

引用格式: 邓鸣阳, 裴浩, 徐丽娜, 等. 风电场和光伏电站对局地气候的影响研究进展 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(2): 15-25. DENG Mingyang, PEI Hao, XU Lina, et al. Research progress on the impact of wind farms and photovoltaic power plants on local climate [J]. Southern energy construction, 2025, 12(2): 15-25. DOI: 10.16516/j.ceec.2024-301.

风电场和光伏电站对局地气候的影响研究进展

邓鸣阳¹, 裴浩², 徐丽娜^{3,✉}, 刘诗梦⁴

- (1. 上海数慧系统技术有限公司, 上海 200120;
2. 内蒙古自治区气象局, 内蒙古 呼和浩特 010051;
3. 内蒙古自治区气象服务中心, 内蒙古 呼和浩特 010051;
4. 内蒙古自治区气候中心, 内蒙古 呼和浩特 010051)

摘要: [目的] 风光资源大规模开发利用的同时, 风电场和光伏电站建设运行对局地气候产生的影响受到广泛关注, 文章重点总结风电场和光伏电站对局地气候影响的研究进展, 为指导其科学合理的规划布局以及风能太阳能可持续发展提供支撑依据。[方法] 对该领域已有研究成果进行梳理, 归纳总结了风电场和光伏电站局地气候效应的研究方法、影响机理、研究过程及成果。[结果] 结果显示: 风电机组作为动量汇和湍流源, 一方面使下风向风速减小, 另一方面通过改变边界层湍流运动, 影响陆气之间能量物质的交换, 进而引起近地层风速、动量、感热通量和潜热通量的变化, 间接改变降水量和云量。光伏电站的建设, 显著改变了陆地表面特征, 导致陆气之间能量收支和分配发生变化, 同时伴随物理遮挡、地表蒸散发作用降低、辐射能转换为电能等因素导致的环境温度冷却效应和光伏组件在光电转换的过程中热量释放、地表的夜间辐射冷却削弱等因素产生的增温效应, 进而对局地气候系统产生反馈。风电光伏一体化运行, 可能会形成地表粗糙度增大/反照率减小—降水增加—植被增加的正反馈机制, 导致局地气候的变化加剧。[结论] 在构建以新能源为主体的新型电力系统背景下, 以“沙戈荒”为重点的大型风电光伏基地建设成为“十四五”新能源发展的重中之重, 其对气候环境的影响研究需持续开展。

关键词: 风电场; 光伏电站; 局地气候效应; 一体化运行; 评价方法

DOI: 10.16516/j.ceec.2024-301

文章编号: 2095-8676(2025)02-0015-11

CSTR: 32391.14.j.ceec.2024-301

中图分类号: TK01; P461



论文二维码

Research Progress on the Impact of Wind Farms and Photovoltaic Power Plants on Local Climate

DENG Mingyang¹, PEI Hao², XU Lina^{3,✉}, LIU Shimeng⁴

- (1. Shanghai Shuhui System Technology Co., Ltd., Shanghai 200120;
2. Inner Mongolia Meteorological Service, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China;
3. Inner Mongolia Meteorological Service Center, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China;
4. Inner Mongolia Climate Center, Hohhot 010051, Inner Mongolia, China)

Abstract: [Objective] With the large-scale development and utilization of wind and solar energy resources, the impact of the construction and operation of wind farms and photovoltaic power plants on local climate has received widespread attention. The paper focuses on summarizing the research progress on the impact of wind farms and photovoltaic power plants on local climate, providing

收稿日期: 2024-09-06 修回日期: 2024-10-12

基金项目: 内蒙古自治区揭榜挂帅项目“基于物理知识与机器学习融合模型的‘沙戈荒’风电基地精细化智慧应用服务系统研发及应用”(2024JBGS0054); 内蒙古自治区自然科学基金资助项目“内蒙古大规模风电场群高风险爬坡气象场景物理机制及预测方法研究”(2021MS04002); 内蒙古自治区自然科学基金资助项目“内蒙古黄河流域气象灾害风险预估预警指标研究”(2024MS04018); 内蒙古自治区科技重大专项“内蒙古风光资源开发对生态环境影响及其应对策略研究”

support for their scientific and reasonable planning and layout, as well as the sustainable development of wind and solar energy. [Method] The paper reviewed existing research results in this field and summarized the research methods, impact mechanisms, research processes and achievements on local climate effects of wind farms and photovoltaic power plants. [Result] Wind turbines operation causes local climate change as a momentum sink and turbulence source, which reduces the wind speed in the downwind direction on the one hand, and affects the exchange of energy and matter between land and air by changing the turbulent motion of the boundary layer on the other hand. Furthermore, the momentum, wind speed, sensible and latent heat fluxes in the near surface layer are changed directly and precipitation and cloud cover are changed indirectly. The construction of photovoltaic power plants has significantly changed the characteristics of the land surface and led to changes in the energy budget and distribution between land and air, the environmental temperature cooling effect and the heating effect exist simultaneously, which in turn produces feedback on the local climate system. The environmental temperature cooling effect is caused by physical obstruction, surface evaporation reducing and conversion of radiation energy into electrical energy. The heating effect is caused by the heat release of photovoltaic modules during the photoelectric conversion process and the weakening of nighttime radiation cooling on the surface. The integrated operation of wind and photovoltaic power may form a positive feedback mechanism of increased surface roughness/reduced albedo - increased precipitation - increased vegetation, leads to increased local climate change. [Conclusion] In the context of building a new power system with new energy as the main body, the construction of large-scale wind and photovoltaic bases with a focus on deserts, gobi and wasteland areas has become a top priority for the development of new energy in the 14th Five-Year Plan period. The research on its impact on the climate and environment needs to be continuously carried out.

Key words: wind farms; photovoltaic power plants; local climate effects; integrated operation; evaluation methods

2095-8676 © 2025 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

为应对全球气候变化,在“碳达峰、碳中和”的目标愿景下,风光发电在过去十几年来得到了快速的发展,全球年新增装机由 2016 年的 163 GW 增长至 2023 年的 500 GW,在新增电源中的比重从 60% 攀升至 80% 以上,成为新增电源的主力。我国风光发电更是实现了跨越式发展,截至 2023 年底,我国风电累计装机 441 GW,光伏发电累计装机 714 GW,累积和新增装机规模长期位居世界首位,风电光伏发电合计装机已超过煤电装机。风光资源利用作为能源转型的核心内容和应对气候变化的重要途经,未来仍将维持高比例发展态势^[1]。

伴随全球可再生能源开发利用规模不断扩大,风电场和光伏电站的建设在带来诸多益处的同时,其对气候的影响不容小觑,风电场和光伏电站与大气边界层的双向作用逐渐受到关注,能源利用整个生命周期中对环境的影响评价得到重视^[2]。Keith 等^[3]首次提出,风经过风电机组发生动能与电能转换,会影响陆地表面和大气层之间的能量交换和循环模式,在对局地天气和气候影响的同时,可能进一步影响全球气候。Barrie 和 Kirk-Davidoff^[4]指出北美地区

风电场引起的边界层扰动可能导致北大西洋上的旋风轨迹及其发展变化。虽然不乏学者对风电场和光伏电站的区域甚至全球气候效应展开讨论,但是多数研究还是围绕局地气候展开^[5-6]。2010 年以后,国内学者开始对我国西北、华北和东北等地区大型风电场和光伏电站开展相关研究。除了其对风速、气温、降水等方面的影响外,大量研究还表明,风电场和光伏电站的建设会使周边的植被活力呈增加趋势,尤其在一些光合有效辐射较高并存在光抑制和光损伤的光伏场站更为明显^[7]。因此,光伏电站区生态保护与修复成为当前光资源开发利用与生态文明建设共赢的重要举措。

风光资源利用与局地气候变化研究是当前可再生能源发展所关注的重要课题^[8]。然而,气候模式和模拟试验设计等的不确定性,导致风电场和光伏电站建设运行对于气候和环境影响仍存在很大的不确定性。有学者^[9]指出,风电场建设对全球气候的平均影响较小,其增暖效应小于人类活动产生的温室气体所造成的增暖效应。

本文通过回顾国内外陆上风电场和光伏电站建设运行的局地气候效应研究,从研究方法、影响机理、研究过程及成果等几方面对文献进行总结,着重梳理不同大气稳定度、参数化方案、下垫面条件下风

电场对局地气候的差异化影响以及在地表反照率、光伏组件与近地表大气之间非线性的相互作用共同影响下的光伏电站局地气候效应, 进一步分析了风电光伏一体化运行对局地气候的影响, 旨在了解风电光伏一体化运行对气候的综合影响, 为指导风电场和光伏电站科学合理的规划布局以及风能太阳能可持续发展提供支撑依据。

1 风电场建设运行对局地气候的影响

1.1 研究方法

目前, 风电场建设运行的气候效应研究主要以风电场建设前后或风电场内外的(近)地面观测、风洞试验观测、遥感资料分析及数值模拟为技术手段。其中, (近)地面观测资料主要以自动气象站观测数据^[10]、测风塔观测数据^[11]以及风力发电机组运行风数据^[12]为主。风洞试验是风电机组运行对边界层的影响研究中重要的研究手段之一, 在热稳定性改变情况下风电机组的尾流变化特征以及湍流效应的产生对风电机组输出功率的影响等方面取得了很多具有实际意义的研究成果^[13-14]。无人机测风、合成孔径雷达(SAR)、连续波雷达(ZephIR)及 Galion(Galion Aerosol Lidar Observation Network)激光雷达等遥感资料, 主要用于风场^[15-18]的差异化研究。

因上述研究手段的局限性, 数值模式逐渐成为研究风电场气候效应的主要工具。在局地气候效应研究中, 主要采用区域气候模式(Regional Climate

Model, RCM)^[19-20]、区域大气模式系统(Regional Atmospheric Modeling System, RAMS)^[21-22]、中尺度天气预报模式(Weather Research and Forecasting Model, WRF)^[23]、计算流体力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)模型^[8]及大涡模拟(Large Eddy Simulation, LES)模型^[24]等。基于风电机组尾流参数化模型(WRF-Fitch), 将风力机的拖曳系数引入 WRF 模式的风速和湍流动能计算中, 近年来常用于国内外的风电场气候效应研究中^[25-26]。

1.2 影响机理

风电机组运行过程中, 其旋转吸收风能的同时, 增加了区域内地表粗糙度, 并对气流增加了扰动作用, 表现出“低风速、高湍流”的尾流效应, 促进大气边界层中质量、动量、能量以及其它物质的垂直混合^[27]。经过若干风电机组群的尾流叠加效应, 即形成风电场尺度的大气内边界层, 当其充分发展时, 可对风电场下游几十公里范围内产生干扰作用^[28]。尾流效应的量级和距离受风电场的大小影响的同时, 还和大气边界层的稳定性有关。研究表明, 在大气中性层结条件下, 风电场尾流距离可以表示为风电机组直径、高度、行数、列间距、动能利用系数和地表粗糙度的函数^[29]。随着大规模风电基地的开发, 风电场尾流效应可呈现出中尺度特征, 影响局地或区域大气物理过程, 进而产生局地或区域气候效应, 影响机理如图 1^[5]所示。

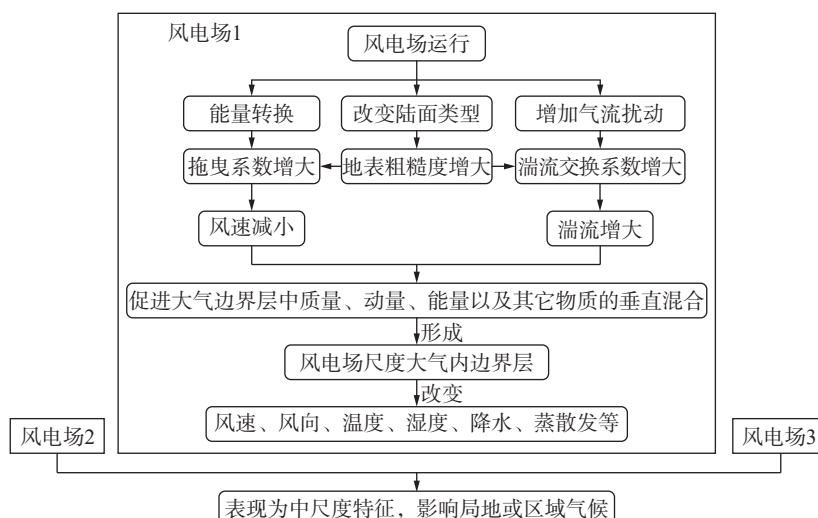


图 1 风电场对局地气候的影响机理^[5]

Fig. 1 Impact mechanism of wind farms on local climate^[5]

1.3 风电场对局地气候的影响

1.3.1 风电场对边界层风场的影响

风电场建设运行对边界层风场的影响直接表现为风速的衰减和湍流的增大。其中,风速的变化是评估风电场未来经济可行性的重要因素之一。研究指出,河西走廊酒泉大型风电场^[30]和河北尚义大型风电场^[31]建成后年平均风速分别减小 0.3 m/s 与 0.4 m/s。风电场建设对高空风速影响更为突出,使风电机组轮毂高度处的风速明显减小^[15,32],并会造成大气边界层高度的增加^[33]。Sharma 等^[34]研究表明大规模的风电场使惯性振荡和与之相关的夜间低空急流高度上移约 200 m。风速衰减距离最大可达到 30 ~ 60 km^[15,32-33],随着风速衰减距离的增大,风速衰减的程度逐渐减小^[15,33,35],风速会在其下风方 5 ~ 20 km 范围逐渐恢复到上风向风速的 98% 以上^[33],然而风速的变化高度却有所升高^[35]。此外,风电场对风速的影响随着周围环境风速的增大而减小^[10,36],且风速的损失量与风电机组的推力系数有关^[36]。

风电场通过改变边界层湍流运动,影响陆气之间能量物质的交换,引起局地气象要素的变化,进而影响局地气候^[37]。湍流强度除随风电机组位置、下垫面类型、风速大小等因素呈现差异化^[12]外,大气稳定度对边界层湍流运动具有重要影响。尾流区域内稳定层结中风切变明显,而不稳定层结中表现出低风速、低风切变与高湍流强度的特征^[17],稳定层结的风切变指数整体大于不稳定层结的风切变指数^[38],由于不稳定边界层的湍流能量较强,风切变及气象要素梯度较小,有利于尾流影响区和外界自由气流的动量和能量交换,使得尾流风速恢复较快,尾流传播距离较短,反之尾流风速恢复较慢,尾流传播距离较远^[27]。夏馨等^[11]研究表明河北尚义大型风电场建成后,近地面湍流增强,湍流强度的增加程度在夜间及 70 m 高度要比白天和 50 m 高度明显,且湍流强度随风速的增加而减小。

1.3.2 风电场对局地温度的影响

风电机组在运行过程中,尾流的扰动作用使得近地表动量、热量的垂直混合增强,进而对风电场内部与周边区域地表感热潜热通量的垂直分布等产生影响,造成气温和地表温度的变化^[39]。通过卫星遥感资料分析发现,德克萨斯中西部地区风电场内外地表温度呈 0.724 °C/10 a 的增温趋势^[40]。加利福尼

亚南部风电场下风向增温范围可达 12 km^[41]。我国西北^[30]、华北地区^[42]风电场及其下游地区同样具有增温趋势,但是增温幅度较小。

受大气稳定度等因素的影响,其增温作用具有较为明显的季节变化与日变化特征,甚至风电场尾流区域下风向表现出明显的异常降温效应^[33,43]。地表温度的变化幅度主要取决于风电机组运行所造成的湍流动能和背景湍流动能之比^[43]。内蒙古中部苏尼特右旗朱日和境内风电场上风向、风电场内、下风向的温度降幅依次为 0.7%、1.2% 和 1.6%,且气温的变化随观测环境温度的升高呈减小趋势^[10]。大量研究表明,风电场引起的夜间增温效应较为明显,且最强增温效应出现在夏季夜间^[40,44],白天则更趋于降温或不明显的增温^[39,43,45]。中国西北部的瓜州附近风电场夏季夜间增温可达 0.58 °C/8 a^[29]。不同的是,李思等^[35]在我国北方大型风电场对华北平原地区气象要素影响的模拟中指出,风电机组在轮毂高度及更高处产生湍流动能,形成湍流逆温效应,从而导致地面和轮毂高度处增温,尤其冬季(1 月)的湍流逆温效应更加明显,且风电场面积的扩大会对冬季的湍流逆温效应增强起到促进作用。

在对风电场的增温效应模拟研究中,不同的参数化方法会导致增温效果的显著差异,在增温幅度和增温范围方面均有所影响^[45]。Fitch 等^[33]在 LES 和 WRF 模型中,分别用上升动量汇和空气动力学粗糙度长度的增加来表示风电场,发现不同参数化方法模拟结果可相差 2 ~ 4 倍,LES 模拟结果温度变化通常小于 0.5 °C,而 WRF 模拟中由于夸大了感热通量,导致风电场区域近地面温度变化达 1 ~ 2 °C。

1.3.3 风电场对局地降水的影响

风电场对局地降水的影响机理和结论目前尚存在一定的不确定性。风电场的存在,可能在一定程度上阻碍了来自西北部的干空气平流,导致风电场东南部及其周边区域降水量增加 1% 左右,并在某一个季节内可能会对降水量产生强烈影响^[25]。在飓风等恶劣天气条件下,海上风电场会使得累积降水的分布明显变化,导致风电场上游或内部的海上区域降水量增加,下游的陆上区域降水量明显减少^[46]。胡菊等^[30]研究发现,酒泉地区风电场的建设,增加了大气对流特性,使河西走廊地区西部对流性雨日增加 1 ~ 1.5 d/a,对流降雨量变化范围在 ±5 mm 之间。

1.4 不同下垫面条件下风电场对局地气候的影响差异研究

不同下垫面条件下气候背景的差异性,造成了不同下垫面条件下风电场运行的气候响应特征的不同。不同地形条件下产生的湍流模型、边界层稳定情况等均不相同^[21]。地表粗糙度越大,风电场下游风速越小,且速度恢复越慢,湍流动能的空间非均匀分布特性越明显,温度的变化加剧、变化范围加大^[8]。相较于复杂地形或陆地风电场,平坦地形^[47]或近海^[23]风电场由于粗糙度较低,湍流运动得到充分发展,尾流中风速得以补充,使得其对当地的气候影响更小,恢复得更快。

艾泽等^[26]以青海湖西南部的乌兰茶卡至共和沙珠玉乡为中心,利用 WRF-Fitch 分别在平坦峡谷、高海拔山地和水体下垫面条件下开展风电场运行的气候效应敏感性数值试验,得出在同等装机的理想情景下,各风电场内近地层平均风速均呈现出衰减特征,且夜间风速衰减程度更加明显,2 m 气温以降低为主,平坦峡谷和水体下垫面风电场的气温变化明显于高海拔地区,且水体风电场内夜间湿度减小更明显。

2 光伏电站建设运行对局地气候的影响研究

2.1 研究方法

与风电场类似,当前光伏电站建设运行的气候效应研究也主要以光伏电站建设前后或光伏电站内外的(近)地面观测、遥感资料分析及数值模拟为技术手段。(近)地面观测存在观测要素种类少、时空局限性强等缺点,一定程度上限制了从观测角度研究光伏电站对局地气候的潜在影响,但是近年来,地面观测实验在不断完善。赵延岩等^[48]通过在新疆五家渠戈壁和光伏电站内两排光伏阵列中点不同高度或不同土壤深度处布设二维超声风速风向仪、空气温湿度传感器、四分量净辐射传感器、大气压力传感器、土壤热通量传感器、土壤温度传感器、土壤湿度传感器以及涡度相关系统,分析了戈壁与光伏电站混合下垫面地表辐射和能量收支特征。MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)^[49]、NASA(National Aeronautics and Space Administration)^[50]等遥感数据常用于地表温度、长短波辐射与地表反照率的变化研究。

Fthenakis 等^[51]采用 CFD 模型对北美地区大型光伏电站温度场进行模拟,并结合实测资料进行光伏热岛效应分析。Millstein 和 Menon^[52]通过 WRF 模拟,开展光伏电站地表反照率、地表温度、降水量和平均云量间的反馈分析。Taha^[53]利用高分辨率城市化中尺度数值模式(urban Mesoscale Model 5, uMM5),结合不同表面类型的反照率,对不同光伏组件转换效率下洛杉矶地区城市环境温度进行模拟。

2.2 影响机理

研究指出,光伏电站对局地气候的影响主要表现为通过改变地表粗糙度和反照率等陆面特征产生辐射强迫以及光伏组件与大气边界层之间的相互作用。光伏电站建设运行造成地表粗糙率和反照率的变化,改变地表-大气的辐射平衡,进而对温度场、湿度场、流场等产生一定影响。由于反照率的大小与下垫面类型有关,通常浅色地表反照率较高,深色地表的反照率较低,因此光伏电站对区域反照率的影响因下垫面类型而异。光伏组件和近地表大气之间非线性的相互作用表现为:(1)光伏组件的遮挡作用,减少了地表的热量吸收;(2)光伏组件在光电转换的过程中,在其上下表面产生热辐射;(3)光伏电站的建设可能会伴随地表植被的破坏,从而降低地表蒸散发作用造成的环境温度冷却效应;(4)辐射能转换为电能,使地表获得的能量减少;(5)光伏组件对向上长波辐射的反射和吸收,削弱了地表的夜间辐射冷却。其影响机理如图 2^[2]所示。

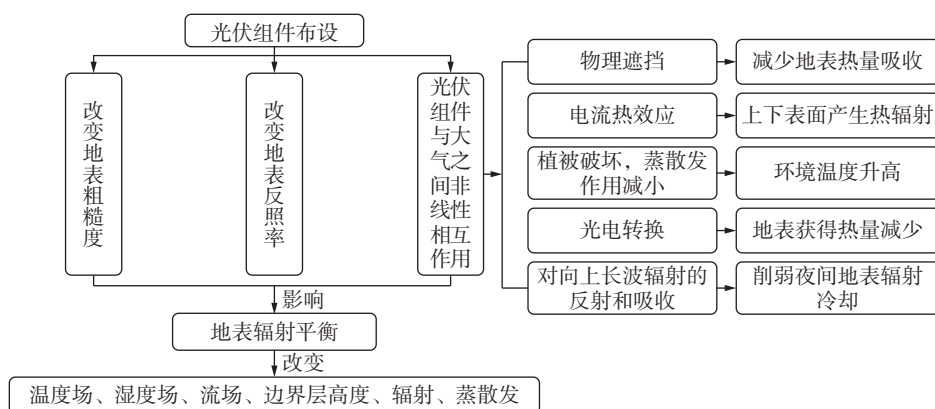
2.3 集中式光伏电站对局地气候的影响研究

2.3.1 光伏电站对辐射的影响

大型光伏电站的建设使电站内太阳辐射的吸收能力增强,反照率下降,向上短波辐射减小^[54]。共和盆地荒漠区大型光伏电站建设使区域辐射量减少 3.37%,且对白天时段太阳辐射影响更加明显^[55]。也有研究进一步指出,冬季共和盆地荒漠地区大型光伏电站内反照率增加,电站内外反照率的季节差异,导致夏季电站内向上短波辐射低于电站外,冬季电站内向上短波辐射高于电站外,而电站内向上长波辐射和向下长波辐射均低于电站外,尤以夏季表现最为明显^[56]。

2.3.2 光伏电站对温度的影响

光伏电站内外气温的季节变化和日变化较为明显。共和盆地^[53]和新疆五家渠^[55]光伏电站气温变

图 2 光伏电站对局地气候的影响机理^[2]Fig. 2 Impact mechanism of photovoltaic power plants on local climate^[2]

化较为一致,均表现出白天增温,夜间降温的变化特征,新疆五家渠光伏电站的建设在白天对 2 m 和 10 m 高度的近地表空气温度分别产生了 0.64 K 和 0.32 K 的对流加热效应,夜间则对 2 m 和 10 m 高度的空气温度产生 0.24 K 和 0.08 K 的冷却效应^[57]。而格尔木荒漠地区大型光伏电站内外气温变化与上述地区有所不同,除冬季白天差异不明显外,全年的夜晚以及春、夏、秋季的白天站内 2 m 气温值均高于站外,尤其夏季差异最大,可达 0.67 °C,而全年 10 m 气温均低于站外。

总体上,光伏电站的建设对地表温度具有冷却作用^[56]。共和盆地荒漠地区大型光伏电站建设产生了年平均 4 °C,月平均 1.8 ~ 8.2 °C 的降温^[56]。格尔木荒漠地区大型光伏电站建设同样造成了白天地表浅层(5 cm)土壤温度的下降,但是夜间除冬季外产生了地表浅层土壤温度的升高^[58]。

2.3.3 光伏电站对其它要素的影响

光伏电站建设,改变了地表反射率和辐射平衡,直接影响土壤温度和环境温度等因素,间接影响蒸发量和降水量^[2]。区域反射率的增加可能会导致降水量的减少,使得蒸发量减少,进一步促进对降水量的抑制作用^[59]。Li 等^[60]发现在沙漠区域布设光伏电站反射率减小,而在农耕环境下布设光伏电站,由于植被破坏,会在暖季导致反射率的增加,从而减少区域蒸发量和降水量。

光伏电站建设对地表粗糙度的改变还可能造成风场类型、湍流强度、大气边界层高度等的变化。Millstein 和 Menon^[52]指出,光伏电站区域的大气边界层高度在下午会升高 150 ~ 250 m。殷代英等^[55]

研究表明,光伏电站的布设,导致局地风向更加趋于单一,大风速占比例也明显降低。

2.4 分布式光伏对城市气候的影响研究

与集中式光伏电站相比,分布式光伏发电的建设规模相对较小,在未来的光伏产业中将扮演重要角色。由于光伏组件的遮蔽效应,减弱了太阳辐射对屋顶的直射作用,同时光电转换效应减少了建筑物表面对太阳辐射的吸收,从而影响城市热量与环境温度。光伏组件的安装可以有效改变建筑物表面温度,对城市热岛效应产生影响^[61],但缓解情况取决于对太阳辐射的吸收率^[62]和城市气候背景^[63]。Salamanca 等^[64]指出,半干旱城市环境下,通过有效降低近地面气温,屋顶光伏组件可以达到节能 8% ~ 11% 的目的。Taha^[53]在对洛杉矶地区城市环境温度进行模拟后得出,当光电转换效率达到某一阈值,太阳能光伏的部署可以为城市环境降温,如当光电转换效率达到 30% 时,洛杉矶地区可能会出现 0.2 °C 的降温。

3 风电光伏一体化运行的综合气候效应研究

目前,风电光伏一体化运行的综合气候效应研究尚少。Li 等^[65]采用气候模式,模拟研究了覆盖撒哈拉和萨赫勒地区的大规模风电光伏一体化运行对气候的综合影响。研究表明,风电场的建设造成该区域风速下降约 36%,近地表显著增温 2.36 K,促进该地区热低压的增强,辐合上升运动加剧,导致降水量增加了一倍,约 0.25 mm/d,尤其萨赫勒地区降水量平均增加了 1.12 mm/d。光伏电站的建设使该地

区降水量增加了 50%, 约 0.13 mm/d, 萨赫勒地区降水量平均增加 0.57 mm/d。光伏电站的运行, 引发了对风电场反照率减小—降水增加—植被盖度增加的正反馈, 进一步导致气温和降水量增加, 因此, 风电光伏一体化运行导致了气候变化加剧。

梁红等^[66]在我国西北干旱和半干旱地区风电场和光伏电站建设的气候效应研究中得出, 西北地区大规模风电场和光伏电站的建设导致局地地面净短

波辐射增加, 地表感热通量升高, 近地面气温升高, 使新疆西部地区、河西走廊地区和我黄淮等地降水量增加, 而华北部分地区降水减少。反照率的改变导致低层形成气旋性环流, 使我国中部地区出现南风异常, 西北地区产生东风异常, 高层形成反气旋环流, 可以影响我国大部分地区, 过程机理如图 3^[67]所示。此外, 还进一步指出, 太阳能利用导致的气候效应大于风能利用的气候效应。

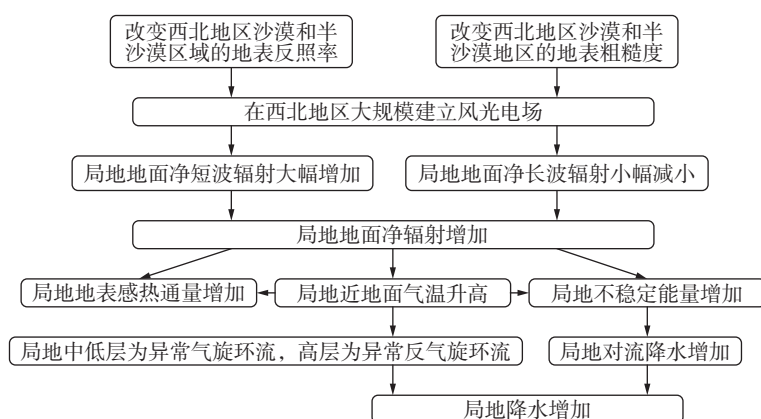


图3 我国西北地区大规模风电场和光伏电站建设引起局地气候变化的过程机理^[67]

Fig. 3 Process mechanism of local and regional circulation change caused by construction of wind farms and photovoltaic power plants in Northwest China^[67]

4 结论

1) 风电场建设运行对边界层风场的影响主要表现为风速的衰减和湍流的增大。湍流运动的变化, 影响陆气之间能量物质的交换, 导致大气通量的变化, 进而影响局地气候。

2) 与风电机组运行相关的风速衰减距离、风切变、湍流强度、温度等变化特征随大气稳定度的不同存在明显差异。

3) 风电场建成后, 改变了近地层动量、风速以及感热和潜热通量, 间接引发降水量和云量的变化, 但是受地形、风速变化、热量和水汽输送等多种因素影响, 使得风电场对降水的影响具有很大的不确定性, 不同粗糙度下垫面条件下, 地表粗糙度越大, 局地气候效应越明显。

4) 地表反照率的改变是光伏电站对局地气候产生影响的重要原因, 此外, 光伏组件的布设会同时伴随物理遮挡、辐射能转换为电能等因素导致的环境温度冷却效应, 以及地表蒸散发作用降低、光伏组件

在光电转换的过程中热量释放、地表的夜间辐射冷却削弱等因素产生的增温效应。光伏电站建设运行的局地气候效应是上述因素共同作用的结果, 当光电转换效率达到某一阈值, 太阳能光伏的部署可以起到为城市环境降温的目的。

在前期研究基础上, 我国学者总结出大型风电场和光伏电站局地气候效应评估方法, 分别制定陆上风电场和大型集中式光伏电站的局地气候效应评估指南^[67], 从气温、风速、相对湿度、降水等方面衡量大型风电场和光伏电站对局地气候的影响, 对大型风电场和光伏电站局地气候效应评估具有明确的指导作用。以减少风电场和光伏电站建设运行的不利气候影响为出发点, 结合气候系统的反馈机制, 研究确定风电场和光伏电站对气候的潜在影响, 探究风电场和光伏电站建设运行对气候影响的评价方法和指标体系, 可以为高效利用风光资源以及规划布局气候友好型风电场和光伏电站等提供科学支撑。

研究^[66]指出, 太阳能利用导致的气候效应大于风能利用的气候效应, 风电光伏一体化运行可能会

导致局地气候变化加剧,但是目前相关研究较少,随着“风光(水)火储一体化”项目的不断推进,风电光伏一体化运行对气候的综合影响应得到广泛关注,以期为相关部门提供科学合理的规划建议,促进可再生能源开发利用可持续发展。

参考文献:

- [1] 朱蓉, 石文辉, 王阳, 等. 我国风电开发利用的生态和气候环境效应研究建议 [J]. *中国工程科学*, 2018, 20(3): 39-43. DOI: [10.15302/J-SSCAE-2018.03.006](#).
ZHU R, SHI W H, WANG Y, et al. Research suggestions for ecological and climatic environmental effects of wind power development in China [J]. *Strategic study of CAE*, 2018, 20(3): 39-43. DOI: [10.15302/J-SSCAE-2018.03.006](#).
- [2] 崔杨, 陈正洪. 光伏电站对局地气候的影响研究进展 [J]. *气候变化研究进展*, 2018, 14(6): 593-601. DOI: [10.12006/j.issn.1673-1719.2018.072](#).
CUI Y, CHEN Z H. Research progresses of the impacts of photovoltaic power plants on local climate [J]. *Advances in climate change research*, 2018, 14(6): 593-601. DOI: [10.12006/j.issn.1673-1719.2018.072](#).
- [3] KEITH D W, DE CAROLIS J F, DEN KENBERGER D C, et al. The influence of large-scale wind power on global climate [J]. *Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America*, 2004, 101(46): 16115-16120. DOI: [10.1073/pnas.0406930101](#).
- [4] BARRIE D B, KIRK-DAVIDOFF D B. Weather response to management of a large wind turbine array [J]. *Atmospheric chemistry & physics*, 2009, 9(1): 2917-2931. DOI: [10.5194/acpd-9-2917-2009](#).
- [5] 陈正洪, 何飞, 崔杨, 等. 近 20 年来风电场(群)对气候的影响研究进展 [J]. *气候变化研究进展*, 2018, 14(4): 381-391. DOI: [10.12006/j.issn.1673-1719.2017.009](#).
CHEN Z H, HE F, CUI Y, et al. Advances in research of influence on climate of the group of wind farms in past 20 years [J]. *Advances in climate change research*, 2018, 14(4): 381-391. DOI: [10.12006/j.issn.1673-1719.2017.009](#).
- [6] 李培都, 高晓清. 光伏电站对生态环境气候的影响综述 [J]. *高原气象*, 2021, 40(3): 702-710. DOI: [10.7522/j.issn.1000-0534.2020.00020](#).
LI P D, GAO X Q. The impact of photovoltaic power plants on ecological environment and climate: a literature review [J]. *Plateau meteorology*, 2021, 40(3): 702-710. DOI: [10.7522/j.issn.1000-0534.2020.00020](#).
- [7] 田政卿, 张勇, 刘向, 等. 光伏电站建设对陆地生态环境的影响: 研究进展与展望 [J]. *环境科学*, 2024, 45(1): 239-247. DOI: [10.13227/j.hj.kx.202301152](#).
TIAN Z Q, ZHANG Y, LIU X, et al. Effects of photovoltaic power station construction on terrestrial environment: retrospect and prospect [J]. *Environmental science*, 2024, 45(1): 239-247. DOI: [10.13227/j.hj.kx.202301152](#).
- [8] 吴正人, 路婷婷, 刘梅, 等. 风电场运行对局地边界层气象因素影响 [J]. *太阳能学报*, 2020, 41(2): 118-125. DOI: [10.19912/j.0254-0096.2020.02.017](#).
WU Z R, LU T T, LIU M, et al. Influence of wind farm operation on meteorological factors in boundary layer [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2020, 41(2): 118-125. DOI: [10.19912/j.0254-0096.2020.02.017](#).
- [9] 赵宗慈, 罗勇, 江滢. 风电场对气候变化影响研究进展 [J]. *气候变化研究进展*, 2011, 7(6): 400-406. DOI: [10.3969/j.issn.1673-1719.2011.06.003](#).
ZHAO Z C, LUO Y, JIANG Y. Advances in assessment on impacts of wind farms upon climate change [J]. *Advances in climate change research*, 2011, 7(6): 400-406. DOI: [10.3969/j.issn.1673-1719.2011.06.003](#).
- [10] 徐荣会. 干旱区风电场对局地微气象环境的影响研究——以苏尼特右旗朱日和风电场为例 [D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.
XU R H. The impact of wind farm on local micro meteorological environment in arid region: taking Zhurihe wind farm as an example [D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2014.
- [11] 夏馨, 余晔, 董龙翔, 等. 风电场建设前后近地面湍流强度变化特征 [J]. *高原气象*, 2022, 41(4): 1062-1073. DOI: [10.7522/j.issn.1000-0534.2021.00005](#).
XIA X, YU Y, DONG L X, et al. Characteristics of near surface turbulence intensity before and after wind farm construction [J]. *Plateau meteorology*, 2022, 41(4): 1062-1073. DOI: [10.7522/j.issn.1000-0534.2021.00005](#).
- [12] 崔冬林, 刘晓亚, 胡威, 等. 运行风电场内局地湍流变化分析方法及其影响探讨 [J]. *太阳能学报*, 2017, 38(9): 2589-2596. DOI: [10.19912/j.0254-0096.2017.09.037](#).
CUI D L, LIU X Y, HU W, et al. Analysis method and influence discussion of local turbulence in wind farm [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2017, 38(9): 2589-2596. DOI: [10.19912/j.0254-0096.2017.09.037](#).
- [13] ZHANG W, MARKFORT C D, PORTÉ-AGEL F. Experimental study of the impact of large-scale wind farms on land-atmosphere exchanges [J]. *Environmental research letters*, 2013, 8(1): 015002. DOI: [10.1088/1748-9326/8/1/015002](#).
- [14] LOGANATHAN B, MUSTARY I, CHOWDHURY H, et al. Effect of turbulence on a Savonius type micro wind turbine [J]. *Energy procedia*, 2017, 110: 549-554. DOI: [10.1016/j.egypro.2017.03.183](#).
- [15] CHRISTIANSEN M B, HASAGER C B. Using airborne and satellite SAR for wake mapping offshore [J]. *Wind energy*, 2006, 9(5): 437-455. DOI: [10.1002/we.196](#).
- [16] HASAGER C B, MOUCHE A, BADGER M, et al. Offshore wind climatology based on synergetic use of Envisat ASAR,

- ASCAT and QuikSCAT [J]. *Remote sensing of environment*, 2015, 156: 247-263. DOI: [10.1016/j.rse.2014.09.030](#).
- [17] BARTHELMIE R J, CRIPPA P, WANG H, et al. 3D wind and turbulence characteristics of the atmospheric boundary layer [J]. *Bulletin of the American meteorological society*, 2014, 95(5): 743-756. DOI: [10.1175/BAMS-D-12-00111.1](#).
- [18] TORRES GARCIA E, AUBRUN S, COUPIAC O, et al. Statistical characteristics of interacting wind turbine wakes from a 7-month LiDAR measurement campaign [J]. *Renewable energy*, 2019, 130: 1-11. DOI: [10.1016/j.renene.2018.06.030](#).
- [19] 胡菊. 大型风电场建设对区域气候影响的数值模拟研究 [D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- HU J. Numerical simulation research on impact of large-scale wind farms on regional climate [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.
- [20] VAUTARD R, THAIS F, TOBIN I, et al. Regional climate model simulations indicate limited climatic impacts by operational and planned European wind farms [J]. *Nature communications*, 2014, 5: 3196. DOI: [10.1038/ncomms4196](#).
- [21] PAIVA L M S, BODSTEIN G C R, MENEZES W F. Numerical simulation of atmospheric boundary layer flow over isolated and vegetated hills using RAMS [J]. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 2009, 97(9/10): 439-454. DOI: [10.1016/j.jweia.2009.07.006](#).
- [22] BAIDYA ROY S. Simulating impacts of wind farms on local hydrometeorology [J]. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 2011, 99(4): 491-498. DOI: [10.1016/j.jweia.2010.12.013](#).
- [23] FIEDLER B H, BUKOVSKY M S. The effect of a giant wind farm on precipitation in a regional climate model [J]. *Environmental research letters*, 2011, 6(4): 045101. DOI: [10.1088/1748-9326/6/4/045101](#).
- [24] HANCOCK P E, ZHANG S. A wind-tunnel simulation of the wake of a large wind turbine in a weakly unstable boundary layer [J]. *Boundary-layer meteorology*, 2015, 156(3): 395-413. DOI: [10.1007/s10546-015-0037-5](#).
- [25] 王姝, 刘树华, 陈建洲, 等. 使用 WRF-Fitch 对湖区风电场风力发电机尾流效应特征的数值模拟 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2018, 54(3): 605-615. DOI: [10.13209/j.0479-8023.2017.187](#).
- WANG S, LIU S H, CHEN J Z, et al. Case studies: simulation on characteristics of wind turbine wake effect in a lake-side wind farm with WRF-Fitch [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2018, 54(3): 605-615. DOI: [10.13209/j.0479-8023.2017.187](#).
- [26] 艾泽, 常蕊, 陈正洪, 等. 不同下垫面风电场对夏季气候的影响 [J]. *高原气象*, 2022, 41(4): 1017-1029. DOI: [10.7522/j.issn.1000-0534.2021.00071](#).
- AI Z, CHANG R, CHEN Z H, et al. The impact of wind farm on local climate under different underlying surface conditions during summertime [J]. *Plateau meteorology*, 2022, 41(4): 1017-1029. DOI: [10.7522/j.issn.1000-0534.2021.00071](#).
- [27] 张双益, 胡非. 大气边界层与风力发电的相互作用研究综述 [J]. *高原气象*, 2017, 36(4): 1127-1137. DOI: [10.7522/j.issn.1000-0534.2016.00095](#).
- ZHANG S Y, HU F. Review on study of atmospheric boundary layer and wind power generation interaction [J]. *Plateau meteorology*, 2017, 36(4): 1127-1137. DOI: [10.7522/j.issn.1000-0534.2016.00095](#).
- [28] 王强. 风电场尾流效应及其对大气环境影响的中尺度数值模拟研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2020. DOI: [10.27461/d.cnki.gzjdx.2020.000048](#).
- WANG Q. Study on mesoscale numerical simulation of wake effect of wind farm & its impact on atmospheric environment [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020. DOI: [10.27461/d.cnki.gzjdx.2020.000048](#).
- [29] 陈伯龙, 高晓清, 左洪超, 等. 大型风电场群风电场布局间距的模型研究 [J]. *高原气象*, 2012, 31(6): 1746-1752.
- CHEN B L, GAO X Q, ZUO H C, et al. Model study on the optimal interval distance among wind farms in large-scale wind farm group [J]. *Plateau meteorology*, 2012, 31(6): 1746-1752.
- [30] 胡菊, 王姝. 甘肃酒泉大型风电基地对区域气候的影响研究 [J]. *全球能源互联网*, 2018, 1(2): 120-128. DOI: [10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2018.02.003](#).
- HU J, WANG S. Impact of large-scale wind power base located in Gansu Jiuquan on regional climate [J]. *Journal of global energy interconnection*, 2018, 1(2): 120-128. DOI: [10.19705/j.cnki.issn2096-5125.2018.02.003](#).
- [31] LUO L H, ZHUANG Y L, DUAN Q T, et al. Local climatic and environmental effects of an onshore wind farm in North China [J]. *Agricultural and forest meteorology*, 2021, 308-309: 108607. DOI: [10.1016/j.agrformet.2021.108607](#).
- [32] FRANDSEN S T, JØRGENSEN H E, BARTHELMIE R, et al. The making of a second generation wind farm efficiency model complex [J]. *Wind energy*, 2009, 12(5): 445-458. DOI: [10.1002/we.351](#).
- [33] FITCH A C, LUNDQUIST J K, OLSON J B. Mesoscale influences of wind farms throughout a diurnal cycle [J]. *Monthly weather review*, 2013, 141(7): 2173-2198. DOI: [10.1175/MWR-D-12-00185.1](#).
- [34] SHARMA V, PARLANGE M B, CALAF M. Perturbations to the spatial and temporal characteristics of the diurnally-varying atmospheric boundary layer due to an extensive wind farm [J]. *Boundary-layer meteorology*, 2017, 162(2): 255-282. DOI: [10.1007/s10546-016-0195-0](#).
- [35] 李思, 章晓冬, 尕藏程林, 等. 大型风力发电场对华北地区大气影响的数值模拟研究 [J]. *高原气象*, 2020, 39(2): 437-444. DOI: [10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00112](#).
- LI S, ZHANG X D, GAZANG C L, et al. Numerical simulations of the influence of large-scale wind farms on meteorological

- conditions in North China [J]. *Plateau meteorology*, 2020, 39(2): 437-444. DOI: [10.7522/j.issn.1000-0534.2019.00112](#).
- [36] 刘磊, 高晓清, 陈伯龙, 等. 大规模风电场建成后对风能资源影响的研究 [J]. *高原气象*, 2012, 31(4): 1139-1144.
LIU L, GAO X Q, CHEN B L, et al. Preliminary estimates of wind energy resources deficit in large wind farm [J]. *Plateau meteorology*, 2012, 31(4): 1139-1144.
- [37] 蒋俊霞, 杨丽薇, 李振朝, 等. 风电场对气候环境的影响研究进展 [J]. *地球科学进展*, 2019, 34(10): 1038-1049. DOI: [10.11867/j.issn.1001-8166.2019.10.1038](#).
JIANG J X, YANG L W, LI Z C, et al. Progress in the research on the impact of wind farms on climate and environment [J]. *Advances in earth science*, 2019, 34(10): 1038-1049. DOI: [10.11867/j.issn.1001-8166.2019.10.1038](#).
- [38] 路婷婷. 基于大涡模拟的风力机对区域大气边界层特性影响研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
LU T T. Study on the influence of wind turbine on the characteristics of regional atmospheric boundary layer based on large eddy simulation [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [39] BAIDYA ROY S, TRAITEUR J J. Impacts of wind farms on surface air temperatures [J]. *Proceedings of the national academy of sciences of the United States of America*, 2010, 107(42): 17899-17904. DOI: [10.1073/pnas.1000493107](#).
- [40] ZHOU L M, TIAN Y H, BAIDYA ROY S, et al. Impacts of wind farms on land surface temperature [J]. *Nature climate change*, 2012, 2(7): 539-543. DOI: [10.1038/nclimate1505](#).
- [41] WALSH-THOMAS J M, CERVONE G, AGOURIS P, et al. Further evidence of impacts of large-scale wind farms on land surface temperature [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2012, 16(8): 6432-6437. DOI: [10.1016/j.rser.2012.07.004](#).
- [42] 马兴悦, 余晔, 夏敦胜, 等. 风电场运行对地表温度的影响——以河北张家口北部风电场为例 [J]. *高原气象*, 2022, 41(4): 1074-1085. DOI: [10.7522/j.issn.1000-0534.2022.00060](#).
MA X Y, YU Y, XIA D S, et al. Impacts of wind farms on land surface temperature: a case study on the wind farm in northern Zhangjiakou, Hebei [J]. *Plateau meteorology*, 2022, 41(4): 1074-1085. DOI: [10.7522/j.issn.1000-0534.2022.00060](#).
- [43] XIA G, CERVARICH M C, ROY S B, et al. Simulating impacts of real-world wind farms on land surface temperature using the WRF model: validation with observations [J]. *Monthly weather review*, 2017, 145(12): 4813-4836. DOI: [10.1175/MWR-D-16-0401.1](#).
- [44] CHANG R, ZHU R, GUO P. A case study of land-surface-temperature impact from large-scale deployment of wind farms in China from Guazhou [J]. *Remote sensing*, 2016, 8(10): 790. DOI: [10.3390/rs8100790](#).
- [45] CERVARICH M C, ROY S B, ZHOU L M. Spatiotemporal structure of wind farm-atmospheric boundary layer interactions [J]. *Energy procedia*, 2013, 40: 530-536. DOI: [10.1016/j.egypro.2013.08.061](#).
- [46] PAN Y, YAN C, ARCHER C L. Precipitation reduction during Hurricane Harvey with simulated offshore wind farms [J]. *Environmental research letters*, 2018, 13(8): 084007. DOI: [10.1088/1748-9326/aad245](#).
- [47] MURALI A, RAJAGOPALAN R G. Numerical simulation of multiple interacting wind turbines on a complex terrain [J]. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 2017, 162: 57-72. DOI: [10.1016/j.jweia.2017.01.005](#).
- [48] 赵延岩, 李振朝, 高晓清, 等. 戈壁大型光伏电站夏季晴天地表通量特征 [J]. *太阳能学报*, 2021, 42(5): 138-144. DOI: [10.19912/j.0254-0096.tynxb.2020-0844](#).
ZHAO Y Y, LI Z C, GAO X Q, et al. Surface flux characteristics of large scale photovoltaic power station in gobi on sunny days in summer [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2021, 42(5): 138-144. DOI: [10.19912/j.0254-0096.tynxb.2020-0844](#).
- [49] ZHANG X H, XU M. Assessing the effects of photovoltaic powerplants on surface temperature using remote sensing techniques [J]. *Remote sensing*, 2020, 12(11): 1825. DOI: [10.3390/rs12111825](#).
- [50] LI S, WEIGAND J, GANGULY S. The potential for climate impacts from widespread deployment of utility-scale solar energy installations: an environmental remote sensing perspective [J]. *Journal of remote sensing & GIS*, 2017, 6(1): 1-6. DOI: [10.4172/2469-4134.1000190](#).
- [51] FTHENAKIS V, YU Y H. Analysis of the potential for a heat island effect in large solar farms [C]//Proceedings of 2013 IEEE 39th Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), Tampa, June 16-21, 2013. New York: IEEE, 2013: 3362-3366. DOI: [10.1109/PVSC.2013.6745171](#).
- [52] MILLSTEIN D, MENON S. Regional climate consequences of largescale cool roof and photovoltaic array deployment [J]. *Environmental research letters*, 2011, 6(3): 034001. DOI: [10.1088/1748-9326/6/3/034001](#).
- [53] TAHA H. The potential for air-temperature impact from large-scale deployment of solar photovoltaic arrays in urban areas [J]. *Solar energy*, 2013, 91: 358-367. DOI: [10.1016/j.solener.2012.09.014](#).
- [54] 杨丽薇, 高晓清, 吕芳, 等. 光伏电站对格尔木荒漠地区太阳辐射场的影响研究 [J]. *太阳能学报*, 2015, 36(9): 2160-2166. DOI: [10.3969/j.issn.0254-0096.2015.09.019](#).
YANG L W, GAO X Q, LÜ F, et al. Study on the impact of large solar farm on radiation field in desert areas of Golmud [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2015, 36(9): 2160-2166. DOI: [10.3969/j.issn.0254-0096.2015.09.019](#).
- [55] 殷代英, 马鹿, 屈建军, 等. 大型光伏电站对共和盆地荒漠区微气候的影响 [J]. *水土保持通报*, 2017, 37(3): 15-21. DOI: [10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.003](#).
YIN D Y, MA L, QU J J, et al. Effect of large photovoltaic power

- station on microclimate of desert region in Gonghe basin [J]. *Bulletin of soil and water conservation*, 2017, 37(3): 15-21. DOI: [10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.003](https://doi.org/10.13961/j.cnki.stbctb.2017.03.003).
- [56] CHANG R, SHEN Y B, LUO Y, et al. Observed surface radiation and temperature impacts from the large-scale deployment of photovoltaics in the barren area of Gonghe, China [J]. *Renewable energy*, 2018, 118: 131-137. DOI: [10.1016/j.renene.2017.11.007](https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.11.007).
- [57] JIANG J X, GAO X Q, LV Q Q, et al. Observed impacts of utility-scale photovoltaic plant on local air temperature and energy partitioning in the barren areas [J]. *Renewable energy*, 2021, 174: 157-169. DOI: [10.1016/j.renene.2021.03.148](https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.03.148).
- [58] 高晓清, 杨丽薇, 吕芳, 等. 光伏电站对格尔木荒漠地区土壤温度的影响研究 [J]. *太阳能学报*, 2016, 37(6): 1439-1445. DOI: [10.3969/j.issn.0254-0096.2016.06.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.0254-0096.2016.06.012).
GAO X Q, YANG L W, LV F, et al. Effect of PV farm on soil temperature in Golmud desert area [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2016, 37(6): 1439-1445. DOI: [10.3969/j.issn.0254-0096.2016.06.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.0254-0096.2016.06.012).
- [59] 蒋俊霞, 高晓清. 光伏系统气候效应及影响机理研究进展 [J]. *高原气象*, 2022, 41(4): 953-962. DOI: [10.7522/j.issn.1000-0534.2022.00077](https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-0534.2022.00077).
JIANG J X, GAO X Q. Research progress on climate effect and influence mechanism of photovoltaic systems [J]. *Plateau meteorology*, 2022, 41(4): 953-962. DOI: [10.7522/j.issn.1000-0534.2022.00077](https://doi.org/10.7522/j.issn.1000-0534.2022.00077).
- [60] LI S, WEIGAND J, GANGULY S. The potential for climate impacts from widespread deployment of utility-scale solar energy installations: an environmental remote sensing perspective [J]. *Journal of remote sensing & GIS*, 2017, 6(1): 1-5. DOI: [10.4172/2469-4134.1000190](https://doi.org/10.4172/2469-4134.1000190).
- [61] MASSON V, BONHOMME M, SALAGNAC J L, et al. Solar panels reduce both global warming and urban heat island [J]. *Frontiers in environmental science*, 2014, 2: 81306. DOI: [10.3389/fenvs.2014.00014](https://doi.org/10.3389/fenvs.2014.00014).
- [62] WANG Y P, TIAN W, ZHU L, et al. Interactions between building integrated photovoltaics and microclimate in urban environments [J]. *Journal of solar energy engineering*, 2006, 128(2): 168-172. DOI: [10.1115/1.2188533](https://doi.org/10.1115/1.2188533).
- [63] BURG B R, RUCH P, PAREDES S, et al. Effects of radiative forcing of building integrated photovoltaic systems in different urban climates [J]. *Solar energy*, 2017, 147: 399-405. DOI: [10.1016/j.solener.2017.03.004](https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.03.004).
- [64] SALAMANCA F, GEORGESCU M, MAHALOV A, et al. Citywide impacts of cool roof and rooftop solar photovoltaic deployment on near-surface air temperature and cooling energy demand [J]. *Boundary-layer meteorology*, 2016, 161(1): 203-221. DOI: [10.1007/s10546-016-0160-y](https://doi.org/10.1007/s10546-016-0160-y).
- [65] LI Y, KALNAY E, MOTESHARREI S, et al. Climate model shows large-scale wind and solar farms in the Sahara increase rain and vegetation [J]. *Science*, 2018, 361(6406): 1019-1022. DOI: [10.1126/science.aar5629](https://doi.org/10.1126/science.aar5629).
- [66] 梁红, 魏科, 马骄. 我国西北大规模太阳能与风能发电场建设产生的可能气候效应 [J]. *气候与环境研究*, 2021, 26(2): 123-141. DOI: [10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19126](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19126).
LIANG H, WEI K, MA J. Climate effect assessment of ideal large-scale solar and wind power farms in Northwest China [J]. *Climatic and environmental research*, 2021, 26(2): 123-141. DOI: [10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19126](https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19126).
- [67] 中国气象局. 陆上风电场局地气候效应评估指南: QX/T 709—2024 [S]. 北京: 气象出版社, 2024.
China Meteorological Administration. Guidelines for assessment of local climate effects of onshore wind farms: QX/T 709—2024 [S]. Beijing: China Meteorological Press, 2024.

作者简介:



邓鸣阳

邓鸣阳(第一作者)

1995-, 女, 信息系统项目管理师, 主要从事国土空间规划和信息化建设应用研究工作 (e-mail) sarina.deng@outlook.com。

徐丽娜

徐丽娜(通信作者)

1981-, 女, 正高级工程师, 主要从事风能太阳能预报技术应用研究工作 (e-mail) wutong2829@sina.com。

(责任编辑 孙舒)