

内蒙古自治区未利用土地可再生能源潜力评估

江东^{1,2,3}, 王娣^{1,2}, 付晶莹^{1,2*}, 杜金霜^{1,2}

1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101

2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049

3. 中华人民共和国自然资源部资源环境承载力评价重点实验室, 北京 100101

摘要 内蒙古自治区的可再生能源丰富, 在中国未来可再生能源发展版图中具有重要地位。结合空间分析技术和多准则分析评价方法, 对内蒙古十二盟市未利用土地上的生物液体燃料、风能发电和太阳能发电资源潜力进行评估, 并给出协调发展3类能源的空间布局建议。研究表明: 阿拉善盟由于未利用土地面积较大, 具备3种可再生能源同时进行资源开发的潜力; 针对甜高粱燃料乙醇, 除阿拉善盟外, 鄂尔多斯市也具有较大的可开发潜力; 对于风电开发, 可优先考虑巴彦淖尔市和乌海市; 光伏发电发展应聚焦在阿拉善盟和锡林郭勒盟。

关键词 未利用土地; 燃料乙醇; 风能发电; 光伏发电

世界经济快速发展的同时, 对能源的需求也大幅增加, 由能源供需紧张引起的能源安全问题和由传统化石能源使用引起的全球气候变暖及大气污染等问题日益突出。可再生能源作为可有效缓解上述问题的新选择, 成为未来全球能源转型的主要方向, 受到越来越多国家的关注^[1]。2007年, 中国发布《可再生资源法》, 标志着可再生资源的利用正

式进入法制化、规范化和可持续发展的阶段。截至2018年底, 中国风电装机量和光伏发电量均位于世界前列。中国自2003年开始发展风能, 2017年全国新增装机容量19660 MW, 全国累计装机容量达到188390 MW, 累计装机容量增长11.65%。2007年中国成为全球最大的太阳能电池生产国, 2012年开始大规模发展光伏发电。2015年中国地

收稿日期: 2019-11-30; 修回日期: 2020-03-28

基金项目: 中国科学院国际合作局对外合作重点项目(131A11KYSB20170014); 中国科学院青年创新促进会项目(2018068)

作者简介: 江东, 研究员, 研究方向为国土资源监测与利用, 电子信箱: jiangd@igsrr.ac.cn; 王娣(共同第一作者), 博士研究生, 研究方向为国土资源利用, 电子信箱: wangd.18b@igsrr.ac.cn; 付晶莹(通信作者), 副研究员, 研究方向为可再生能源评估与利用, 电子信箱: fu-jy@igsrr.ac.cn

引用格式: 江东, 王娣, 付晶莹, 等. 内蒙古自治区未利用土地可再生能源潜力评估[J]. 科技导报, 2020, 38(11): 60-69; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2020.11.007

面光伏装机规模甚至达到了计划规模的2倍,目前中国地面光伏电站市场已经趋近于饱和。虽然生物质能发展相对于风能和太阳能来说进展缓慢,但也开始逐步被引导和提倡,尤其是作为传统燃油有效补充的生物燃料乙醇。中华人民共和国国家发改委、国家能源局、中华人民共和国财政部等15部门联合印发了《关于扩大生物燃料乙醇生产和推广使用车用乙醇汽油的实施方案》,到2020年,将在全国范围推广使用车用燃料乙醇。

然而,可再生能源发展中仍存在一些亟待解决的问题。比如,风能和太阳能发电存在土地乱用和因无法消纳导致的“弃风弃光”等问题^[2]。燃料乙醇则因原料供给和技术工艺限制导致目前产能不足,需求缺口较大^[3]。内蒙古自治区的风能和太阳能资源储量均位于全国前列,同时已于2010年建成年产10万t的甜高粱茎秆燃料乙醇项目^[4]。作为具备3类能源可同时开发利用的典型地区,因水土资源有限和3者间存在的土地竞争关系而面临着更为严峻的冲突问题。如何统筹3类可再生资源的开发布局是缓解冲突的关键。因此,科学布局可再生能源发展,结合当地资源禀赋、气候及自然环境等

条件进行合理评估和规划,是当前十分必要和紧迫的工作。

本文对内蒙古自治区未利用土地上的3类可再生资源潜力进行评估,同时对能量、经济、环境和水资源压力进行综合对比,最终根据优先发展顺序确定3类可再生资源的空间布局,提出发展建议。

1 数据与方法

1.1 研究区域

内蒙古自治区位于中国华北地区,界于北纬 $37^{\circ}24' \sim 53^{\circ}23'$,东经 $97^{\circ}12' \sim 126^{\circ}04'$ 之间,东北部与黑龙江省、吉林省、辽宁省、河北省交界,南部与山西省、陕西省、宁夏回族自治区相邻,西南部与甘肃省毗连,北部与俄罗斯、蒙古接壤,内蒙古自治区总面积118.3万 km^2 ,面积广袤,资源丰富,有“东林西铁,南粮北牧”的特点。

1.2 研究方法

本研究内容主要包括宜能未利用土地评价与提取、可再生能源潜力评估和未来发展空间布局及规划,技术路线如图1所示。

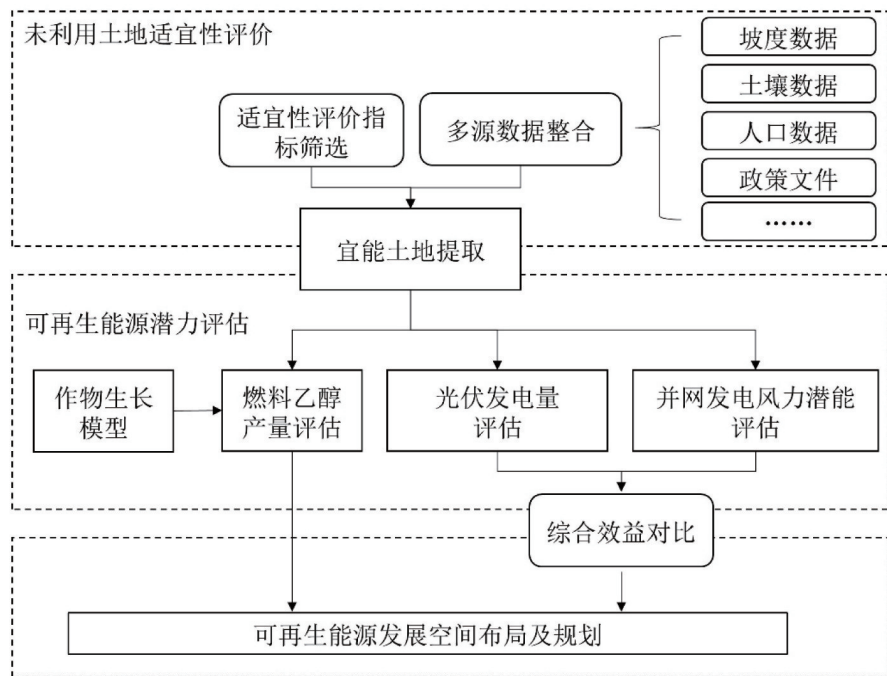


图1 技术路线

1.2.1 宜能未利用土地评价与提取

本研究通过对前人研究的文献进行整理,确定了适宜3类能源发展的土地适宜性评价指标(表1)。采用多准则分析评价方法和空间分析技术,使用 Arcgis 10.2 软件对宜能未利用土地进行了提取。

表1 适宜3类能源发展的未利用土地适宜性评价采用的约束条件及阈值

约束条件	甜高粱 ^[5]	风力发电 ^[6-9]	光伏发电 ^[10]
坡度条件	<25°	<15°	<10°
土壤类型	壤土或砂壤土	—	—
土壤酸碱性 (pH)	5.0~8.5	—	—
人口密度	—	≤700 人/km ²	—
植被覆盖度	—	≤0.4	—
成片面积	>1.8 km ²	>4 km ²	—

甜高粱因其具有较高的含糖量,被列为中国发展生物液体燃料乙醇优先采用的原料之一。本研究根据 Hao 等^[5]收集的甜高粱生长条件,建立了内蒙古自治区未利用土地上甜高粱种植适宜性评价指标(表1)。

风能资源的开发主要用于发电。风电场的选址和建设除了受风能资源禀赋的影响,还与周边自然(地形、地质、自然灾害等)和人文条件(经济发展、人口聚集、道路设施等)密切相关^[6-8]。通过对2008年底中国大陆已建成的239个陆上风电场进行分析,结果显示:中国绝大部分(90%)风电场的坡度小于10°^[9]。受相关数据的可获得性和准确度影响,本研究采用坡度、人口密度、植被覆盖度和成片面积等因素作为风能开发的适宜性评价指标,并考虑到未来技术进步,将坡度放宽到15°。

太阳能资源应用主要分为太阳能热和光伏发电。大型光伏电站的选址主要考虑地形坡度,场地越平坦越有利于建设和后期运营维护。中国光伏电站工程多使用自然坡5°以内的平原和微丘陵地区^[10]。

1.2.2 可再生能源潜力评估方法

1) 燃料乙醇产量评估方法。

本研究利用农业技术转移决策支持系统(deci-

sion support system for agrotechnology transfer, DSSAT)模型模拟甜高粱种植产量。DSSAT是目前使用最广泛的模型系统之一,常应用于不同情境的作物生长模拟研究和模型验证。对模型中的参数进行本地化^[11]后可模拟得到甜高粱产量。按照甜高粱与燃料乙醇的转化率为16:1计算^[12-13],可获得甜高粱燃料乙醇单产的空间分布。

2) 光伏年发电量评估方法。

光伏发电的年发电量可通过下式进行评估

$$L=Q\cdot S\cdot \gamma\cdot \varepsilon$$
 (1)

式中, L 为光伏电站年发电量; Q 为倾斜面年总辐射量; S 为光伏组件的面积; γ 为光伏组件的转化效率; ε 为光伏电站系统总效率。

光伏组件转化效率采用国家能源局综合司颁布的《关于征求发挥市场作用促进光伏技术进步和产业升级意见的函》(国能综新能[2015]51号)中规定的多晶硅电池组件转换效率最低值,即15.5%。光电系统总效率采用石磊等估算的内蒙古自治区20 MW光伏发电系统总效率值,约为88.78%^[14]。

3) 适宜并网发电的风能潜力评估方法。

风功率密度蕴含风速、风速频率分布和空气密度的影响,是风场风能资源的综合指标。由于风能资源的波动性和不稳定性,在进行资源开发评估时,要考虑是否适宜并网发电。根据《风电场资源评估方法》中的风功率密度等级表(表2),风功率密度大于300 W/m²时能够较好地应用于并网风力发电。

1.3 数据来源

1) 适宜性评价指标数据及来源(表3)。

2) 甜高粱产量模拟的输入数据及来源(表4)。

3) 太阳能数据。

本文采用的太阳能资源数据为世界银行(The World Bank Group)生产和免费公开发布的全球太阳能数据集(The Global Solar Atlas, <https://global-solaratlas.info/>)。采用该数据集中的总倾斜辐射(GTI)指标代表太阳能资源潜力。

4) 风能数据。

本研究采用由丹麦技术大学风能系和世界银

表2 风功率密度等级

风功率密度等级	10 m 高度		30 m 高度		50 m 高度		应用于并网风力发电
	风功率密度 /(W·m ⁻²)	年平均风速 参考值 /(m·s ⁻¹)	风功率密度 /(W·m ⁻²)	年平均风速 参考值 /(m·s ⁻¹)	风功率密度 /(W·m ⁻²)	年平均风速 参考值 /(m·s ⁻¹)	
1	<100	4.4	<160	5.1	<200	5.6	—
2	100~150	5.1	160~240	5.9	200~300	6.4	—
3	150~200	5.6	240~320	6.5	300~400	7.0	较好
4	200~250	6.0	320~400	7.0	400~500	7.5	好
5	250~300	6.4	400~480	7.4	500~600	8.0	很好
6	300~400	7.0	480~640	8.2	600~800	8.8	很好
7	400~1000	9.4	640~1600	11.0	800~2000	11.9	很好

表3 未利用土地适宜性评价采用的数据及来源

数据名称	时间	数据来源
行政边界数据	2014 年	中国科学院资源环境科学数据中心 (RESDC)
土地利用数据	2015 年	中国科学院资源环境科学数据中心 (RESDC)
坡度数据	—	SRTM 90 m Digital Elevation Data
人口密度数据	2010 年	中国科学院资源环境科学数据中心 (RESDC)
植被覆盖度 NDVI	2015 年	中国科学院资源环境科学数据中心 (RESDC)

表4 DSSAT-CERES-Sorghum 模型输入数据^[11]

数据名称	数据描述	数据来源
甜高粱田间试验数据	包括田间管理数据、生长监测数据、成分检测数据等	山东省东营市河口区仙河镇实地调研
气象数据	日值太阳辐射、最高温度、最低温度和降水数据等站点数据	国家气象科学数据共享服务平台 (http://data.cma.cn/)
土壤剖面数据	有机质含量、盐碱含量、pH 等	寒区旱区科学数据中心 GSDE (Global Soil Data Set for Earth System Modeling) 数据库

行合作生产并免费公开发布的全球风能数据集 (The Global Wind Atlas, <https://globalwindatlas.info>) 中的风功率密度数据。

2 可再生能源潜力评价与空间布局

2.1 未利用土地适宜性评价

本研究根据土地利用数据提取了内蒙古自治区各盟市未利用土地的空间分布 (图 2(a))。根据适宜性评价指标及标准, 对其进行适宜性评价, 结果如图 2 和表 5 所示。内蒙古自治区未利用土地总面积约 24.05 万 km², 主要分布在西部。其中阿拉善盟约有 16.08 万 km², 占全自治区的 66.86%。全

区适宜甜高粱种植的未利用土地面积总计 8.95 万 km², 主要分布在阿拉善盟的中部和东部, 约有 5.72 万 km², 占阿拉善盟全部未利用土地的 35.63%。鄂尔多斯市有将近 75.42% 的未利用土地适宜种植甜高粱, 其次是赤峰市, 约 67.01%。不考虑风能资源稳定性和丰富度, 仅看地形和人文条件, 全自治区适宜 50 m 高度风能开发的未利用土地总面积约 16.44 万 km², 仅阿拉善盟就占了 87.35%, 约 14.36 万 km²。阿拉善盟有将近 90% 的未利用土地适宜发展风能, 其次是巴彦淖尔市, 适宜风电开发的未利用土地占全市未利用土地的 70%。由于光伏发电对于场地的约束条件较少, 内蒙古自治区 90% 以上的未利用土地均可用于光伏发电, 总面积达到了

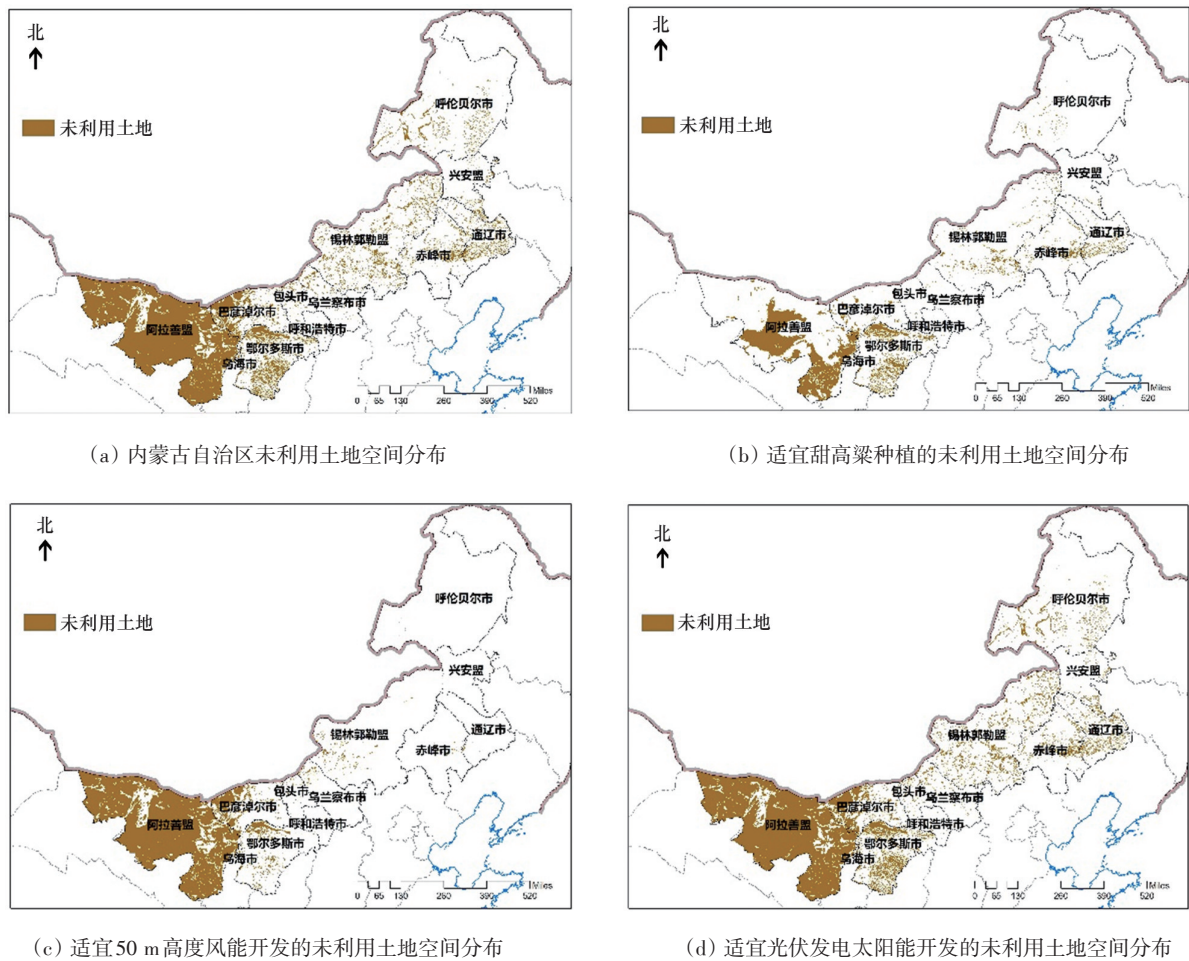


图2 内蒙古自治区未利用土地空间分布及适宜性评价结果

表5 内蒙古自治区各盟市未利用土地面积及适宜性评价结果

各盟市	未利用土地	适宜甜高粱种植的未利用土地面积及占比		适宜开发风能的未利用土地面积及占比		适宜光伏发电的未利用土地面积及占比	
	面积/km ²	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
呼和浩特市	320	72	22.50	0	0	306	95.63
包头市	1449	88	6.07	430	29.68	1400	96.62
乌海市	227	40	17.62	94	41.41	208	91.63
赤峰市	5735	3843	67.01	386	6.73	5523	96.30
通辽市	6716	3323	49.48	120	1.79	6464	96.25
鄂尔多斯市	18386	13866	75.42	5725	31.14	17730	96.43
呼伦贝尔市	9166	1482	16.17	32	0.35	8757	95.54
巴彦淖尔市	15739	2876	18.27	11270	71.61	15048	95.61
乌兰察布市	2306	160	6.94	772	33.48	2199	95.36
兴安盟	2338	348	14.88	15	0.64	2207	94.40
锡林郭勒盟	17304	6109	35.30	1954	11.29	16616	96.02
阿拉善盟	160771	57290	35.63	143573	89.30	154565	96.14
合计	240457	89497		164371		231023	

23.1 万 km²。其中 12 盟市中有 1/2 盟市适宜发展光伏发电的未利用土地面积都占到了各盟市的 96% 以上,其中包头市最高,为 96.62%。

2.2 未利用土地可再生资源潜力

1) 未利用土地发展甜高粱燃料乙醇的潜力。

根据 1.2 中的方法及 1.3 中的数据,对未利用土地上甜高粱产量进行估算,结果如图 3 所示。按照甜高粱茎秆与燃料乙醇的转换系数(16:1),统计得各盟市燃料乙醇年产量如表 6 所示。以甜高粱燃料乙醇的热值为 29660 MJ/t,转换后的能量当量如表 6 所示。

根据 DSSAT 模型的模拟结果,内蒙古自治区未利用土地上可获得 2257.51 万 t 甜高粱,转化后可

得 141.09 万 t 燃料乙醇,产生的能量当量约 4184.86 GJ。呼和浩特市、包头市、乌海市和兴安盟虽有适宜种植的未利用土地,然而在田间管理和气候条件等影响下,无法获得最终的甜高粱产量。而阿拉善盟和鄂尔多斯市可获得甜高粱茎秆产量分别为 1089 万 t 和 617.68 万 t,相应的可转化的燃料乙醇量为 68.06 万 t 和 38.61 万 t,相当于可提供 2018.73 GJ 和 1145.03 GJ 的清洁能量。

2) 未利用土地上光伏发电潜力。

根据 1.2 中的方法及 1.3 中的数据未利用土地上太阳能总倾斜辐射量及发电量进行计算,结果如图 4 和表 7 所示。未利用土地上太阳能总倾斜辐射

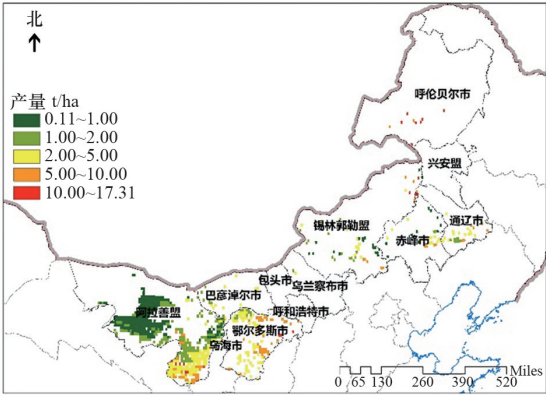


图3 未利用土地上甜高粱茎秆产量空间分布

表6 未利用土地上甜高粱产量及可转化的燃料乙醇量

各盟市	甜高粱产量/ 万 t	燃料乙醇 潜力/万 t	能量当量/ GJ
呼和浩特市	—	—	—
包头市	—	—	—
乌海市	—	—	—
赤峰市	121.88	7.62	225.94
通辽市	116.05	7.25	215.13
鄂尔多斯市	617.68	38.61	1145.03
呼伦贝尔市	101.27	6.33	187.73
巴彦淖尔市	51.83	3.24	96.08
乌兰察布市	4.21	0.26	7.81
兴安盟	—	—	—
锡林郭勒盟	155.58	9.72	288.41
阿拉善盟	1089.00	68.06	2018.73
合计	2257.51	141.09	4184.86

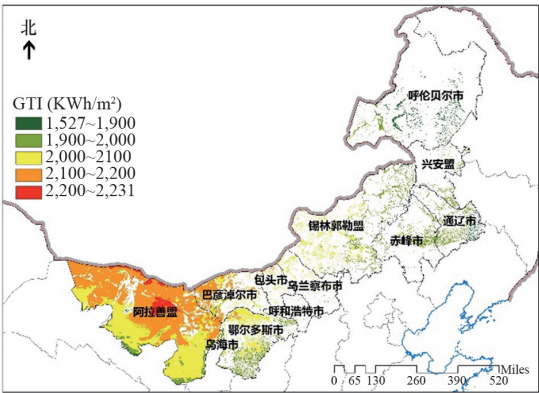


图4 未利用土地上太阳能总倾斜辐射量(GTI)空间分布

表7 未利用土地上太阳能总倾斜辐射量(GTI)及光伏发电量

各盟市	总倾斜辐射量/ MWh	光伏发电 量/MWh	能量当量/ GJ
呼和浩特市	607.20	83.56	300.81
包头市	2912.45	400.78	1442.81
乌海市	413.78	56.94	204.98
赤峰市	10859.53	1494.37	5379.73
通辽市	12474.85	1716.65	6179.95
鄂尔多斯市	35710.01	4914.02	17690.47
呼伦贝尔市	16257.34	2237.16	8053.76
巴彦淖尔市	31796.15	4375.44	15751.57
乌兰察布市	4483.60	616.98	2221.15
兴安盟	4282.12	589.26	2121.33
锡林郭勒盟	33114.71	4556.88	16404.78
阿拉善盟	326274.30	44898.28	161633.81
合计	479186.10	65940.32	237385.15

量达 479.19 GWh,若全部铺设多晶硅电池组件用于光伏发电,年发电量可达 65.94 GWh,约 2.37×10^5 GJ 能量。阿拉善盟太阳能总倾斜辐射量最丰富,达 326.27 GWh,若全部用于发电,年发电量可达 44.90 GWh,占全省年发电量的 68.09%。乌海市的太阳能资源最匮乏,太阳辐射总量仅有 0.41 GWh,年发电量为 0.057 GWh。

3) 未利用土地上风能发电潜力。

除考虑地形和人文条件,充分结合当地风能的波动性和稳定度,排除风功率密度低于 300 W/m^2 的地区,得到内蒙古自治区未利用土地上风能潜力空间分布,如图 5 和表 8 所示。

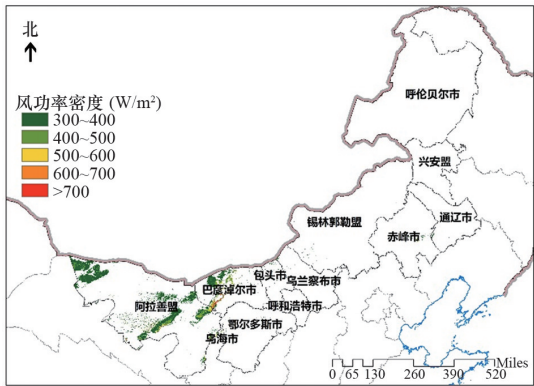


图 5 未利用土地上的风功率密度空间分布

表 8 未利用土地上年平均风功率密度

各盟市	风功率密度/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)	各盟市	风功率密度/ ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
呼和浩特市	—	呼伦贝尔市	—
包头市	363.94	巴彦淖尔市	441.54
乌海市	434.91	乌兰察布市	326.10
赤峰市	369.94	兴安盟	—
通辽市	314.19	锡林郭勒盟	320.49
鄂尔多斯市	363.23	阿拉善盟	359.83

2.3 可再生能源发展空间布局及规划

在进行可再生能源发展空间布局及规划时,需要确定 3 类可再生能源的发展优先级。经研究认为燃料乙醇的发展优先级最高,原因有以下 3 点:(1) 中国“缺油”的基本国情决定了发展燃料乙醇的必要性和紧迫性;(2) 目前内蒙古自治区的风

电和光伏发电开发程度较高,甚至出现了“弃风弃光”的现象,而燃料乙醇的发展相对缓慢;(3) 发展燃料乙醇前期不需要投入较大的基础设施建设成本,可行性较高。

风电和光伏发电在全生命周期能量、经济和资源环境效益等方面均存在差别。本文对两种能源发电的综合效益进行对比(表 9),确定优先发展顺序。

表 9 风力发电与光伏发电全生命周期效益对比

	能量效益 效益	环境效益 碳足迹/ ($\text{g} \cdot \text{kWh}^{-1}$)	经济效益 投资回收 期/年	资源压力 水足迹 ($\text{m}^3 \cdot \text{MWh}^{-1}$)
风力发电	0.7~2.5	4.97~69.9	10+	0.56~0.64
光伏发电	1.5~5.7	9.47~292.4	10+	1.69

1) 能量效益。

能量回收时间常用来衡量能量效益,是指系统多长时间可以回收生产制造此系统所耗费的所有能量。风力发电的能量回收时间约 0.7~2.5 年^[15]。回收时间主要与风电场的装机容量有关。内蒙古自治区某装机容量为 49.5 MW 的风电场能源回收时间为 0.74 年^[16],而 850 kW 的小型风力机的能量回收时间为 2.36 年^[17]。光伏发电的能量回收时间约 1.5~5.7 年。由于单晶硅目前的生产工艺较多晶硅稍复杂,前者的能量回收时间较长,约 3.2~15.7 年,后者约 1.5~5.7 年^[18]。

2) 环境效益。

环境效益采用碳足迹来衡量。其含义为产品在生产制造、运输和消费以及各类过程中引起的温室气体排放的集合,单位是 g/kWh 。风力发电的全生命周期碳足迹区间为 $4.97 \sim 69.9 \text{ g/kWh}$ ^[19]。光伏发电的全生命周期碳足迹因单晶硅与多晶硅材料差异,具有很大差别。单晶硅 GHG(CO_2)当量排量为 $44 \sim 280 \text{ g/kWh}$,多晶硅为 $9.4 \sim 104 \text{ g/kWh}$ ^[20]。郭敏晓选取了风电、光伏电站进行全生命周期能源回报比和碳足迹的对比,结果显示风力发电的 CO_2 排放强度为 9.47 g/kWh ,光伏发电为 292.4 g/kWh ^[21]。

3) 经济效益。

风电产业的经济效益与初始投资、营运成本及

上网电价等相关。投资回收期是指项目运营多长时间能收回投入的经济成本^[22]。700 MW 规模的风电场投资回收期为 11.94 年^[23]。20 MW 光伏发电项目的投资回报期为 10.6 年^[24]。

4) 水资源压力。

目前针对风力发电和光伏发电全生命周期中耗水程度的研究相对较少。发达国家风电全生命周期水足迹为 0.0416 m³/MWh, 光伏发电全生命周期水足迹为 0.892 m³/MWh^[25]。这一指标在中国分别为 0.56~0.64 m³/MWh 和 1.69 m³/MWh^[26]。

综合以上 4 个方面因素可以看出, 风力发电综合效益相对优于光伏发电。因此建议规划优先发展顺序为燃料乙醇优于风能, 其次是太阳能。

按照燃料乙醇>风电>光伏发电的发展规划顺序, 可获得内蒙古自治区未利用土地上的可再生能源发展空间布局, 结果如图 6 和表 10 所示。阿拉善盟由于未利用土地面积较大, 3 种可再生能源非常丰富, 可同时进行资源开发。针对甜高粱燃料乙

醇, 除阿拉善盟外, 鄂尔多斯市也具有较大的可开发资源, 相对其余盟市具有较大优势。对于风能, 巴彦淖尔市和乌海市是发展风电的最适宜区域, 其次是鄂尔多斯市。光伏发电发展主要在阿拉善盟和锡林郭勒盟。呼和浩特市和兴安盟均不适合发展甜高粱燃料乙醇和 50 m 高度风力发电, 可考虑开发光伏发电, 但呼和浩特市光伏发电潜力较低。

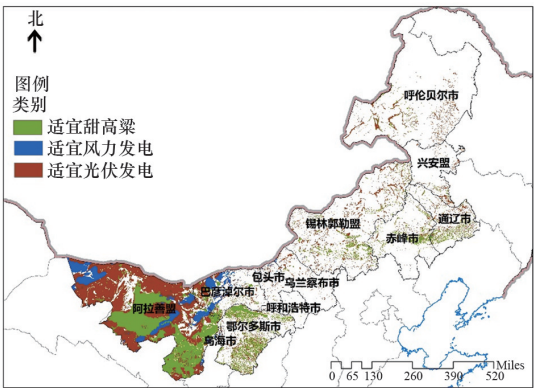


图6 3种可再生能源空间规划布局

表 10 3 种可再生能源潜力评估

各盟市	甜高粱燃料乙醇		风功率密度		太阳能辐射总量	
	面积/km ²	潜力/万 t	面积/km ²	潜力/(W·m ⁻²)	面积/km ²	潜力/MWh
呼和浩特市	72	0.00	—	—	248	492.94
包头市	88	0.00	238	362.20	1110	2305.47
乌海市	40	0.00	34	434.91	145	288.19
赤峰市	3843	7.62	—	—	2526	4964.54
通辽市	3323	7.25	20	310.86	3872	7463.74
鄂尔多斯市	13866	38.61	89	368.73	6323	12615.30
呼伦贝尔市	1482	6.33	—	—	7674	14263.43
巴彦淖尔市	2876	3.24	5018	446.83	7377	15609.66
乌兰察布市	160	0.26	102	327.42	1956	3983.59
兴安盟	348	0.00	—	—	1964	3807.81
锡林郭勒盟	6109	9.72	73	323.80	12040	23978.12
阿拉善盟	57290	68.06	17572	360.13	81589	172692.42

3 结论与讨论

通过适宜性评价指标提取了内蒙古自治区适宜发展甜高粱燃料乙醇、50 m 高度风力发电及地面光伏发电的宜能未利用土地, 并基于燃料乙醇>

风电>光伏发电的优先发展顺序, 获得了内蒙古自治区未利用土地上可再生能源发展的空间布局及相应的资源潜力。

阿拉善盟的未利用土地面积较大, 3 种可再生能源非常丰富, 可同时进行资源开发。针对甜高粱

燃料乙醇,除阿拉善盟外,鄂尔多斯市也具有较大的可开发资源。对于风能,巴彦淖尔市和乌海市可开展风电开发工作,其次是鄂尔多斯市。光伏发电潜力主要在阿拉善盟和锡林郭勒盟。

然而,在分析过程中也存在一些值得进一步探讨的问题。风力发电与光伏发电涉及到复杂的机电工程设计,单纯从地形、人口密度等进行约束尚显不足。如何能够将其他自然灾害、并网条件、经济水平等对风能开发的限制作用量化并加以空间表达,是今后应进一步研究的方向。

参考文献(References)

- [1] 张倩. 能源转型下可再生能源发展现状研究[J]. 低碳世界, 2019, 9(3): 23-24.
- [2] 范高锋, 张楠, 梁志锋, 等. 我国“三北”地区弃风弃光原因分析[J]. 华北电力技术, 2016(12): 55-59.
- [3] 娄岩. 中国乙醇汽油和燃料乙醇市场供需现状[J]. 国际石油经济, 2019, 27(7): 68-74.
- [4] 中兴能源. 内蒙古新闻网: 中兴能源年产10万吨甜高粱茎秆燃料乙醇项目开工奠基[EB/OL]. (2010-04-27) [2019-05-20]. <https://www.zonergy.com/6137.html>.
- [5] Hao M, Fu J, Jiang D, et al. Sustainable development of sweet sorghum-based fuel ethanol from the perspective of water resources in China[J]. Sustainability, 2018, 10(10): 3428.
- [6] 曾昭强. 基于模糊层次分析法的分散式风电场宏观选址研究[D]. 沈阳: 东北大学信息科学与工程学院, 2014.
- [7] 娜仁花. 基于模糊综合评价模型的风电场选址研究[D]. 北京: 华北电力大学经济与管理学院, 2015.
- [8] 张庆轩. 风力电站宏观选址分析模型研究[D]. 南昌: 东华理工大学, 2014.
- [9] 邓院昌, 余志, 钟权伟. 风电场宏观选址中地形条件的分析与评价[J]. 华东电力, 2010, 38(8): 1244-1247.
- [10] 彭金桂. 关于我国光伏发电的土地使用现状和应对策略的几点思考[J]. 低碳世界, 2017(22): 49-50.
- [11] Yan X X, Jiang D, Fu J Y, et al. Assessment of sweet sorghum-based ethanol potential in China within the Water-Energy-Food Nexus Framework[J]. Sustainability, 2018, 10(4): 17.
- [12] 王峰. 甜高粱制取燃料乙醇产业初步分析[J]. 酿酒, 2009, 36(3): 64-67.
- [13] 田宜水, 李十中, 赵立欣, 等. 甜高粱茎秆乙醇全生命周期分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42(6): 132-137.
- [14] 石磊, 侯学良. 并网光伏电站发电效率快速估算实用模型[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(2): 161-166, 72.
- [15] 绿色和平. 《能源转型加速度: 中国风电光伏发电的协同效益》研究报告[EB/OL]. (2017-04-11) [2019-05-20]. <https://www.greenpeace.org.cn/co-benefits-of-wind-and-solar-power-in-china-report>.
- [16] 王晓天. 基于全生命周期评价方法的风电环境效益测算——以内蒙古某风电场为例[J]. 科技管理研究, 2012, 32(18): 259-262.
- [17] 李帅帅, 莫秋云, 周祖鹏, 等. 基于LCA小型风力发电机能量偿还时间的计算[J]. 可再生能源, 2015, 33(5): 667-671.
- [18] Sherwani A F, Usmani J A, Varun. Life cycle assessment of solar PV based electricity generation systems: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010(1): 540-544.
- [19] 赵晓丽, 王顺昊. 基于CO₂减排效益的风力发电经济性评价[J]. 中国电力, 2014, 47(8): 154-160.
- [20] 申卫华, 江浩, 亢超群. 太阳能光伏发电环境效益研究[J]. 电力与能源, 2014, 35(5): 627-631, 635.
- [21] 郭敏晓. 风力、光伏及生物质发电的生命周期CO₂排放核算[D]. 北京: 清华大学环境学院, 2012.
- [22] 拜景彬. 基于全生命周期理论的光伏系统能耗分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- [23] 曹效义, 薛志凌. 风力发电与火力发电的节能减排效益比较分析[J]. 内蒙古电力技术, 2009, 27(5): 33-34.
- [24] 李璨. 基于生命周期的光伏发电项目综合效益评价研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2017.
- [25] Meldrum J, Nettles-Anderson S, Heath G, et al. Life cycle water use for electricity generation: A review and harmonization of literature estimates[J]. Environmental Research Letters, 2013, 8(1): 015031.
- [26] Feng K, Hubacek K, Siu Y L, et al. The energy and water nexus in Chinese electricity production: A hybrid life cycle analysis[J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2014(39): 342-355.

Assessment of potential of renewable energy to be proclaced on unused land in Inner Mongolia Autonomous Region

JIANG Dong^{1,2,3}, WANG Di^{1,2}, FU Jingying^{1,2*}, DU Jinshuang^{1,2}

1. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China

2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3. Key Laboratory of Carrying Capacity Assessment for Resource and Environment, Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Beijing 100101, China

Abstract Developing renewable energy is an important way to alleviate the energy crisis and the damage caused by climate change. However, the existing planning for renewable energy mostly focuses on a certain type of energy, without taking complementary advantages of multiple energy sources into consideration. The right thing to do is a coordinating and optimizing multiple energy planing. The Inner Mongolia Autonomous Region is rich in renewable energy and plays an important role in China's future renewable energy development map. This paper combines the spatial analysis technology and the multi-criteria analysis and evaluation methods to evaluate the potential resources of the bio-liquid fuel, the wind power and the solar power on the unused land of Inner Mongolia. And suggestions for the spatial layout of the coordinated development of three types of energies are made. It is shown that Alxa League has the potential for the development of three types resources at the same time due to its large area of unused land. For sweet sorghum fuel ethanol, in addition to Alxa League, Ordos also has a great development potential. For the wind power development, Bayannaoer and Wuhai cities can be given priority. For the development of the photovoltaic power generation, the focus should be put on Alxa League and Xilin Gol League.

Keywords unused land; fuel ethanol; wind power; photovoltaic power ●



(责任编辑 傅雪)