^[73]。

把AIRS/Aqua、TRMM卫星资料用于西南涡及其降水研究，证明主要监测大气成分的卫星AIRS资料也能很好地用于西南涡及其暴雨的研究，可有效弥补高原大气垂直观测资料缺乏的短板。强降水发生于西南涡的发展阶段，且最大降水发生后云中水含量明显增加。AIRS向外长波辐射（OLR）低值区与西南涡有

很好对应关系，AIRS云顶亮温资料（TBB）亦能有效反映出西南涡的发展演变，当西南涡发展旺盛时TBB出现明显低值区。在西南涡强盛阶段，温度廓线显示存在明显逆温层，水汽垂直分布亦出现逆湿现象。而西南涡强盛阶段的水汽含量明显小于初生阶段，水汽散度垂直通量能较好解释水汽廓线发生如此变化的原因^[74]。

涡度收支方程诊断表明^[75]，散度项的配置与平流项基本相反，散度项对低层西南低涡的发展和维持起主导作用，扭转项对西南涡的形成也有重要贡献，平流项和摩擦耗散项是西南涡涡度消耗的主要项，不利于西南涡的生成发展。涡动能收支方程诊断进一步表明，西南涡发展维持的涡动能主要源于水平通量散度项和涡动能制造项，摩擦耗散项和垂直通量散度项是其主要消耗项。西南涡的初生和成熟阶段都维持对流层低层辐合与正涡度、高位涡中心相耦合的动力结构，并有强烈上升运动，同时存在相当位温的“暖心”结构和相对湿度的“湿心”结构。在西南涡发展成熟阶段，正涡度柱可发展至对流层高层300 hPa。垂直方向上，西南涡首先在低层850 hPa形成，尔后向上发展在700 hPa出现闭合低涡并趋于成熟。低空水汽通量散度对降水带的强度和移动都具有较好指示意义。而位涡收支诊断分析表明，非绝热作用项的垂直结构与垂直通量散度项相反，潜热释放造成的非绝热作用项有利于低层位涡增长而抑制高层位涡增长，对西南涡的生成发展有重要作用。

4 高原低涡与西南低涡的耦合

在高原涡、西南涡形成阶段，位涡中心都位于高度场、风场低涡中心的西侧。高原涡在东移到高原东部的过程中强度加强；进入四川盆地继续东移的过程中开始出现强度减弱。当高原涡与西南涡实现垂直耦合后，高原涡的强度再次加强。高原涡与西南涡处于非耦合状态时，高原涡东侧的下沉气流将抑制盆地西南涡的发展。而当高原涡东移出高原与盆地西南涡垂直耦合后可激发西南涡加强，高原涡与西南涡垂直合并为一个深厚强涡。两涡相互作用过程中，暴雨中心对应稳定的上升气流，上升气流的右侧出现明显的下沉气流，从而构成次级垂直环流圈，完成高、低空的水汽和能量交换。位涡垂直剖面不仅清晰地反映高原涡与西南涡相互作用过程以及两涡的移动，还可以指示低涡中心强度的变化。等熵位涡水平面上能较好地反映高原涡、西南涡的移动及演变情况，对强降水中心也有预示作用，可在水平方向表征两涡相互作用过程^[76]。

两涡耦合开始阶段, 高原涡和西南涡都比较浅薄; 耦合贯通强盛阶段, 高层的高原涡和低层的西南涡分别向上和向下扩展贯通; 耦合结束阶段, 高原涡和西南涡垂直方向萎缩减弱。西南涡和高原涡耦合区上方在不同阶段均维持正涡度柱, 呈现低空辐合和高空辐散的特征, 并伴有强烈上升运动。垂直运动在耦合开始阶段最强, 正涡度柱在耦合强盛阶段显著增强, 高原涡和西南涡耦合贯通后, 改变了涡度的垂直分布特征。西南涡发展维持的涡动动能主要源于水平通量散度项和涡动动能制造项, 摩擦耗散项和垂直通量散度项是其主要消耗项。高原涡发展维持的涡动动能主要源于垂直通量散度项和区域平均动能与涡动动能之间的转换项, 涡动动能制造项出现负值是其涡动动能减弱的主要原因。两涡耦合期间强烈垂直上升运动将西南涡的涡动动能向高原涡输送, 即西南涡对高原涡的发展维持有重要动力作用^[77]。

5 高原切变线与高原低涡的关系

基于大气运动方程组及散度方程, 对高原横切变线上扰动稳定性问题以及切变线诱发高原涡的动力学机制进行了理论分析并用ERA-Interim再分析资料对其进行验证。得出高原横切变线是高原低涡产生的重要背景场, 切变线以南的水汽输送与辐合对于低涡的诱发作用是大气处于不平衡状态而引起散度场调整的结果, 辐合增强区有利于高原涡生成, 低涡中心对应非平衡正值中心, 低涡外围为非平衡项负值区。非平衡项负值大值与水汽辐合带的重叠区对降水落区有较好指示意义。当高原南部的西南风带向东或东北方向移动或当低涡下游出现非平衡项负值中心时, 低涡亦同向移动。若高原出现气旋式环流并且环流中心与非平衡项正值中心对应时, 有利于低涡生成。当低涡中心与非平衡项正值中心对应且正值中心数值不断增大时, 低涡趋于发展加强^[78]。

通过涡度方程和总变形方程的联合分析, 初步揭示出高原涡减弱而高原切变线生成的动力机制。高原涡的减弱主要受散度项的影响, 系统演变特征是由呈现强气旋性涡度的高原涡演变为呈现强辐合的高原切变线。在高原涡较强时, 正涡度局地变化项呈纬向带状分布。当高原涡减弱消失时, 正涡度局地变化项呈现东北—西南向的带状分布。高原切变线的生成阶段, 总变形局地变化项在切变线的生成位置上为正值, 总变形扭转项对切变线生成的作用最强, 其次为水平气压梯度项, 散度项的贡献最弱。高原涡受拉伸变形作用减弱消失, 而正是由于这种拉伸变形作用有助于高原切变线的生成。当高原切变线上以拉伸变形

为主时, 不利于其上高原涡的发展, 切变线可能是影响低涡发展的背景流场^[79]。

6 低频振荡对高原低涡的调制

利用NCEP/DOE再分析资料、NOAA向外长波辐射资料、澳大利亚气象局实时热带大气次季节振荡MJO指数和中国气象局成都高原气象研究所高原低涡年鉴统计数据, 应用合成分析方法初步探讨了MJO对高原涡发生的调制作用。结果表明: 1) MJO对高原涡的发生调制作用显著, MJO活跃期生成的高原低涡数约为MJO不活跃期的3倍; 2) 强(弱)MJO背景下, 青藏高原上被低频低压气旋(高压反气旋)控制, 高原上空的大气环流条件和水汽条件有利于(不利于)高原涡的生成; 3) 强(弱)MJO背景下, 高原东部盛行南(北)风, 西部盛行北(南)风, 高原北部盛行东(西)风, 南部盛行西(东)风, 低层涡度为正(负), 有利于(不利于)高原低层气旋环流的形成, 从而有利于(不利于)高原涡的形成; 4) 强(弱)MJO背景下有较强的动能制造, 高原上大气低频动能较高(低), 低频涡动动能也随之偏高(低), 能够(不能)为高原涡的生成提供充足的旋转动能, 有利于(不利于)高原涡的形成。MJO在向东传播的过程中, MJO对流中心东移, 热带地区大气垂直环流结构随之改变。由于中低纬大气环流的相互作用, 中低纬间的大气斜压性、大气有效位能以及涡动有效位能分布状况也随之改变, 这使得青藏高原及周边大气环流结构发生变化, 水汽输送因此产生明显差异, 高原上的大气潜热分布随之发生变化, 有利于和不利于高原涡生成的条件交替出现, 从而造成不同位相高原涡发生频数的显著差异^[80-82]。

利用500 hPa天气图、多种再分析资料和卫星反演的亮温资料, 研究了1998年5—9月高原涡与10~30 d次季节振荡的关系。研究揭示出活跃期与非活跃期的高原涡存在显著差异。该年暖季高原涡有9个活跃期, 高原涡的群发与气旋式环流联系的500 hPa涡度场的次季节振荡有关。相较于30~60 d次季节振荡(MJO), 夏季高原涡的群发现象更明显受10~30 d振荡(准两周振荡, QBWO)的调制, 所有高原涡的活跃期都位于10~30 d振荡的正位相。该结果显现出10~30 d准两周振荡对高原涡群发性的重要调制作用, 即10~30 d振荡通过提供有利于(不利于)气旋式(反气旋式)环境流场直接调制着高原涡的活动。大气低频振荡分析表明: 10~30 d尺度上, 在来自印度季风区低层暖对流引起的对流不稳定配合下, 西风槽扰动可激发高原涡活动。来自高原西南边界的水汽

输送是对流能量汇聚的一个重要影响因子。这一研究结果使我们认识到10~30 d次季节振荡的预测将有助于提升高原涡及其影响高原下游地区的中期（延伸期）天气预报、短期气候预测能力^[83]。

7 高原大地形对大气长波的激发与调制

青藏高原大地形有利于大气 Rossby 波的形成，高原动力、热力作用引起的 Rossby 波能量频散所产生的上游效应是引发我国（持续性）灾害天气发生、发展的重要因素之一，且波动能量传播速度随坡度的增大而增大。高原地形的南北坡度对波动相速度的影响相反，且在一定坡度值下波动可呈现准定常状态，甚至向西移动。高原大地形引起的西风绕流作用强于爬流抬升作用，即高原地形坡度的作用总体上使得高原西侧（上游）以辐散下沉运动为主，东侧（下游）为辐合上升运动，且垂直运动随地形坡度的增大而增强，这就使得原本背风坡下沉气流控制的高原东侧“死水区”反而成为我国对流活动的高发区。当地形坡度在一定范围内增大时，大气 Rossby 波的振幅增强、波数减少、波长加长，使波动向低频方向演化，最终促使地形 Rossby 波演化为高原准定常行星波。因此，高原对大气波动不仅起激发作用，还有调制作用。高原南坡和北坡都能激发出大气 Rossby 波，但南坡激发的波动无论在强度、范围更有利于波动向低频方向发展。高原地形坡度对我国东部地区降水的增幅、加时作用明显，有利于短时暴雨演变为持续性暴雨，并且降水中心也随着高原地形坡度的增大而增强并逐渐向东、向北移动^[84]。

8 结论

以上本文系统性梳理了近10年来以高原涡、高原切变线和西南涡这些青藏高原及周边地区基本天气系统为代表的青藏高原天气动力学研究的若干重要问题及取得的主要成果，从中也可以看出在当前为数很少的青藏高原天气动力学研究工作中，参研的人数较少，研究的深度、广度不够，呈现方式多为理论公式的简单释用，研究成果出现碎片化，缺乏理论的预见性和系统性。如对高原地形和加热作用的考虑也较为粗糙，导致高原独特作用对我国灾害性天气和气候的影响机理以及数值模式中如何更好地考虑高原地-气物理过程等重要问题，都非常缺乏动力学理论方面的有力支撑。应该看到，动力学理论研究既然是用数理方法来研究大气问题，就不能不受到数学、物理学本身发展水平的限制，也将随着数学、物理学的发展而前进。由于支配大气运动的数学方程组如此复杂、包含的物理过程如此繁多（特别是在青藏高原这样高大

地形、复杂下垫面的地区），我们常常面对这样的困境：为了求得方程组的解析解，所作的简化（近似）偏离实际，而合乎实际的方程组却难以求得解析解，从而制约动力学理论研究的应用和深入。这就要求在动力学研究中灵活采用其他研究方法特别是数值模式、卫星遥感等方法作为有益助力。此外，注意引进其他学科可学、可用的新理论、新技术，应用新的资料、新的信息技术手段（如可视化、虚拟现实、智能识别、机器学习和深度学习等），实现抽象物理概念与复杂物理模型的可视化，非线性物理过程与非线性偏微方程组的仿真求解，极端天气关键特征与数值模式最优解的筛选识别，这对于向青藏高原天气动力学研究的深度和广度进军十分必要。

随着大气探测技术的发展，高原观测资料的增多，会揭露出新的高原大气现象，提出新的问题，这些都对高原天气动力学理论研究不断产生压力和动力，促进经典问题的再研究、再认识，经典理论的复活，开启新问题的理论思考与解答。例1，西南涡的形成机理一直是西南低涡研究的难题，众说纷纭，至今尚无定论。经典天气学理论认为，青藏高原东南侧的偏南气流输送暖空气造成升温降压，同时在高原侧向摩擦作用下产生气旋性切变的偏南气流，与高原东北缘反气旋切变的偏北气流形成辐合，从而生成西南涡^[84]。而西南涡成因的动力学理论观点目前大致有三类：其一归因为地形，如基于北美落基山脉的经典地形理论给出的背风气旋（满足 Taylor-Proudman 定理的 Sullivan 涡解）、尾流涡，或南支涡、高原大地形绕流形成的南支气旋性气流及横断山脉的阻挡加强效应^[85]；其二归因为加热，如高原近地层超干绝热导致的条件不稳定、热成风适应、热力适应；其三归因为地形与加热的共同作用，如斜坡地形上加热强迫作用产生的倾斜涡度发展。近年来又提出水汽作用说（雨生涡）、波动说（切变线波动、非线性惯性重力内波）、位涡不稳定（高层位涡下传）、对称不稳定引发的中尺度对流涡（MCV）发展、高原涡的垂直或水平耦合的激发作用^[10]，以及西西南支绕流和季风环流带来的水汽、角动量输送的诱发作用^[49]等新观点。例2，四川盆地西南涡持续性暴雨天气过程中，虽然西南涡本身不属于 MCS，但在西南涡发展过程中，MCS 有利于激发上升气流，中低层的上升气流和正涡度配合利于热量和水汽垂直输送，高层的辐散进一步促使 MCS 的发展，MCS 对西南涡的移动也有一定引导作用。有无 MCS 伴随发展，西南涡中对流活动对热量和水汽的输送能力迥异^[16]。这说明按水平尺度，西南

涡可归入MCS, 但西南涡本身一般并不当作MCS来研究(虽然西南涡降水具有明显对流性)。然而西南涡内已初步证实存在MCS, 这就促使我们必须考虑西南涡与MCS的相互作用问题^[86]。此外, 高原天气系统之间的相互作用、异常发展的长生命史中尺度低涡以及高原天气系统生成、东移与发展机理等问题也值得进一步研究^[87-94]。

因此, 在以上综述与思考的基础上提出当前高原天气动力学研究存在的主要问题和需要加强的若干方向:

1) 高原天气系统数据集的创建。涉及高原天气系统定义及统计标准的规范、统一, 高原涡、高原切变线和西南涡年鉴的连续、及时出版, 并逐步由图表集向量化数据集发展。常规资料和高原试验资料质量控制与开放共享, 高原天气系统智能识别技术探索, 以及可用于气候研究的高原天气系统活动指数的创建。

2) 高原天气系统共性与差异化研究。如高原涡与西南涡、西北涡的异同, 不同源地高原涡、西南涡的异同。

3) 高原天气系统形成机理、结构特征、影响因素及强迫作用的细化和深化研究。西南涡的分类研究及其不同类型西南涡形成机理的再研究。高原天气系统的理论归因研究与甚高分辨模拟(如西南涡整体的大涡模拟)。除地形之外, 高原特殊的陆-气过程可能对高原及周边天气系统亦有重要影响; 除下垫面的影响之外, 高层系统对低层系统的诱发作用也不可忽视, 如高原涡多为自下向上而发展, 但在有利环流条件下也可能自上向下而形成。

4) 高原低值系统之间的相互作用。如高原涡与西南涡、西南涡与西南涡的双涡甚至多涡效应, 高原切变线与高原涡、西南涡的因果关系, 高原MCS与高原涡、西南涡的相互作用。

5) 高原天气系统东移发展条件的理论化和系统化研究。多级阶梯地形、多尺度天气系统背景下的高原低值系统东移条件与演变机理。高原低值系统与高原大气波动的联系, 触发高原下游强天气的影响方式与影响机理。高原低值系统与下游天气系统(如低空急流、南支槽、江淮切变线、江淮气旋、梅雨锋、热带气旋以及西北太平洋副热带高压)的相互作用。次季节振荡(高原准两周振荡QBWO、热带MJO)对高原低值系统活动的影响。研究方式也应由个例分析、诊断计算为主, 更多地转为合成分析、集成研究和概念模型提炼。

6) 高原高值与低值系统之间的相互作用。南亚高压(青藏高压)对高原涡在内的低层低值系统和高原及周边天气的影响。

7) 高原天气系统的气候变化机理研究。在全球变暖、青藏高原也发生明显气候变化的背景下, 高原天气系统活动的变异特征与物理机理, 以及这种变异对我国极端天气气候事件(如暴雨、干旱、高温、冰雪、雾霾)和未来天气、气候格局的可能影响。

参考文献

- [1] Xu X D, Zhang R H, Koike T, et al. A new integrated observational system over the Tibetan Plateau. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2008, 89(10): 1492-1496.
- [2] Zhao P, Xu X D, Chen F, et al. The third atmospheric scientific experiment for understanding the earth-atmosphere coupled system over the Tibetan Plateau and its effects. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2018, 99(4): 757-776.
- [3] 赵平, 李跃清, 郭学良, 等. 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. *气象学报*, 2018, 76(6): 833-860.
- [4] Fu Y F, Ma Y M, Zhong L, et al. Land-surface processes and summer-cloud-precipitation characteristics in the Tibetan Plateau and their effects on downstream weather: a review and perspective. *National Science Review*, 2020, 7(3): 500-515.
- [5] 李国平. 高原涡、西南涡研究的新进展及有关科学问题. *沙漠与绿洲气象*, 2013, 7(3): 1-6.
- [6] 李国平. 近25年来中国山地气象研究进展. *气象科技进展*, 2016, 5(3): 115-122.
- [7] 李国平, 陈佳. 西南涡及其暴雨研究新进展. *暴雨灾害*, 2018, 37(4): 293-302.
- [8] 李国平, 张万诚. 高原低涡、切变线暴雨研究新进展. *暴雨灾害*, 2019, 38(5): 464-471.
- [9] 周玉淑, 邓涤菲, 陈秋士. 等 σ 面相当重力位势分析方法及其对高原低涡个例的检验应用. *大气科学*, 2012, 36(1): 47-62.
- [10] Xiang S, Li Y, Li D, et al. An analysis of heavy precipitation caused by a retracing plateau vortex based on TRMM data. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2013, 122(1-2): 33-45.
- [11] 孙建华, 李娟, 沈新勇, 等. 2013年7月四川盆地一次特大暴雨的中尺度系统演变特征. *气象*, 2015, 41(5): 533-543.
- [12] Shou Y X, Lu F, Liu H, et al. Satellite-based Observational study of the low systems over the Tibetan Plateau and surrounding areas: Features of deep convective clouds top. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2019, 36(2): 73-90.
- [13] 傅慎明, 孙建华, 赵思雄, 等. 梅雨期青藏高原东移对流系统影响江淮流域降水的研究. *气象学报*, 2011, 69(4): 581-600.
- [14] 何钰, 李国平. 青藏高原大地形对华南持续性暴雨影响的数值试验. *大气科学*, 2013, 37(4): 933-944.
- [15] Li G P, Deng J. Atmospheric water monitoring by using ground-based GPS during heavy rains produced by TPV and SWV. *Advances in Meteorology*, 2013, doi: 10.1155/2013/793957.
- [16] 胡祖恒, 李国平, 官昌贵, 等. 中尺度对流系统影响西南低涡持续性暴雨的诊断分析. *高原气象*, 2014, 33(1): 116-129.
- [17] 董元昌, 李国平. 大气能量学揭示的高原低涡结构及降水特征. *大气科学*, 2015, 39(6): 1136-1148.
- [18] 郝丽萍, 周瑾, 康岚. 西南涡暴雨天气过程分析和数值模拟试验. *高原气象*, 2016, 35(5): 1182-1190.
- [19] 李山山, 李国平. 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. *高原气象*, 2017, 36(2): 317-329.
- [20] 李驰狄, 左群杰, 高守亭, 等. 青藏高原上空一次重力波过程的识别与天气影响分析. *气象学报*, 2018, 76(6): 904-919.
- [21] 马婷婷, 吴国雄, 刘屹岷, 等. 青藏高原地表位涡密度强迫对2008年1月中国南方降水过程的影响 I: 资料分析. *气象学报*, 2018, 76(6): 870-886.
- [22] 宋雯雯, 李国平, 龙柯吉, 等. 两类动力因子对四川盆地一次低涡

- 暴雨的应用研究, 高原气象, 2018, 37(5): 1289-1303.
- [23] 罗雄, 李国平. 一次高原切变线过程的数值模拟与阶段性结构特征, 高原气象, 2018, 37(2): 406-419.
- [24] 罗雄, 李国平. 高空急流对高原切变线影响的数值试验与动力诊断, 气象学报, 2018, 76(3): 361-378.
- [25] 刘晓冉, 李国平, 李永华, 等. 一次引发重庆大暴雨的西南低涡动力诊断分析, 西南大学学报(自然科学版), 2018, 40(5): 160-169.
- [26] 宋雯雯, 李国平. 两类涡度矢量对四川盆地一次暴雨过程的分析应用. 高原气象, 2016, 35(6): 1464-1475.
- [27] 罗潇, 李国平. 动能空间尺度分解及其在高原切变线的分析应用, 高原气象, 2019, 38(2): 314-324.
- [28] 罗潇, 李国平. 一次东移型高原切变线过程的扰动动能特征, 气象科学, 2019, 39(2): 226-236.
- [29] 马婷, 刘屹岷, 吴国雄, 等. 青藏高原低涡形成、发展和东移影响下游暴雨天气个例的位涡分析. 大气科学, 2020, 44(3): 472-486.
- [30] Sugimoto S, Ueno K. Formation of mesoscale convective systems over the eastern Tibetan Plateau affected by plateau-scale heating contrasts. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2010, 115. 10.1029/2009JD013609.
- [31] Li L, Zhang R, Wen M, et al. Effect of the atmospheric heat source on the development and eastward movement of the Tibetan Plateau vortices. *Tellus A*, 2014, 66: 24451, doi: 10.3402/tellusa.v66.24451.
- [32] Fan Y Y, Li G P, Lu H G. Impacts of abnormal heating of Tibetan Plateau on Rossby wave activity and hazards related to snow and ice in South China. *Advances in Meteorology*, 2015, DOI: 10.1155/2015/878473.
- [33] 李国平, 卢会国, 黄楚惠, 等. 青藏高原夏季地面热源的气候特征及其对高原低涡生成的影响. 大气科学, 2016, 40(1): 131-141.
- [34] 刘云丰, 李国平. 夏季高原大气热源的气候特征以及与高原低涡生成的关系. 大气科学, 2016, 40(4): 864-876.
- [35] Wu D, Zhang F M, Wang C H. Impacts of diabatic heating on the genesis and development of an inner Tibetan Plateau vortex. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. 2018, 123(20): 11691-11704.
- [36] Zhang F M, Wang C H, Pu Z X. Genesis of Tibetan Plateau vortex: roles of surface diabatic and atmospheric condensational latent heating. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2019, 58: 2633-2651.
- [37] Zhang Y C, Sun J H, Fu S M. Impacts of diurnal variation of mountain-plain solenoid circulations on precipitation and vortices east of the Tibetan Plateau during the Mei-yu season. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2014, 31: 139-153.
- [38] He Y, Li G P. The effects of the plateau's topographic gradient on Rossby waves and its numerical simulation. *Journal of Tropical Meteorology*, 2015, 21(4): 337-351.
- [39] 潘昶, 李建, 宇如聪. 东移西南低涡空间结构的气候学特征. 气候与环境研究, 2011, 16(1): 60-70.
- [40] 郁淑华, 高文良, 彭骏. 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. 高原气象, 2013, 32(6): 1527-1537.
- [41] 林志强, 周振波, 假拉. 高原低涡客观识别方法及其初步应用. 高原气象, 2013, 32(6): 1580-1588.
- [42] 李国平, 赵福虎, 黄楚惠, 等. 基于NCEP资料的近30年夏季青藏高原低涡的气候特征. 大气科学, 2014, 38(4): 756-769.
- [43] Yu S H, Gao W L, Peng J, et al. Observational facts of sustained departure plateau vortices. *Journal of Meteorological Research*, 2014, 28(2): 296-307.
- [44] Zhong R, L H Zhong, L J Hua, et al. A climatology of the southwest vortex during 1979-2008. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2014, 7(6): 577-583.
- [45] Feng X, Liu C, Rasmussen R, et al. A 10-yr Climatology of Tibetan Plateau vortices with NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2014, 53(1): 34-46. 67.
- [46] Feng X, Liu C, Fan G, et al. Climatology and structures of southwest vortices in NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Journal of Climate*, 2016, 29(21), 7675-7701.
- [47] Lin Z Q. Analysis of Tibetan Plateau vortex activities using ERA-Interim data for the period 1979-2013. *Journal of Meteorological Research*, 2015, 29: 720-734.
- [48] 刘红武, 邓朝平, 李国平, 等. 东移影响湖南的西南低涡统计分析. 气象与环境科学, 2016, 39(1): 59-65.
- [49] 叶瑶, 李国平. 近61年西南低涡的统计特征与异常发生的流型分析. 高原气象, 2016, 35(4): 946-954.
- [50] Bai A J, Li G P. Climatology of monsoon precipitation over the Tibetan Plateau from 13-year TRMM observations. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016, 126(1): 5-26.
- [51] Zhang X, Yao X P, Ma J L, et al. Climatology of transverse shear lines related to heavy rainfall over the Tibetan Plateau during boreal summer. *Journal of Meteorological Research*, 2016, 30(6): 915-926.
- [52] 张博, 李国平, 段炼, 等. 基于客观识别技术的高原低涡近30年气候特征. 兰州大学学报(自然科学版), 2018, 54(1): 104-119.
- [53] 刘自牧, 李国平, 张博. 高原涡与高原切变线伴随出现的统计特征, 高原气象, 2018, 37(5): 1233-1240.
- [54] Curio J, Chen Y R, Schiemann R, et al. Comparison of a manual and an automated tracking method for Tibetan Plateau vortices. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2018, 35(8): 965-980.
- [55] Curio J, Schiemann R, Hodges K I, et al. Climatology of Tibetan Plateau vortices in reanalysis data and a high-resolution global climate model. *Journal of Climate*, 2019, 32: 1933-1950.
- [56] 刘自牧, 李国平. 高原切变线的客观识别与时空分布的统计分析. 大气科学, 2019, 43(1): 13-26.
- [57] 陈炜, 李跃清. 青藏高原东部重力波过程与西南涡活动的统计关系. 大气科学, 2019, 43(4): 773-782.
- [58] 王婧羽, 王晓芳, 汪小康, 等. 青藏高原云团东传过程及其中尺度对流系统的统计特征. 大气科学, 2019, 43(5): 1019-1040.
- [59] 刘冲, 赵平. 1979-2016年四川盆地低涡的气候特征分析. 气候变化研究进展, 2020, 16(2): 203-214.
- [60] Mai Z, Fu S M, Sun J H, et al. Key statistical characteristics of the mesoscale convective systems generated over the Tibetan Plateau and their relationship to precipitation and southwest vortices. *International Journal of Climatology*, 2020, doi: 10.1002/joc.6735.
- [61] Lin Z, Guo, W, Jia, L. et al. Climatology of Tibetan Plateau vortices derived from multiple reanalysis datasets. *Climate Dynamics*, 2020, https://doi.org/10.1007/s00382-020-05380-6.
- [62] Cao J. Computing stream function and velocity potential near the Tibetan Plateau. *Atmospheric Research*, 2020, 247, https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105149.
- [63] 李国平. 青藏高原动力气象学(第三版). 北京: 气象出版社, 2020.
- [64] Li G P, Lu J H. Some possible solutions of nonlinear internal inertial gravity wave equations in the atmosphere, *Advances in Atmospheric Sciences*, 1996, 13(2): 244-252.
- [65] 李国平, 蒋静. 一类奇异孤波解及其在高原低涡结构分析中的应用. 气象学报, 2000, 58(4): 447-456.
- [66] Liu X R, Li G P. Analytical solutions for the thermal forcing vortices in the boundary layer and its applications. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2007, 28(4): 429-439.
- [67] 李国平, 赵邦杰, 杨锡青. 地面感热对青藏高原低涡流场结构及发展作用的动力学分析, 大气科学, 2002, 26(3): 519-525.
- [68] 李国平, 徐琪. 边界层动力“抽吸泵”对青藏高原低涡的作用, 大气科学, 2005, 29(6): 965-972.
- [69] 李国平, 罗喜平, 陈婷, 等. 高原低涡中涡旋波动特征的初步分析. 高原气象, 2011, 30(3): 553-558.
- [70] 陈功, 李国平. 夏季青藏高原低涡的切向流场及波动特征分析. 气象学报, 2011, 69(6): 956-963.
- [71] Chen G, Li G P. Dynamic and numerical study of waves in the Tibetan Plateau vortex. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2014, 31(1): 131-138.
- [72] 杜梅, 李国平, 丁晨晨. 高原横切变线上的波动及其与低涡的可能联系. 高原气象, 2018, 37(6): 1605-1615.
- [73] 韦晶晶, 李国平. 一次东南路径西南低涡引发广西强降水的湿位涡和二阶湿位涡特征. 成都信息工程大学学报, 2016, 31(6): 592-598.
- [74] Ni C C, Li G P, Xiong X Z. Analysis of a vortex precipitation event over Southwest China Using AIRS and in situ measurements. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2017, 34(4): 559-570.
- [75] 刘晓冉, 李国平. 一次东移型西南低涡的数值模拟及位涡诊断. 高原气象, 2014, 33(5): 1204-1216.

- [76] 邱静雅, 李国平, 郝丽萍. 高原涡与西南涡相互作用引发四川盆地暴雨的位涡诊断. *高原气象*, 2015, 34(6): 1556-1565.
- [77] 刘晓冉, 李国平, 胡祖恒, 等. 一次高原低涡诱发西南低涡耦合加强的动力诊断分析. *气象科学*, 2020, 40(3): 363-373.
- [78] 杜梅, 李国平, 李山山. 高原横切变线与高原低涡关系的初步研究. *大气科学*, 2020, 44(2): 269-281.
- [79] 李山山, 李国平. 一次高原低涡与高原切变线演变过程与机理分析. *大气科学*, 2017, 41(4): 713-726.
- [80] 赵福虎, 李国平, 黄楚惠, 等. 热带大气低频振荡对高原低涡的调制作用. *热带气象学报*, 2014, 31(1): 119-128.
- [81] Zhao F H, Li G P, Huang C H, et al. The modulation of Madden-Julian oscillation on Tibetan Plateau vortex. *Journal of Tropical Meteorology*, 2016, 22(1): 30-41.
- [82] Li G P, Zhao F H. Analysis of the mechanism underlying Tibetan Plateau vortex frequency differences between strong and weak MJO periods. *Journal of Meteorological Research*, 2017, 31(3): 530-539.
- [83] Zhang P F, Li G P, Fu X H, et al. Clustering of Tibetan Plateau vortices by 10–30-day intraseasonal oscillation. *Monthly Weather Review*, 2014, 142(1): 290-300.
- [84] 罗亚丽, 孙继松, 李英, 等. 中国暴雨的科学和预报: 改革开放40年研究成果. *气象学报*, 2020, 78(3): 419-450.
- [85] Wang Q W, Tan Z M. Multi-scale topographic control of southwest vortex formation in Tibetan Plateau region in an idealized simulation. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2014, 119: 11543-11561.
- [86] 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. *Journal of the Atmospheric Sciences*, doi: 10.1175/JAS-D-18-0331.1.
- [87] 李国平, 李山山, 黄楚惠. 高原切变线与高原低涡相互作用的研究现状与展望. *地球科学进展*, 2017, 32(8): 789-795.
- [88] Zhou K, Liu H W, Zhao L, et al. Binary mesovortex structure associated with southwest vortex. *Atmospheric Science Letters*, 2017, 18: 246-252.
- [89] Chen Y R, Li Y Q, Kang L. An index reflecting mesoscale vortex-vortex interaction and its diagnostic applications for rainstorm area. *Atmospheric Science Letters*, 2019, 20(6), <https://doi.org/10.1002/asl.902>.
- [90] Fu S M, W Li, J Sun, et al. Universal evolution mechanisms and energy conversion characteristics of long-lived mesoscale vortices over the Sichuan Basin. *Atmospheric Science Letters*, 2015, 16, 127-134.
- [91] Fu S M, J H Sun, Y L Luo, et al. Formation of long-lived summertime mesoscale vortices over central east China: Semi-idealized simulations based on a 14-year vortex statistic. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 2017, 74: 3955-3979.
- [92] Li L, Zhang R, Wen M. Genesis of Southwest Vortices and its relation to Tibetan Plateau Vortices. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2017, doi: 10.1002/qj.3106.
- [93] Li L, Zhang R, Wen M. Modulation of the atmospheric quasi-biweekly oscillation on the diurnal variation of the occurrence frequency of the Tibetan Plateau vortices. *Climate Dynamics*, 2018, 50(11-12): 4507-4518.
- [94] Li L, Zhang R H, Wen M, et al. Development and eastward movement mechanisms of the Tibetan Plateau vortices moving off the Tibetan Plateau. *Climate Dynamics*, 2019, 52: 4849-4859.