

风电场建设对周边扰动区域土壤养分和植被的影响

李智兰

(山西省水利水电勘测设计研究院, 太原 030024)

摘 要:研究了风电场的建设对周边扰动区域土壤养分和植被的影响。结果表明:风电场的建设增加了扰动区域土壤容重、pH 和总孔隙度,降低了土壤电导率、含水量和全盐,同时也降低了植被生长各指标和土壤养分(除了土壤全磷)等;在扰动区域(0~3 km),植被生长各指标和土壤养分均随远离风电场距离的增加而增加,距离风电场 4 km 时,植被生长各指标和土壤养分基本与未扰动区域达到一致,初步表明了风电场对于植被和土壤养分的影响范围均在方圆 3 km 以内;风电场扰动区域土壤微生物量的变化幅度和变异系数最大,说明风电场对土壤微生物量的空间变异影响较大;风电场扰动区域和非扰动区域土壤养分均随土层深度的增加而逐渐降低趋势,表现出明显的“表聚性”,而土壤深层(40—60 cm)未扰动区和扰动区土壤养分基本一致,表明了风电场的建设并没有改变土壤养分的垂直分布特征,也并未影响深层土壤养分含量;风电场未扰动区域植被与土壤因子相关性基本与扰动区域相一致,表明风电场对周边区域植被和土壤均有影响,而此影响具有同等的重要性,也即同等程度下影响了植被和土壤因子,同时也体现了植被和土壤因子的互作效应。

关键词:风电场; 扰动区域; 植被; 土壤养分

中图分类号:S157.1; X171.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2015)04-0061-06

Effect of Wind Power Site Construction on Soil Nutrients and Vegetation of the Surrounding Disturbed Region

LI Zhilan

(Shanxi Water Conservancy Exploration & Design Institute, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The effect of wind power site construction on vegetation and soil nutrients of the surrounding disturbed region were examined. The results showed that the wind power site construction increased soil bulk density, pH and total porosity, reduced the soil electrical conductivity, moisture content and total salt in the surrounding disturbed region, at the same time, it reduced the growth of the vegetation index and soil nutrients (in addition to the soil total phosphorus) and so on. In disturbed region (0~3 km), the index of plant growth and soil nutrients increased with the increase of the distance from the wind power site. When distance is 4 km away from the wind power site, the index of plant growth and soil nutrient in disturbed region were consistent with non-disturbed region, which turned out that the effect of wind power site on vegetation and soil nutrient was within the scope of 3 km, in addition, the range ability and coefficient of variation of soil microbial biomass were the largest which meant the influence on the spatial variation of soil microbial biomass was more significant than other soil nutrients. In disturbed and non-disturbed region, the soil nutrients decreased progressively with soil depth and showed the enrichment in surface soil layer which meant that surface accumulation was obvious, while at the layer of 40—60 cm, the soil nutrients in disturbed and non-disturbed region had no significant differences, which indicated that wind power site construction had no influence on the vertical distribution characteristics of soil nutrients and the soil nutrient content of deeper layers. Pearson correlation analysis showed that wind power site construction had the same effect on vegetation and soil nutrient of the surrounding disturbed region, which meant that wind power site influenced the plant and soil nutrient at the same degree and reflected the complex interaction effect of vegetation and soil nutrients.

Keywords: wind power site; disturbed region; vegetation; soil nutrient

常规能源对生态环境的严重污染及能源危机使得我们极力开发和探索新型能源^[1-3]。风能是一种清洁的可再生能源,在全球得到了广泛的应用和发展,已有越来越多的大型风电场建立并投入运行^[4-6]。当前世界各国把风能发电作为开发可再生能源和改善生态环境的重要手段,它在中国的未来能源结构中也占有主导地位^[1-3,7-8]。大力发展风能发电不仅可以避免对矿物燃料的过度依赖,也是对不可再生能源的保护^[7-8]。伴随着未来风能发电的主导地位,其对生态环境的影响也引起了科学界足够的重视和关注,目前大量研究集中在风电场对环境生态系统(如动植物生存环境)、水土保持、景观格局及气候变化等方面,许多学者提出和解决了大量值得关注的问题^[8-13]。而风电场的建设必然扰动地表、破坏植被、造成水土流失和影响生态环境,对扰动区域土壤和植被带来一系列影响^[8,10-11,14-15]。鉴于此,本文以山西大同天镇县华能天镇武家山风电场为研究对象,从植被和土壤养分特征等方面研究风电场对周边扰动区域植被和土壤养分特征影响,在指导风电场的建设、植被和土壤肥力恢复、改善生态环境等方面具有重要的理论基础和实践意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

华能天镇武家山风电场(49.5 MW)位于山西大同天镇县、河北张家口阳原县交界部位,地势平坦广阔,主要为荒漠、戈壁和草原,具有由半湿润向半干旱地区过渡的特征,土壤大多为黄绵土,土壤质地主要为壤质、沙壤质。风电场坐标北纬 40°12.4′—40°16.5′,东经 114°12.2′—114°20.8′,海拔 1 700~1 983 m;该区域风能资源丰富,冬季和春季多盛行西北风和西风,风向稳定性较好,瞬时风速大于 13 m/s 的天数约为 70~80 d,有效风速小时数较多,破坏性风速较少,风品质较好,离地表 10 m 高度处年平均风速 4.8~5.8 m/s,年平均风功率密度 172.3~215.7 W/m²,离地表 7 m 高度处年有效风速小时数约为 6 000 h,主风能方向集中,各局度的风能主要集中于 203°—286°(SW-WNW)之间,占总风能的 70% 以上。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置及植物采集 以华能天镇武家山风电场为中心,在其扰动区域(分别距离风电场 0,1,2,3 km)和未扰动区域(分别距离风电场 4,5,6,7 km)的四个不同方向(东南西北)布设采样点。2013 年 9 月中旬,在生物量最大时全面开展植被生物量和土壤

调查研究,每个采样点设置 5 个 1 m×1 m 样方,调查样方中物种高度、盖度和多度。物种地上生物量用收割法获取,剪齐地面植被并挖取地下根系(1 m×1 m,挖取深度为 60 cm)带回实验室,105℃下杀青 15 min 后 65℃下 48 h 烘至恒重,获取每个样方地上和地下生物量。

本研究选用 Shannon-Wiener 多样性指数、Simpson 优势度指数和 Pielou 均匀度指数,其计算公式为^[16]:

Patrick 丰富度指数:

$$P_a = S \quad (1)$$

Shannon-Wiener 多样性指数(H):

$$H = -\sum P_i \ln P_i \quad (2)$$

Simpson 优势度指数(D):

$$D = 1 - \sum (P_i)^2 \quad (3)$$

Pielou 均匀度指数(J_p):

$$J_p = H / \ln S \quad (4)$$

式中: S ——样方内物种数目; P_i ——样方内种的相对重要值,相对重要值(P_i)=(相对覆盖度+相对高度+相对多度)/3

1.2.2 土壤采集及样品的测定 2013 年 9 月中旬,取植物样的同时,采集土壤样品,每个采样点将土层分为 0—20,20—40,40—60 cm,按对角交叉取样法五点取样,所取土样分为 3 份,一份装自封袋中,测定土壤含水量(烘干法,%);一份自然风干(20 d)去除碎片和部分根后过 2 mm 筛,测定土壤养分及理化性质;一份放入 4℃冰箱中测定土壤微生物量,并在取样点附近挖取剖面测定土壤容重(环刀法,g/cm³)。

土壤理化性质及养分含量的测定:pH 采用电极电位法测定(1:2.5 水土比);电导率采用 P4 多功能测定仪测定;土壤有机碳含量(g/kg)测定采用重铬酸钾氧化外加加热法;土壤电导率(5:1 水土比浸提液;EC, μ S/cm)采用 P4 多功能测定仪测定;土壤全氮(g/kg)用凯氏定氮法;土壤全磷(g/kg)用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法;有效磷(mg/kg)采用 NaHCO₃ 浸提—钼锑抗比色法测定;碱解氮(mg/kg)采用 NaOH—H₃BO₃ 法测定^[17]。

土壤微生物量的测定:氯仿熏蒸—K₂SO₄ 浸提法测定土壤微生物量碳、氮和磷(mg/kg)^[18]。

1.3 数据处理

利用 Excel 2003 和 SPSS 18.0 对数据统计和分析,显著性分析采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和最小显著法(LSD),Pearson 相关性系数检验扰动区域和未扰动区域植被与土壤因子的相关性,作图采用 Origin 7.5。

2 结果与分析

2.1 风电场的建设对植被的影响

由表 1 可知,风电场的建设对植被有较大的影响,在风电场扰动区域(0~4 km),随着距离的增加,植被覆盖度、丰富度指数、均匀度指数、多样性指数、优势度指数地上、地下生物量和枯落物含量均明显增加,其中

距离风电场 0 km 处的植被各指标均显著低于距离风电场≥1 km 处的植被各指标,当距离风电场超过 1 km 时,植被各指标增加幅度较大,距离风电场 4 km 时,植被各指标基本与未扰动区域达到一致;在风电场扰动区域(4~7 km),植被覆盖度、丰富度指数、均匀度指数、多样性指数、优势度指数地上、地下生物量和枯落物含量基本达到稳定状态,局部有所波动。

表 1 风电场的建设对植被的影响

距离		植被	丰富度	均匀度	多样性	优势度	地上生物量/	地下生物量/	枯落物量/
风电场/km		覆盖度/%	指数	指数	指数	指数	(g·m ⁻²)	(g·m ⁻²)	(g·m ⁻²)
扰动区域	0	15±3e	4.3±1.5d	0.53±0.11d	1.21±0.19d	0.31±0.07d	15.32±3.56e	18.36±3.56e	10.23±3.56d
	1	23±6d	7.3±0.9c	0.72±0.09c	1.88±0.23c	0.69±0.09c	33.45±4.37d	46.21±2.75d	18.36±2.13c
	2	51±8c	8.6±1.3c	0.73±0.14c	2.16±0.31c	0.72±0.11bc	46.78±2.58c	53.41±5.69c	19.45±3.78c
	3	68±9b	10.3±3.1b	0.81±0.15bc	2.79±0.32b	0.81±0.07b	59.97±6.31b	57.45±7.23c	21.38±4.23c
未扰动区域	4	75±8b	11.5±2.8b	0.87±0.09b	2.64±0.45b	0.86±0.09ab	63.56±7.25b	67.38±9.32b	35.65±5.15a
	5	70±10b	10.7±3.6b	0.92±0.11a	3.01±0.23ab	0.91±0.13a	72.41±9.21a	79.35±8.87a	28.29±4.87b
	6	80±5a	13.5±2.4a	0.90±0.23ab	2.58±0.27bc	0.89±0.08a	68.94±8.54ab	62.38±7.23bc	26.38±6.41b
	7	82±7a	11.3±2.7b	0.83±0.20b	3.11±0.58a	0.85±0.14ab	65.79±9.12b	72.14±6.54ab	21.41±5.12c

注:同列不同小写字母表示差异显著($p<0.05$)。下同。

2.2 风电场的建设对土壤理化性质的影响

由表 2 可知,风电场的建设对 0—60 cm 土层平均土壤理化性质有较大的影响,随着距离的增加,土壤电导率、含水量和全盐含量均明显增加,而土壤容重、pH 和总孔隙度则明显降低。在风电场扰动区域(0~4 km),距离风电场 0 km 处的土壤电导率、含水

量和全盐含量均显著低于距离风电场≥1 km 处的植被各指标,当距离风电场超过 1 km 时,土壤各指标变化幅度较大,距离风电场 4 km 时,土壤各指标基本与未扰动区域达到一致;在风电场扰动区域(4~7 km),土壤电导率、含水量和全盐含量、容重、pH 和总孔隙度基本达到稳定状态,局部有所波动。

表 2 风电场的建设对 0—60 cm 土层平均土壤理化性质的影响

距离 风电场/km	容重/ (g·cm ⁻³)	pH	电导率/ (μS·cm ⁻²)	含水量 /%	总孔隙 度/%	全盐/ %	
扰动区域	0	1.32±0.14a	8.9±0.3a	52.1±3.6e	5.32±1.03d	53.21±2.3a	0.210±0.09d
	1	1.30±0.11ab	8.6±0.4a	62.3±4.2d	7.68±1.56c	53.01±3.5a	0.465±0.10c
	2	1.24±0.09b	8.8±0.2a	67.2±3.1c	8.35±1.37c	52.11±4.1ab	0.511±0.12bc
	3	1.17±0.14c	7.5±0.3b	75.3±4.6bc	9.27±2.10bc	50.37±3.7b	0.658±0.08b
未扰动区域	4	1.05±0.08d	7.2±0.1b	82.7±6.7ab	10.35±2.07ab	48.36±3.1c	0.732±0.16ab
	5	1.09±0.07cd	7.6±0.3b	79.3±6.9b	9.98±1.98b	49.21±2.8bc	0.812±0.19a
	6	0.97±0.06d	7.5±0.2b	83.6±5.4a	11.36±1.74a	48.56±1.9bc	0.698±0.21b
	7	1.03±0.10d	7.5±0.3b	86.4±7.3a	10.78±2.05ab	49.78±2.4bc	0.775±0.17ab

2.3 风电场的建设对土壤养分的影响

由表 3 可知,风电场的建设对 0—60 cm 土层平均土壤养分有较大的影响,在风电场扰动区域(0~4 km),随着距离的增加,土壤有机碳、全氮、有效磷、碱解氮、微生物量碳、氮和磷均明显增加,除全磷外,距离风电场 0 km 处的土壤养分均显著低于距离风电场≥1 km 处的土壤养分,当距离风电场超过 1 km 时,土壤养分增加幅度较大,距离风电场 4 km 时,土壤养分基本与未扰动区域达到一致;在风电场扰动区域(4~7 km),土壤有机碳、全氮、有效磷、碱解氮、微生物量碳、氮和磷基本达到稳定状态,局部有所波动。

2.4 风电场的建设对土壤养分垂直分布的影响

风电场的建设对周边区域土壤有机碳、全氮、全

磷、土壤微生物量碳、氮、磷垂直分布特征均有明显的影响,由图 1 可知,扰动区域和未扰动区域土壤养分均随土层深度的增加而逐渐降低趋势,表现出明显的“表聚性”,20—40 cm 土层以下,土壤养分急剧降低,40—60 cm 土层,未扰动区和扰动区土壤养分基本一致;同层土壤各养分相比,基本出现未扰动区>扰动区,局部有所波动。

2.5 风电场干扰区域和未干扰区域植被与土壤因子相关分析

由表 4 可知,风电场扰动区域植被覆盖度与土壤微生物量碳呈显著正相关($p<0.05$);丰富度指数与有机碳、全氮、碱解氮、微生物量碳和氮呈显著正相关($p<0.05$);均匀度指数指数与有效磷和微生物量碳

呈显著正相关($p<0.05$);多样性指数与有机碳、全氮和微生物量碳呈极显著正相关($p<0.01$),与全磷和有效磷呈显著正相关($p<0.05$);优势度指数与有效磷和微生物量碳呈显著正相关($p<0.05$);地上生物量与有机碳和全氮呈极显著正相关($p<0.01$),与有效磷和微生物量碳呈显著正相关($p<0.05$);地下

生物量与有机碳、全氮、有效磷、碱解氮、微生物量碳和氮呈极显著正相关($p<0.01$),与微生物量磷呈显著正相关($p<0.05$);枯落物量与有机碳呈极显著正相关($p<0.01$),与全氮和微生物量碳呈显著正相关($p<0.05$)。由表 5 可知,风电场未扰动区域植被与土壤因子相关性基本与扰动区域相一致。

表 3 风电场的建设对 0—60 cm 土层平均土壤养分的影响

距离 风电场/km	有机碳/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全氮/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全磷/ ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	有效磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碱解氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	微生物量碳/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	微生物量氮/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	微生物量磷/ ($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
扰动区域	0 3.54±0.31d	0.35±0.03c	0.98±0.04a	0.65±0.04c	8.4±0.4d	103.4±8.5d	9.5±1.6d	7.4±1.9d
	1 4.78±0.21c	0.54±0.02ab	0.83±0.06a	0.95±0.03b	10.2±1.3c	115.7±11.9c	13.7±0.8c	12.6±2.3c
	2 5.78±0.78b	0.48±0.04b	0.78±0.07a	1.15±0.04b	13.5±2.0bc	154.5±12.4b	15.3±2.7c	15.3±3.1bc
	3 6.27±0.45ab	0.67±0.02a	0.86±0.06a	1.37±0.03ab	15.3±0.7ab	178.6±10.3a	21.7±3.8ab	17.3±2.6b
未扰动区域	4 5.25±1.09b	0.69±0.04a	0.87±0.05a	1.45±0.08a	16.7±2.6a	165.8±9.8a	19.6±3.6b	20.8±3.5a
	5 6.37±0.98a	0.59±0.05ab	0.92±0.08a	1.39±0.07ab	14.8±3.6b	172.5±7.6a	22.9±4.7a	19.7±1.8ab
	6 6.59±0.78a	0.63±0.05a	0.79±0.03a	1.36±0.05ab	15.4±3.5ab	169.3±13.8a	18.3±2.5b	21.5±2.5a
	7 5.97±0.91ab	0.57±0.06ab	0.85±0.04a	1.41±0.09a	16.8±2.9a	175.9±12.4a	20.5±3.1a	22.7±3.2a

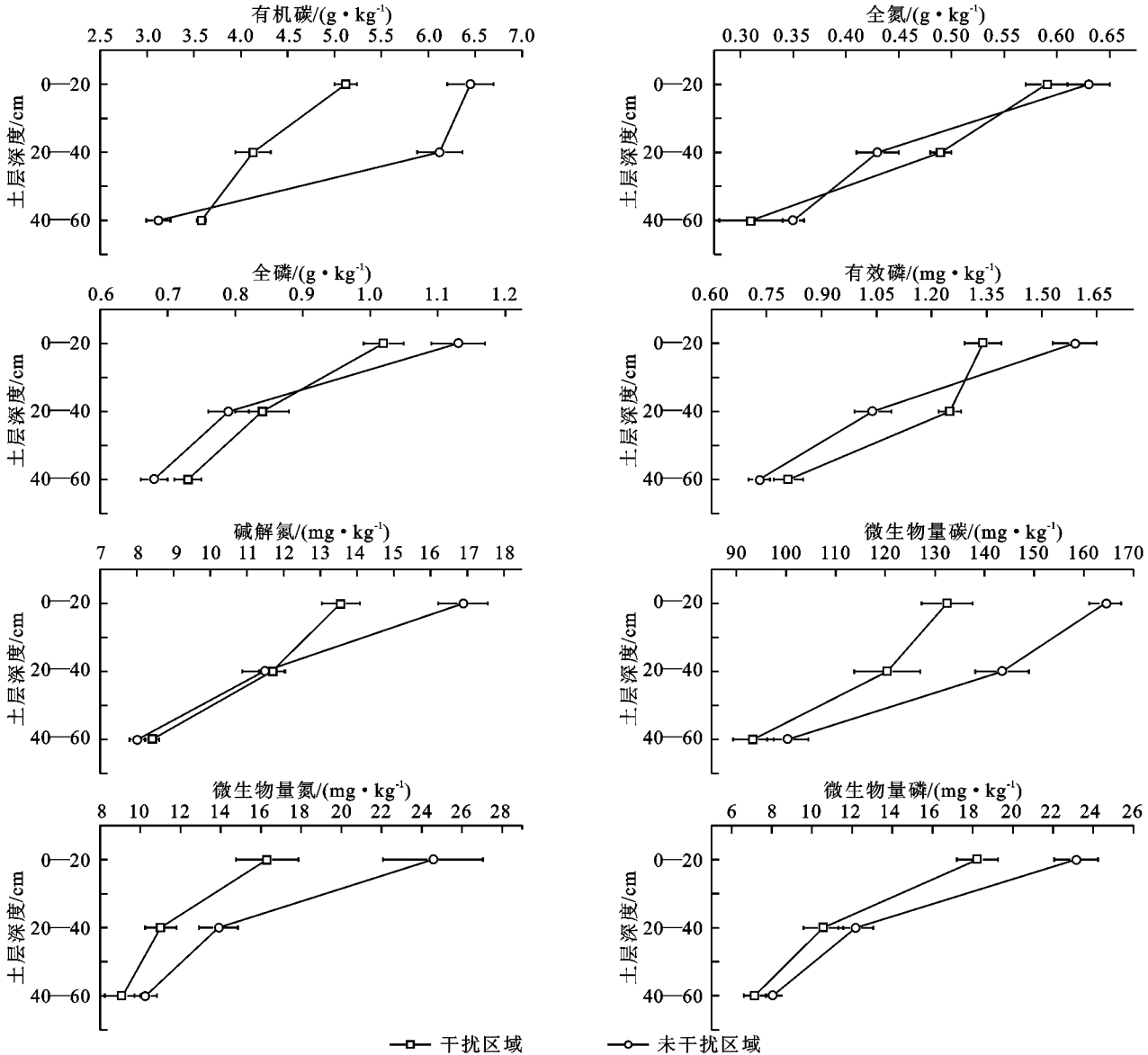


图 1 风电场的建设对土壤养分垂直分布的影响

表 4 风电场干扰区域植被与土壤因子(0—60 cm)相关分析

指 标	植被覆盖度	丰富度指数	均匀度指数	多样性指数	优势度指数	地上生物量	地下生物量	枯落物量
有机碳	0.304	0.425*	0.279	0.689**	−0.231	0.798**	0.884**	0.677**
全 氮	0.214	0.513*	0.287	0.712**	−0.118	0.772**	0.809**	0.512*
全 磷	−0.154	0.114	−0.102	0.421*	0.216	0.256	0.317	0.296
有效磷	0.279	0.216	0.317*	0.397*	0.387*	0.467*	0.779**	0.187
碱解氮	0.109	0.398*	−0.205	0.113	−0.105	0.359	0.687**	0.306
微生物量碳	0.435*	0.510*	0.489*	0.566**	0.405*	0.449*	0.823**	0.501*
微生物量氮	0.019	0.432*	0.227	0.217	0.201	0.310	0.669**	0.321
微生物量磷	−0.098	0.145	−0.109	0.178	0.191	0.197	0.413*	−0.216

** 相关性在 0.01 水平上显著(双尾),* 相关性在 0.05 水平上显著(双尾),下同。

表 5 风电场未干扰区域植被与土壤因子(0—60 cm)相关分析

指 标	植被覆盖度	丰富度指数	均匀度指数	多样性指数	优势度指数	地上生物量	地下生物量	枯落物量
有机碳	0.619**	0.655**	−0.163	0.773**	−0.315	0.885**	0.893**	0.794**
全 氮	0.523*	0.713**	0.312	0.659**	−0.294	0.801**	0.798**	0.698**
全 磷	−0.250	0.259	−0.214	0.523*	0.169	0.456*	0.662**	0.315
有效磷	0.319	0.510*	0.213	0.662**	0.336	0.667**	0.662**	0.245
碱解氮	−0.257	0.413*	−0.294	0.523*	−0.087	0.624**	0.713**	0.287
微生物量碳	0.535*	0.492*	0.513*	0.669**	−0.233	0.552*	0.813**	0.659**
微生物量氮	0.327	0.352	0.331	0.369	0.305	0.219	0.724**	0.209
微生物量磷	−0.156	0.198	−0.097	0.245	−0.124	0.105	0.135	−0.107

3 讨论与结论

表 1 的结果显示了风电场降低了周边区域植被覆盖度、丰富度指数、均匀度指数、多样性指数、优势度指数地上、地下生物量和枯落物含量,在扰动区域(0~3 km),植被各指标和土壤养分均随远离风电场距离的增加而增加,距离风电场 4 km 时,植被各指标和土壤养分基本与未扰动区域达到一致,未扰动区域(4~7 km)植被各指标和土壤养分基本一致,初步表明了风电场对于植被和土壤养分的影响范围均在方圆 3 km 以内。

由表 2 可知,风电场增加了周边区域土壤容重、pH 和总孔隙度,降低了土壤电导率、含水量和全盐,主要是由于风电场降低了周边区域植被覆盖度、丰富度指数、均匀度指数、多样性指数、优势度指数地上、地下生物量和枯落物含量,而植被地下根系属性的降低导致了其根区土壤容重、pH 和总孔隙度增加,土壤电导率、含水量和全盐降低,此外,这还与植被地下根系在土壤中的空间位置及分布有关^[14-15]。风电场建设过程中土壤的压实效应致使土壤容重和土壤强度增加、持水率下降,加之地表裸露致使地表温度升高、蒸发量增大,引起了可溶性盐类在土壤表层或土壤中逐渐积累^[14-15,19-20],因而加重土壤碱化程度,pH 值也相应的增加,pH 值的增加影响土壤其他养分有

效性下降、微生物活动和植物的生长等,与前人的研究结果相一致^[14,19-20]。

土壤养分不仅能反映土壤“营养库”中养分的贮量水平,而且在一定程度上能影响有效养分的供应能力^[21-22]。本研究中风电场扰动区域和非扰动区域土壤养分含量之间的差异明显(表 3),表明了风电场降低了土壤养分,但其影响程度因养分的有效性及土层的深度而异。从土壤养分的垂直分布特征来看(图 1),风电场扰动区域和非扰动区域土壤养分均随土层深度的增加而逐渐降低趋势,表现出明显的“表聚性”,而土壤深层(40—60 cm)未扰动区和扰动区土壤养分基本一致,同层土壤各养分相比,基本出现未扰动区>扰动区,表明了风电场的建设降低了土壤养分含量(除了全磷),但并没有改变土壤养分的垂直分布特征,也并未影响深层(40—60 cm)土壤养分含量。这可能是由于风电场建设过程中表层、底层土混合产生的稀释效应^[14-15,19-20];同时,风电场改变土壤理化性质和当地植被,从而加速有机质分解,降低了土壤有机质含量,有机质矿化能力随之下降,结果导致土壤有效养分和微生物量下降,并且养分在土壤垂直方向的归还具有明显的下降趋势,从而表现出明显的“表聚性”。而本研究中风电场的建设并没有引起全磷含量的下降(表 2),主要是由于磷素是一种沉积性元素,由母质类型和成土条件决定,在土壤中的存在

形式较稳定、不易流失^[23-24],因此,风电场的建设没有影响土壤全磷含量及其分布特征。综合来看,土壤微生物量的变化幅度最大,对风电场的扰动表现最为敏感,经计算可得,土壤微生物量变异系数高于其他养分变异系数,说明风电场对土壤微生物量的空间变异影响较大。

风电场未扰动区域植被与土壤因子相关性基本与扰动区域相一致(表4,5),表明风电场对周边区域植被和土壤均有显著影响,而此影响具有同等的重要性,也即同等程度下影响了植被和土壤因子,同时也体现了植被和土壤因子的互作效应。

本研究表明了风电场对植被和土壤均有一定影响,主要是破坏了其周边区域地表形态、植被和土层结构,导致地表裸露,损害土壤肥力等,距风电场3 km以外的植被和土壤受影响较小,因此,建议风电场建设边界距3 km以上,以减少对植被及土壤的间接影响。风电场是人类对大自然的干预,对局部生态环境和自然景观产生不利影响,它的建设必须严格保护生态环境,尽可能减少负面影响。结合本研究的结果,应改良当地土壤的酸碱度,由于风电场导致土壤pH值升高,所以对土壤进行适当的改良;其次,结合扰动区域植被进行人工干预或自然恢复,撒播适宜当地土壤和气候生长的草种,有效固着土壤、减少水土流失,施用有机肥和秸秆,较大程度提高土壤有机质含量及酶活性等。

参考文献:

- [1] Heier S. Grid Integration of Wind Energy[M]. John Wiley & Sons, 2014.
- [2] Patel M R. Wind and solar power systems: design, analysis, and operation[J]. Wind Engineering, 2006, 30(3): 265-266.
- [3] Foley A M, Leahy P G, Marvuglia A, et al. Current methods and advances in forecasting of wind power generation[J]. Renewable Energy, 2012, 37(1): 1-8.
- [4] Gipe P. Wind power[J]. Wind Engineering, 2004, 28(5): 629-631.
- [5] Boyle G. Renewable energy[M]. British Oxford: Oxford University Press, 2004.
- [6] Heier S. Grid integration of wind energy[M]. John Wiley & Sons, 2014.
- [7] 郑崇伟,潘静. 全球海域风能资源评估及等级区划[J]. 自然资源学报, 2012, 27(3): 364-371.
- [8] 赵宗慈,罗勇,江滢,等. 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.
- [9] 奚同行,林圣玉,张华明,等. 环鄱阳湖区风电场工程水土流失特征及防治措施体系[J]. 中国水土保持, 2012(6): 63-65.
- [10] 宋文玲. 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, 2011.
- [11] 宋文玲,钱谊,苏晓星. 大丰风电场建设对盐城自然保护区的生态影响分析[J]. 环境监测管理与技术, 2011(4): 32-36.
- [12] 孟宪华. 风电场工程水土流失规律及其防治技术研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
- [13] 郑有飞,吕士成. 风电场对盐城珍禽国家自然保护区鸟类的影响[J]. 生态学杂志, 2010, 29(3): 560-565.
- [14] 柴亚凡,马金珠,周波,等. 戈壁荒漠区风电场建设对水土流失的影响[J]. 水土保持通报, 2014, 34(2): 124-127.
- [15] 王希平,张韬,刘佳慧,等. 辉腾锡勒风电场局域环境植被特征分析研究[J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2013(4): 70-75.
- [16] 马克平,刘玉明. 生物群落多样性的测度方法[J]. 生物多样性, 1994, 2(4): 231-239.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [18] Brookes P C, Landman A, Pruden G, et al. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1985, 17(6): 837-842.
- [19] 张爽爽. 风电场建设对生态环境影响的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2012.
- [20] 潘艳秋,李璐. 辉腾锡勒风电场对区域生态环境影响初探[J]. 北方环境, 2012(10): 80-82.
- [21] 罗歆,代数,何丙辉,等. 缙云山不同植被类型林下土壤养分含量及物理性质研究[J]. 水土保持学报, 2011, 25(1): 64-69.
- [22] 张平究,潘根兴. 不同植被群落下喀斯特土壤养分及生物化学性质特征[J]. 水土保持学报, 2012, 26(1): 77-80.
- [23] 方晓航,刘晓文,张晓芒,等. 水生植物种植场磷素分布特征与植物吸收[J]. 生态环境学报, 2011, 20(6): 1081-1085.
- [24] 张晴雯,杨正礼,罗良国,等. 宁夏灌区湿地沉积物营养盐和重金属垂向分布特征[J]. 水土保持学报, 2011, 25(1): 74-80.