

风力提水在南疆灌溉农业发展中的潜力评估

宋 姝, 牛 俊*

(中国农业大学中国农业水问题研究中心, 北京 100083)

摘 要: 开采利用可再生能源, 是未来区域可持续发展的重要支撑途径。风能作为一种有活力且经济效益更高的可再生能源, 具有多种利用方式, 风力提水技术便是其中之一。该研究通过对 2000~2014 年南疆地区风速及降水数据进行分析, 采用两参数威布尔分布模型对南疆的风能资源进行评估。通过作物的蒸散发及有效降雨量计算南疆灌溉需水量, 以探寻风能资源和灌溉需水量的时空分布及其变化规律。南疆地区平均风功率密度 4 月最大 (25.14 W/m^2), 灌溉需水量与风功率的季节分布不匹配, 最大出现在 8 月 (9.02 亿 m^3)。通过统计南疆 5 个地 (州) 的风力提水总量, 计算其占非自流灌溉区内灌溉需水量的比例, 进而得出克州最适宜建设风力提水工程, 其风力提水满足率达 68% 以上。相应的风力提水潜力评估结果, 为南疆农业节水灌溉和可持续发展提供一定的决策参考。

关键词: 灌溉; 风能; 蒸散发; 风力提水; 灌溉需水量; 南疆

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.2.015

中图分类号: S275

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-2-0123-07

宋姝, 牛俊. 风力提水在南疆灌溉农业发展中的潜力评估[J]. 农业工程学报, 2021, 37(2): 123-129. doi:

10.11975/j.issn.1002-6819.2021.2.015 <http://www.tcsae.org>

Song Shu, Niu Jun. Potential assessment on wind-powered water pumping for irrigated agriculture in Southern Xinjiang[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(2): 123-129. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.2.015 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

随着人口的增长、全球变暖的加剧, 清洁能源产业的产生与发展是社会可持续发展的必然需求。风能是一种清洁且经济效益更高的可再生能源。现阶段, 在新疆主要利用风能发电, 风力提水灌溉在新疆还未开展深入研究^[1]。

风力提水技术是指将风能转换为水源的动、势能, 达到农业引水灌溉的目的。中国利用风车提水可以溯源到 1 700 多年前^[2]。目前中国推广的风力提水机产品主要分为两大类, 具体为南方型大流量低扬程风力提水机组和北方型小流量高扬程风力提水机组, 其型号丰富多样^[3]。张丹等发现风力提水灌溉不仅解决了偏远山区无法用电提水灌溉的难题, 而且不会产生环境污染, 实现了绿色、环保、零污染的农田灌溉^[4]。苏建军首次在风力提水机组中应用了自动适应偏航回转系统, 自主设计了往复式双作用抽水泵, 具有显著的社会经济效益, 为农村灌溉提供新思路^[5]。卢月总结得出, 利用风能提水开展节水型农业灌溉是平原干旱地区解决农作物灌溉的一种有效措施和方法, 经济效

益显著^[6]。Jadallah 等评估在伊拉克使用风力/光伏混合系统抽水的可能性, 并分析了井深、环境温度、太阳辐射强度和风力机转子结构等关键性能参数对系统生产率的影响^[7]。Rehman 等比较了沙特阿拉伯的风力抽水系统和柴油发电机系统的性能, 所得结果表明, 通过充分利用风能, 每年可以避免将近 24 000 t 的二氧化碳的排放^[8]。目前, 对风力提水的研究多数在于其系统本身, 而实际应用推广必要性少有研究。本文旨在对南疆地区风能资源进行评估, 探究风力提水在南疆农业中的潜力。建设风力提水工程的意义不仅在于可以有效缓解南疆水资源短缺对农业种植带来的问题, 而且具有一定经济、生态效益。

1 研究区概况

南疆地区处于新疆维吾尔自治区南部, 总面积达 108 万 km^2 , 地理位置位于 $73^\circ 20' \text{E} \sim 96^\circ 25' \text{E}$, $34^\circ 15' \text{N} \sim 49^\circ 10' \text{N}$, 位于中纬度欧亚大陆腹地, 四周以高山环绕, 中部是中国最大的盆地: 塔里木盆地^[9-10]。南疆地区地貌高差明显, 戈壁滩、沙漠面积大, 气候属于大陆性干旱气候, 并具有以下特点: 冬日酷冷, 夏日干热, 昼夜温差大, 降雨量少, 蒸发量大, 气候干燥, 但日照充足, 风次多且持续时间长, 具有明显的气候垂直运动。南疆是一个十分缺水的地区, 多年平均降水量为 123.9 mm ^[11], 其河流补给主要来自山区降水和高山积雪、冰川融水, 也是农田灌溉水源的主要来源^[12]。

收稿日期: 2020-08-22 修订日期: 2020-12-18

基金项目: 国家自然科学基金国际 (地区) 合作与交流项目 (51861125103); 国家自然科学基金面上项目 (51679233)

作者简介: 宋姝, 主要从事水-能源-粮食安全关联研究。

Email: songshu6523@163.com

*通信作者: 牛俊, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事区域农业-水资源-环境的关联效应研究。Email: niuj@cau.edu.cn

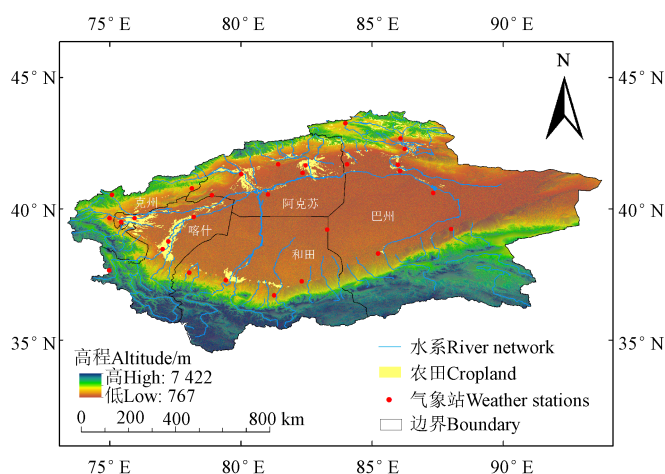


图1 南疆水系、农田、气象站点位置信息

Fig.1 Location, information on river network, cropland and weather stations in Southern Xinjiang, China

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

本文使用的土地利用类型数据来源于由 GLC2000 项目发布的基于 SPOT4 遥感数据的全球土地覆盖数据中国子集^[13],分辨率为 $1\text{km} \times 1\text{km}$, 含有 22 种土地利用类型。本文使用的蒸散发数据来源于 NASA 水文和地球科学研究项目^[14], 该项目基于彭曼公式, 根据 NDVI 测定的生物群落特异性冠层进行估算, 并对开放水蒸发量进行量化。本文选取了 2000—2013 年月尺度的蒸散发数据。

本文使用的气象数据来源于中国气象数据网 (http://data.cma.gov.cn/), 使用了 2000—2014 年日尺度上的测风数据及降水数据, 选取了南疆地区 29 个气象站点, 数据的实有率在 99% 以上, 数据的正确率接近 100%。利用 ArcGIS 软件的普通克里金法进行空间插值^[15-16], 得到南疆地区的风速分布情况。

2.2 研究方法

2.2.1 两参数威布尔分布及风功率密度

常见的用于拟合风速概率分布的模型有威布尔 (Weibull) 分布、伽马 (Gamma) 分布、瑞利 (Rayleigh) 分布、皮尔逊 (Burr) 分布和对数正态 (Log-normal) 分布模型等。在上述模型中, 由于两参数威布尔分布模型能够很好的描述不同形状的风速概率分布^[17], 且形式简单、计算方便, 因此本文选用两参数威布尔分布。

两参数威布尔概率密度函数如公式 (1) 所示^[18]

$$f(v) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (1)$$

式中 $f(v)$ 是特定地点特定风速出现的概率; v 是实测风速, m/s ; k 是形状参数, 无量纲; c 是尺度参数, m/s 。

本文利用最小二乘法计算得威布尔分布的形状参数与尺度参数^[19-20], 进而计算出区域的平均风功率密度。平均风功率密度可以有效衡量地区风能大小的风能储量, 其计算公式如下^[21]

$$\bar{w} = \frac{1}{2} \rho \int_0^\infty v^3 f(v) dv \quad (2)$$

式中 ρ 是空气密度, kg/m^3 , 本文中取 1.225kg/m^3 ^[22]; \bar{w} 是平均风功率密度, W/m^2 ; $f(v)dv$ 是求解在特定风速下的瞬间功率。

2.2.2 地理限制

对南疆地区可用于建设风力提水机的区域加以地理限制, 得到南疆地区可用于陆上安装风力提水机的土地总面积。本文排除了自然保护区、已开发区 (城市、乡镇、工厂、矿场等)、水域 (海洋、湖泊等)、耕地、林地、坡度大于 20° 的区域、海拔高于 3500m 的地区, 选择在河流附近 30m 内、耕地附近 8km 内建设风力提水机, 并假定风力提水机间距为 10 倍转子直径^[23-26]。根据上述地理限制条件, 利用 ArcGIS 的镶嵌至新栅格工具, 将所有的限制叠加, 生成最终的南疆可用于安装风力提水机的土地总面积。

2.2.3 农业灌溉需水量

南疆地区的天然降水匮乏, 导致供求失衡, 绝大部分农田需要依靠灌溉才能维持正常的生理特性。基于此点, 南疆的农业区均与灌区完全结合。本文假设南疆地区农作物的灌溉制度为充分灌溉, 利用蒸散发数据集与降水数据, 引入降水有效利用系数因素的影响, 最终确定南疆地区的农业灌溉需水量, 如下式^[27]

$$W = ET - P \cdot \delta \quad (3)$$

式中 W 是农业灌溉需水量, mm ; ET 是蒸散发量, mm ; P 是降水量, mm ; δ 是降水有效利用系数, 受降水总量、强度、降水时长的影响, 且与土壤类别、作物种植模式有关, 根据前人的研究, 本文取值为 0.43 ^[28]。

2.2.4 自流灌溉区的设定

在计算风力提水灌溉面积时, 需要将南疆总耕地面积减去自流灌溉的面积。本研究根据南疆灌区数目及大小, 在满足高程的条件下, 假定河流两侧缓冲区覆盖的耕地满足自流灌溉条件, 设定其为自流灌溉区, 并按照缓冲区范围分为 3 种情景, 如表 1 所示。

表1 南疆地区自流灌溉区的划分

情景 Scenario	1~2 级河流两侧缓冲区 范围 Buffer area for both sides of rivers at level 1-2 /km	3~5 级河流两侧缓冲区 范围 Buffer area for both sides of rivers at level 3-5/km
情景一 Scenario 1	8	6
情景二 Scenario 2	10	8
情景三 Scenario 3	12	10

减去南疆地区自流灌区的面积之后, 得到巴州、和田、阿克苏、喀什、克州 5 个地州的可利用风力提水技术灌溉的耕地面积, 如表 2 所示。

2.2.5 风力提水量的计算

根据南疆地区主要农作物的灌溉制度可知, 1 月、2 月及 12 月不进行灌水^[29], 因此本文研究计算风力提水量时, 仅考虑 3 月至 11 月的平均风功率密度。

表 2 南疆五地（州）风力提水灌溉面积

Table 2 Irrigation areas of wind-powered water pumping for the five prefectures in Southern Xinjiang km²

地区 Region	情景一中灌溉面积 Irrigated area in scenario 1	情景二中灌溉面积 Irrigated area in scenario 2	情景三中灌溉面积 Irrigated area in scenario 3
巴州 Bazhou	4 430.79	3 600.82	2 940.77
和田 Hetian	1 784.69	1 481.19	1 242.51
阿克苏 Aksu	6 435.50	5 283.36	4 322.75
喀什 Kashgar	5 515.16	3 741.27	2506.62
克州 Kezhou	582.46	478.34	339.85

根据风力机的风轮大小，风能产量可按下式计算^[30]

$$R = \varepsilon \cdot \pi \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2 \cdot \bar{w} \quad (4)$$

式中 R 是风能产量，kW； ε 是风能利用率，基于前人的研究结果，本文取值为 0.4^[31]； D 是转子直径，m，由风速概率分布计算而得。

本文采用的风力提水机的启动风速为 2 m/s，转子直径为 7.5 m，根据 2000—2014 年的风速数据，统计出 5 个地州内年 3 月至 11 月风速大于 2 m/s 的累计有效小时数，并根据下式计算有效风能^[30]

$$e = N \cdot R \quad (5)$$

表 3 南疆五地（州）各月平均风功率密度

Table 3 Average wind power density for the five prefectures in Southern Xinjiang of each month

地区 Region	1 月 January	2 月 February	3 月 March	4 月 April	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September	10 月 October	11 月 November	12 月 December
巴州 Bazhou	3.47	6.29	12.98	26.25	27.93	17.29	17.33	14.31	11.56	10.01	4.08	3.37
和田 Hetian	2.12	3.89	8.11	15.65	13.62	14.15	12.08	10.53	6.94	4.3	2.16	2.15
阿克苏 Aksu	1.97	3.71	8.45	16.48	16.34	13.29	13.78	10.44	7.23	5.3	2.89	2.13
喀什 Kashgar	2.63	4.66	10.76	21.93	16.97	13.42	11.72	8.8	7.37	4.43	3.44	2.79
克州 Kezhou	4.9	7.3	15.6	45.66	37.67	30.79	27.08	19.56	18.13	12.91	6.26	5.7

从空间尺度上看，平均风功率密度在空间上呈现出从西部至东部由高降低再升高的特点。克州与巴州的风能资源较为丰富，整体风功率密度高于其他地州的风功率密度，并且每个月份的风功率密度值也相对较大。巴州、和田、阿克苏、喀什、克州的年平均风功率密度分别为 15.75、9.73、10.47、10.98、23.74 W/m²。南疆东西部的整体风功率较大，更加适宜建设风力提水工程，开发利用风能资源。

3.2 南疆农业灌溉需水量的时空分布及其变化规律

根据式（2）～（3）计算了南疆地区农业多年平均灌溉需水量，得到 2000—2013 年灌溉需水量的年内变化，

式中 e 是有效风能，kW·h； N 是风速大于 2m/s 的累计有效小时数，h。

南疆地区四周以高山环绕，中部是塔里木盆地，地势起伏较大，本文设定风力提水机扬程为 15 m，单台风力提水机的年平均抽水量可按下式计算^[30]

$$q = 3.6 \times 10^6 \frac{e}{\rho_w g h} \quad (6)$$

式中 q 是单台风力提水机的年平均抽水量，m³； ρ_w 是水的密度，取值为 10³ kg/m³； g 是重力加速度，取值为 9.8m/s²； h 是扬程，取值为 15 m。

3 结果与讨论

3.1 南疆风能资源的时空分布及其变化规律

根据 2000—2014 年南疆地区 29 个气象站点逐日的风速数据，计算得出南疆 5 个地州多年月平均风功率密度，如表 3 所示。图 2 为南疆地区年内平均风功率时空变化图，呈现出较为明显的时空差异性。

从时间尺度上看，南疆地区年内风能资源分布不均匀，总体呈现出先增大后减小的趋势，并随着季节变化而波动，且波动幅度较大，体现出强烈的季节相关性。南疆地区 4 月的风能资源最为丰富，平均风功率密度达 25.14 W/m²，其次是 5 月的平均风功率密度，其值为 22.51 W/m²，而 1 月的风能资源最小，平均风功率密度仅为 3.09 W/m²。

如图 3 所示。从时间分布特征分析，1 月至 8 月的灌溉需水量呈上升趋势，并在 8 月达到峰值，其值为 9.02 亿 m³。此后灌溉需水量逐渐减少，直至 12 月结束。从空间分布特征分析，由于南疆地理条件相差较大，各地区农业灌溉需水量存在一定的差异。总体而言呈现东北高，西南低的空间格局，其中，阿克苏及巴州北部单位面积的灌溉需水较高。由于南疆地区耕地面积主要分布于东部，5 个地州的耕地面积有所不同，喀什的耕地面积大于巴州的耕地面积。所以，虽然喀什的单位面积灌溉需水量较小，但是其体积农业灌溉需水量依然大于巴州的体积农业灌溉需水量。

表 4 南疆五地（州）各月灌溉需水量

Table 4 irrigation water requirement for the five prefectures in Southern Xinjiang of each month

地区 Region	1 月 January	2 月 February	3 月 March	4 月 April	5 月 May	6 月 June	7 月 July	8 月 August	9 月 September	10 月 October	11 月 November	12 月 December
巴州 Bazhou	6.99	10.43	7.87	7.01	9.71	17.67	23.81	23.83	16.14	8.54	5.84	3.61
和田 Hetian	3.00	3.29	1.99	3.47	5.21	5.33	6.26	6.33	4.40	2.57	1.81	1.57
阿克苏 Aksu	10.39	13.67	9.36	11.49	17.43	24.65	29.91	30.79	24.82	14.25	8.35	5.76
喀什 Kashgar	13.22	16.17	8.62	11.37	16.96	21.42	25.81	26.78	18.48	10.91	7.17	5.49
克州 Kezhou	0.80	1.04	0.98	1.26	1.80	2.20	2.46	2.50	1.70	1.16	0.72	0.48

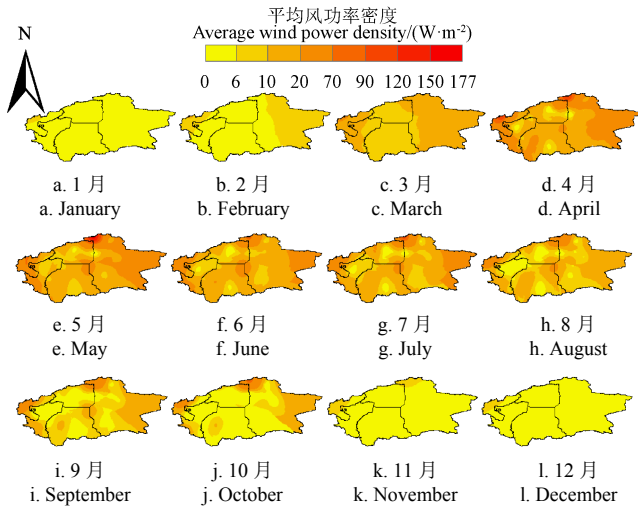


图2 南疆地区年内平均风功率密度时空分布图

Fig.2 Spatial and temporal distribution of monthly average wind power density in Southern Xinjiang

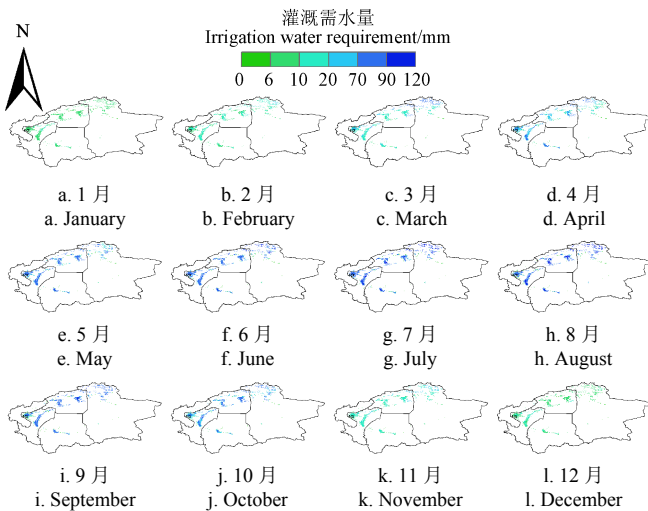


图3 南疆地区年内灌溉需水量时空分布图

Fig.3 Spatial and temporal distribution of monthly irrigation water requirement in Southern Xinjiang

3.3 南疆风力提水量及风力提水机数目计算

本文根据 2.2 中公式和地理限制条件,分别计算得到南疆地区 5 个地州单台风力提水量及风力提水机数目,

进而计算得各个地州的总风力提水量。克州由于平均风功率密度较高,在 5 个地州中,克州单台风力提水机的年提水量最大,其值为 $5.84 \times 10^4 \text{ m}^3$,和田的单台风力提水机的年提水量最小,其值为 $0.79 \times 10^4 \text{ m}^3$,巴州、阿克苏、喀什的单台风力提水机的年提水量分别为 2.27×10^4 、 1.31×10^4 、 $1.27 \times 10^4 \text{ m}^3$,具体情况如表 5 所示。

表5 南疆五地(州)风力提水量

Table 5 Amount of wind-powered water pumping for the five prefectures in Southern Xinjiang $\times 10^4 \text{ m}^3$

地区 Region	风力提水量 The amount of wind-powered water pumping
巴州 Bazhou	2.27
和田 Hetian	0.79
阿克苏 Aksu	1.31
喀什 Kashgar	1.27
克州 Kezhou	5.84

在情景一、情景二、情景三中,由于设置的缓冲区依次增大,相应的自流灌溉区依次增大,非自流灌溉区的灌溉需水量依次减小,风力提水总量占非自流灌溉区的灌溉需水量依次增大。由于 5 个地州的耕地面积、耕地与河流的距离、作物蒸散发量、有效降雨量均有所不同,因而其灌溉需水量相差较大。阿克苏地区非自流灌溉区的灌溉需水量最大,在 3 种情景中均大于 $10.00 \times 10^8 \text{ m}^3$;克州非自流灌溉区的灌溉需水量最小,在 3 种情景中最大值不超过 $1.50 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。

风力提水满足率指的是区域内风力提水量除以其非自流灌溉区的灌溉需水量的比值。南疆 5 个地州非自流灌溉区风力提水满足率如表 6 所示,在情景一、情景二、情景三中,风力提水满足率依次增加。在 3 种情景中,克州风力提水量占其非自流灌溉区的灌溉需水量的比值最高,而和田、阿克苏、喀什相对较低。在情景三中,克州的风力提水满足率高达 1.17,更加适合建设风力提水工程。相比而言,其他地州由于风能资源较少、可用于建设风力提水机的土地较少,或非自流灌溉区的灌溉需水量相对较大,因而风力提水满足率不高,在建设风力提水工程时需要考虑其经济效益。

表6 南疆5地(州)非自流灌溉区灌溉需水量及风力提水满足率

Table 6 Irrigation water requirement and satisfaction rate of wind-powered water pumping in non-gravity irrigation area for the five prefectures in Southern Xinjiang

地区 Region	情景一 Scenario 1		情景二 Scenario 2		情景三 Scenario 3	
	灌溉需水量 Irrigation water requirement/($\times 10^8 \text{ m}^3$)	风力提水 满足率 Satisfaction rate	灌溉需水量 Irrigation water requirement/($\times 10^8 \text{ m}^3$)	风力提水 满足率 Satisfaction rate	灌溉需水量 Irrigation water requirement/($\times 10^8 \text{ m}^3$)	风力提水 满足率 Satisfaction rate
巴州 Bazhou	12.04	0.05	9.79	0.07	7.99	0.08
和田 Hetian	3.74	0.04	3.10	0.04	2.60	0.05
阿克苏 Aksu	17.10	0.04	14.04	0.05	11.49	0.06
喀什 Kashgar	14.75	0.03	10.01	0.04	6.70	0.06
克州 Kezhou	1.48	0.68	1.21	0.83	0.86	1.17

4 经济效益分析

建设风力提水工程是弥补边远农村、农场、农牧区

的能源不足途径之一。在建设风力提水工程时,应严格控制工程投资,主要投入包括风力发电提水机组、储水池、田间灌溉设备及人力资源等。为保证在枯风期因风

力提水微小的不足,必要时可选取灵活的设备补灌,来确保经济效益^[32]。李亮等在风能提水试验点的经济分析中,采用年费用最小法计算进行经济效益分析,研究得到在风力提水机使用期中,不考虑拉水效益情况下,风力提水年均节约 1.77 万元/a,是内燃机组费用的 57.12%;考虑拉水效益情况下,风力提水年均节约 7.23 万元/a,是内燃机组和拉水总费用的 84.45%^[33]。胡建栋等按 506 台提水机组(FSH-200, 350 型系列风力提水机)完成的提水量,相对 8.8 kW 柴油机组,每年可少消耗柴油 443 256 kg,减排二氧化碳 1 413 986.64 kg,使用风力提水机的价格与使用 8.8 kW 柴油机的价格比为 1:6.7,与使用 2.2 kW 汽油机的价格比为 1:4.25^[34]。风力提水机每年维修 1 次,费用为 0.5 万元;管理费用为 0.1 万元,使用寿命为 15 a 左右^[33],整体来看长期投入小。同时,使用风力提水灌溉降低了农民体力劳动,提高了用水方便程度,总体减少了用水费用,节约了燃料,具有较好的环境效益和社会效益。

5 结 论

本文对研究期 2000—2014 年内南疆地区风速及降水数据进行分析,采用两参数威布尔分布模型对南疆的风能资源进行评估,借助 ArcGIS 软件可视化表达。通过作物蒸散发量及有效降雨量计算南疆灌溉需水量,探寻风能资源与灌溉需水量的时空分布变化规律。计算南疆 5 个地(州)的风力提水总量,开展风力提水在区域灌溉农业中的潜力研究。本文通过研究得到以下结论:

1) 南疆地区 4 月的平均风功率密度最大,其值为 25.14 W/m²。克州与巴州的风能资源较为丰富,其他地区的风能资源相对较低,在开发利用风能时,需要综合考虑经济效益。

2) 南疆地区 8 月的灌溉需水量最大,需水高峰期及季节的变化与南疆地区种植制度密切相关。单位面积上的灌溉需水较高的地区主要位于南疆阿克苏及巴州北部部分地区,呈现东北高,西南低的空间格局。结合耕地面积大小,阿克苏和喀什农业灌溉需水量大。

3) 根据南疆 5 个地(州)的年风能有效小时数、年平均风功率密度分布、农业灌溉需水量以及适宜建设风力提水工程的面积,计算获得不同地区的风力提水满足率,揭示利用清洁风能资源服务灌溉农业的发展潜能,其中,在克州建设风力提水工程的效益更高。

南疆地区极度干旱少雨,植被覆盖度低,生态环境脆弱,农业种植对灌溉用水十分依赖。利用风能资源进行“绿色灌溉”,减轻南疆对化石能源的依赖,并且减少使用产生的环境污染物,带来更多的生态效益。本文将研究区以地(州)进行划分,从年风能有效小时数、平均风功率密度、单位面积农业灌溉需水量及可安装风力提水机的面积等四个方面评估南疆更加适合建设风力提水工程的地(州),得到克州具有更大的建设风力提水工程的潜力。区域利用风能资源提水的初步潜力评估,有助于在南疆布局风力提水开发利用前对区域情况有一个整体的认知和了解。

[参 考 文 献]

- [1] 萨肯·赛买提, 莎吉达·肉孜. 风力提水在新疆现代化农牧业发展中潜力的思考与展望[J]. 地下水, 2012, 34(6): 201-204.
- [2] 林宗虎. 风能及其利用[J]. 自然杂志, 2008, 30(6): 309-314. Lin Zonghu. Wind energy and its utilization[J]. Chinese Journal of Nature, 2008, 30(6): 309-314. (in Chinese with English abstract)
- [3] 胡建栋, 邹占武, 徐双信. FSH-400 型风力提水机的设计试验研究[J]. 太阳能学报, 2013, 34(5): 895-901. Hu Jiandong, Zou Zhanwu, Xu Shuangxin. Design test and research of FSH-400 type wind power water pumping machine[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2013, 34(5): 895-901. (in Chinese with English abstract)
- [4] 张丹, 邵子玉, 孟维忠, 等. 新型风力提水灌溉系统在果园灌溉中的应用研究[J]. 中国水利, 2017, 31(3): 50-51.
- [5] 苏建军. 新型风力提水灌溉技术在建平县的推广应用经验[J]. 水利建设与管理, 2018, 38(8): 60-62. Su Jianjun. Experience in the popularization and application of novel wind-powered water-lifting irrigation technology in Jianping County[J]. Water Conservancy Construction and Management, 2018, 38(8): 60-62. (in Chinese with English abstract)
- [6] 卢月. 风力提水滴灌技术[J]. 农村牧区机械化, 2018(1): 38-39.
- [7] Jadallah A A, Er Z, Abdulqader Z A. Performance analysis of a hybrid wind/photovoltaic power generation system for water pumping[J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2019, 16(9): 5295-5304.
- [8] Rehman S, Sahin A. Comparing the use of diesel and wind power in pumping water in Saudi Arabia[J]. Energy Environment, 2014, 25(3): 369-388.
- [9] 郑红莲, 严军, 元慧慧. 南疆地区近 58 年气温、降水变化特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(7): 103-109. Zheng Honglian, Yan Jun, Yuan Huihui. Analysis of temperature and precipitation of southern Xinjiang in last 58 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(7): 103-109. (in Chinese with English abstract)
- [10] 阿依努尔·买买提. 基于 GIS 的南疆地区人居环境适宜性评价研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2011. Aynur Mamat. A Study on Evaluations of Living Environment Suitability in Southern Xinjiang Based on GIS[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [11] 柳葳, 许有鹏, 黄云. 气候变暖对新疆降水和径流影响分析[J]. 干旱区地理, 2005, 28(5): 597-602. Liu Wei, Xu Youpeng, Huang Yun. Effects of global warming on precipitation and runoff volume in Xinjiang[J].

- Arid Land Geography, 2005, 28(5): 597-602. (in Chinese with English abstract)
- [12] 王槐军. 新疆地表水现状及其开发利用[J]. 能源与节能, 2016(12): 109-110, 126.
- Wang Huaijun. Situation and development utilization of surface water in Xinjiang[J]. Energy and Energy Conservation, 2016(12): 109-110, 126. (in Chinese with English abstract)
- [13] Wu Bingfang, Xu Wenting, Huang Huiping, et al. GLC2000 database[Z]. European Commision Joint Research Centre, 2003. <http://www.gvm.jrc.it/glc2000>.
- [14] Zhang K, Kimball J S, Ramakrishna R N, et al. Vegetation greening and climate change promote multidecadal rises of global land evapotranspiration[J]. Scientific Reports, 2015(5): 15956.
- [15] Lorenc A C. A global three-dimensional multivariate statistical interpolation scheme[J]. Monthly Weather Review, 1981, 109(4): 701-721.
- [16] Luo W, Taylor M C, Parker S R. A comparison of spatial interpolation methods to estimate continuous wind speed surfaces using irregularly distributed data from England and Wales[J]. International Journal of Climatology, 2010, 28(7): 947-959.
- [17] 王承煦, 张源. 风力发电[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [18] 谢今范, 刘玉英, 于莉, 等. 二参数 Weibull 分布在风能资源参数长年代订正中的应用探讨[J]. 太阳能学报, 2015, 36(11): 2830-2836.
- Xie Jinfan, Liu Yuying, Yu Li, et al. Discussion on the application of two-parameter Weibull distribution in the long-term correction of wind energy resource parameters[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2015, 36(11): 2830-2836. (in Chinese with English abstract)
- [19] 游达章. 最小二乘法在威布尔分布的可靠性评估[C]// 游达章. 武汉机械设计与传动学会第 17 届学术年会论文集. 武汉: 武汉机械设计与传动学会, 2009: 36-37, 47.
- [20] Archer C L, Jacobson M Z. Evaluation of global wind power[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 2005, 110(12): 1147-1148.
- [21] Zhao Haoran, Wu Qiuwei, Hu Shuju, et al. Review of energy storage system for wind power integration support[J]. Applied Energy, 2015(7): 137.
- [22] 王芸, 魏光辉, 王勇. 希尼尔水库的风能资源特性[J]. 水电与新能源, 2011(1): 63-66.
- Wang Yun, Wei Guanghui, Wang Yong. Characteristics of wind energy resources in Xinier reservoir[J]. Hydropower and New Energy, 2011(1): 63-66. (in Chinese with English abstract)
- [23] Chang T P, Liu F J, Ko H H, et al. Comparative analysis on power curve models of wind turbine generator in estimating capacity factor[J]. Energy, 2014(1): 73.
- [24] Feng Jingxuan, Feng Lianrong, Wang Janliang, et al. Evaluation of the onshore wind energy potential in mainland China Based on GIS modeling and EROI analysis[J]. Resources, Conservation and Recycling. 2020, 119(152): 104484.
- [25] 中华人民共和国水利部. 风力提水工程技术规程: GB/T SL343-2006[S]. 北京: 水利水电出版社, 2006.
- [26] 魏建明. 国外风力提水机[J]. 太阳能, 1988(3): 6-11.
- [27] 张喜英. 华北典型区域农田耗水与节水灌溉研究[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(10): 1454-1464.
- Zhang Xiying. Water use and water-saving irrigation in typical farmlands in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(10): 1454-1464. (in Chinese with English abstract)
- [28] 徐小波, 周和平, 王忠, 等. 干旱灌区有效降雨量利用率研究[J]. 节水灌溉, 2010(12): 44-46, 50.
- Xu Xiaobo, Zhou Heping, Wang Zhong, et al. Study on effective rainfall use efficiency in arid irrigation Sistrict[J]. Water Saving Irrigation, 2010(12): 44-46, 50. (in Chinese with English abstract)
- [29] 艾斯喀尔·木拉提. 渭干河灌区作物灌溉制度合理性分析[J]. 科技信息, 2013(11): 466-467.
- [30] 梁潇丹. 用于旱地牧区灌溉的一种风力提水滴灌系统[C]// 中国地质学会. 2018 年全国工程地质学术年会论文集. 北京: 《工程地质学报》编辑部, 2018: 158-163.
- [31] 朱瑞兆, 薛珩. 我国风能资源[J]. 太阳能学报, 1981(2): 117-124.
- Zhu Ruizhao, Xue Yan. Wind energy resources in China[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 1981(2): 117-124. (in Chinese with English abstract)
- [32] 查咏, 李红, 刘伟. 风力提水灌溉人工草场的技术和经济可行性初步分析[J]. 内蒙古水利, 2006(2): 19-20.
- [33] 李亮, 吴永忠, 朱俊峰, 等. 牧区新能源提水经济效益的研究[J]. 中国农村水利水电, 2016(2): 92-95, 100.
- Li Liang, Wu Yongzhong, Zhu Junfeng, et al. The research on the water lifting economic benefits of new energy in pastoral areas[J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(2): 92-95, 100. (in Chinese with English abstract)
- [34] 胡建栋, 陈绍恒, 于宝生, 等. 离网牧区户用新能源提水设备推广应用研究[J]. 农机化研究, 2012, 34(9): 215-219.
- Hu Jiandong, Chen Shaoheng, Yu Baosheng, et al. Promotion and application of new energy pumping water equipment in no electricity pastoral areas[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(9): 215-219. (in Chinese with English abstract)

Potential assessment on wind-powered water pumping for irrigated agriculture in Southern Xinjiang

Song Shu, Niu Jun^{*}

(Center for Agricultural Water Research in China, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Renewable energy has become a major supply way to support sustainable regional development in low-carbon energy economies. One kind of renewable energy, wind energy has widely been utilized with many approaches, including wind-powered water pumping. Southern Xinjiang is featured with abundant wind energy, complex terrain, low rainfall, and a fragile ecological environment in the arid area of northwest China. Therefore, irrigation agriculture is essential to crop production, as in-season rainfall is inadequate to water requirement. A wind-powered water pumping can effectively alleviate the shortage of water resources, while reducing the dependence on fossil energy in Southern Xinjiang. In this study, a systematic potential assessment was made on the wind-powered water pumping for irrigated agriculture in Southern Xinjiang, northwest China. a) Two-parameter Weibull distribution was employed to evaluate the wind sources in Southern Xinjiang from 2000 through 2014, where the specific parameters were estimated by the least square. Then the data was effectively resampled using an ordinary Kriging interpolation on the platform of ArcGIS, thereby obtaining the distribution of wind power density in Southern Xinjiang. b) The evapotranspiration of regional crops and effective rainfall were utilized to calculate the actual requirement of irrigation water in Southern Xinjiang, further to examine the temporal and spatial distribution of required water resources. c) The total amount of wind-powered water was analyzed in the five regions of Southern Xinjiang, thereby calculating the proportion to the requirement of irrigation water in the non-artesian irrigation area. As such, a potential assessment on wind energy was achieved for the application of wind-powered water-pumping in different regions. The results were as follows: 1) The maximum wind power occurred in April in Southern Xinjiang, with an average density of 25.14 W/m². It was found that Kizilsu Kirghiz and Bayingolin Mongol Autonomous Prefecture presented relatively richer wind resources, compared with other regions. 2) The largest requirement of irrigation water appeared in August, indicating that seasonal changes were closely related to the local cropping system. The high requirements of irrigation water per unit were located mainly in Aksu Prefecture and parts of northern Bayingolin Mongol Autonomous Prefecture, as well as in the northeast and southwest research regions. Considering the size of irrigation areas, the amount of irrigation water was large in Aksu and Kashgar Prefecture. 3) The effective time and the distribution of wind were used to compute the water requirement for agricultural irrigation, and the suitable area for the construction of wind pumping projects in the five prefectures in Southern Xinjiang. The satisfaction rate of wind pumping was obtained to reveal the potential of wind energy for irrigated agriculture in Southern Xinjiang. The Kizilsu Kirghiz Autonomous Prefecture was an optimal option to construct the wind-powered water pumping with high natural benefits. In addition, the economic benefits need to be further considered. The obtained knowledge on the potential of wind-powered water pumping can provide scientific support to make water-saving irrigation strategies and policies for regional agricultural development in Southern Xinjiang of China.

Keywords: irrigation; wind energy; evapotranspiration; wind-powered water pumping; irrigation water requirement; Southern Xinjiang