

姚德贵,赵灿,苗雨沛,等. 河南“7·20”暴雨天气形势与变电站洪涝防御环境分析[J]. 陕西气象,2024(6):24-31.

文章编号:1006-4354(2024)06-0024-08

河南“7·20”暴雨天气形势与变电站洪涝防御环境分析

姚德贵^{1,2},赵 灿^{2,3},苗雨沛⁴,刘善峰¹,周 放⁵

(1. 国网河南省电力公司电力科学研究院,郑州 450052;

2. 中国气象局秦岭和黄土高原生态环境气象重点开放实验室,西安 710016;

3. 陕西省气候中心,西安 710014;4. 北京西太科技有限公司,北京 100089;

5. 南京信息工程大学大气科学学院,南京 210044)

摘要:基于河南2021年7月20—21日暴雨(简称“7·20”暴雨)灾害,通过选取“7·20”暴雨前配备有主动排水防汛设备的6座变电站数据,结合气象观测和再分析资料,从降水强度、环流形势、水汽输送和地形地势等几个方面对河南省变电站的洪涝防御环境进行了分析。结果表明:产生“7·20”暴雨的水汽主要来自西太平洋和印度洋,通过北上的西太平洋副热带高压和台风“烟花”将水汽输送至河南地区;巴尔喀什湖附近的长波槽与北上的副高对峙导致环流形势稳定,配合高空急流的作用,产生了持续性强降水;水汽通过偏东或者东南风输送至河南,地形对暴雨产生了增强效应。此次过程中,6座变电站均遭受了站内积水威胁。针对变电站洪涝防御,一方面,要关注暴雨天气形势的变化,特别是副高、台风、高纬度长波等系统的相互叠加和共同作用,另一方面,变电站的选址也要考虑地形对强降水的增幅影响。

关键词:“7·20”暴雨;大尺度气象条件;变电站防御环境

中图分类号:P458.1215:X43

文献标识码:A

随着全球变暖的加剧,华北地区气候正逐渐由干冷向温暖转型,极端天气气候事件更加频繁,同时伴随而来的气象灾害也更加普遍^[1-2]。电力行业是对气象条件高敏感和高需求的行业,频繁发生的极端天气事件所引发的气象灾害对电网的稳定运行带来了严重的威胁^[3-6]。例如,处于建造期的变电站如果遭遇强降水的影响,可能导致其边坡失稳^[3];变电站的建造选址对于抵御50年一遇甚至百年一遇的洪水灾害也有着极为严格的要求^[5-6]。随着夏季风的向北推进,在每年大约7月下旬至8月上旬左右,中国北方雨季爆发。此时,

西太平洋副热带高压达到全年最北的位置,副高西侧的西南气流或偏东气流把低纬度洋面上的水汽源源不断地向北输送,为华北地区降水提供了充足的水汽条件^[7]。短短一个月左右的时间,华北地区降雨量便会达到其一年总雨量的三分之一左右^[8]。这一时期也是中国北方洪涝灾害发生最集中的时间段,城市汛期防范工作十分严峻^[9]。

近60年,河南省年平均降水量呈现出不显著的减少趋势,年际变率显著,局地性极端暴雨呈现增多的趋势^[10]。例如2021年7月20—21日河南中部和北部地区发生了特大致洪暴雨(简称

收稿日期:2023-12-25

作者简介:姚德贵(1971—),男,汉族,安徽芜湖人,博士,教授级高工,主要从事电力气象与防灾减灾方面研究。

通信作者:赵灿(1991—),女,汉族,陕西榆林人,博士,工程师,主要从事气候预测与气候变化研究。

基金项目:秦岭和黄土高原生态环境气象重点实验室开放基金课题(2021Y-3);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2023-JC-QN-0340)

“7·20”暴雨),给河南电网行业造成了重大冲击。此次极端暴雨天气过程具有累积雨量大、降水强度极端性强等特点,致使河南省境内数十座变电站因灾主动停运。特别是郑州市出现历史罕见特大暴雨,单日降水量和单小时降水量均超过当地有记录以来的历史极值,使得电网防汛工作面临巨大考验^[11-13]。基于此,围绕“7·20”暴雨灾害,对暴雨天气形势与变电站洪涝防御环境进行分析,以期为变电站洪涝灾害防御工作提供支撑。

1 数据资料

1.1 气象资料

所用降水观测资料来自河南省气象局整编的2021年7月17—22日省内119个国家级地面气象观测站逐小时降水量资料,且均已经过质量控制和极值检验,日累计降水量取当日00—23时降水量的总和。采用欧洲中期天气预报中心发布的第5代全球再分析资料数据集(ERA5)分析“7·20”暴雨的大尺度气象条件,其水平分辨率为 $0.25^{\circ} \times$

0.25° ,垂直方向上为1 000 hPa到100 hPa共12层,时间分辨率为1 h,主要变量包括位势高度、水平风场、比湿、地表气压等,主要分析时段为2021年7月20—22日,气候态采用1991—2020年平均值表示。地形高度资料来自于美国地质勘探局发布的全球30 m分辨率SRTM高程DEM数据。

1.2 变电站资料

变电站降水量直接利用变电站所在地区气象台站的降水量进行估计。变电站防汛设备统计信息来自国家电网河南省电力科学研究院提供的45站防汛资料。“7·20”暴雨前,河南省大部分变电站采用自排水方式;“7·20”暴雨后,电力部门通过增设固定式、移动式和方舱排水泵,对大部分站点的防汛能力进行了提升核验。因此,选择了“7·20”暴雨前配备有主动排水防汛设备的6座变电站,并对其受暴雨影响情况进行分析。变电站所在地区、站名、占地面积、集水井容积和总排水量等防汛信息如表1所示。

表1 河南“7·20”暴雨前变电站防汛设备统计信息

所在地区	站名	规模/kV	占地面积/m ²	集水井容积/m ³	总排水量/(m ³ /h)	临界排水强度/(mm/h)
安阳市开发区	优创	220	7 533	200	200	26.5
安阳市汤阴县	易都	220	22 500	110	1 500	66.7
焦作市修武县	潭王	220	17 056	70	700	41.0
新乡市市辖区	王村	110	5 046	30	30	5.9
郑州市荥阳市	嵩山	500	61 500	408	1 345	21.9
郑州市市辖区	花园口	110	7 429	160	280	37.7

2 “7·20”暴雨天气形势和变电站洪涝防御环境

2.1 暴雨过程

2021年7月17—22日,河南省多地出现了破纪录的极端强降水过程。河南省有39个县市累计降水量达年均降水量的一半,其中郑州、辉县、淇县等10个县市超过常年总降水量。累计雨量超过250 mm的覆盖面积占河南国土面积的32.8%^[11]。最大小时降水量(郑州,201.9 mm)超过“75·8”暴雨(1975年8月5日,河南林庄,198.5 mm),创下国内小时气象观测降雨量新纪录;郑州、新乡、开封等19个县市日降水量突破历史极值;32个县市连续3日降水量突破历史极

值^[11]。暴雨导致郑州、鹤壁、新乡、安阳等城市发生严重内涝,城市电力运行大面积中断,造成重大人员伤亡和巨大经济损失^[12-15]。

此次过程的强降水中心主要位于郑州、新乡、鹤壁和安阳(图1a),6座变电站所在地区累计降水量均在400 mm以上,其中花园口变电站位于郑州市区,累计降水量超过700 mm。在7月20日(图1b),花园口变电站位于暴雨中心,郑州市国家气象观测站出现最大日降雨量624.1 mm,接近郑州平均年降雨量(640.8 mm),为郑州气象观测站建站以来最大日降水量(189.4 mm,1978年7月2日)的3.4倍。位于花园口变电站附近

的潭王、王村和嵩山等变电站所在地区日降水量也达到 200 mm 以上。郑州市气象观测站 7 月 20 日最大小时降水量达 201.9 mm(图 2, 16—17

时), 突破国内气象观测记录历史极值(198.5 mm, 1975 年 8 月 5 日河南林庄)。

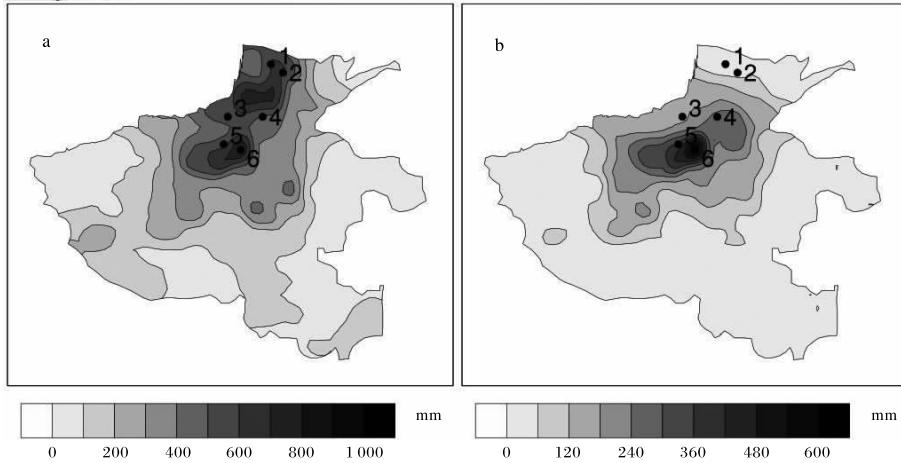


图 1 河南省 2021-07-17—22(a)和 20 日(b)累计降水量(单位为 mm; 1~6 号黑点分别代表优创、易都、潭王、王村、嵩山和花园口变电站站址; 审图号为 GS(2019)3266 号)

此次暴雨过程具有突发性极强、短时雨量极强和降水极端性突出的特征。就所选 6 座变电站而言, 强降水出现时间并不一致, 具有显著的局地性(图 2)。例如, 优创、易都和潭王站强降水主要集中于 7 月 21 日下午, 嵩山和花园口站强降水主要集中于 7 月 20 日下午。为分析降水量对变电站的影响, 假设一个理想化的模型: 首先, 忽略地表径流、渗流等水文过程, 以及蒸发耗散等作用; 其次, 降水发生时排水设备即开始不间断工作, 降水被排出变电站外, 当排水量小于降水量时变电站内产生积水, 积水首先被排入集水井中; 第三, 当积水量大于集水井容积时, 变电站内开始淹没, 此时站内设备将受到积水威胁。基于此, 将总排水量与占地面积的比值认作临界排水强度, 即集水井开始蓄水的降水强度。对比小时降水量和临界排水强度可见, 6 站集水井均在此次降水过程中开始蓄水(图 2 虚线)。考虑到集水井蓄水体积, 可以进一步估算理想状况下, 集水井蓄满水的时段: 优创站约为 7 月 22 日 05 时, 王村站约为 7 月 20 日 09 时, 嵩山站约为 7 月 20 日 16 时, 花园口站约为 7 月 20 日 18 时。

根据国家电网河南省电力公司电力科学研究院提供的防汛资料, “7·20”暴雨期间, 优创站由

于站内地势与站外地势基本持平, 阻水措施不利的情况下导致了雨水倒灌; 易都站由于站外永通河河水外溢流入站内, 造成站内水位升高; 潭王站因受站外大沙河、山门河泄洪导致站内内涝; 王村站因暴雨以及站外积水流向导致站内积水; 嵩山站因暴雨积水导致围墙倒塌的情况下造成洪水倒灌; 花园口站因地势较低导致站外积水倒灌。可见, 当强降水发生时, 由降水所造成的水文、地质变化, 变电站的位置, 乃至变电站建设时的工程设计方案对其在极端暴雨条件下的防洪防汛都至关重要^[13]。

2.2 天气形势

受印度洋低压、西太平洋副热带高压等大气活动中心以及北上台风残余环流的影响, “7·20”暴雨过程是在相对稳定的环流形势下发展起来的^[16-17]。由此次暴雨主要集中时段(7 月 20—22 日)的平均环流形势(图 3a, 图见第 28 页)可以看出: 河南全境位于高空急流出口区的右侧, 强的高空辐散气流使得低层空气向上补偿, 导致河南全境位于强的上升运动区; 西太平洋副热带高压较常年偏北, 稳定在日本海地区。由图 3b 可见, 2021 年 7 月 20—22 日西太平洋副热带高压的平均脊线位置, 比 2021 年夏季平均的脊线位置和多年夏季平均的脊线位置均偏北 10 个纬度以上。特

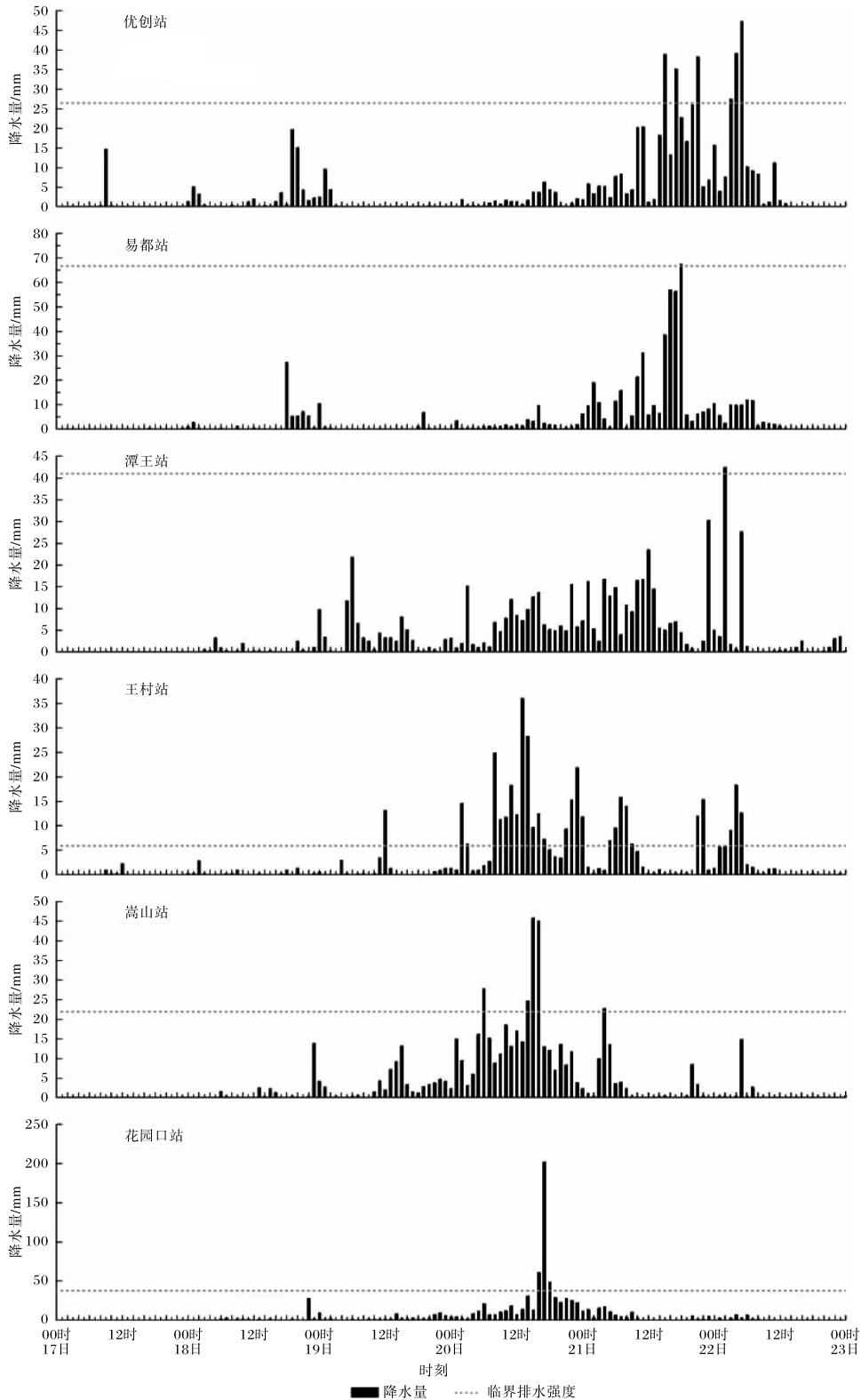


图2 2021-07-17—22 优创、易都、潭王、王村、高山和花园口变电站逐小时降水量和临界排水强度

别地,在此次暴雨过程中降水强度最大的7月20日,副高脊线的位置虽存在一定的日变化,但基本处于最北的位置。21日以后,副高位置有所回

落,但仍在后续时间影响了多地降水。巴尔喀什湖地区有稳定的长波槽形成,由该长波槽分裂而下的短波槽受到偏北的副高阻挡,长时间在贝加

尔湖以南地区停滞,槽前的正涡度平流使得河南全境上升运动进一步加强。2021年7月20—22日期间,超强台风“烟花”受副高阻挡,在台湾以东洋面长时间停滞,“烟花”外围气流将充沛的水汽沿

着副高西南侧的东南气流向河南地区输送,为河南暴雨提供了充沛的水汽条件。以上有利于降水形成的天气形势相互叠加,共同导致河南省出现“7·20”极端暴雨。

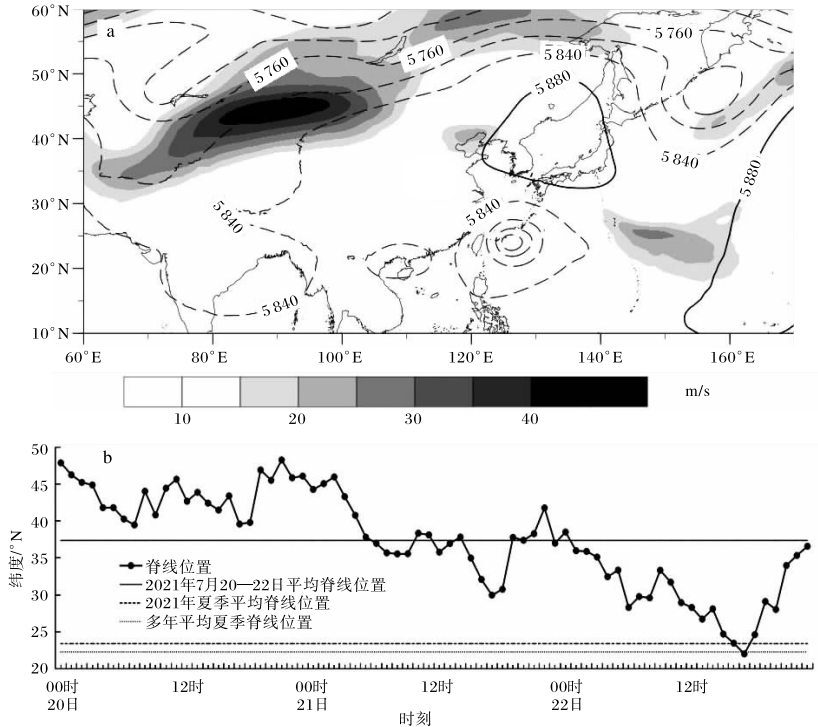


图3 2021-07-20—22 500 hPa 平均形势场(虚线;单位为 gpm;实线为 5 880 gpm 等值线)和 200 hPa 纬向风(阴影)(a)及逐小时副高脊线位置(b,文见第 26 页)

2.3 水汽通道

华北地区的降水大多由夏季风以及台风所带来的印度洋和西太平洋水汽所致,水汽对于极端强降水的产生具有至关重要的作用,有利的环流形势加之充沛的水汽源源不断向暴雨区输送,可使暴雨降水强度增大,持续时间增长,从而导致城市洪涝。图 4a 为此次暴雨主要集中时段(7 月 20—22 日)对流层整层积分的水汽通量及其强度平均场。可以看到,导致“7·20”暴雨有 2 条较为明显的水汽通道,一是由台风“烟花”北侧气流导致的从西北太平洋沿着副高外围东南风向河南地区输送的偏东水汽通道,另一条是由弱的台风“查帕卡”产生的从我国南海自南向北延伸到河南地区的偏南水汽通道。在大尺度环流形势的控制下,西南季风增强,2 条水汽通道的叠加使得河南北部地区水汽输送的强度显著增强。从高、低层水平散度和涡度可见(图

4b~图 4e),高空急流和长波槽的共同作用,使河南地区形成了高层辐散、低层辐合的环境,并在其北部地区尤为显著。与水平散度相对应,高空为反气旋式涡度,低空为气旋式涡度,从而有利于形成强烈的垂直上升运动。在充沛的水汽输送条件下,非常有利于河南北部地区形成强降水。

虽然 6 座变电站出现暴雨极值的时间不同,但最强降水时刻环流形势和水汽输送条件特征一致,即大尺度环流形势稳定维持、高低纬度大气环流系统相互叠加、水汽输送条件充沛,共同导致变电站经历短时极端强降水过程(图略)。上游巴尔喀什湖附近的长波槽、高空急流、北上的西太平洋副热带高压、台风以及来自西太平洋及印度洋的水汽是暴雨产生的关键系统。此外,由上游长波槽分裂而下的短波槽对短时暴雨的产生和加强有重要影响。因此,就变电站暴雨灾害防御而言,电力部门需与

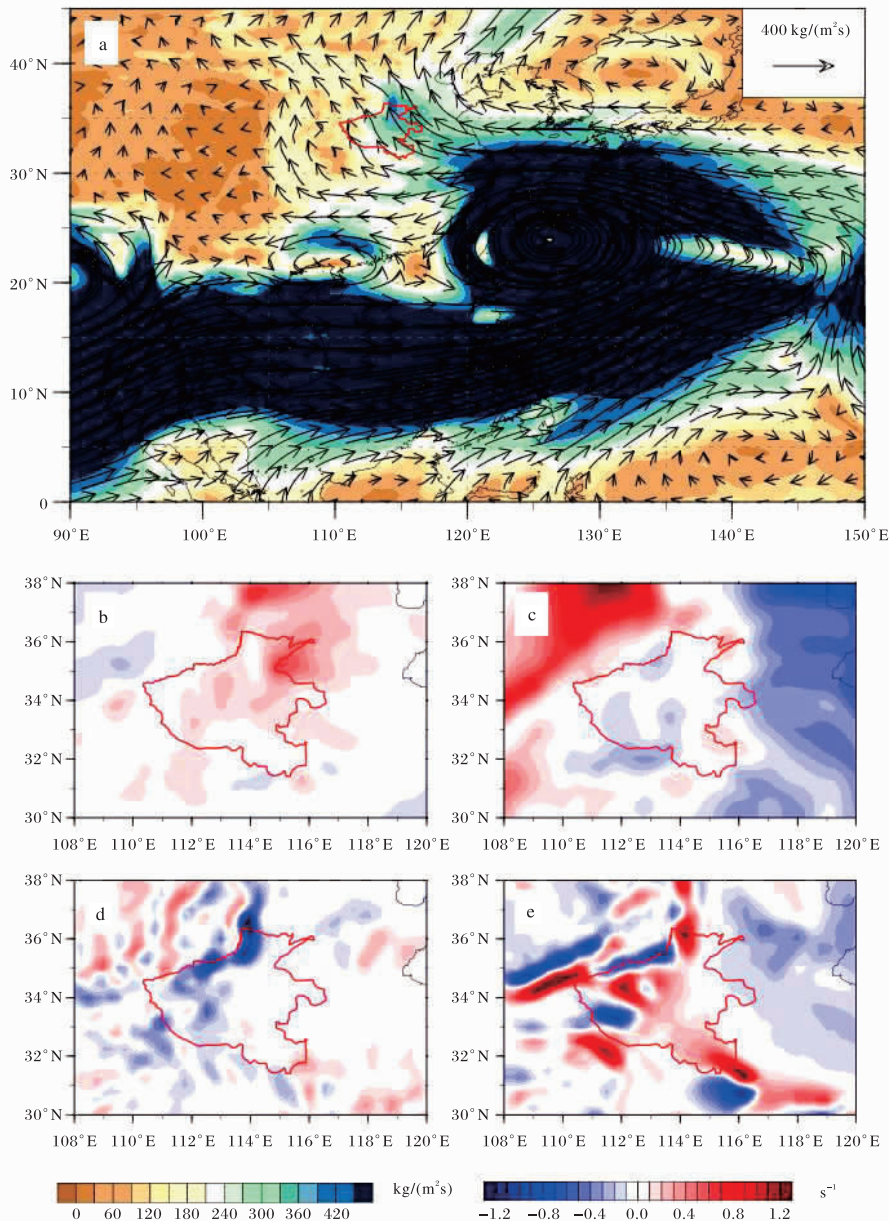


图4 2021-07-20-22 物理量平均场(a 对流层整层水汽通量(矢量箭头)及其强度(阴影), b 200 hPa 水平散度, c 200 hPa 水平涡度, d 925 hPa 水平散度, e 925 hPa 水平涡度; 审图号为 GS(2019)3266 号)

气象部门协同合作,及时关注暴雨天气形势变化和暴雨预测预警,做好有针对性地防汛准备,有效降低暴雨灾害给变电站造成的损失。

2.4 地形条件

以上大尺度的气象条件为“7·20”暴雨提供了有利的环流形势,但地形的增幅作用对短时段强降水的影响也是不容忽视的^[18-19]。河南省地形地貌比较复杂,自西向东由山区丘陵过渡到平原地

区,分界明显。如图5所示,优创站和易都站位于太行山脉东侧,嵩山站和花园口站位于嵩山山脉东侧、太行山脉以南,潭王站和王村站位于由太行山脉和嵩山山脉形成的喇叭口地形东侧。“7·20”暴雨期间,河南省东部存在一支强的低空偏东气流,使得水汽一直输送至嵩山山脉,河南以北地区则以东南气流为主。一方面,偏东气流遇到嵩山山脉以及太行山山脉的阻挡作用产生强迫抬升,增强了优

创、易都、嵩山和花园口站的降水;另一方面,喇叭形山口的地形辐合作用则增强了潭王和王村站的降水。此外,不同于其他站,除了偏东气流的影响外,花园口站南部同时存在一支沿伏牛山脉北上的偏南气流,使得花园口站南部和东部均有低空气流流入且受到山脉地形的阻挡产生强迫抬升,为暴雨区的上升运动乃至水汽辐合提供了极为有利的条件。这也是“7·20”暴雨期间花园口站受灾最为严重的原因之一。

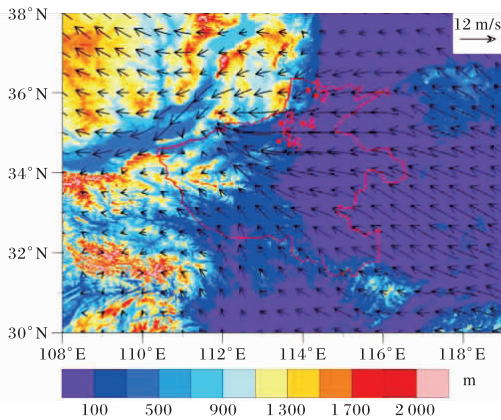


图5 河南及周边地区地形高度(阴影)及“7·20”暴雨期间花园口站小时降水量达到最强时925 hPa风场(矢量);1~6号红点分别代表优创、易都、潭王、王村、嵩山和花园口变电站站址;审图号为GS(2019)3266号)

根据国家电网河南省电力科学研究院提供的变电站资料信息,优创站址地势开阔平坦,周边地势由西向东倾斜,站区北侧3 000 m有河;易都站址地势开阔平坦,站区南侧500 m有河;潭王站址地势开阔平坦,周边地势呈现南高北低走势,站区西侧2 000 m有河;王村站址地势开阔平坦,站外整体地势西高东低,站区北侧和南侧2 000 m均有河;嵩山站址地形地势开阔平坦,站外整体地势西高东低,站区西侧4 000 m左右有河;花园口站址地势较低,站外积水易倒灌,站外整体地势北高南低,南侧临河。由此可见,6座变电站的共同站址特征为:站外地势倾斜,站外积水自然流动导致变电站积水增加;附近河流泄洪导致河水倒灌造成变电站内涝严重。大地形的影响对暴雨产生了增幅作用,使得变电站直接遭受暴雨影响,变电站周边地形造成的站外积水流动和站外河水倒灌使变电站二次受灾。因此变电站及周边的地形条件也是变电站选址不容忽视的因素。

“7·20”暴雨后,河南电网有针对性地实施了防汛能力提升工程,对集水井以及总排水设备做了改造升级。防汛能力提升后的临界小时排水强度如表2所示。从气象条件的角度,所能抵御的降水强度均要高于图2所示的“7·20”期间的最强小时降水。

表2 河南“7·20”暴雨后变电站防汛设备统计信息

所在地区	站名	规模/kV	占地面积/m ²	集水井容积/m ³	总排水量/(m ³ /h)	临界排水强度/(mm/h)
安阳市开发区	优创	220	7 533	200	670	88.9
安阳市汤阴县	易都	220	22 500	110	1 529	68.0
焦作市修武县	潭王	220	17 056	470	2 150	126.1
新乡市市辖区	王村	110	5 046	212	2 490	493.5
郑州市荥阳市	嵩山	500	61 500	408	4 600	74.8
郑州市市辖区	花园口	110	7 429	160	1 520	204.6

3 结论与讨论

2021年河南“7·20”极端暴雨灾害给河南电网造成了极大冲击,导致河南省45座变电站因灾主动停运,电网防汛工作面临巨大考验。“7·20”暴雨是在稳定的环流形势下,富含大量水汽的偏东气流和偏南气流在河南中部交汇而产生。在这一过程中,地形对于极端强降水的增幅起到了关

键作用。基于此,本文选择了“7·20”暴雨前配备有主动排水防汛设备的6座变电站,结合气象观测和再分析资料,对河南省变电站的洪涝防御环境进行了分析,有以下结论:

(1)从大尺度气象条件的角度,“7·20”暴雨的水汽主要来自西太平洋及印度洋,北上的西太平洋副热带高压将水汽向北输送至华北地区;此

次过程中西太平洋副热带高压位置异常偏北,上游巴尔喀什湖附近的长波槽与北上的副高对峙导致环流形势稳定,产生持续性降水;河南全境位于高空急流出口区右侧,受高空急流和长波槽的共同影响,河南北部地区形成了高空辐散和反气旋式涡度、低空辐合和气旋式涡度的环境,有利于形成强烈的垂直上升运动;西太平洋台风活动配合以上环流形势,使得降水进一步加强,造成极端性强降水灾害。此次过程中,6座变电站均遭受了站内积水威胁。针对变电站洪涝防御的气象环境,电力部门需与气象部门协同合作,关注天气形势与天气预测预警,及时做好针对性的防汛准备,有效降低暴雨灾害给变电站带来的损失。

(2)从地理环境的角度,地形对于极端强降水的增幅起到关键作用。水汽输送至华北地区主要借助于偏东或者东南风,河南特殊的西高东低的地形环境对于气流具有显著的强迫抬升作用。本文所选的变电站基本位于山脉东侧或者喇叭形山口处,地形对降水的增幅作用明显。因此,处于相同气象条件下,位于迎风坡和喇叭形山口处的变电站的暴雨受灾风险明显高于平原地区。此外,变电站选址造成的站外积水流动和站外河水倒灌亦会使得变电站二次受灾。因此,变电站的选址也要考虑地形地势对灾害性天气的增幅影响。

(3)在“7·20”暴雨后,河南电网有针对性地实施了防汛能力提升工程,现有条件足以应对“7·20”期间的最强小时降水。值得注意的是,本文所关注的是基于大尺度气象条件的变电站洪涝防御环境分析,水文条件及工程环境并未考虑在内。由变电站地势导致的站外积水倒灌、站外河流泄洪等人为因素导致站内内涝、设备老化和管道破损导致的房屋渗水等因素并未考虑在内,变电站洪涝防御是一项多学科专业共同协作的问题,需要根据具体情况做到具有针对性的科学决策。

参考文献:

- [1] 翟盘茂,廖圳,陈阳,等. 气候变暖背景下降水持续性与相态变化的研究综述[J]. 气象学报,2017,75(4):527-538.
- [2] 胡畔,陈波,史培军. 中国暴雨洪涝灾情时空格局及影响因素[J]. 地理学报,2021,76(5):1148-1162.
- [3] 李华. 降水对某变电站的边坡破坏的作用分析[J]. 低碳世界,2016,27(25):40-41.
- [4] 刘强,孙才华. 基于 MIKE21 的变电站洪涝灾害评估研究[J]. 能源与环保,2022,44(12):86-91.
- [5] 沈艳. 淮河正南洼地内某变电站站址处 50 年一遇洪涝水位分析[J]. 工程与建设,2020,34(5):820-821.
- [6] 乐红玲. 淮南市大通路变电站站址洪涝水位分析[J]. 工程与建设,2021,35(5):1009-1011.
- [7] 丁一汇. 中国暴雨理论的发展历程与重要进展[J]. 暴雨灾害,2019,38(5):395-406.
- [8] 张天宇,程炳岩,王记芳,等. 华北雨季降水集中度和集中期的时空变化特征[J]. 高原气象,2007,26(4):843-853.
- [9] 徐波,张楠,魏俊涛,等. 降雨天气对轨道交通客流量的波动影响研究[J]. 陕西气象,2023(6):59-63.
- [10] 计舒怀. 1961—2020 年河南省气候变化及其对气候生产力的影响[J]. 陕西气象,2022(6):42-47.
- [11] 中国气象局. 中国气候公报(2021)[EB/OL]. (2022-03-08)[2023-12-02]. https://www.cma.gov.cn/zfxxgk/gkqr/qxbg/202203/t20220308_4568477.html.
- [12] 张建云,王银堂,贺瑞敏,等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展,2016,27(4):485-491.
- [13] 任瑞杰. 浅析“7·20”郑州特大暴雨成因及对城市防洪措施探讨[J]. 甘肃水利水电技术,2023,59(6):5-8.
- [14] 张远. 郑州市近 60 年暴雨气候特征精细化分析[J]. 环境影响评价,2023,45(4):93-97.
- [15] 张建云,舒章康,王鸿杰,等. 郑州“7·20”暴雨洪涝几个水文问题的讨论[J]. 地理学报,2023,78(7):1618-1626.
- [16] 任宏昌,张恒德. 郑州“7·20”暴雨的精细化特征及主要成因分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(5):1-9.
- [17] 艾润冰. 2021 年“7·20”郑州地区强降水过程诊断分析[J]. 河南科技,2023,805(11):94-97.
- [18] 张启绍. 河南“21·7”极端暴雨过程地形敏感性试验[J]. 河南科学,2023,41(3):398-407.
- [19] 马丽,武永利,董春卿,等. 太行山复杂地形下华北暖季极端降水的时空分布特征[J]. 大气科学学报,2024,47(3):438-449.