

华维,邓浩,夏昌基,等.青藏高原水循环中高原低涡及多季风交汇的研究进展[J].沙漠与绿洲气象,2024,18(2):1-11.

doi: 10.12057/j.issn.1002-0799.2024.02.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



青藏高原水循环中高原低涡及多季风交汇的研究进展

华 维^{1,2,3}, 邓 浩^{1,4}, 夏昌基^{1,5}, 张永莉¹, 朱丽华¹, 赖 欣¹, 范广洲^{1,2,3}

(1.成都信息工程大学大气科学学院,四川 成都 610225;2.高原大气与环境四川省重点实验室,四川 成都 610225;

3.四川省气象灾害预测预警工程实验室,四川 成都 610225;4.中国电力工程顾问集团西南电力

设计院有限公司,四川 成都 610056;5.镇远县气象局,贵州 镇远 557700)

摘 要:青藏高原以其特殊而强大的动力和热力效应,导致东亚季风、印度季风和高原季风在高原及周边地区交汇。受多季风交汇影响,青藏高原低涡的水循环过程极为复杂,而高原低涡水循环异常往往可造成高原及周边乃至我国中东部地区频发灾害性天气,因此一直是国内外学者关注的热点和难点问题。本文回顾了国内外关于高原低涡活动特征、结构特征、生成发展机制等方面研究进展,从高原低涡水汽输送、低涡降水和云—降水物理过程等角度概括了高原低涡参与水循环过程研究成果,在总结东亚季风、印度季风和高原季风相互作用研究的基础上分析了多季风交汇对高原水循环的影响。对多季风作用下高原低涡影响水循环方面存在的问题进行了讨论,并展望了未来研究方向。

关键词:多季风交汇;高原低涡;水循环

中图分类号:P426

文献标识码:A

文章编号:1002-0799(2024)02-0001-11

水是万物赖以生存的物质基础,也是地球气候系统中最为活跃的因子之一。作为联系气候系统各圈层的重要纽带,水循环是形成和制约天气气候变化的基本过程,可直接影响人类活动和生态系统的发展^[1]。地球表面水循环过程极其复杂,影响因子既包括大气环流、辐射、降水、温度等气象因素,也受到地形、海洋、土壤、植被等下垫面的作用,这增加了人们准确认识地球水循环的难度。为此,全球范围内开展了以国际水文计划和全球能量与水循环试验等为代表的大量与水循环过程相关的科学计划和野外观

测试验^[2-3]。鉴于青藏高原(以下简称“高原”)能量和水循环过程对亚洲季风乃至全球天气气候变化的重要影响,科学家还实施了全球能量水循环之亚洲季风青藏高原试验研究^[4]。我国近年来开展的第三次青藏高原大气科学试验(The Third Tibetan Plateau Atmospheric Scientific Experiment, TIPEX-III)也将认识高原水循环作为重要的科学目标之一^[5]。高原水循环受诸多因素制约,其中高原低涡降水是高原水循环过程的重要组成部分。作为一种生成于高原主体的特殊天气系统,高原低涡的发生、发展和消亡一定程度上反映了高原上复杂的大气环流、动力作用、陆面过程以及物质循环过程^[6-12]。高原低涡作为一种典型的中尺度天气系统,是高原主要的降水系统之一,且其东移还可造成四川盆地及我国中东部地区发生大风、暴雨等灾害性天气以及泥石流和山洪等次生灾害^[8-9,13-15]。因此,深入开展青藏高原水循环中高原低涡及多季风交汇的作用意义重大。

收稿日期:2022-11-07;修回日期:2023-08-08

基金项目:国家自然科学基金项目(42075019,42275022);第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK010203);国家重点研发计划项目(2018YFC1505702);成都信息工程大学科技创新能力提升计划项目(KYQN202202)

作者简介:华维(1982—),男,教授,主要从事高原气象及气候变化研究。E-mail: huawei@cuit.edu.cn

高原特殊的地形和热力作用深刻影响着亚洲水循环过程^[4],因此高原也被认为是亚洲季风形成的“发动机”和“启动器”^[16-17]。从亚洲季风系统的结构和成员来看,东亚季风与印度季风差异明显,且相对独立^[18-19],同时高原主体也存在一个冬、夏盛行风向相反的季风环流,即高原季风^[20]。因此,东亚季风、印度季风和高原季风组成的亚洲季风系统被认为是全球最复杂的季风系统之一。东亚季风、印度季风和高原季风在高原及周边地区交汇,形成了全球少有的多季风交汇区。在多季风交汇作用影响下,高原低涡的消发展既受季风影响下的大尺度水循环制约,同时也与低涡系统中小尺度水循环密切联系,因此,其水循环过程十分复杂。与此同时,高原低涡与季风的相互反馈对区域天气气候也有着重要影响。一方面,多季风交汇产生的能量和水汽输送可造成低涡涡区和周边大气水循环改变,从而导致低涡的结构和性质发生变异^[21-22];另一方面,高原低涡降水异常释放的凝结潜热也将影响高原与周边自由大气间的热力差异,并反作用于季风环流,进而改变区域天气系统^[23]。

可见,高原水循环中高原低涡及多季风交汇的作用十分重要,但相关研究仍存在较大的挑战和不确定性。本文从高原低涡的特征与发展机理、高原低涡对高原水循环的影响以及多季风交汇作用对高原降水的影响等三方面对国内外相关研究进行回顾,探讨高原多季风交汇作用和高原低涡在水循环过程中的可能联系,以期凝练出关键科学问题,并对未来研究方向进行展望。

1 高原低涡研究进展

1.1 高原低涡的基本活动特征

1.1.1 高原低涡生成源地及气候特征

高原低涡是一种强烈依赖高原特殊大地形的局地涡旋,其生成地存在明显的地域差异。早期研究^[24]指出,高原中西部是高原低涡的频发地区。随后的研究^[9]也发现,高原低涡主要生成于高原北部的那曲和高原东部的松潘等地区。高原存在那曲东北部、德格东北部、松潘及申扎一改则一带4个低涡生成高频中心^[25]。此外,高原中部也是高原低涡的主要生成源地^[26]。高原低涡的气候特征分析依赖于对低涡的精确识别。早期工作多以人工识别为主^[7,25,27],但由于人工识别的主观性导致其结果存在不确定性,因此高原低涡的客观识别应运而生,且与人工识别结果相比,高原低涡客观识别方法得出的结论同样具

有较高的可信度^[28]。随着观测资料和数值模式的快速发展,基于再分析资料、遥感资料和高分辨率数值模式开展的高原低涡客观识别研究提高了对高原低涡气候特征的认识^[29-34]。需要指出的是,由于不同研究所用资料、识别标准和统计时段有所不同,导致高原低涡气候特征研究结论存在明显差异^[26,35]。表1为部分学者关于高原低涡基本活动特征的研究结果。

表1 不同研究基于客观识别得到的高原低涡统计结果

主要参考文献	再分析资料	时段/年	最短生命史/h	年均个数/个	年均移出个数(移出率)
Lin 等 ^[26]	ERA-Interim	1979—2017	18	63.5	8.4 (12.9%)
	ERA-40	1958—2001	18	63.5	7.3 (11.5%)
	JRA55	1958—2017	18	63.5	8.0 (12.6%)
	NCEP-CFSR	1979—2017	18	63.5	8.8 (13.9%)
	MERRA2	1980—2017	18	63.5	9.1 (14.3%)
张博等 ^[33]	NCEP-CFSR	1981—2010	—	60.6	—
黄一航等 ^[35]	ERA-Interim	1979—2016	—	56.3	—
Feng 等 ^[29]	NCEP-CFSR	2000—2009	6	103.0	8.7 (8.5%)
Lin 等 ^[30]	ERA-Interim	1979—2013	18	53.0	6.7 (13.0%)
Curio 等 ^[32]	ERA-Interim	1979—2015	24	154.0	31.0 (20.0%)
	NCEP-CFSR	1979—2015	24	269.0	53.0 (20.0%)

1.1.2 高原低涡的东移及消亡

高原低涡生成后可沿西风带向东移动,但大部分在高原主体消亡^[26],部分低涡可继续东移出高原,这一现象在夏季最为明显^[13,25,34]。高原低涡东移出高原后,主要存在东移、东南移和东北移3条路径,其中东移型低涡最多,其次为向东北移和东南移低涡^[25]。高原低涡移出高原后,其生命史与低涡发展过程密切相关,一半以上移出型低涡在12 h内消亡,少部分可持续60 h以上^[25]。此外,西风急流、南亚高压、南支槽、切变线、下垫面和冷暖平流等均为影响高原低涡东移发展的影响因素^[21,25],高原低涡自身的倾斜结构也可对低涡的东移造成重要影响^[36]。

1.2 高原低涡的结构特征

高原低涡为 α 中尺度低压气旋,水平范围在400~500 km,垂直厚度为2~3 km,大部分在400 hPa以下形成和活动,其结构在500 hPa等压面上最为清晰。作为边界层内形成的浅薄低压系统,高原低涡的热力、水汽和动力特征在其生命史的不同阶段都存在明显的差异^[13]。高原低涡的热力特征与太阳辐射加热、冷暖平流、地表感热及凝结潜热等因素密切

相联。在高原短波辐射和地表感热加热共同作用下生成的低涡一般为暖性低涡,地面至 100 hPa 均为暖心结构,具有明显的正压性^[37],成熟阶段多为冷性低涡,斜压性较强,但冷性低涡中仍存在暖中心,并且在冷平流侵入或非绝热冷却的影响下可形成与暖中心共存的冷中心^[38]。此外,高原低涡在成熟阶段存在与热带气旋相似的螺旋云带结构^[15,39]。

1.3 高原低涡的生成发展机理

高原低涡在形成初期环境风速较小,一般呈气旋性切变,随着低涡系统的发展,整个涡区低层均呈气旋式辐合,强辐合区出现在 400 hPa 附近,辐散层主要位于辐合层上方的 300~150 hPa^[38]。涡区存在强烈的上升运动,上升区主要位于低涡垂直轴东侧,西侧为较弱的下沉运动,因此高原低涡云系多具有“西少东多”的分布特征^[13]。

涡度平流也是影响高原低涡生成发展的重要因子。低涡高发年,高原 500 hPa 上的东南—西北向正涡度平流有利于低涡形成^[40]。对涡区涡度的收支分析^[41]也表明,水平辐合辐散和垂直输送有利于低涡增强,但不同阶段二者的贡献并不相同。通过对移出型与未移出型低涡的动力结构对比可知,移出型(未移出型)低涡的厚度约为 3(1.5) km,且涡区的上升运动强度和范围随低涡发展而发展(减弱)^[42]。一般而言,高原低涡的正涡度强度以及垂直和水平范围在移出高原前较移出后强度更强,范围更广^[13]。此外,高原低涡的垂直差动涡度平流强迫也被认为是低层浅薄涡旋系统发展的动力机制之一^[43]。

凝结潜热、地表感热和层结不稳定也对高原低涡发展起着至关重要的作用。夏季高原地表加热场强烈的日变化可造成日间位涡消耗,夜间则相反^[44-45]。伴随低涡降水的形成,凝结潜热与低涡对流存在正反馈机制,而低层凝结潜热加热垂直梯度形成的正位涡有利于低涡增强和东移^[46-47]。一些研究还从动力学角度证明了高原加热和层结稳定度对低涡结构和发展移动的影响^[48-49]。此外,不少学者还基于数值模式探讨了地面感热、大气层结稳定度、边界层以及水汽等因素对高原低涡生成发展的影响及机理^[22,34,50-53]。

2 高原低涡对高原水循环过程的影响

2.1 高原低涡的水汽输送

水汽输送是水循环过程的主要表现形式,也是形成降水的重要条件。水汽输送不仅可对高原低涡的生成产生影响,亦可对涡眼结构的维持和发展起

到至关重要的作用^[51-52]。高原水汽通量的净输入与高原低涡的生成频次密切相关,高原低涡频发时段常与水汽净输入量最大时刻相对应,即输送到高原主体的水汽越多,高原低涡发生频次越高,反之亦然^[34]。当然,也有研究指出不同高原低涡个例中的主要水汽输送通道存在一定差异^[9,54-55]。从高原水汽源地分布(图 1)来看,其主要的水汽来源包括西风带中纬度水汽输送以及季风带来的印度洋和太平洋水汽输送,且大部分低涡降水个例中同时存在 3 条水汽输送与辐合^[56-57]。

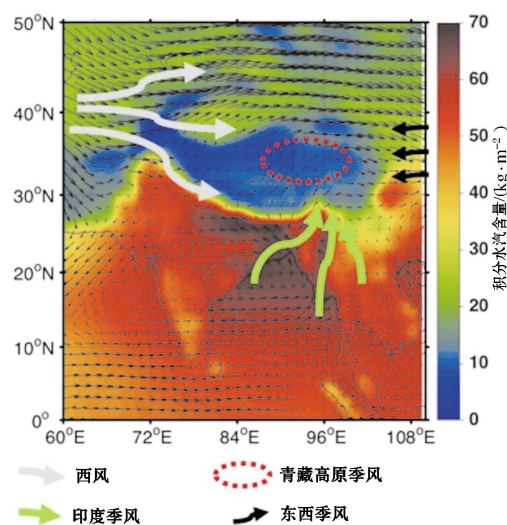


图 1 调节青藏高原上空大气湿度的气候系统示意^[57]

Xu 等^[58]揭示了夏季高原大气水塔维持的类 CISK (第二类条件不稳定) 机制,并指出与高原加热相关的高原低涡可在高原及周边地区形成大量云和降水,存在于高原南坡和主体的辐合辐散耦合过程则将水汽输送至高原,这一水汽抬升过程亦可促进高原对流系统发展,从而在高原上空形成水循环(图 2)。

2.2 高原低涡的降水特征与机理

除台站观测资料外,大量工作基于地基 GPS、雷达和卫星等资料对高原低涡进行了连续观测。基于 GPS 大气可降水量反演产品的研究^[59]表明,大气可降水量变化趋势与西南低涡的发生发展过程几乎一致。利用天气雷达开展的高原低涡降水研究也发现,雷达回波可较准确地确定涡区地面 3 h 累积降水的落区,且回波强度亦能较好反应降水量量级^[60]。利用 TRMM 卫星开展的高原低涡降水研究^[61]发现,低涡降水在移出高原前后差异较为明显,总的来看,高原主体形成的低涡降水较东移出高原后在四川盆地引发的降水而言,其范围更广,最大雨顶高度也更高。

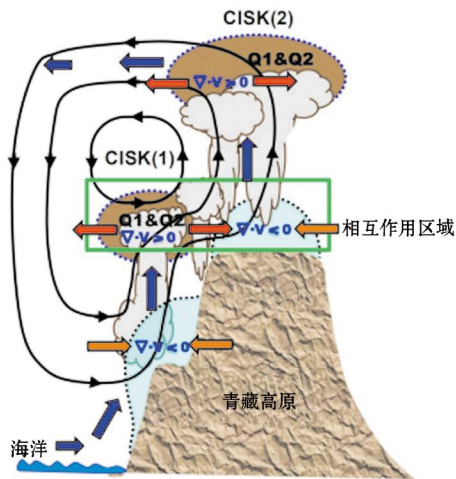


图2 青藏高原上空维持大气“水塔”的类CISK机制示意^[58]

不少学者还利用螺旋度、湿位涡、非地转湿 Q 矢量等方法对高原低涡的降水特征进行了诊断。黄楚惠等^[62]对2000年7月9—15日发生的一次高原低涡降水过程进行分析发现,相对螺旋度和低层湿 Q 矢量散度垂直分布对未来6 h低涡降水落区及走向有较好的指示意义。对2008年7月20—25日一次东移型高原低涡暴雨的诊断也可得到类似结论,且湿位涡的时空演变与高原低涡降水的发生发展具有很好的一致性^[63]。高原低涡与西南涡相互作用引发的夏季暴雨也一直受到关注。邱静雅等^[64]对一次高原低涡与西南涡耦合引起的特大暴雨进行诊断认为,

非耦合状态时高原低涡东部的下沉气流可抑制西南涡的发展,而二者的耦合将激发四川盆地上空的浅薄天气系统发展,其垂直叠加有利于西南涡发展从而形成盆地暴雨。此外,就对流性降水在总降水量中的贡献而言,高原低涡要明显高于西南低涡^[65]。

根据高原低涡诱发的降水量级的统计结果^[66],低涡降水以小雨为主,而中雨对总降水量贡献最大,且夏半年随着低涡活动时间的延长,其降水范围与强度均有所增大^[67]。高原低涡持续时间与高原中部的大气可降水量、水汽辐合量及降水量等密切相关^[68]。高原低涡降水的大值中心主要位于安多—那曲—索县一带,呈向东南部递减的分布特点^[66]。移出高原后形成的低涡降水量较高原主体产生的降水量更大,其最大降水区一般位于四川盆地和黄河中游^[13],且移出高原的低涡降水落区呈环状分布,而未移出的低涡降水落区则主要位于低涡南部和西南部^[42]。此外,一些学者对高原低涡降水对高原降水的贡献率进行了定量分析。Lin等^[69]发现在暖季5—9月,高原60%(30%)范围内低涡降水对高原总降水量的贡献超过25%(30%),而在冷季(10月—次年4月),约20%高原范围上低涡降水的贡献仍可超过25%(图3)。Lin等^[70]进一步研究发现,约30%高原范围内形成的高原极端降水事件中,一半以上由高原低涡贡献。

2.3 高原低涡云—降水物理过程

高原积雨云的生成和移动、云—降水物理特征

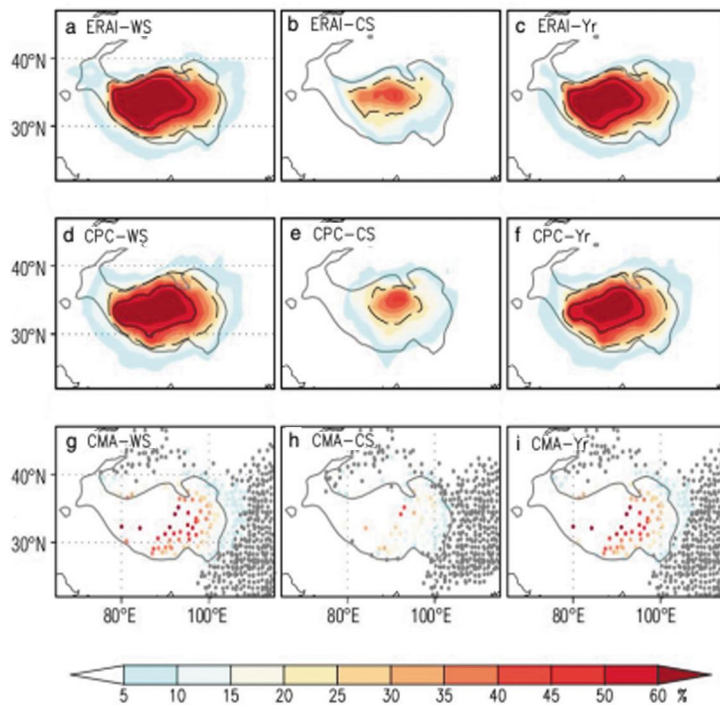


图3 高原低涡降水占总降水的百分比分布(单位:%)

(a~c 为 ERA-Interim, d~f 为 CPC, g~i 为 CMA, a, d, g 为暖季, b, e, h 为冷季, c, f, i 为全年占比^[69])

和潜热释放等水循环过程可对高原低涡的形成和维持起到重要作用^[71-72],因此有必要对高原低涡的云—降水物理过程加以关注。高原低涡不同阶段形成的云雨在宏观特征、垂直结构和微物理过程上均有显著差异^[73]。高原低涡对云的相态和粒子大小十分敏感,小冰晶颗粒的增加以及环形和 U/V 形冷云顶结构的出现可视为高原低涡内更强对流出现及降雨增强的主要标志^[74]。高原低涡东移期间,其云中的深对流云与多层云的比例呈增加趋势^[72],当高原低涡与西南低涡发生耦合时所产生的 MCC 云系中对流性降水的平均降水率远大于层云降水的平均降水率^[75]。Xiang 等^[76]利用 TRMM 资料对一次高原低涡折返降水进行分析后发现,与对流降水云相比,层状降水云的面积占比更高,二者对总降水的贡献比例相当;当涡旋向东移动时,对流层中下部的降水云粒子显著增加,当低涡向西折返时,云冰粒子在 6~8 km 处迅速增加。

TIPEX-III 观测期间获得了大量与高原低涡相关的云—降水物理观测资料^[77]。赵平等^[78]基于 TIPEX-III 观测资料指出高原低涡降水以对流云降水为主,降水雨滴谱分布在 0.3~4.9 mm(图 4)。李筱杨等^[79]对 2015 年 8 月 6 日高原那曲一次低涡降水过程的宏微观特征进行分析得出,此次高原低涡形成的涡旋状云系以对流云和积层混合云为主。在对流云阶段,回波多呈小面积的零星稀疏分布,持续时间较短;而混合云阶段,回波多呈整齐的片状,面积较对流阶段有增大趋势,回波持续时间较长。此外,对流云阶段降水持续时间短、降水强度小,雨滴粒子发展不均匀;而混合云阶段降水持续时间长,降水强度大,雨滴粒子直径多处于 1~3 mm,且浓度较大。

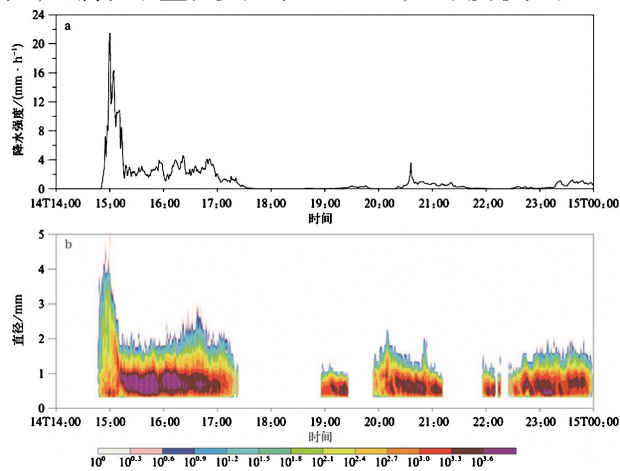


图 4 2014 年 7 月 14 日 14:00—15 日 00:00 雨滴谱仪 B 观测的高原低涡降水强度(a)和雨滴谱(b)的时间序列^[78]

3 高原多季风相互作用研究

3.1 东亚季风、印度季风和高原季风间的相互作用

印度季风和东亚季风的相互作用一直是热点研究领域。早期研究^[80]指出,东亚夏季风可显著影响印度季风区的气压和低空位势高度,印度夏季风对东亚夏季风的影响并不显著。Zhu 等^[81]提出东亚季风和印度季风可通过波传导、水汽输送和能量交换产生相互作用。也有研究发现印度季风可影响东亚季风的水汽输送^[82]和空间模态分布^[83]。丁一汇等^[19]在总结东亚季风的研究的基础上,指出东亚季风与印度季风间在遥相关、季节突变、行星风系移动与季风雨带的北进等方面存在明显且变化一致的相互作用,并且其相互作用贯穿两大季风的生命史。此外,印度夏季风和东亚夏季风的相互作用还体现在造成我国南方降水异常^[84]和影响湄公河流域雨季降水的年际变化^[85]等方面。

高原低涡是高原季风在天气尺度上的重要表现之一,东亚季风、印度季风与高原季风之间的联系也一定程度上反映了不同季风与高原低涡之间的相互作用。早期在对亚洲季风的年代际振荡进行分析时,卫捷等^[86]指出高原季风、东亚季风和印度季风三者在年代际尺度上具有很好的一致性。Xun 等^[87]的分析也表明高原季风、东亚季风和印度季风在一定程度上存在内在联系。华维等^[88]发现高原季风与东亚季风和印度季风之间存在显著的反相关关系,且高原季风与印度季风的联系更为紧密,二者之间存在“跷跷板”关系。就高原季风与东亚季风的相互作用而言,王奕丹等^[89]基于动态高原季风指数^[87]和东亚夏季风指数探讨了高原季风和东亚季风的关系,指出二者强度变化在关键年表现一致,高原季风对东亚季风具有一定的指示意义。有研究^[90-91]表明高原季风和东亚季风可对四川盆地夏季降水形成协同影响,但影响区域存在一定差异,即盆地西部降水主要与高原季风有关,盆地东部则主要受东亚季风影响。澜沧江流域的旱涝^[92]则与高原季风和印度季风均存在较强的联系。Zhao 等^[93-94]指出高原夏季风和印度夏季风均可通过中亚对流层中高层温度影响塔里木盆地夏季降水。此外,Zhao 等^[95]还发现高原季风的变化主导了 1985 年前后高原积雪和印度夏季季风降水偶极子模态的转变。

3.2 多季风交汇和高原低涡对高原水循环的影响

大量研究均证实西风气流、印度季风和东亚季风是高原水汽输送的主导环流系统^[96-102],相关结论也为水汽追踪和降水同位素分析进一步证明^[103-104]。印

度季风对高原东北边坡地区降水有明显影响^[105],而高原中南部降水也与印度季风异常有关^[106],强、弱季风年高原水汽输送和降水量分布表现出明显的差异^[107-108]。印度夏季风爆发的早晚还可对高原西部冰川的发展消退产生影响^[109]。许多研究指出西风、印度季风和东亚季风之间的协同作用对高原水循环有重要作用。Guo等^[102]发现高原东北部处于东亚夏季风和印度夏季风的影响范围内,季风为当地降水输送了大量水汽,而高原东南部地区的晚春降水则主要受到西风和孟加拉湾夏季风的协同影响^[110-111]。因此,高原水汽输送、土壤湿度、降水、地表蒸发和地表径流等因素的季节变化间接表明了高原水循环过程与多季风环流的季节转变和协同作用密切联系。

一些学者分析了季风环流对高原水循环的影响过程。季风经圈环流可将赤道和热带地区的水汽源源不断输送至副热带和中高纬地区^[112]。王可丽等^[113]指出高原东部的西南季风携带的水汽可通过绕流和爬流向高原输送。也有研究认为西南季风水汽可沿高原北部边缘输送,并可输送至塔里木盆地西部^[114]。徐祥德等^[115]基于季风和水汽输送特征提出了高原—季风水汽输送的“大三角扇型”模型,并指出夏季高原在夏季长江流域梅雨带中起着“转运站”作用(图5)。此外,印度夏季风和高原夏季风可通过大气环流变化来影响长江源区的夏季降水,进而影响长江径流^[116]。李生辰等^[117]从季风作用下天气系统造成降水异常的角度分析了季风对三江源区江河形成的重要作用。可见,亚洲季风除可影响水汽输送外,还可通过影响大尺度大气环流和高原上空的辐合辐散影响大气的水循环过程,而高原降水经地面植被冠层截留后的部分又可以通过地表渗透作用改变土壤含水量从而影响高原蒸发,其余降水则与冰川融水共同形成地表径流,径流入海后又通过季风水汽输送至高原形成降水,周而复始形成了特殊的高原水循环过程^[118]。

相对于大尺度季风系统对水循环的影响,多季风交汇作用下高原低涡对水循环的影响研究还较少涉及。Lin等^[70]认为引起极端降水的高原低涡与西南季风气流、高原切变线和南亚高压有关,西南季风对低涡水循环过程具有重要贡献。郑蓓等^[119]发现高原季风强度与高原低涡的生成频数和东移个数呈正比,而与高原低涡长生命史呈反比。此外,也有研究发现高原上空气旋环流的增强可导致降雪增多,使高原土壤湿度发生改变,从而造成海陆热力差异发生变化^[120-122],而高原上空热源减弱所致的高原低涡

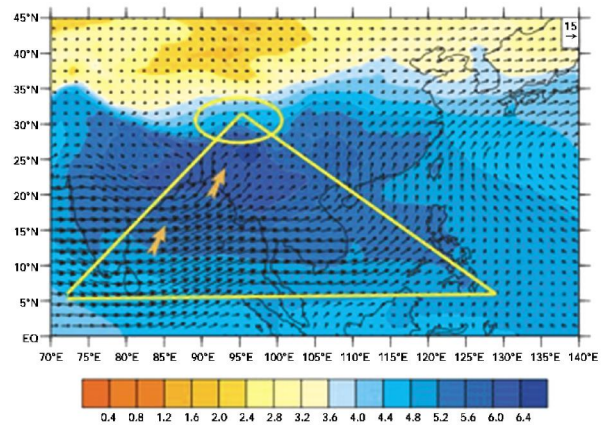


图5 高原“大三角扇形”水汽输送概念模型示意图^[115]

生成数和东移数的减少又会抑制东亚夏季风和主雨带的形成^[123]。杨泽粟等^[124]指出西风指数和季风指数与高原土壤湿度显著相关,季风和西风可通过调节局地气候环境条件对地表蒸散产生影响。总体来看,高原低涡受多季风交汇作用影响,并造成降水异常从而导致高原水循环过程发生改变,而这一过程亦可通过改变海陆热力差异影响亚洲季风系统,进而对高原低涡形成调制作用,最终形成复杂的高原水循环过程。

4 结论与展望

高原低涡在动力学机制、天气诊断分析、气候特征和数值模拟等方面取得了丰富的研究成果,但高原低涡不同阶段降水类型、水汽输送、水汽含量、云内相态、云—水转化效率等水循环过程的微观特征研究还有待进一步明晰。同时,作为一个独特的天气系统,高原低涡与低空急流、南支槽、江淮气旋、梅雨锋、高原切变线和西南低涡等天气系统之间的关系以及多系统相互作用的机制问题等还值得深究^[125]。东亚季风、印度季风和高原季风的相互作用使高原成为了全球少有的多季风交汇区,因而多季风交汇区域气候的多时空尺度变化特征和变化机理、天气系统间相互作用关系研究等将是下一步研究的重点,这将为研究高原多季风交汇如何影响高原低涡,进而导致高原低涡对高原水循环的贡献产生变化提供基础。

随着历次高原大气科学试验以及一些国际合作试验的开展,许多学者对高原天气系统和水循环开展了系统性研究,加深了人们对高原水循环及其影响我国天气气候的认识。但由于观测资料的限制,以往对高原水循环的研究多关注其大尺度特征,对高

原低涡等天气系统发生发展所涉及的微尺度水循环特征研究还较少。最近,Cheng 等^[126]对高原低涡的水循环宏观收支进行了统计研究,得到了高原低涡水循环的气候特征和变化趋势。但是高原低涡内部水循环的微观特征尚未明晰,且高原低涡水循环的变化受怎样的大气环流异常所影响也需要利用数值模式进一步验证。由于水循环的增强或减弱会受到辐射通量相对较小变化的限制,因此无法跟上对流层低层水汽的快速增加,导致水汽在大气中的滞留时间增加^[127],这是否与高原低涡数量变化相关?此外,多季风交汇为高原区域带来了丰沛的水汽,那不同的季风强弱变化对高原低涡的水循环活跃度会产生怎样的影响?另一方面,虽然目前拥有较高精度的卫星遥感等观测资料的时间尺度还较短,无法满足高原低涡在气候尺度上的研究,但已有学者利用高分辨率的气候模式开展了对高原低涡气候特征的研究^[32]和高原低涡活动在未来变暖背景下的变化研究^[128],所以基于高分辨率观测数据和数值模式数据的多季风交汇下高原低涡的水循环变化研究有待进一步完善,这有助于更好地理解高原水循环过程,进一步推动高原及附近区域的天气诊断和气候预测技术发展。

参考文献:

- [1] 陆桂华,何海.全球水循环研究进展[J].水科学进展,2006,17(3):419-424.
- [2] JIMENEZ-CISNEROS B.Responding to the challenges of water security:the eighth phase of the international hydrological programme,2014-2021[J].Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences,2015,366:10-19.
- [3] SOROOSHIAN S,LAWFORD R,TRY P,et al.Water and energy cycles:Investigating the links [J].World Meteorological Organization Bulletin,2005,54(2):58-64.
- [4] 马耀明,姚檀栋,王介民.青藏高原能量和水循环试验研究—GAME/Tibet 与 CAMP/Tibet 研究进展[J].高原气象,2006,25(2):344-351.
- [5] 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[J].气象学报,2018,76(6):833-860.
- [6] 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[J].大气科学,2014,38(4):756-769.
- [7] 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[J].大气科学,2016,40(1):131-141.
- [8] 郁淑华,高文良,彭骏.高原低涡移出高原后持续的对流层中层环流特征[J].高原气象,2015,34(6):1540-1555.
- [9] 李江萍.高原低涡的特征、环流形势及水汽轨迹研究[D].兰州:兰州大学,2012:116-118.
- [10] 李国平,徐琪.边界层动力“抽吸泵”对青藏高原低涡的作用[J].大气科学,2005,29(6):965-972.
- [11] 董元昌,李国平.大气能量学揭示的高原低涡个例结构及降水特征[J].大气科学,2015,39(6):1136-1148.
- [12] 章焕,范广洲,张永莉,等.青藏高原土壤湿度对一例高原低涡影响的数值模拟[J].高原气象,2018,37(4):886-898.
- [13] LI L,ZHANG R,WEN M.Structure characteristics of the vortices moving off the Tibetan Plateau[J].Meteorology and Atmospheric Physics,2020,132(1):19-34.
- [14] LI L,ZHANG R,WU P,et al.Roles of Tibetan Plateau vortices in the heavy rainfall over southwestern China in early July 2018[J].Atmospheric Research,2020,245:105059.
- [15] 黄楚惠,李国平.基于卫星观测的两例青藏高原低涡结构的初步分析[J].成都信息工程学院学报,2007,22(2):253-259.
- [16] SHANG K,LIU X,DONG B.Climatology and physical mechanisms of the tropospheric warm cores over the Tibetan Plateau and its vicinity[J].Climate Dynamics,2021,57(3):953-974.
- [17] LIU Y,LU M,YANG H,et al.Land-atmosphere-ocean coupling associated with the Tibetan Plateau and its climate impacts[J].National Science Review,2020,7(3):534-552.
- [18] DING Y,CHAN J C L.The East Asian summer monsoon:an overview[J].Meteorology and Atmospheric Physics,2005,89(1):117-142.
- [19] 丁一汇,司东,柳艳菊,等.论东亚夏季风的特征、驱动力与年代际变化[J].大气科学,2018,42(3):533-558.
- [20] 齐冬梅,李跃清.高原季风研究主要进展及其科学意义[J].干旱气象,2007,25(4):74-79.
- [21] 胡慧敏,范广洲.高原低涡东移与东亚夏季风的关系分析[J].高原山地气象研究,2019,39(4):39-45.
- [22] WANG B.The development mechanism for Tibetan Plateau warm vortices[J].Journal of the Atmospheric Sciences,2010,44(20):2978-2994.
- [23] 邓汗青,郭品文,于波.高原东部夏季凝结潜热对热带气旋频数的影响[J].气象科学,2011,31(3):282-289.
- [24] 青藏高原低值系统协作组.1978 年盛夏青藏高原低涡发生发展的初步研究[J].中国科学,1978,8(3):341-350.
- [25] 王鑫,李跃清,郁淑华,等.青藏高原低涡活动的统计研究[J].高原气象,2009,28(1):64-71.
- [26] LIN Z,GUO W,JIA L,et al.Climatology of Tibetan Plateau vortices derived from multiple reanalysis datasets [J].Climate Dynamics,2020,55(7):2237-2252.

- [27] 黄楚惠,李国平,牛金龙,等.近30年夏季移出型高原低涡的气候特征及其对我国降雨的影响[J].热带气象学报,2015,31(6):827-838.
- [28] 关良,李栋梁.青藏高原低涡的客观识别及其活动特征[J].高原气象,2019,38(1):55-65.
- [29] FENG X, LIU C, RASMUSSEN R, et al. A 10-yr climatology of Tibetan Plateau vortices with NCEP climate forecast system reanalysis [J]. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2014, 53(1): 34-46.
- [30] LIN Z. Analysis of Tibetan Plateau vortex activities using ERA-Interim data for the period 1979-2013 [J]. Journal of Meteorological Research, 2015, 29(5): 720-734.
- [31] 任素玲,方翔,卢乃锰,等.基于气象卫星的青藏高原低涡识别[J].应用气象学报,2019,30(3):345-359.
- [32] CURIO J, SCHIEMANN M R, HODGES K I, et al. Climatology of Tibetan Plateau vortices in reanalysis data and a high-resolution global climate model [J]. Journal of Climate, 2019, 32(6): 1933-1950.
- [33] 张博,李国平,段炼,等.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),2018,54(1):104-111,119.
- [34] LI L, ZHANG R, WEN M. Diurnal variation in the occurrence frequency of the Tibetan Plateau vortices [J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2014, 125: 135-144.
- [35] 黄一航,陈权亮,汪正林,等.1979—2016年青藏高原低涡的变化特征研究[J].暴雨灾害,2018,37(2):97-104.
- [36] 郁淑华,高文良.高原低涡移出高原的观测事实分析[J].气象学报,2006,64(3):392-399.
- [37] 吕君宁,钱正安,单扶民.夏季青藏高原低涡的综合结构[C]//青藏高原气象科学试验文集(二).北京:科学出版社,1984:195-205.
- [38] 杨颖臻,李跃清,陈永仁.高原低涡东移加深过程的结构分析[J].高原气象,2018,37(3):702-720.
- [39] 陈功,李国平.基于WRF的高原低涡内波动特征及空心结构的初步研究[J].高原山地气象研究,2010,30(1):6-11.
- [40] 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[J].大气科学,2016,40(4):864-876.
- [41] 屠妮妮,何光碧.两次高原切变线诱发低涡活动的个例分析[J].高原气象,2010,29(1):90-98.
- [42] 郁淑华,高文良.1998年夏季两例青藏高原低涡结构特征的比较[J].高原气象,2010,29(6):1357-1368.
- [43] 陈忠明,闵文彬,缪强,等.高原涡与西南涡耦合作用的个例诊断[J].高原气象,2004,23(1):75-80.
- [44] 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[J].大气科学,2020,44(3):472-486.
- [45] 罗四维,杨洋,吕世华.一次青藏高原夏季低涡的诊断分析研究[J].高原气象,1991,10(1):1-12.
- [46] 田珊儒,段安民,王子谦,等.地面加热与高原低涡和对流系统相互作用的一个个例研究[J].大气科学,2015,39(1):125-136.
- [47] 许威杰,张耀存.凝结潜热加热与对流反馈对一次高原低涡过程影响的数值模拟[J].高原气象,2017,36(3):763-775.
- [48] 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[J].气象学报,2000,58(4):447-456.
- [49] 李国平,赵邦杰,杨锦青.地面感热对青藏高原低涡流场结构及发展的作用[J].大气科学,2002,26(4):519-525.
- [50] 杨伟恩,杨大升.正压大气中青藏高原地形影响的数值试验[J].高原气象,1987,6(2):117-129.
- [51] 宋雯雯,李国平,唐钱奎.加热和水汽对两例高原低涡影响的数值试验[J].大气科学,2012,36(1):117-129.
- [52] 郁淑华,何光碧.对流层中上部水汽对高原低涡形成影响的数值试验[J].南京气象学院学报,2001,24(4):553-559.
- [53] 陈伯民,钱正安,张立盛.夏季青藏高原低涡形成和发展的数值模拟[J].大气科学,1996,20(4):491-502.
- [54] 陶健红,孔祥伟,刘新伟.河西走廊西部两次极端暴雨事件水汽特征分析[J].高原气象,2016,35(1):107-117.
- [55] 王伏村,付双喜,张德玉,等.一次引发河西走廊大暴雨的高原低涡的机制分析[J].气象,2014,40(4):412-423.
- [56] SUN J, YAO X, DENG G, et al. Characteristics and synoptic patterns of regional extreme rainfall over the central and eastern Tibetan Plateau in boreal summer [J]. Atmosphere, 2021, 12(3): 379.
- [57] MA Y, LU M, CHEN H, et al. Atmospheric moisture transport versus precipitation across the Tibetan Plateau: A mini-review and current challenges [J]. Atmospheric Research, 2018, 209: 50-58.
- [58] XU X, ZHAO T, LU C, et al. An important mechanism sustaining the atmospheric "water tower" over the Tibetan Plateau [J]. Atmospheric Chemistry and Physics, 2014, 14(20): 11287-11295.
- [59] 邓佳,李国平.引入地基GPS可降水量资料对一次西南涡暴雨水汽场的初步分析[J].高原气象,2012,31(2):400-408.
- [60] 李国平.低涡降水学[M].北京:气象出版社,2016:1-2.
- [61] 柳草.使用TRMM卫星资料对青藏高原低涡降水结构的分析研究[D].北京:中国气象科学研究院,2009:11-17.
- [62] 黄楚惠,李国平.基于螺旋度和非地转湿Q矢量的一个东移高原低涡强降水过程分析[J].高原气象,2009,28(2):319-326.
- [63] 黄楚惠,顾清源,李国平,等.一次高原低涡东移引发四川盆地暴雨的机制分析[J].高原气象,2010,29(4):832-839.
- [64] 邱静雅,李国平,郝丽萍.高原涡与西南涡相互作用引发

- 四川暴雨的位涡诊断[J].高原气象,2015,34(6):1556–1565.
- [65] 蒋璐君,李国平,王兴涛.基于 TRMM 资料的高原涡与西南涡引发强降水的对比研究[J].大气科学,2015,39(2):249–259.
- [66] 全思航,朱克云,任景轩,等.1979—2015 年青藏高原低涡降水特征分析[J].气候与环境研究,2019,24(1):105–115.
- [67] 郁淑华,高文良,彭骏.青藏高原低涡活动对降水影响的统计分析[J].高原气象,2012,31(3):592–604.
- [68] 赵思玉,范广洲.青藏高原大气水循环与高原涡持续时间的关系分析[J].西南大学学报:自然科学版,2022,44(10):114–126.
- [69] LIN Z, GUO W, YAO X, et al. Tibetan Plateau vortex – associated precipitation and its link with the Tibetan Plateau heating anomaly[J]. International Journal of Climatology, 2021, 41(14):6300–6313.
- [70] LIN Z, YAO X, GUO W, et al. Extreme precipitation events over the Tibetan Plateau and its vicinity associated with Tibetan Plateau vortices[J]. Atmospheric Research, 2022, 280:106433.
- [71] 徐祥德,赵天良,施晓晖.青藏高原大气水循环特征[J].气象学报,2014,72(6):1079–1095.
- [72] LI C, WANG X, ZHUO L, et al. Cloud features of Tibetan Plateau vortex category cloud cluster over different regions along the eastward – moving path in summer[J]. Advances in Meteorology, 2019, 2149357.
- [73] 左园园,郑佳锋,贺婧姝,等.一次高原涡过境的不同云–降水垂直结构和特征研究[J].高原气象,2022,41(5):1251–1265.
- [74] SHOU Y X, LU F, LIU H, et al. Satellite – based observational study of the Tibetan Plateau Vortex: Features of deep convective cloud tops[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2019, 36(2):189–205.
- [75] 蒲学敏,白爱娟,毛晓亮.高原涡与西南涡相互作用引发暴雨过程及云系特征分析[J].气象科技进展,2021,11(4):89–101.
- [76] XIANG S, LI Y, LI D, et al. An analysis of heavy precipitation caused by a retracing plateau vortex based on TRMM data[J]. Meteorology and Atmospheric Physics, 2013, 122(1):33–45.
- [77] ZHAO P, XU X, CHEN F, et al. The third atmospheric scientific experiment for understanding the earth – atmosphere coupled system over the Tibetan Plateau and its effects[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2018, 99(4):757–776.
- [78] 赵平,袁溢.2014 年 7 月 14 日高原低涡降水过程观测分析[J].应用气象学报,2017,28(5):532–543.
- [79] 李筱杨,郑佳锋,朱克云,等.基于雷达资料的一次高原涡天气云降水宏微观特征研究[J].气象,2019,45(10):1415–1425.
- [80] CHEN L, JIN Z. The medium – range variations of the summer monsoon circulation system over East Asia[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 1984, 1(2):224–233.
- [81] ZHU Q, HE J, WANG P. A study of circulation differences between East – Asian and Indian summer monsoons with their interaction[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 1986, 3(4):466–477.
- [82] ZHANG R. Relations of water vapor transport from Indian monsoon with that over East Asia and the summer rainfall in China[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2001, 18(5):1005–1017.
- [83] GREATBATCH R J, SUN X, YANG X Q. Impact of variability in the Indian summer monsoon on the East Asian summer monsoon[J]. Atmospheric Science Letters, 2013, 14(1):14–19.
- [84] 桓玉,李跃清.夏季东亚季风和南亚季风协同作用与我国南方夏季降水异常的关系[J].高原气象,2018,37(6):1563–1577.
- [85] YANG R, ZHANG W K, GUI S, et al. Rainy season precipitation variation in the Mekong river basin and its relationship to the Indian and East Asian summer monsoons[J]. Climate Dynamics, 2019, 52(9):5691–5708.
- [86] 卫捷,汤懋苍,冯松,等.亚洲季风年代际振荡及与天文因子的相关[J].高原气象,1999,18(2):179–184.
- [87] XUN X, HU Z, MA Y. The dynamic plateau monsoon index and its association with general circulation anomalies[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2012, 29(6):1249–1263.
- [88] 华维,范广洲,王炳赟.近几十年青藏高原夏季风变化趋势及其对中国东部降水的影响[J].大气科学,2012,36(4):784–794.
- [89] 王奕丹,胡泽勇,孙根厚,等.高原季风特征及其与东亚夏季风关系的研究[J].高原气象,2019,38(3):518–527.
- [90] 马振锋,高文良,刘富明,等.青藏高原东侧初夏旱涝的季风环流分析[J].高原气象,2003,22(增):1–7.
- [91] 白莹莹,张焱,李强,等.四川盆地夏季降水区域差异及其与季风的联系初探[J].气象,2014,40(4):440–449.
- [92] 唐见,翟文亮,曹慧群.澜沧江流域旱涝特征变化及其与季风之间的关联性研究[J].长江科学院院报,2019,36(3):19–25.
- [93] ZHAO Y, HUANG A, ZHOU Y, et al. Impact of the middle and upper tropospheric cooling over central Asia on the summer rainfall in the Tarim Basin, China[J]. Journal of Climate, 2014, 27(12):4721–4732.
- [94] ZHAO Y, HUANG A, ZHOU Y, et al. The impacts of the summer plateau monsoon over the Tibetan Plateau on the rainfall in the Tarim Basin, China[J]. Theoretical and

- Applied Climatology, 2016, 126(1): 265–272.
- [95] ZHAO H, MOORE G W K. On the relationship between Tibetan snow cover, the Tibetan plateau monsoon and the Indian summer monsoon[J]. Geophysical Research Letters, 2004, 31(14): 101–111.
- [96] 荀学义, 胡泽勇, 崔桂凤, 等. 青藏高原季风对我国西北干旱区气候的影响[J]. 气候与环境研究, 2018, 23(3): 311–320.
- [97] 周亚, 高晓清, 李振朝, 等. 青藏高原深层土壤热通量的变化特征分析[J]. 高原气象, 2017, 36(2): 307–316.
- [98] 周娟, 文军, 王欣, 等. 青藏高原季风演变及其与土壤湿度的相关分析[J]. 高原气象, 2017, 36(1): 45–56.
- [99] 索朗塔杰, 杜军, 卓嘎, 等. 1981—2020年青藏高原春季土壤湿度时空变化特征及其与高原季风的关系[J]. 大气科学, 2022, 46(2): 473–485.
- [100] 周天军, 高晶, 赵寅, 等. 影响“亚洲水塔”的水汽输送过程[J]. 中国科学院院刊, 2019, 34(11): 1210–1219.
- [101] CUI A, LU H, LIU X, et al. Tibetan plateau precipitation modulated by the periodically coupled westerlies and Asian monsoon[J]. Geophysical Research Letters, 2021, 48(7): e2020GL091543.
- [102] GUO X, FENG Q, SI J, et al. Considerable influences of recycled moistures and summer monsoons to local precipitation on the northeastern Tibetan Plateau [J]. Journal of Hydrology, 2022, 605: 127343.
- [103] CHEN B, XU X D, YANG S, et al. On the origin and destination of atmospheric moisture and air mass over the Tibetan Plateau[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2012, 110(3): 423–435.
- [104] TIAN L, YAO T, SCHUSTER P F, et al. Oxygen-18 concentrations in recent precipitation and ice cores on the Tibetan Plateau[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2003, 108(D9): 4293–4302.
- [105] 李玲萍, 刘维成, 杨梅, 等. 1971—2015年青藏高原东北边坡降水特征及主要影响因子分析[J]. 冰川冻土, 2018, 40(5): 916–924.
- [106] ZHU Y, SANG Y F, CHEN D, et al. Effects of the South Asian summer monsoon anomaly on interannual variations in precipitation over the South-Central Tibetan Plateau [J]. Environmental Research Letters, 2020, 15(12): 124067.
- [107] ZHOU L, ZHU J, ZOU H, et al. Atmospheric moisture distribution and transport over the Tibetan Plateau and the impacts of the South Asian summer monsoon [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2013, 27(6): 819–831.
- [108] 周顺武, 假拉. 印度季风的年际变化与高原夏季旱涝[J]. 高原气象, 2003, 22(4): 410–415.
- [109] Mölg T, MAUSSION F, YANG W, et al. The footprint of Asian monsoon dynamics in the mass and energy balance of a Tibetan glacier [J]. The Cryosphere, 2012, 6(6): 1445–1461.
- [110] SONG C, WANG J, LIU Y, et al. Toward role of westerly-monsoon interplay in linking interannual variations of late spring precipitation over the southeastern Tibetan Plateau [J]. Atmospheric Science Letters, 2022, 23(3): e1074.
- [111] WANG J, LIU Y, SONG C, et al. Synergistic impacts of westerlies and monsoon on interdecadal variations of late spring precipitation over the southeastern extension of the Tibetan Plateau [J]. International Journal of Climatology, 2022, 42(14): 7342–7361.
- [112] 伊兰, 陶诗言. 定常波和瞬变波在亚洲季风区大气水分循环中的作用[J]. 气象学报, 1997, 55(5): 21–33.
- [113] 王可丽, 江灏, 赵红岩. 西风带与季风对中国西北地区的水汽输送[J]. 水科学进展, 2005, 16(3): 432–438.
- [114] CHEN C, ZHANG X, LU H, et al. Increasing summer precipitation in arid Central Asia linked to the weakening of the East Asian summer monsoon in the recent decades[J]. International Journal of Climatology, 2021, 41(2): 1024–1038.
- [115] 徐祥德, 董李丽, 赵阳, 等. 青藏高原“亚洲水塔”效应和大气水分循环特征[J]. 科学通报, 2019, 64(27): 2830–2841.
- [116] 罗玉, 秦宁生, 王春学, 等. 长江源区夏季径流量变化及其与高原夏季风和南亚夏季风的关系[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(10): 2209–2218.
- [117] 李生辰, 李栋梁, 赵平, 等. 青藏高原“三江源地区”雨季水汽输送特征[J]. 气象学报, 2009, 67(4): 591–598.
- [118] XU X, LU C, SHI X, et al. World water tower: An atmospheric perspective[J]. Geophysical Research Letters, 2008, 35(20): 525–530.
- [119] 郑蓓, 范广洲, 吴战平, 等. 高原季风强弱对高原涡的影响[J]. 中低纬山地气象, 2021, 45(4): 15–22.
- [120] ZHANG Y, LI T, WANG B. Decadal change of the spring snow depth over the Tibetan Plateau: The associated circulation and influence on the East Asian summer monsoon [J]. Journal of Climate, 2004, 17(14): 2780–2793.
- [121] BARNETT T P, Dümenil L, Schlese U, et al. The effect of Eurasian snow cover on regional and global climate variations[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1989, 46(5): 661–686.
- [122] CHOW K C, CHAN J C L, SHI X, et al. Time-lagged effects of spring Tibetan Plateau soil moisture on the monsoon over China in early summer [J]. International Journal of Climatology, 2008, 28(1): 55–67.
- [123] MA Y, MA W, ZHONG L, et al. Monitoring and modeling the Tibetan Plateau's climate system and its impact on

- East Asia[J].Scientific Reports,2017,7(1):1–6.
- [124] 杨泽粟,张宇,张强,等.青藏高原蒸散年际变化及其对西风环流的响应[J].地球物理学报,2022,65(8):2813–2827.
- [125] 陈功,李国平,李跃清.近20年来青藏高原低涡的研究进展[J].气象科技进展,2012,2(2):6–12.
- [126] CHENG Q,FAN G,ZHU L.Characteristics and changes in the atmospheric water cycle of the Tibetan Plateau Vortex[J].Theoretical and Applied Climatology,2023,151:1601–1614.
- [127] HELD I M,SODEN B J.Robust responses of the hydrological cycle to global warming[J].Journal of climate,2006,19(21):5686–5699.
- [128] LIN Z Q,GUO W D,GE J,et al.Increased Tibetan Plateau vortex activities under 2 °C warming compared to 1.5 °C warming:NCAR CESM low-warming experiments [J].Advances in Climate Change Research,2021,12(3):322–332.

Advance of Research on Plateau Vortex and Multi-monsoon Interaction in Water Cycle of Tibetan Plateau

HUA Wei^{1,2,3},DENG Hao^{1,4},XIA Changji^{1,5},ZHANG Yongli¹,ZHU Lihua¹,

LAI Xin¹,FAN Guangzhou^{1,2,3}

(1.School of Atmospheric Science,Chengdu University of Information Technology,Chengdu 610225, China;

2.Plateau Atmosphere and Environment Key Laboratory of Sichuan Province,Chengdu 610225, China;

3.Meteorological Disaster Prediction and Warning Engineering Laboratory of Sichuan Province,Chengdu 610225, China;

4.Southwest Electric Power Design Institute CO.,LTD.of China Power Engineering Consulting Group,Chengdu 610056, China;

5.Zhenyuan Meteorological Bureau,Zhenyuan 557700, China)

Abstract Due to the special and powerful dynamic and thermal effects of Tibet Plateau,the East Asian monsoon,Indian monsoon and Tibet Plateau monsoon interact with each other over Tibetan Plateau.Under the influence of multi-monsoon interactions,the water cycle of Tibetan Plateau influenced by the Tibet Plateau vortex is extremely complex.The abnormal water cycle of Tibet Plateau will cause frequent occurrence of catastrophic weather processes over Tibet Plateau and surrounding areas and even in the middle and lower reaches of the Yangtze River,so it has been a hot issue of concern for atmospheric science at home and abroad.We systematically review the research progress on the activity characteristics,structural characteristics,generation and development mechanisms of Tibet Plateau vortex.And the research results on how the Tibet Plateau vortex affects the water cycle are outlined from the perspectives of water vapor transport,precipitation and cloud-precipitation physics.In particular,the impact of the multi-monsoon interaction on the water cycle of Tibetan Plateau is analyzed based on the summary of interaction between East Asian monsoon,Indian monsoon and Tibetan Plateau monsoon.Finally,the shortcomings of the current study are pointed out, and the future research directions are prospected.

Key words multi-monsoon interactions; Tibetan Plateau vortex; water cycle