江西省山地风电项目区水土流失与防治研究

张华明[1,2], 吴治玲[1,2], 咎玉亭[1,2], 李 英[1,2], 龚长春[1,2], 熊 峰[1,2], 车腾腾[1,2]
(1. 江西省水土保持科学研究院, 江西 南昌 330029; 2. 江西省土壤侵蚀与防治重点实验室, 江西 南昌 330029)

摘 要: [目的] 探讨江西山地风电项目建设特点,研究山地风电项目区水土流失的特征,并提出防治重点和措施建议,以期为山地风电项目环境保护与水土流失治理提供科学依据与参考。[方法] 以江西省 6 处典型山地风电项目为研究对象,结合现有研究成果,定量分析项目占地、土石方、水土流失等水土保持指标特征。[结果] ①单台风机平均占地 2.44 hm^2,挖方 4.51×10^4 m^3,弃方 1.44×10^4 m^3,新增水土流失量 364.38 t,每 1 kW 容量平均占地 11.63 m^2,挖方 2 148.91 m^3,弃方 684.53 m^3,新增水土流失量 0.17 t。②道路工程区、风机机组区、弃土场区的新增水土流失量分别占总量的 53.87%,21.84%和 10.13%,是山地风电项目水土流失最为严重的区域,也是水土保持的重点区域。[结论] 结合山地风电项目的区域环境特征,提出应注重道路工程区和风电机组区选线(址),优化竖向设计,减少挖填土石方数量,从源头上减少对区域土地和植被的破坏;其次要注重表土和植被资源保护与利用、道路工程区和风机机组区下边坡拦挡防护与排水措施设计,恢复和重建区域生态环境。

关键词: 江西省; 山地; 风电项目; 水土流失; 防治

文献标识码: A **文章编号**: 1000-288X(2018)04-0007-07 **中图分类号**: S157.1

文献参数: 张华明, 吴治玲, 咎玉亭, 等. 江西省山地风电项目区水土流失与防治研究[J]. 水土保持通报, 2018,38(4):7-13. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2018.04.002. Zhang Huaming, Wu Zhiling, Zan Yuting, et al. Soil erosion and control of wind power project areas in Jiangxi mountainous area[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018,38(4):7-13.

Soil Erosion and Control of Wind Power Project Areas in Jiangxi Mountainous Area

ZHANG Huaming[1,2], WU Zhiling[1,2], ZAN Yuting[1,2], LI Ying[1,2],
GONG Changchun[1,2], XIONG Feng[1,2], CHE Tengteng[1,2]
(1. *Jiangxi Institute of Soil and Water Conservation*, *Nanchang*, *Jiangxi* 330029, *China*;
2. *Jiangxi Provincial Key Laboratory of Soil Erosion and Prevention*, *Nanchang*, *Jiangxi* 330029, *China*)

Abstract: [Objective] This paper illustrated the characteristics of mountainous wind power project areas in Jiangxi Province. Soil erosion characteristics in mountainous wind power were studied, in order to provide scientific basis and reference for mountain wind power project environment protection and soil erosion control. [Methods] 6 different typical mountain wind power projects in Jiangxi Province were taken as the research object. Related previous research was consulted to elicit important, soil and water conservation indexes, such as land area, earthwork, soil erosion, etc., they were quantitatively analyzed. [Results] ① The averaged single wind turbine covered an area of 2.44 hm^2, with 45 100 m^3 of excavation, 14 400 m^3 of abandoned soil. The amount of newly soil and water loss was 364.38 t. Each unit of kilowatt capacity covered an area of 11.63 m^3, having excavation of 2 148.19 m^3, abandonment of 684.53 m^3; 0.17 t of soil and water newly lost. ② The added amount of soil and water loss in road engineering area, fan unit area and spoil area accounted for 53.87%, 21.84% and 10.13% of the total newly loss respectively. They were the area with the most serious soil and water loss in mountainous wind power projects as well as the key area for soil and water conservation. [Conclusion] Considering the regional environmental characteristics of mountainous wind power project, attention should be paid to route selection(site) of road engineering area and wind

收稿日期:2018-01-29 **修回日期**:2018-02-23
资助项目:江西省科技厅项目"江西红壤区工程堆积体水土保持植被优化配置研究"(20161BBG70086),"低影响开发生物滞留系统环境水文效应及关键技术研究"(20161BBG70087)
第一作者:张华明(1978—),男(汉族),江西省吉安市人,硕士,高级工程师,主要从事水土保持及生态恢复研究。E-mail:10145037@qq.com。

turbine area, optimization vertical design, decrease of earth and rock excavation and filling, and avoiding the destruction of land and vegetation from the source. In addition, attention should be paid to the protection and utilization of topsoil and vegetation resources, road blocks design, roadside protection and drainage measures under the wind turbine generator units to restore and rebuild the regional ecological environment.

Keywords: Jiangxi Province; mountain area; wind electric power project; soil erosion; control

能源是人类赖以生存和发展的重要物质保障,也是经济和社会发展的重要基础。风能作为一种清洁的可再生能源,几乎不产生污染物,成本低于火力发电[1],比火力发电具有更高的环境价值[2],能够改善生态环境质量,提高资源利用,避免对生态环境产生重大影响[3],越来越受到政府和企业的重视。2012 年中国新增风电装机容量和累计风电装机容量均为世界第一[4]。江西风能资源总储量约 6.00×10^7 kW,其中技术可开发量约 3.10×10^6 kW,且增长迅速[5],至 2020 年,风电装机容量将达到 1.70×10^6 kW 以上。受地形和气候的共同影响,江西省风能资源主要集中在赣北鄱阳湖地区和高海拔山地[6]。随着 2012 年首批山地风电项目核准立项,江西省山地风电项目开发拉开了序幕[7],将以高山风场为重点发展风电。

江西省山地面积约 6.01×10^4 km^2,这些山地是以沿山脉走向的线状式分布或孤立山峰的点状式分布的风能资源丰富区,具有较好的风能资源开发潜力[8]。江西山地风电项目一般位于海拔较高的山顶或山脊,一般平均起伏度<300 m,平均坡度<10°[9],建设地点一般 70 m 高空平均风速大于 6.0 m/s,近地面风速大于 4.0 m/s[10]。项目建设中的风机基础开挖、升压变电站修建、集电线路敷设、施工道路修建和弃土堆置等活动不可避免地对原地表和植被造成破坏,具有水蚀、风蚀并存[11],水土流失危害大[12],水土流失防治及植被恢复难度都比较大[13-14]等特点,容易引发水土流失与生态环境破坏等系列问题[15],对项目建设进度甚至项目安全都会造成一定程度的影响,这越来越引起政府相关部门及专家的重视[16]。目前,国内外学者对风电场的选址[17-18]及其影响因素[19]、风电环境价值[20]、开发措施[21]、水土流失特点及其防治措施[22-24]和对生态环境的影响[25]等都进行了大量研究。本文在前人研究的基础上,选择江西省 6 处典型风电项目为研究对象,通过分析山地风电项目特点、工程占地与土石方特征、水土流失情况,阐述山地风电项目建设区域土地受损情况及水土流失特征,提出山地风电项目水土流失防治重点和措施建议,为山地风电项目环境保护与水土流失治理提供科学依据与参考。

1 研究项目概况

江西省地貌以山地、丘陵为主,东、南、西三面群山环抱,峰峦重迭,山势峻拔;中部丘陵、盆地相间;北部地面开阔,平原坦荡,河湖交织。江西属中亚热带湿润季风气候区,冬季盛行偏北风,夏季盛行偏南风,年平均气温 17.8 ℃,自北向南逐渐增高;全省年降水量在 1 377~1 991.6 mm 之间,南多北少,东多西少;山区多,盆地少;年降水主要集中在 4—6 月,约占全年的 42%~53%。地带性土壤有红壤和黄壤,红壤广泛分布于海拔 800 m 以下的低山区和丘陵岗地,800 m 以上为黄壤、暗黄棕壤和山地草甸土等。江西属中亚热带常绿阔叶林地带,植被类型繁多,植物资源丰富,现状植被主要为针叶林、针阔混交林,随着海拔升高,分布有山顶矮林、山地草甸等山地植被。受地形和气候的共同影响,江西风能资源除富集于鄱阳湖区外,主要分布在高山山地,如东部武夷山脉,西部省罗霄山脉,西北部幕阜山、九岭山。根据近几年江西山地风电项目规划建设情况,选择武夷山、九连山、罗霄山、幕阜山等山脉的 6 处典型山地风电项目进行分析。研究项目共建设风机 204 台,单机容量涉及 2 000,2 100,2 500 kW 等 3 种型号,总装机容量 428.5 MW,项目建设规模及内容等情况详见表 1。

2 结果与分析

2.1 山地风电项目建设特点

根据项目建设内容和施工扰动范围,山地风电项目可划分为风机机组区、升压站区、集电线路区、道路工程区、弃土场区和施工场地区等。

风机机组区主要包括风机基础、箱式变电站和风机安装平台 3 个部分,受项目装机规模和风机数量的影响。山地风电的风机一般建于山头或山脊上,海拔范围 500~1 760 m,风机区域地形尖瘦陡峭,风机施工安装需要对场地进行开挖,形成施工平台,项目挖方基本无法回填,产生大量弃土(石、渣)。升压站区主要布置中控楼、配电室、附属用房及泵房、库房和主变压器等,周边设置围墙。升压站一般设在地形平坦、临近村庄的地方,沿现有道路或进场道路布设。集电线路区一般包括直埋电缆和架空线路。直埋电

缆一般布设在 800 m 及以上高海拔地区,以适应恶劣的山区气候环境,直埋电缆需要开沟敷设,埋于地下,不占地面和空间,施工简单;架空线路采用铁塔架设,塔基施工涉及土石方开挖回填,地表扰动呈点状分布,影响范围相对较小。山地风电项目受其风机机位和建设条件的限制,需要修建较长的进场道路和施工检修道路,总长达数 10 km。进场道路主要为上山道路,起点接风场周边现有道路,终点接风场内施工检修道路,海拔逐渐抬升,沿线植被和地形地貌变化较大;施工检修道路为风场内道路,联通各风机机位,主要沿山脊或山体等高线修建,其长度受地形、风机数量及分布等影响。道路工程一般采用山岭重丘四级公路标准建设,建设标准低、工程占地和土石方量大、沿线地形复杂,导致道路工程区是山地风电项目地表扰动和植被破坏最为严重的区域。弃土场区主要为风机机位和道路工程施工多余的开挖土(石、渣)方堆放区,一般临近风机或道路布设。山区地形陡峭,山高谷深,弃土场也是易发生严重水土流失的区域之一。施工场地区包括升压站施工场地和设备转运场地,一般选择地形较为平坦的场地。

表 1　研究项目基本情况

项 目	风机/台	单机容量/kW	总装机容量/MW	风机机组区	升压站区	集电线路区		道路工程区		弃土场/处	施工场地/处
				风机场地/处	升压站/座	直埋电缆/km	架空线路/km	进场道路/km	施工检修道路/km		
乐安鸭公嶂风电	30	2 100	63.0	30	1	37.1	—	12	35.6	6	1
定南双山风电	35	2 000	70.0	35	1	20.6	19.4	11.33	30.7	10	2
浮梁中岭风电	50	2 000	100.0	50	1	34.3	21.6	10.94	51.2	12	2
石城金华山风电	35 6	2 500 2 000	99.5	41	1	31.8	9.5	6.29	32.0	10	2
遂川清秀风电	23	2 000	46.0	23	1	11.7	—	30.3	9.2	10	1
武宁太阳山风电	25	2 000	50.0	25	1	29.8	—	2.9	35.0	9	1
合 计	204	—	428.5	204	6	165.3	50.5	73.8	193.7	57	9

2.2　工程占地分析

工程占地包括项目建设征用、占用、使用及管辖的地域,是生产建设项目水土保持的一项基础性指标。研究项目总占地面积 498.39 hm^2,单台风机占地 2.44 hm^2,每 1 kW 容量占地 11.63 m^2。从项目组成占地比重来看,道路工程区占地最多,占总占地面积的 61.68%;其次为风电机组区,占总占地面积的12.97%;第三为集电线路区,占总占地面积的 12.18%;施工场地占地最小,仅占总占地面积的 1.05%。项目工程占地情况详见表 2。由表 2 可知,研究项目道路工程长 37.9～62.1 km,路基宽度一般为 5.5 m,行车宽度 4.5 m。由于道路工程里程长,导致其占地比重最大。这充分说明道路工程区是山地风电项目的占地主体,其方案设计对工程占地和区域环境景观具有重要影响,因此,在工程设计中应尤其注重道路工程选址选线和断面设计。乐安鸭公嶂风电道路工程里程总长 47.64 km,占地面积 50.60 hm^2,与定南双山风电相比,道路工程里程长 5.6 km,但占地少 5.36 hm^2,其主要原因是鸭公嶂风电 12 km 进场道路是在路基宽 2.0～3.5 m 的乡村道路上扩建,大大减少了道路工程占地,这也说明道路工程建设受现有交通影响较大,可以充分利用现有山区道路建设,有效减少工程占地。

表 2　研究项目工程占地情况　　hm^2

项目名称	风机机组区	升压站区	集电线路区	道路工程区	弃土场区	施工场地区	合计
乐安鸭公嶂风电	9.08	1.01	15.81	50.60	4.87	0.81	82.18
定南双山风电	11.46	1.59	11.97	55.96	12.00	1.11	94.09
浮梁中岭风电	14.63	1.58	8.65	61.29	10.13	1.10	97.38
石城金华山风电	12.37	1.46	15.96	37.67	7.40	0.81	75.67
遂川清秀风电	8.99	1.88	0.87	64.26	10.00	0.81	86.81
武宁太阳山风电	8.09	0.98	7.45	37.62	7.53	0.59	62.26
合 计	64.62	8.50	60.71	307.4	51.93	5.23	498.39
比例/%	12.97	1.71	12.18	61.68	10.42	1.05	100.00
单台风机占地(hm^2/台)	0.32	0.04	0.30	1.51	0.25	0.03	2.44
单位容量占/($hm^2 \cdot kW^{-1}$)	1.51	0.20	1.42	7.17	1.21	0.12	11.63

2.3 土石方平衡分析

土石方与工程建设规模、施工方案和区域地形地貌及地质等情况密切相关。山地风电项目根据风电设备运输及施工安装的要求，需要对风机机组区和道路工程区等区域进行开挖、回填，但受区域地形地貌及地质情况的限制，开挖土石方难以全部调配利用，往往容易产生大量弃土(石、渣)，研究项目土石方平衡情况详见表3。

由表3可知，研究项目总挖方量9.21×10^6 m^3，总填方量6.27×10^6 m^3，总弃方量2.93×10^6 m^3；单台风机挖方4.51×10^4 m^3，填方3.08×10^4 m^3，弃方1.44×10^4 m^3；每1 kW容量挖方2 148.91 m^3，填方1 464.39 m^3，弃方684.53 m^3。从各分区的挖方来看，道路工程区挖方最多，达6.83×10^6 m^3，占总挖方量的74.15%；其次为风电机组区，占总挖方量的19.90%；第三为升压站区，占总挖方量的3.22%；施工场地占地最小，仅为3.29×10^4 m^3，占总挖方量的0.36%。从填方来看，道路工程区填方最多，达5.00×10^4 m^3，占总填方量的79.62%；其次为风电机组区，占总填方量的13.46%；第三为集电线路区，占总填方量的3.29%；施工场地填方最小，仅为3.09×10^4 m^3，占总填方量的0.49%。从弃方来看，道路工程区弃方最多，达1.83×10^6 m^3，占总弃方量的62.42%；其次为风电机组区，为98.75，占总弃方量的33.67%；其他区域的弃方数量均较小。除部分升压站设置在山包产生弃方外，一般可以实现土方平衡。集电线路区和施工场地产生的少量弃方，可以在区域内平衡。

表3 研究项目区土石方平衡情况 10^4 m^3

项目名称		风机机组区	升压站区	集电线路区	道路工程区	弃土场区	施工场地区	合计
乐安鸭公嶂风电	挖方	11.47	2.50	3.50	91.85	—	0.41	109.73
	填方	9.77	2.50	2.45	65.36	—	0.41	80.49
	弃方	1.70	—	1.05	26.49	—	—	29.24
定南双山风电	挖方	46.62	8.78	2.76	108.96	—	0.42	167.54
	填方	13.58	3.96	2.60	43.81	—	0.42	64.38
	弃方	33.04	4.81	0.16	65.14	—	—	103.16
浮梁中岭风电	挖方	33.92	5.00	6.55	109.12	—	0.77	155.36
	填方	18.57	5.03	6.55	72.35	—	0.77	103.27
	弃方	15.35	—	—	36.74	—	—	52.09
石城金华山风电	挖方	33.70	3.53	5.25	66.58	—	1.13	110.19
	填方	16.01	3.59	5.25	50.53	—	1.13	76.51
	弃方	17.69	—	—	15.99	—	—	33.68
遂川清秀风电	挖方	26.96	7.38	0.80	264.08	—	0.26	299.48
	填方	10.48	2.38	0.80	242.85	—	0.06	256.57
	弃方	16.48	5.00	—	21.23	—	0.20	42.91
武宁太阳山风电	挖方	30.53	2.46	3.00	42.22	—	0.30	78.51
	填方	16.04	2.21	3.00	24.72	—	0.30	46.27
	弃方	14.49	0.25	—	17.50	—	—	32.24
合 计	挖方	183.2	29.65	21.86	682.81	—	3.29	920.81
	填方	84.45	19.67	20.65	499.62	—	3.09	627.49
	弃方	98.75	10.06	1.21	183.09	—	0.20	293.32
比例/%	挖方	19.90	3.22	2.37	74.15	—	0.36	100.00
	填方	13.46	3.13	3.29	79.62	—	0.49	100.00
	弃方	33.67	3.43	0.41	62.42	—	0.07	100.00
单台风机(10^4 m^3/台)	挖方	0.90	0.15	0.11	3.35	—	0.02	4.51
	填方	0.41	0.10	0.10	2.45	—	0.02	3.08
	弃方	0.48	0.05	0.01	0.90	—	0.00	1.44
单位容量/(m^3·kW^{-1})	挖方	427.54	69.19	51.02	1 593.49	—	7.68	2 148.91
	填方	197.08	45.90	48.19	1 165.97	—	7.21	1 464.39
	弃方	230.46	23.48	2.82	427.28	—	0.47	684.53

从土石方平衡角度分析,挖方、填方、弃方均以道路工程区最大,其次为风机机组区,两者合计分别占项目总量的 94.05%,93.08%,96.09%,说明道路工程区和风机机组区是山地风电项目地表扰动最为剧烈的区域,是山地风电项目弃渣的主要来源区。从土石方挖方利用率来看,研究项目的挖方总利用率为 68.15%,风机机组区为 46.10%,升压站区为 66.34%,道路工程区为 73.17%,集电线路区和施工场地区分别为 94.46%和 93.92%。风机机组区土石方利用率最低,远低于项目挖方总利用率,说明风机机组区最易产生弃土石(渣),这与其所处区域的地形地貌和施工方案密切相关。这也充分说明在山地风电项目规划设计中,要重视风机机组区和道路工程区的选址选线及竖向与平面设计,尽可能减少土石方挖方数量,提高土石方利用率,加大土方回填利用力度,减少弃土(石、渣),保护区域生态环境景观。

2.4　水土流失量分析

水土流失量是反映生产建设项目区水土流失情况以及对周边环境影响程度的重要指标,与项目建设区的扰动地表面积、水土流失预测时段、土壤侵蚀背景模数、扰动后的土壤侵蚀模数等有关。受工作条件和技术手段的限制,通常利用与建设内容相同、自然环境条件相似的其他山地风电项目的水土保持监测成果,采用类比法,分析计算水土流失量,研究项目区水土流失量情况,结果详见表 4。由表 4 可知,研究项目区水土流失总量 81 787 t,新增水土流失量 74 334 t;单台风机水土流失总量 400.92 t,新增水土流失量 364.38 t;每 1 kW 容量水土流失总量 0.19 t,新增水土流失量 0.17 t。从水土流失总量来看,道路工程区水土流失量最多,占总水土流失量的 51.93%;其次为风电机组区,占总水土流失量的 24.72%;第三为弃土场区,占总水土流失量的 9.56%;其他区域的水土流失量均较小。从新增水土流失量来看,道路工程区新增水土流失量最多,占总新增水土流失量的 53.87%;其次为风电机组区,占总新增水土流失量的 21.84%;第三为弃土场区,占总新增水土流失量的 10.13%;其他区域的新增水土流失量均较小。这和各区的扰动面积、土石方等相关,相同降雨条件下,裸露面积越大,挖填土方越多,就越容易发生水土流失。道路工程区、风机机组区、弃土场区对项目区水土流失贡献最大,三者的新增水土流失量占总量的 85.84%,这充分说明道路工程区、风机机组区、弃土场区是山地风电项目水土流失最为严重的区域,因此,也应成为山地风电项目水土流失防治的重点区域。其中,道路工程区的水土流失总量和新增量,均大于其他防治区,这和道路工程区的占地和扰动面积比较大相关。此结论和尹晓煜认为交通道路区是新增水土流失量最大防治区的观点一致[26]。

表 4　研究项目区水土流失量情况　　t

项目名称		风机机组区	升压站区	集电线路区	道路工程区	弃土场区	施工场地区	合计
乐安鸭公嶂风电	总量	10 172	1 864	1 333	7 474	663	86	21 592
	新增	6 617	1 705	1 188	7 100	630	81	17 321
定南双山风电	总量	2 397	150	1 235	9 662	2 561	216	16 221
	新增	2 324	139	1 192	9 321	2 481	205	15 662
浮梁中岭风电	总量	3 200	176	996	13 701	86	2 748	20 907
	新增	3 065	167	894	12 914	75	2 667	19 782
石城金华山风电	总量	3 143	181	1 474	6 575	1 119	98	12 590
	新增	3 040	176	1 358	6 297	1 069	92	12 032
遂川清秀风电	总量	667	171	38	2 336	2 652	6	5 870
	新增	593	149	30	1 836	2 572	4	5 184
武宁太阳山风电	总量	642	163	316	2 721	735	30	4 607
	新增	598	161	284	2 579	703	28	4 353
合 计	总量	20 221	2 705	5 392	42 469	7 816	3 184	81 787
	新增	16 237	2 497	4 946	40 047	7 530	3 077	74 334
比例/%	总量	24.72	3.31	6.59	51.93	9.56	3.89	100.00
	新增	21.84	3.36	6.65	53.87	10.13	4.14	100.00
单台风机(t/台)	总量	99.12	13.26	26.43	208.18	38.31	15.61	400.92
	新增	79.59	12.24	24.25	196.31	36.91	15.08	364.38
单位容量/(t·kW^{-1})	总量	0.05	0.01	0.01	0.10	0.02	0.01	0.19
	新增	0.04	0.01	0.01	0.09	0.02	0.01	0.17

2.5 水土流失防治对策

从项目建设特点、工程占地、土石方平衡、水土流失量等方面分析，山地风电项目应重点做好道路工程区、风机机组区、弃土场区的水土流失防治工作[10]。

道路工程区线路里程长，沿线地形地貌复杂，土石方工程量大，建设标准偏低，区域水土流失尤为严重[26]。因此，第一要注重控制路基边坡坡比，应严格按设计要求放坡，防止出现倒坡、急陡坡产生安全隐患；第二要注重路基下边坡临时拦挡，防止施工过程中土石方沿山坡滚落，造成溜碴挂坡现象，严重破坏区域生态环境和植被生态系统[27]；第三要注重做好路基排水，防止雨水径流溢出排水沟，经路面对路基下边坡坡面进行冲刷，造成水土流失，甚至产生滑坡、崩塌，影响路基安全稳定，尤其是进场道路具有海拔跨度范围大、路面高程逐渐抬升等特点，路基排水切忌沿路线一沟到底，防止出现大流量、高流速的沟道汇流，产生巨大的冲刷力和破坏力，其路基排水应根据沿线地形做到分段收集，分段导排入自然沟道中，排水出口处设置消能措施，减少径流能量；第四要注重路基边坡防护，改善沿线生态环境。路基填方边坡一般以土石混合物为主，挖方边坡一般为石质坡面，对填方边坡可采用喷播草灌护坡；挖方边坡可采用挂网喷草灌护坡，受投资标准的限制也可采用栽植攀援植物护坡，但植被恢复时间较长，初期效果相对较差。

风机机组区一般沿山脊分布，区域海拔高，地形地貌陡峭、土层薄，植物资源特殊，植被破坏后难以恢复。因此，第一要注重区域土壤和植物资源的保护与利用[28]。施工前首先要对施工范围内的乔木、灌木、草皮进行移植并养护，对表土进行剥离并集中堆放，施工结束后回填表土，回植乔木、灌木、草皮，并加强植物养护，维护区域生态环境。第二要注重区域下边坡拦挡，尤其是施工期间临时拦挡，防止出现溜碴挂坡现象，破坏地表植被，影响区域生态环境景观。第三要注重理顺场地排水，有序收集排放场地雨水径流，排水出口设置消能防冲设施，防止场地雨水径流沿坡面由上往下冲刷，造成水土流失，影响坡面稳定。

弃土场区一般靠近道路工程、风机机组区布设，主要为坡地型弃土场，弃渣物质组成以土石混合物为主，废石所占比重大，结构松散，后期植被恢复较为困难。因此，第一，弃渣前应设置挡土墙等拦挡措施[29]，清除弃土场范围内地表植被和软弱土层，防止在渣体底部形成软弱夹层；弃渣宜采用自下而上、分层碾压方式堆置，并按设计要求严格控制渣体边坡高度及坡比，确保渣体稳定[30]。第二要与风机机组区一样，注重区域土壤和植物资源的保护与利用。第三要采取防洪排导措施，弃土场周边设置截水沟，拦截上游汇水，防止对渣体造成冲刷或渗入渣体，影响渣体稳定。第四利用剥离的表土和移栽的植物，做好弃土场边坡防护和植被恢复。

3 讨论与结论

(1) 研究项目区共建设风机204台，总装机容量428.5 MW，总占地面积498.39 hm^2；平均单台风机占地2.44 hm^2，挖方4.51×10^4 m^3，填方3.08×10^4 m^3，弃方1.44×10^4 m^3，水土流失量400.92 t，新增水土流失量364.38 t；平均每1 kW容量占地11.63 m^2；挖方2 148.91 m^3；填方1 464.39 m^3；弃方684.53 m^3；水土流失量0.19 t；新增水土流失量0.17 t。

(2) 山地风电项目区道路工程路线里程长，占地面积、挖填土石方数量大，是弃土(石、渣)的主要来源区。因此，要注重道路工程选线，充分利用当地现有道路，尽量减少工程占地；同时要优化路线竖向设计，加强土石方调配利用，减少土石方和弃土(石、渣)量，从源头上减少山地风电项目水土流失。

(3) 道路工程区、风机机组区、弃土场区的新增水土流失量分别占总量的53.87%，21.84%和10.13%，三者合计占项目新增水土流失量的85.84%，充分说明道路工程区、风机机组区、弃土场区是山地风电项目水土流失最为严重的区域，也是山地风电项目水土保持的重点区域。

(4) 山地风电项目建设区域海拔高，植被类型特殊、生态环境脆弱，应注重表土和植被资源保护与利用。施工前，剥离表土和移栽乔木、灌木、草皮，并做好防护和养护，施工结束后用于区域土地整治与植被恢复，维护区域生态环境。

(5) 山地风电项目一般建于山头或山脊上，山高坡陡，区域地形地貌复杂，应注重道路工程区、风电机组区下边坡拦挡，尤其是土石方施工过程中的临时拦挡，做好坡面防护，防止土石方沿山坡滚落，造成溜碴挂坡现象，严重破坏区域生态环境和植被生态系统。

(6) 江西省地处亚热带湿润季风气候区，雨量丰沛且时空分布不均，山地风电项目应注重场地排水，防止地表径流乱流，冲刷坡面，造成水土流失甚至安全隐患。尤其是道路工程路基排水，应根据沿线地形做到分段收集，分段导排入自然沟道中，减少径流流量和能量。

(7) 风能是技术最为成熟并且无大气污染物的一种可再生能源，在当今能源短缺以及污染严重的时代扮演了重要角色[31]，在江西省[8]乃至全国[32]最有发展前景。风电开发能够改善环境，也会产生系列环

境问题[33],因此了解山地风电项目建设特点,优化风电项目土石方的调配,加大对风电项目扰动区域尤其是水土流失严重区域的关注,并采取针对性的防治措施,能够大大降低对周边环境的影响,更利于生态环境的保护与提升。

[参 考 文 献]

[1] 俞海淼,周海珠,裴晓梅.风力发电的环境价值与经济性分析[J].同济大学学报:自然科学版,2009,37(5):704-708.

[2] Fulvio A. Energy performances and life cycle assessment of an Italian wind farm [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2008,12(1):200-217.

[3] 陈雯.我国风力发电的现状与展望[J].应用能源技术,2010(8):49-51.

[4] 武宁.山地型风电场的建设对森林生态系统影响浅析[J].河北林业科技,2013(4):62-63.

[5] 杨飞虎,何源明.江西新能源产业发展态势与对策[J].江西社会科学,2016(9):70-74.

[6] 徐卫民,曾辉,陆长清.江西省风能资源分析[J].江西能源,2002(4):43-46.

[7] 周春波,魏伟,吴淑丹.江西省高山风电场建设水土流失防治措施初探[J].江西水利科技,2006,42(1):70-72.

[8] 吴琼,聂秋生,周荣卫,等.江西省山地风场风能资源储量及特征分析[J].自然资源学报,2013,28(9):1605-1614.

[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):1243-1247.

[10] 汪传理.安徽省山区风电开发项目水土流失防治重点及对策[J].安徽农学通报,2017,23(14):158-160.

[11] 王莉,尚佰晓,张辉,等.铁岭风电项目水土保持监测存在的问题及对策[J].中国水土保持,2013(7):64-66.

[12] 陈连可.浅析福建省风电项目建设水土流失问题与防治措施布局[J].亚热带水土保持,2017,29(4):66-68.

[13] 史彦林,贾洪纪,张利,等.黑龙江山区风电场工程水土流失特点及防治措施[J].中国水土保持,2010(9):21-23.

[14] 赵陟峰,吴震,周建海,等.风电场建设对河西走廊水土流失的影响及防治对策[J].中国水土保持,2011(8):17-18,26.

[15] 杨国华,鲍丽芳,韩世军.分布式风力发电开发对宁夏局部生态环境的影响研究[J].安徽农业科学,2011,39(21):12832-12833.

[16] 彭何.风电工程水土流失防治技术探讨[J].南方农业,2015,9(36):222,224.

[17] Laura C R, Ross K M. A geographic analysis of wind turbine placement in Northern California[J]. Energy Policy, 2006(34):2137-2149.

[18] 涂波,孙志忠,周孟,等.江西省高山风电场选址方法[J].电力建设,2014,35(4):91-95.

[19] LEE A H. Multi-criteria decision making on strategic selection of wind farms[J]. Renewable Energy, 2009, 34(1):120-126.

[20] Boško J. The strategic environmental impact assessment of electric wind energy plants: Case study 'Bavaniste'(Serbia)[J]. Renewable Energy, 2010,35(7):1509-1519.

[21] 高阳华,王堰,邱新法,等.基于 GIS 的复杂地形风能资源模拟研究[J].太阳能学报,2008,29(2):163-169.

[22] 郝志敏.南方丘陵区风电工程水土流失主要成因及对策分析[J].科技创新导报,2015(9):177,179.

[23] 龚长春,熊峰,章龙飞.山地风电场项目水土保持方案植被恢复措施探讨[J].江西水利科技,2013,39(3):228-230.

[24] 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:中国农业科学研究院,2010.

[25] 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].江苏 南京:南京师范的大学,2011.

[26] 尹晓煜.风电场项目交通道路防治区水土保持措施探讨[J].中国水土保持,2015(7):32-33.

[27] 张祖鹏.浅谈南方山区风电项目水土保持工作存在的问题及建议:以浙江华电长兴弁山风电场 22 MW 工程为例[J].浙江水利科技,2017,209(1):41-42.

[28] 田甜.广东省风电工程水土流失特点及防治措施设计[J].亚热带水土保持,2014,26(2):53-56.

[29] 中华人民共和国建设部.GB50433-2008 开发建设项目水土保持技术规范[S].北京:中国计划出版社,2008.

[30] 中华人民共和国建设部.GB50433-2008 水土保持工程设计规范[S].北京:中国计划出版社,2008.

[31] 余寅,唐宏德,郭家宝.中国可再生能源发展前景分析[J].华东电力,2009,37(8):1306-1308.

[32] Zhang Xiliang, Chang Shiyan, Martinot E. Renewable energy in China: An integrated technology and policy perspective[J]. Energy Policy, 2012,51(1):1-6.

[33] 董智,贾志军,李红丽,等.河北省坝上风电场建设区水土流失特点与植被恢复途径[J].中国水土保持科学,2009,10(7):82-86.