

风电场对环境的影响研究进展

李国庆¹, 李晓兵^{2,3}

(1. 鲁东大学资源与环境工程学院, 山东 烟台 264025; 2. 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;
3. 北京师范大学资源学院, 北京 100875)

摘要:风能作为清洁和环境友好的可再生能源,可以减少对化石燃料的依赖,因而近年来发展迅速。但风电设施在安装和运行过程中,评价其对环境产生的影响却尚未得到足够的重视。本文综述了风电场施工和运行过程对气候变化及陆地生态系统的可能影响,同时探讨了风电设施所产生的噪声污染及辐射效应,认为未来风电研究的重要方向为:①评价风电场对气候的影响,还需要建立或改进更精细的气候模型;②探讨风电场对动物的影响,需要识别到底哪些环境因子对动物活动起到了决定性的作用,这些因子在不同风电场中是否具有普遍性;③分析风电场对植被的影响,需要综合利用遥感监测及生态学调查方法,才能准确识别不同陆地生态系统植被对风电场的响应机制;④研究风电场对生态系统碳、氮循环的影响,要加强地表实测数据的获取,尤其是连续多年的数据获取,形成长期的观测序列,进行时空尺度的分析;⑤风电场在全球不同区域,对各环境要素的影响并不完全一致,通过对典型区域的研究来反映风电场对环境影响的共性问题,是目前较为可行的方法;⑥在确保风能作为新能源发展重点的同时,还需保护整个陆地生态系统的生产力和生物多样性,在此基础上才能准确评价、处理风电场与可持续发展的关系;⑦在风电场建设前的环评阶段,需要补充完善现有环评导则和标准,充分考虑风能、太阳能等新兴能源对环境长期而复杂的影响;⑧中国作为世界风能利用的第一大国,需要适时建立长期定位观测试验站,以期开展风电场对环境影响的定量化、全过程、时空尺度的细致研究。本文可为人类科学合理的利用风能、处理风电场建设与可持续发展的关系是提供一些思路。

关键词:风电场;环境影响;全球变化;陆地生态系统;研究进展

1 引言

由于化石能源的不可再生性及其燃烧带来的环境问题日益加剧,清洁能源越来越被各国政府和民众所接受(Dincer et al, 2015)。从全球的清洁能源利用发展来看,风能作为一种清洁能源,越来越受到广泛重视(Garrigle et al, 2015; Phillips, 2015)。2010-2015年间,全球风能发电量以年均30%的速度增长,预计到2020年,风能将占全球总能源的5%(Herbert et al, 2007)。中国的清洁能源政策也逐步向风能方向倾斜(McElroy et al, 2009),自2008年

起,中国风力发电机的已有装机容量和装机速度一直稳居世界第一位,风能未来将在中国能源结构中占据重要地位(Xu et al, 2010; Feng et al, 2015)。风电场建立之初,研究人员和政府部门更关注于风电的节能减排作用,由于风电场对环境的影响是一个长期渐变和难以衡量的过程,致使风电场对环境的影响评价被人为忽视(Leung et al, 2012; Sun et al, 2015)。由此未来可能会造成灾难性的影响(Leung et al, 2012; Armstrong et al, 2014; Feng et al, 2015)。风能在带来积极环境效应的同时,风电开发和运行对环境的负面影响还需认真思考。风电场对人类

收稿日期:2016-01;修订日期:2016-06。

基金项目:山东省高等学校科技计划项目(J16LH51, J16LH02);国家重点基础研究发展计划项目(2014CB138803);国家自然科学基金项目(41601598) [Foundation: Higher Education Science and Technology Program of Shandong Province, No.J16LH51, No.J16LH02; National Key Basic Research Program of China, No.2014CB138803; National Natural Science Foundation of China, No.41601598]。

作者简介:李国庆(1982-),男,讲师,博士,主要从事草原生态遥感、湿地环境遥感等方面研究, E-mail: ligqing@foxmail.com。

引用格式:李国庆, 李晓兵. 2016. 风电场对环境的影响研究进展[J]. 地理科学进展, 35(8): 1017-1026. [Li G Q, Li X B. 2016. Research progress of wind farm impact on the environment[J]. Progress in Geography, 35(8): 1017-1026.]. DOI: 10.18306/dlkxjz.2016.08.011

及生存环境的影响是“利大于弊”还是“弊大于利”，目前已经开始出现争议，但由于缺少深入系统的研究，迄今未得出“利弊如何”的结论(赵宗慈等, 2011; Zhou L M et al, 2012; Phillips, 2015; 李智兰, 2015)。本文参照大量国内外文献，归纳总结风电场对环境影响的主要方面，指出目前研究的主要方向、方法及存在的问题，以期为客观地认识风能、掌握风电场对环境影响评价方法提供借鉴。

2 风电场施工期对环境的影响

风电场在施工期对环境的影响主要是对地表原有生态系统的破坏。陆上风电场施工期的危害主要有：施工期间的挖土与回填土工程，如道路修建、土地平整、风机基础工程、箱式变电工程、电缆沟工程等，将破坏地表形态和土层结构，造成地表裸露，植被破坏，土壤肥力受损，导致水土流失发生(表1)(Armstrong et al, 2014; 李智兰, 2015)。在湿地生态系统中建设风电场，施工过程会导致土壤结构和地表植被改变，改变了底栖生物的生境，导致风电场范围内底栖生物的消亡(Fagúndez, 2010; 宋文玲, 2011); 而对于海上风电场，除将造成底栖动物全部丧失外，风机塔架基础结构施工过程中，会引起周围一定范围内悬浮泥沙增加(>10 mg/L)，造成藻类等植被光合作用减弱(季遥, 2010; Andersson, 2011)。与此同时，施工过程中产生的振动和噪声对海洋生物也会产生一定影响，国内有媒体报道，风力发电工程项目在施工过程中巨大的撞击声和震动感会对亲鱼培育产生严重影响，造成出苗率低、畸形苗多等问题，但目前尚未见深入的科学研究方法和可信的科学结论(天长市农委渔业局, 2012)。另外，由于人类活动、交通运输工具、施工机械的机械运动，相应施工过程中产生的噪声、灯光等可能对邻近岸边及近岸地区的鸟类栖息地和觅食的鸟

类产生一定影响，导致施工区域及周边区域中分布的鸟类数量减少、多样性降低(Wang et al, 2015a)，但这种影响是局部的、短期的、可逆的，当工程建设完成后，其影响基本可以消除(Furness et al, 2013)。

3 风电场运行期对气候变化的影响

3.1 对局地气候的影响

风电场可以改变局地气象条件、陆表和大气热交换过程(Keith et al, 2004; Xia et al, 2016)，其中风电场对蒸散发、风速及地表温度的影响受到了广泛关注(Roy et al, 2004; Vautard et al, 2010)。蒸散发受风电场的影响可能最为严重，学者们较早地进行了相关研究(Baidya et al, 2004; Keith et al, 2004)。在研究方法上，主要从区域尺度评价风电场对蒸散发的影响，由于风电场的观测数据很少公布于众，大面积的实地蒸散发观测也具有较大的难度，因此目前多利用气候模型模拟的方法判断大型风电场对蒸散发的影响趋势，取得了非常好的效果(Roy et al, 2004; 胡菊, 2012; Vautard et al, 2014)。现有研究表明，风电场对局地蒸散发的影响可达300 mm/a以上(徐荣会, 2014; Szilagyi, 2015)。

在探讨风电场对局地风速的影响方面，主要通过模型模拟方法。风力发电机运行过程中，会吸收气流的动量，从而使下游地区风速明显减小20%~40%，影响范围可达30~60 km(Frandsen et al, 2009; Vautard et al, 2010)。但这一影响范围可能会随着风电场规模增加而扩大，有报道表明，京津冀爆发大面积雾霾很大程度上是由于近些年风速的减小，而风速的减小很可能与内蒙古风电场大规模建设相关，但由于缺少完整可信的研究体系，这一结论的争议尚很大(刘江恒等, 2014)。

在对地表温度的影响方面，Somnath等(2010)通过在美国加利福尼亚风电场上、下风处各设立一个观测塔，实测发现风电场会对上、下风处的气温产生影响，且气温变化特点不同，但受限于观测成本和方法，无法从区域尺度上验证。Zhou L M等(2012)首次利用遥感数据从区域尺度上监测了美国德克萨斯州风电场地表温度的变化趋势发现，风电场的建设，使附近地表增温达0.72℃。

另外，对风电场周围的实验观测表明：风速、地表温度、湍流的变化可能影响大气湿度和温室气体(如CO₂、CH₄和N₂O)在近地面边界层的浓度分布(Roy et al, 2004; Roy, 2011)，甚至使降雨量增加

表1 风电场施工期对陆地环境的影响
Tab.1 Impact of wind farms on the terrestrial environment during the construction period

污染来源	环境危害
风电场占地场地平整、配套道路施工	植被破坏、水土流失
设备运输过程	噪声污染、扬尘增加
施工建材堆放	植被覆盖度减少、土壤结构破坏
风电场及附属设施施工	碎砖、废沙等建筑垃圾、噪声污染、底栖生物的消亡
施工过程及设备清洗所产生的废水	含悬浮颗粒物、石油类悬浮物废水的污染

(Fiedler et al, 2011)。上述现象可能发生相互作用,通过对局地气象因子的长期改变,最终影响局地气候条件。

3.2 对全球气候变化的影响

风电场对气候的影响不只是局地的,还有大范围的气候效应。大型风电场设置会造成全球大气能量损失,使得全球表面经向风速、温度、云、感热、潜热、短波和长波辐射都会发生变化,间接影响降雨量的变化(Keith et al, 2004; Balog et al, 2016)。由于风电场对全球气候变化的影响观测困难,目前主要以 NCAR 和 GFDL 等模型模拟方法来评价其对全球气候变化的影响(赵宗慈等, 2011; Balog et al, 2016)。Wang 等(2010)利用 NCAR 模型,模拟到2100年全球使用风能占总能源的10%以上时,风电场对全球气候的影响,研究结果表明:陆地风电场设置使全球陆地年平均气温升高0.15℃,沿海风电场对全球年平均气温没有影响;南北半球中低纬度大部分地区变暖,其中许多地区变暖在1℃以上;风电场造成全球大部分网格点上动能减小,盛行风速明显减弱,多数格点气温上升;风电场的设置改变了近地层的感热和潜热通量以及动量和风速,从而间接改变降水量和云量(Wang et al, 2010)。

3.3 对气候影响的原因分析

Armstrong 等(2014)将风电场对大气造成上述影响的可能原因进行了分析(图1)。在图1中,温度和蒸散量白天是个不稳定的大气边界,晚上是一个稳定的大气边界。粉红色背景代表较温暖的空气,蓝灰色背景代表较冷空气。粉红色虚线箭头表示暖空气涡旋,该涡旋将增加局地范围内空气的温度,蓝灰色的实线箭头代表较冷的空气涡旋,该涡旋将降低该范围内空气的温度。水平箭头粗细表示通过涡轮机前后风速的大小,垂直箭头的粗细代表蒸散量的大小。由图1可见,理论上风电场会使得下风处的近地表下层空气出现白天“减温增湿”,晚上“增温减湿”的现象,上风处恰好相反。风电场通过改变风速、湍流、垂直混合、蒸发、陆表和大气的热交换过程,进而改变大气边界层条件,最终影响陆表气象,进一步影响气候状况。

3.4 不确定性探讨

目前,有关风电场对局地气候的影响存在很大的争议。首先,并不是所有研究都表明风电场会对气候产生影响。例如 Vautard 等(2014)利用一个复杂的区域气候模型对欧洲部分地区的风电场进行研究,结果表明,风电场不会对区域气候产生显著

影响,风电场对气候的影响要比欧洲绝大部分地方的自然气候变化小得多。另外,从目前探讨风电场对局地气候影响的方法方面看,一般采用气候模型模拟方法,但由于气候模式的不确定性、风电场模拟试验设计的不确定性,以及模拟结果验证的复杂性,大面积建立风电场的全球气候效应尚有很大不确定性,争议也较大(Fitch, 2015)。再者,已有研究还缺乏对下述因素的考虑:①风力发电机的型号、高度、密度、空间分布形式和数量的差异性;②几乎没有考虑风电场及其周边的气候条件、地表类型及地形因素的异质性对结果的影响。研究仅集中在气候条件、地表类型相同或相似的风电场,缺少在不同风电场中的对比研究;③观测时空尺度的一致性,忽略时空尺度的差异可能会产生相悖的研究结论。因此,研究风电场对区域气候的影响,还需要针对不同地形区域、不同地表类型区域和不同气候背景下的风电场进行长期观测,这种长期观测的尺度可能长达几十年,甚至更长。

4 风电场运行期对陆地生态系统影响

相对于理解和评价风电场对气候变化的影响,风电场对陆地生态的影响更直观,也容易评价。目

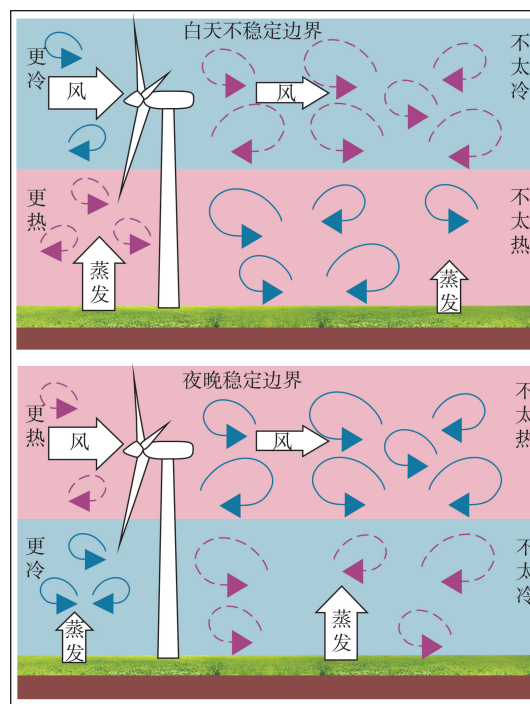


图1 风电场对大气潜在影响示意图(Armstrong et al, 2014)

Fig.1 Potential impact of wind farms on the atmospheric environment(Armstrong et al, 2014)

前主要涉及到风电场对动物、植物、土壤及生态系统碳、氮循环方面。

4.1 对动物的影响

风电场对动物的影响研究主要围绕陆地及海上2个场景进行。相对于风电场建立之前,陆地风电场内鸟类及蝙蝠等飞行动物的活动会迅速下降,这主要是由于风机运行的噪声和风机转动对动物的伤害所致。风机运行的时候,每台风机产生的噪声值约为96~104 dB(A)之间,对噪声比较敏感的动物就会选择回避;很多学者通过统计鸟类栖息地的数量和面积、迁徙路线、种群数量等方式评价风机对鸟类和蝙蝠的影响发现,转动的风机以及架空输电线会导致鸟类和蝙蝠撞击伤亡,大多数鸟类和蝙蝠会主动避免在此区域栖息和觅食(宋文玲, 2011; Hernández-Pliego et al, 2015; Peste et al, 2015; Wang et al, 2015a)。但也有研究指出,风机转动对鸟类确实存在驱赶作用,但对鸟类的数量影响不大,与同死于飞机、汽车、建筑物、通讯塔、架空电线等人造机器或设备下的鸟数量相比,死于风机下的鸟数量微不足道(Erickson et al, 2001)。目前,探讨鸟类活动与环境因子的相关性研究很多,但在风电场内特定环境下,进行鸟类活动与环境因子相关性的研究较少。而风电场内影响鸟类活动的环境因子更为复杂,如地形地貌、天气状况、风机高度与排列、植被层次结构、鸟类可捕食的鼠虫数量、人为干扰等。风电场内鸟类活动与哪些环境因子之间具有显著相关关系,这些相关因子是否具有普遍性,还有待于今后进一步研究。

海上风电设施的设置对动物的影响方面,目前看喜忧参半,因风机植入海底的部分相当于人造岛礁,为鱼类提供更为安全的庇护场所(Stenberg et al, 2011; Petz, 2012; Bergström et al, 2014),从而会增加鱼的种类。但风力发电机运行过程产生的噪声,可能会对近海鱼类活动和繁殖产生消极影响,但影响程度和鱼类的品种相关(Andersson, 2011)。

4.2 对植被的影响

目前,探讨风电场对植被的影响主要在小尺度内进行,一般采用生态学调查方法,实地分析电场建设前后的植被变化。一般认为,风电场的运行会对电场区域内植被覆盖度、地上、地下生物量和枯落物含量产生消极影响(Fagúndez, 2010; 王希平, 2014; 李智兰, 2015),受限于电场建成历史短的限制,以及生态学地面调查方法的空间尺度限制,研究时间还局限于风电场建立前、后两期的对比,研

究范围还限于风电场附近2~3 km范围。但从风电场对局地气候影响范围看,风电场对植被的影响范围也绝不会仅限于上述范围内;由于植被对风电场的响应具有滞后性,仅通过风电场建立前后植被样地的对比,尚不能准确反映风电场对植被的影响。所以评价风电场对植被的影响,还需考虑更大的空间范围、更长的连续时间尺度。李国庆等(2016)以内蒙古灰腾梁风电场为例,利用遥感数据分析了电场50 km范围内、建设前9年和建成后7年植被的变化情况,研究发现:①风电场对电场区域内外植被的影响机制是不同的,且和风向密切相关,电场区域内不利于植被的生长,而上、下风区域却有利于植被的生长,其中下风处更甚;②距离风电场中心30~40 km的下风区很可能是受风电场影响最为明显的区域。但这是在假设地表放牧干扰相似的情况得出的结论,“放牧干扰相似”是李国庆等(2016)通过野外的宏观观测与牧户调查得出的,还需要通过布设大量的样地来验证这一结论。另外,目前尚未见风电场对森林、湿地植被影响相关的研究,还需进行该方面的研究工作,以发现风电场对“草原生态系统”“湿地生态系统”和“森林生态系统”植被影响机制的“相似性”与“相异性”。为此,将经典的生态学调查方法与遥感技术相结合,也许会更容易、更真实地揭示风电场对植被的影响机制。

4.3 对土壤的影响

目前,探讨风电场对土壤的影响,主要通过对风电场及周边土壤样品的采样和分析。有研究表明:风电场的建设增加了扰动区域的土壤容重、PH和总孔隙度,降低了土壤电导率、含水量和全盐,同时也降低了土壤养分(李智兰, 2015)。但是否会对风电场占地范围之外的土壤产生影响,影响范围和强度有多大,目前尚无相关研究。值得注意的是,风电场对局地气候的影响,势必造成土壤温室气体排放的变化,对土壤的碳、氮等元素的循环过程产生重大影响(Bardgett et al, 2008; Allison et al, 2010; Zhou J Z et al, 2012)。另外,风电场通过对降雨的影响间接改变土壤水分的输入量(Lee et al, 2012)。也有研究假设风电场会改变土壤的水分蒸发,但目前这一结论并未得到实验的验证(Roy et al, 2004)。在风电场占地范围之外,由于土壤对外部的干扰是滞后且缓慢的,风电场对土壤的影响可能需要20~25年,甚至更长的时间才能表现出来(Euskirchen et al, 2009)。从已有研究结果看,由于目前尚未形成长时间连续序列的土壤观测资料,实地验证困难,

通过模型模拟风电场对土壤的影响可能成为唯一可行的手段。由于中国风电历史更短,在长时间尺度上研究风电场对土壤的影响更为罕见。

4.4 对碳、氮循环的影响

与风电场对植被、土壤的影响相比,从整个陆地生态系统范围探讨风电场对碳、氮循环的影响就更为复杂。风电场主要通过对局地微气象的影响,对生态系统的碳、氮循环产生影响,最终形成对全球变化的反馈(图2)(Armstrong et al, 2014)。在图2中,线形虚线箭头表示风电场对陆地碳、氮循环和气候变化的直接影响,点形虚线箭头表示风电场对陆地碳、氮循环和气候变化的间接影响,实线箭头表示上述过程对全球变化的反馈。风电场的直接影响主要表现在通过对温度、土壤湿度的影响,导致植物群落组成和生产力、土壤微生物活性发生变化;风电场的间接影响主要体现在:通过对植物群落组成和生产力的影响,进而改变土壤理化条件和土壤的碳、氮输入,最终改变土壤微生物群落的变化,对全球变化产生反馈。

但就陆地生态系统碳、氮循环而言,这个过程本身就微妙而复杂,涉及的因素庞杂(Li et al, 2014; Li et al, 2016)。目前主要的问题是:在现有气候变化模型不足以准确揭示风电场对局地甚至全球气候变化影响的情况下,进一步开展讨论风电场对碳、氮循环的影响及对全球变化的反馈就更加困难。揭示风电场对陆地生态系统碳、氮循环的影响需要长期的深入研究,而科学理解风电场对陆地生态系统碳、氮循环的影响,是衡量风电利弊的关键。

5 风电场对环境的其他影响

5.1 噪声污染

相对风电场对气候及环境的影响,风电场产生的噪声对人类生活的影响迅速、直接、最令人难以忍受。风力涡轮机引起噪声主要有机械噪声和空气动力噪声。目前,很多学者已开展了类似研究,均表明风机转动过程中所产生的低频噪声会对人类生活造成影响(King et al, 2012; Laratro et al, 2014; Wasala et al, 2015)。Pedersen(2011)探讨了风力涡轮机的声压水平与邻居的幸福感之间的关系,结果显示在风力涡轮机的存在下,人更加容易被激怒,而且会出现头痛等症状,他通过构建加权声音变量和疾病之间的回归关系,判断风机噪音对人类身体健康的影响。Punch 等(2010)和 Arezes 等

(2014)在对这方面的文献进行回顾总结时发现,风力涡轮机的低频空气动力噪音会引起睡眠障碍和听力损失,同时也会伤害前庭系统。但风电场产生的噪声影响距离一般不会超过 4 km(Arezes et al, 2014; Zajamšek et al, 2016)。现有研究存在的主要问题是:从研究方法上看,通过定量方式评价噪声的大小和距离的关系相对容易,但评价噪声对人类的影响程度却极其复杂,因为这种影响和人群对噪声的耐受程度及年龄相关(Abbasi et al, 2015)。从研究区域上看,上述研究多集中在荒漠、草原、高山森林生态系统等人类聚集不明显的区域。在这些区域,风电噪声对人类生活的影响并不明显,但在近海及海岛风电场,尤其是中国东部沿海,人类聚集密度大,能源紧缺,风电是当地能源紧缺的重要补充形式,风力涡轮机转动的噪声对人类活动影响尤为显著(人民网, 2015)。由于目前还缺少完备的风电噪声评价体系,和对当地居民合理的补偿机制,因而造成的“人—风”之间矛盾非常突出,在该类区域探讨风电与人类活动协调发展最为迫切。

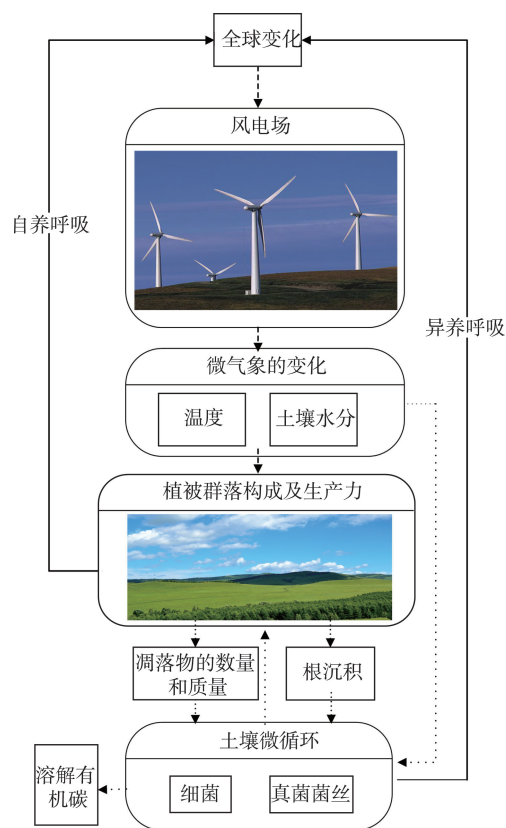


图2 风电场对碳、氮循环的影响及对全球变化的反馈
(Armstrong et al, 2014)

Fig.2 Impact of wind farms on carbon and nitrogen cycling and the feedback to global change (Armstrong et al, 2014)

5.2 辐射效应

风电场辐射源主要有风力发电机、变电站、输电线路3个部分(Sengupta, 1999)。风力发电机在150 m以外对人体所产生的电磁干扰几乎可以忽略不计(贺志明, 2008)。但风力发电机叶片是由具有强反射能力的金属材料制成,对无线电信号的电磁干扰影响很大,主要表现在对电视广播、微波通信、飞机导航等无线通信的影响上;只有当波长大于风轮机总高度的4倍以上时,通信信号才基本不受影响(Mroziński et al, 2015)。此外架设的高压输电线路处于工作时,相对地面将产生静电感应,形成一个交变电磁辐射场,对无线电形成干扰(石洪华, 2012)。相对于风力发电机和输电线路所产生的电磁辐射,变电站产生的电磁辐射更容易人为控制和降低;当变电站进出线采用地下电缆时,运行时产生的电磁辐射对周围环境的影响几乎可忽略不计(Ozen, 2008)。评价风电场建成后对周围环境的辐射影响研究较多,但在风电场建设前的环评阶段,对其电磁辐射效应的考虑却显得不足(Lapčík, 2008; Jones et al, 2014)。例如,风电场及其附属设施所产生的电磁辐射可能会抬高地区电磁环境的背景噪声,会导致军用雷达等用频系统效能难以有效发挥;由于涉及到多个部门的协调工作,环评阶段对这一因素考虑尚不全面,将有可能给国家经济及国防建设带来重大损失(吴彪等, 2016)。要降低风电场的辐射效应,今后需要重点考虑下述几个因素:①风力发电机的电磁辐射要控制在设计环节,设计和制造时要选择防磁、防辐射的材料,减少风机转动对无线电信号的干扰;②在风电场建设的环评阶段,必须考虑风力发电机的参数及相关无线电系统参数,多部门协调工作,减少对军用雷达等用频系统的干扰;③输电线路设计要调查线路经过的居民点,了解当地通讯线路的走势,避开重要电子设施,比如电视发射塔、移动通讯发射塔和基站、电话程控塔、机场导航台等;④选用设备干扰水平要低,并与可能造成干扰的设备保持防护间距,输电线要适当抬高架设高度,减小输电线的线下场强。

6 未来的研究方向

探讨风电场对环境的影响的最终目的,是期待景观、区域及全球尺度的可持续发展(Matthies et al, 2015; Papathanasopoulou et al, 2015; Alam et al, 2016)。保证区域生态系统服务需求与供给的动态

平衡是实现区域可持续发展的基本条件(Burkhard et al, 2012; Yahdjian et al, 2015)。但现有研究表明,在区域尺度上,风电场对生态系统服务中的空气质量的提升、植被生长的促进有积极作用,而对土壤、水、牲畜的影响则以消极作用为主(Wiedmann et al, 2011);在全球尺度上,风电场对生态系统服务以消极影响为主(Wang et al, 2015b)。虽然一般认为,风能是绿色、环保、可持续发展能源的代表,但对此我们不能盲从,需警惕和继续关注。通过对目前国内研究方向的梳理,未来风电研究的重要方向为:

(1) 评价风电场对气候的影响,还需要建立或改进更精细的气候模型。由于多数气候模型是以气象站测定的数据为基础,而气象站点间距过远,难以准确地反映气象因子的空间异质性,使得准确衡量风电场对局地气候的影响距离受到制约(Vautard et al, 2014; Fitch, 2015)。在运用精细气候模型的基础上,需要针对不同地形区域、不同地表类型区域和不同气候背景下的风电场进行进一步的长期观测研究,解决前文所述的争议问题。

(2) 探讨风电场对动物的影响,需要识别到底哪些环境因子对动物活动起到了决定性作用,这些因子在不同风电场中是否具有普遍性。另外,目前的研究对象还集中在对鸟类等飞行动物的影响,从生态系统能量循环的角度来说,飞行动物的变化势必对整个生态系统的食物链产生影响,目前这方面的研究极为不足。

(3) 分析风电场对植被的影响,需要综合利用遥感监测及生态学调查方法,才能准确识别不同陆地生态系统植被对风电场的响应机制。另外,从植被所在的生态系统类型上看,目前的研究主要集中在草地生态系统,对森林及湿地植被的影响尚未被认识,以致风电场对陆地生态系统植被的影响没有被完整理解。

(4) 研究风电场对生态系统碳、氮循环的影响,要加强地表实测数据的获取,尤其是多年连续的数据获取,以形成长期的观测序列,进行时空尺度分析。这对客观认识风能利弊,增强对陆地生态系统碳、氮循环的理解,以及对草业、林业、湿地资源的可更新性、可持续性利用均具有重要意义。

(5) 风电场对环境的影响与其周围地区的自然地理条件密切相关,因此风电场对各环境要素的影响并不会完全一致,甚至存在显著差异的可能。通过在全球范围内建立典型实验区的形式,以典型区的研究来反映全球范围内的共性问题,也许是目前

较为可行的方法。

(6) 风电场对环境的影响是一个长期的、累积的过程,由于全球气候的多样性、地表类型的复杂性,使得准确揭示风电场对全球环境的影响还需大量深入的科学研究。在确保风能作为新能源发展重点的同时,还需要保护整个陆地生态系统的生产力和生物多样性。准确评价、处理风电场与可持续发展的关系是要解决的最终问题。

(7) 风电场对环境的影响是长期和复杂的,但现有环评导则和标准对上述影响的考虑却极为不足,甚至并未考虑。随着风能、太阳能等新型能源的发展,现有的环评导则和标准能否作为风电场等新能源建设的环境评价标准还需要进一步商榷。

(8) 目前,中国作为世界风能利用的第一大国,与美国、德国等风能利用大国相比,受政策导向、风电场建设起步晚等因素制约,无论在风电场建设区域的选择上,还是在评价风电场对气候、陆地生态系统、噪声及电磁辐射的影响方面均研究不足。特别是,由于目前中国尚未建立有关长期定位观测试验站,探讨风电场对环境的影响还缺少定量化、全过程、时空尺度的细致研究。未来,需要适时建立长期定位观测试验站,以利于进一步开展相关研究。

参考文献(References)

- 贺志明. 2008. 鄱阳湖区风电场环境影响研究[D]. 南昌: 南昌大学. [He Z M. 2008. The study of wind farm environmental effect of Po-yang Lake area[D]. Nanchang, China: Nanchang University.]
- 胡菊. 2012. 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. [Hu J. 2012. Numerical simulation research on impact of large-scale wind farms on regional climate[D]. Lanzhou, China: Lanzhou University.]
- 季遥. 2010. 浅谈海上风电场的环境影响[J]. 长三角, 4(7): 110, 112. [Ji Y. 2010. Qiantan haishang fengdianchang de huanjing yingxiang [J]. Yangtze Delta, 4(7): 110, 112.]
- 李国庆, 张春华, 张丽, 等. 2016. 风电场对草地植被生长影响分析: 以内蒙古灰腾梁风电场为例[J]. 地理科学, 36(6): 959-964. [Li G Q, Zhang C H, Zhang L, et al. 2016. Effects of wind farms on grassland vegetation: A case study of Huitengliang Wind Farm, Inner Mongolia[J]. Scientia Geographica Sinica, 36(6): 959-964.]
- 李智兰. 2015. 风电场建设对周边扰动区域土壤养分和植被的影响[J]. 水土保持研究, 22(4): 61-66. [Li Z L. 2015. Effect of wind power site construction on soil nutrients and vegetation of the surrounding disturbed region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 22(4): 61-66.]
- 刘江恒, 洪广玉. 2014. 风力发电“偷走”北京的风[N]. 北京科技报, 2014-12-10(046). [Liu J H, Hong G Y. 2014. Fengli fadian "touzou" Beijing de feng[N]. Beijing Science and Technology News, 2014-12-10(046).]
- 人民网. 2015. 华能江苏启东风力发电场噪声扰民[EB/OL]. 2015-01-16[2015-03-20]. <http://leaders.people.com.cn/n/2015/0116/c217816-26398874.html>. [People Net. 2015. Huaneng Jiangsu Qidong Fengli Fadianchang zaosheng raomin[EB/OL]. 2015-01-16[2015-03-20]. <http://leaders.people.com.cn/n/2015/0116/c217816-26398874.html>.]
- 石洪华, 岳曾敬. 2012. 高速差分传输线的电磁辐射分析与测试[J]. 兵工自动化, 31(10): 80-82. [Shi H H, Yue Z J. 2012. Analysis and test of high-speed difference transmission line electromagnetic radiation[J]. Ordnance Industry Automation, 31(10): 80-82.]
- 宋文玲. 2011. 风电场工程对盐城自然保护区的累积生态影响研究[D]. 南京: 南京师范大学. [Song W L. 2011. Fengdianchang gongcheng dui Yancheng Ziran Baohuqu de lei ji shengtai yingxiang yanjiu[D]. Nanjing, China: Nanjing Normal University.]
- 天长市农委渔业局. 2012. 风电项目致螃蟹养殖场河蟹大量死亡[EB/OL]. 2012-07-06[2012-10-11]. <http://newenergy.in-en.com/html/newenergy-1466346.shtml>. [Tianchang Agricultural Bureau of Fisheries. 2012. Fengdian xiangmu zhi pangxie yangzhichang hexie daliang siwang[EB/OL]. 2012-07-06[2012-10-11]. <http://newenergy.in-en.com/html/newenergy-1466346.shtml>.]
- 王希平. 2014. 辉腾锡勒草原风电场开发运营植被响应分析研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学. [Wang X P. 2014. Study on vegetation response to development and operation of wind farm in Huitengxile Grassland[D]. Hohhot, China: Inner Mongolia Agricultural University.]
- 吴彪, 周宁, 韩朝晖. 2016. 风电场对电磁环境的影响分析[J]. 能源环境保护, 30(2): 6-9. [Wu B, Zhou N, Han C H. 2016. Analysis of the influence of wind farm on electromagnetic environment[J]. Energy Environmental Protection, 30(2): 6-9.]
- 徐荣会. 2014. 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. [Xu R H. 2014. The impact of wind farm on local micro meteorological environment in arid region-taking Zhurihe Wind Farm as an example[D]. Hohhot, China: Inner Mongolia Agricultural University.]
- 赵宗慈, 罗勇, 江滢. 2011. 风电场对气候变化影响研究进展[J]. 气候变化研究进展, 7(6): 400-406. [Zhao Z C, Luo Y, Jiang Y. 2011. Advances in assessment on impacts of wind farms upon climate change[J]. Advances in Climate Change Research, 7(6): 400-406.]
- Abbasi M, Monazzam M R, Akbarzadeh A, et al. 2015. Impact of wind turbine sound on general health, sleep disturbance and annoyance of workers: A pilot- study in Manjil Wind

- Farm, Iran[J]. Journal of Environmental Health Science and Engineering, 13(1): 71.
- Alam M, Dupras J, Messier C. 2016. A framework towards a composite indicator for urban ecosystem services[J]. Ecological Indicators, 60: 38-44.
- Allison S D, Wallenstein M D, Bradford M A. 2010. Soil-carbon response to warming dependent on microbial physiology[J]. Nature Geoscience, 3(5): 336-340.
- Andersson M H. 2011. Offshore wind farms-ecological effects of noise and habitat alteration on fish[D]. Stockholm, Sweden: Stockholm University.
- Arezes P M, Bernardo C A, Ribeiro E, et al. 2014. Implications of wind power generation: Exposure to wind turbine noise[J]. Procedia- Social and Behavioral Sciences, 109: 390-395.
- Armstrong A, Waldron S, Whitaker J, et al. 2014. Wind farm and solar park effects on plant-soil carbon cycling: Uncertain impacts of changes in ground-level microclimate[J]. Global Change Biology, 20(6): 1699-1706.
- Balog I, Ruti P M, Tobin I, et al. 2016. A numerical approach for planning offshore wind farms from regional to local scales over the Mediterranean[J]. Renewable Energy, 85: 395-405.
- Bardgett R D, Freeman C, Ostle N J. 2008. Microbial contributions to climate change through carbon cycle feedbacks[J]. The ISME Journal, 2(8): 805-814.
- Bergström L, Kautsky L, Malm T, et al. 2014. Effects of offshore wind farms on marine wildlife: A generalized impact assessment[J]. Environmental Research Letters, 9(3): 034012.
- Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, et al. 2012. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets[J]. Ecological Indicators, 21(3): 17-29.
- Dincer I, Acar C. 2015. A review on clean energy solutions for better sustainability[J]. International Journal of Energy Research, 39(5): 585-606.
- Erickson W P, Johnson G D, Strickland D M, et al. 2001. Avian collisions with wind turbines: A summary of existing studies and comparisons to other sources of avian collision mortality in the United States National Wind Coordinating Committee resource document[R]. Washington DC: Western Ecosystems Technology.
- Euskirchen E S, McGuire A D, Chapin III F S, et al. 2009. Changes in vegetation in northern Alaska under scenarios of climate change, 2003- 2100: Implications for climate feedbacks[J]. Ecological Applications, 19(4): 1022-1043.
- Fagúndez J. 2010. Effects of wind farm construction and operation on mire and wet heath vegetation in the Monte Maior SCI, north-west Spain[J]. Mires and Peat, 4: 2.
- Feng Y, Lin H Y, Ho S L, et al. 2015. Overview of wind power generation in China: Status and development[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 50: 847-858.
- Fiedler B H, Bukovsky M S. 2011. The effect of a giant wind farm on precipitation in a regional climate model[J]. Environmental Research Letters, 6(4): 045101.
- Fitch A C. 2015. Climate impacts of large-scale wind farms as parameterized in a global climate model[J]. Journal of Climate, 28(15): doi: 10.1175/JCLI-D-14-00245.1.
- Frandsen S, Jørgensen H E, Barthelmie R, et al. 2009. The making of a second-generation wind farm efficiency model complex[J]. Wind Energy, 12(5): 445-458.
- Furness R W, Wade H M, Masden E A. 2013. Assessing vulnerability of marine bird populations to offshore wind farms[J]. Journal of Environmental Management, 119: 56-66.
- Garrigle E V M, Leahy P G. 2015. Quantifying the value of improved wind energy forecasts in a pool-based electricity market[J]. Renewable Energy, 80: 517-524.
- Herbert G M J, Iniyan S, Sreevalsan E, et al. 2007. A review of wind energy technologies[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11(6): 1117-1145.
- Hernández-Pliego J, de Lucas M, Muñoz A R, et al. 2015. Effects of wind farms on Montagu's harrier (*Circus pygargus*) in southern Spain[J]. Biological Conservation, 191: 452-458.
- Jones C R, Lange E, Kang J, et al. 2014. WindNet: Improving the impact assessment of wind power projects[J]. AIMS Energy, 2(4): 461-484.
- Keith D W, DeCarolis J F, Denkenberger D C, et al. 2004. The influence of large-scale wind power on global climate[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 101(46): 16115-16120.
- King E A, Pilla F, Mahon J. 2012. Assessing noise from wind farm developments in Ireland: A consideration of critical wind speeds and turbine choice[J]. Energy Policy, 41: 548-560.
- Lapčík V. 2008. Environmental impact assessment of wind generators in the Czech Republic[J]. Acta Montanistica Slovaca, 13(3): 381-386.
- Laratro A, Arjomandi M, Kelso R, et al. 2014. A discussion of wind turbine interaction and stall contributions to wind farm noise[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 127: 1-10.
- Lee H, Schuur E A G, Inglett K S, et al. 2012. The rate of permafrost carbon release under aerobic and anaerobic conditions and its potential effects on climate[J]. Global Change Biology, 18(2): 515-527.
- Leung D Y C, Yang Y. 2012. Wind energy development and its environmental impact: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16(1): 1031-1039.
- Li G Q, Li X B, Zhou T, et al. 2016. A model for simulating the soil organic carbon pool of steppe ecosystems[J]. Envi-

- ronmental Modeling & Assessment, 21(3): 339-355.
- Li R H, Li X B, Li G Q, et al. 2014. Simulation of soil nitrogen storage of the typical steppe with the DNDC model: A case study in Inner Mongolia, China[J]. *Ecological Indicators*, 41: 155-164.
- Matthies B D, Kallikokoski T, Ekholm T, et al. 2015. Risk, reward, and payments for ecosystem services: A portfolio approach to ecosystem services and forestland investment[J]. *Ecosystem Services*, 16: 1-12.
- McElroy M B, Lu X, Nielsen C P, et al. 2009. Potential for wind-generated electricity in China[J]. *Science*, 325: 1378-1380.
- Mroziński A, Piasecka I. 2015. Selected aspects of building, operation and environmental impact of offshore wind power electric plants[J]. *Polish Maritime Research*, 22(2): 86-92.
- Ozen S. 2008. Evaluation and measurement of magnetic field exposure at a typical high-voltage substation and its power lines[J]. *Radiation Protection Dosimetry*, 128(2): 198-205.
- Papathanasopoulou E, Beaumont N, Hooper T, et al. 2015. Energy systems and their impacts on marine ecosystem services[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52: 917-926.
- Pedersen E. 2011. Health aspects associated with wind turbine noise-results from three field studies[J]. *Noise Control Engineering Journal*, 59(1): 47-53.
- Peste F, Paula A, da Silva L P, et al. 2015. How to mitigate impacts of wind farms on bats? A review of potential conservation measures in the European context[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 51: 10-22.
- Petz B. 2012. Fish thrive on Danish offshore wind farm[EB/OL]. 2012-04-12[2015-10-09]. <http://www.ecology.com/2012/04/12/fish-thrive-offshore-wind-farm/>.
- Phillips J. 2015. A quantitative-based evaluation of the environmental impact and sustainability of a proposed onshore wind farm in the United Kingdom[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49: 1261-1270.
- Punch J, James R, Pabst D. 2010. Wind-turbine noise: What audiologists should know[J]. *Audiology Today*, (7-8): 20-31.
- Roy S B. 2011. Simulating impacts of wind farms on local hydrometeorology[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 99(4): 491-498.
- Roy S B, Pacala S W, Walko R L. 2004. Can large wind farms affect local meteorology[J]. *Journal of Geophysical Research*, 109(D19): D19101.
- Sengupta D L. 1999. Electromagnetic interference from wind turbines[C]//*Proceedings of IEEE antennas and propagation society international symposium*. Orlando, FL: IEEE: 1984-1986.
- Somnath B R, Traiteur J J. 2010. Impacts of wind farms on surface air temperatures[J]. *Proceedings of The National Academy of Sciences of The United States of America*, 107(42): 17899-17904.
- Stenberg C, van Deurs M, Støttrup J G, et al. 2011. Effect of the horns rev 1 offshore wind farm on fish communities: Follow-up seven years after construction[R]. Copenhagen, Denmark: Institut for Akvatiske Ressourcer.
- Sun S P, Liu F L, Xue S, et al. 2015. Review on wind power development in China: Current situation and improvement strategies to realize future development[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45: 589-599.
- Szilagy J. 2015. Testing the rationale behind an assumed linear relationship between evapotranspiration and land surface temperature[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 20(5): doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001091.
- Vautard R, Cattiaux J, Yiou P, et al. 2010. Northern Hemisphere atmospheric stilling partly attributed to an increase in surface roughness[J]. *Nature Geoscience*, 3(11): 756-761.
- Vautard R, Thais F, Tobin I, et al. 2014. Regional climate model simulations indicate limited climatic impacts by operational and planned European wind farms[J]. *Nature Communications*, 5: 3196.
- Wang C, Prinn R G. 2010. Potential climatic impacts and reliability of very large-scale wind farms[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(4): 2053-2061.
- Wang S F, Wang S C, Smith P. 2015a. Ecological impacts of wind farms on birds: Questions, hypotheses, and research needs[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 44: 599-607.
- Wang S F, Wang S C, Smith P. 2015b. Quantifying impacts of onshore wind farms on ecosystem services at local and global scales[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52: 1424-1428.
- Wasala S H, Storey R C, Norris S E, et al. 2015. Aeroacoustic noise prediction for wind turbines using large eddy simulation[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 145: 17-29.
- Wiedmann T O, Suh S, Feng K S, et al. 2011. Application of hybrid life cycle approaches to emerging energy technologies-the case of wind power in the UK[J]. *Environmental Science & Technology*, 45(13): 5900-5907.
- Xia G, Zhou L M, Freedman J M, et al. 2016. A case study of effects of atmospheric boundary layer turbulence, wind speed, and stability on wind farm induced temperature changes using observations from a field campaign[J]. *Climate Dynamics*, 46(7-8): 2179-2196.
- Xu J Z, He D X, Zhao X L. 2010. Status and prospects of Chinese wind energy[J]. *Energy*, 35(11): 4439-4444.
- Yahdjian L, Sala O E, Havstad K M. 2015. Rangeland ecosys-

- tem services: Shifting focus from supply to reconciling supply and demand[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 13(1): 44-51.
- Zajamšek B, Hansen K L, Doolan C J, et al. 2016. Characterisation of wind farm infrasound and low-frequency noise [J]. *Journal of Sound and Vibration*, 370: 176-190.
- Zhou J Z, Xue K, Xie J P, et al. 2012. Microbial mediation of carbon-cycle feedbacks to climate warming[J]. *Nature Climate Change*, 2(2): 106-110.
- Zhou L M, Tian Y H, Roy S B, et al. 2012. Impacts of wind farms on land surface temperature[J]. *Nature Climate Change*, 2(7): 539-543.

Research progress of wind farm impact on the environment

LI Guoqing¹, LI Xiaobing^{2,3}

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Ludong University, Yantai 264025, Shandong, China;

2. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing 100875, China;

3. College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Wind energy is generally considered a clean and environmentally friendly renewable energy source that can reduce societal dependence on fossil fuels. Wind energy has rapidly developed in recent years; developing technologies and the relatively low cost of wind energy production will make it a significant energy source in the future. At present, China's energy policy is gradually including wind energy. However, the environmental impact of installing and operating wind farms has not been thoroughly investigated. Although the impact of a wind farm will be a gradual process over a long period of time, and the impact may be difficult to measure, any environmental impacts cannot be ignored. Through analyzing the research status in China and internationally, this article summarizes eight aspects of wind farm impact, including on climatic change, vegetation, soil, and C/N cycle. In addition, this article summarizes the methods employed for evaluating the impacts. Finally, eight areas of concern may need to be investigated in the future to assess the impact of wind farms on the environment: (1) to evaluate the impact of wind farms on climate, more precise climate models need to be established or improved; (2) to explore the effect of wind farms on animals, it is necessary to identify what environmental factors play a decisive role in the activities of the animals, and whether these factors are universal in different wind farms; (3) to analyze and detect the impact of wind farms on vegetation, it is necessary to comprehensively use remote sensing monitoring and ecological survey methods to accurately identify the response mechanisms of different terrestrial ecosystems; (4) to study the impact of wind farms on the carbon and nitrogen cycles of the ecosystem, it is necessary to improve the acquisition of measured data, especially data acquisition over a long period of time, so as to form a long-term observation sequence for the analysis of greater spatial and temporal scale; (5) the impact of wind farms in different regions of the world on various environmental factors is not exactly the same. The study of a typical area to reflect the common problems of wind farm impact on the environment is a feasible approach at present; (6) while focusing on wind energy development, we also need to protect the productivity and biodiversity of the whole terrestrial ecosystems. Only on this basis can we accurately evaluate the relationship between wind farms and sustainable development; (7) in the environmental impact assessment (EIA) stage before the construction of wind farms, the current environmental impact assessment guidelines and standards should be improved, and the long-term complex influence of wind, solar, and other new energy on the environment should be taken into full account; (8) as the world's wind energy superpower, China should timely establish long-term observation and experiment stations to quantify the process, and emphasize the impact of wind farms on the environment from the broader temporal and spatial perspectives.

Key words: wind farm; environmental impact; global change; terrestrial ecosystem; research progress