

山地风电场开发过程中水土流失相关问题研究进展

张荣¹ 陈正洪² 孙朋杰²

(1 中国气象局气象干部培训学院湖北分院, 武汉 430074; 2 湖北省气象服务中心, 武汉 430070)

摘要: 风力发电在提供清洁能源的同时亦带来了一定程度的水土流失和生态环境破坏。特别是山地风电场, 由于其所在的山区土壤抗蚀性低, 且植被破坏后恢复难度大, 在开发过程中引起的水土流失问题尤为突出。回顾了山区风电场水土流失特点、影响风电场水土流失关键因子等方面的相关研究成果, 并对其进行了总结。山区风电场水土流失具有地域不完整性及扰动多样性的特点, 道路施工区、风电机组建设区是水土流失的重点区域; 水土流失呈现时空分布不均性特点, 水土流失时段主要集中在施工期, 且流失剧烈阶段主要发生在每年的降雨集中期; 降雨是影响风电场水土流失的关键因子, 滑坡稳定性系数在降水期间急剧下降, 降水入渗作用促进了边坡变形破坏向不利的一面发展, 容易引起水土流失及边坡不稳; 降雨侵蚀力指标与降雨量及雨强有关, 按照获取气象资料的不同, 目前主要采用月降雨量及日降雨量来分别估算降雨侵蚀力; 在进行山区风电场水土流失强度预测时, 将整个预测区域划分为4~6个单元, 确定各预测单元工程扰动前、施工期、扰动后的土壤侵蚀模数, 采用类比法结合数学模型法预测造成的水土流失量。

关键词: 山区风电场, 水土流失, 土壤侵蚀, 降雨侵蚀力

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.01.008

Research Progress on Soil Erosion Related Problems in Mountain Wind Farm Development

Zhang Rong¹, Chen Zhenghong², Sun Pengjie²

(1 Hubei Branch of the China Meteorological Administration Meteorological Cadre Training Institute Wuhan 430074
2 Hubei Provincial Meteorological Service Center, Wuhan 40205)

Abstract: Wind power generation provides clean energy, while brings a certain degree of soil erosion and ecological environment damage. Because of the low resistance to soil erosion and the difficult recovery after vegetation destruction, the soil erosion caused by the development process is particularly prominent in mountain wind farm. This paper reviews studies of soil erosion characteristics of wind farm in mountainous areas and key factors affecting wind farm soil erosion. The soil erosion of wind farm in mountainous area is characterized by geographical incompleteness and disturbance diversity. Road construction area and wind turbine construction area are the key areas of soil erosion. Soil erosion varies in time and space. Soil erosion occurs mainly in the construction period and severe soil erosion occurs mainly in the peak phase of rainfall. Rainfall is the most important factor affecting the soil erosion of wind farm. The stability coefficient of landslide decreases sharply in the precipitation period. The infiltration of precipitation promotes the development of slope deformation and destruction to the unfavorable side, which can easily cause soil erosion and slope instability. The rainfall erosive force index was related to rainfall amount and rainfall intensity. According to the different meteorological data, the rainfall erosive power was estimated by both monthly and daily rainfall. For predicting soil erosion intensity of mountain wind farm, the whole forecast area was divided into 4-6 blocks to determine the soil erosion modulus before, during, and after the construction disturbance in each block.

Keywords: mountain wind farm, soil and water loss, soil erosion, rainfall erosive power

0 引言

进入21世纪以来, 随着石油、煤炭等传统不可再生能源的开采和消耗, 越来越多的目光关注到风能、太阳能等清洁、可再生的能源。风电已经实现规模化

应用, 2000年以来风电占欧洲新增装机的30%, 2007年以来风电占美国新增装机的33%^[1], 美国还提出到2030年风电用电量占比将提升至20%。我国风能利用经历了从赶跑者到领跑者的阶段, 从2004年的742 MW, 到截至2017年底的195 GW, 增长了263倍, 一跃成为全球太阳能风能装机量最高的国家^[2]。从风能资源分布情况来看, 我国风能主要分布于“三北”地

收稿日期: 2018年12月6日; 修回日期: 2019年5月13日
第一作者: 张荣(1985—), Email: pjws@163.com

带,随着前期开发,资源丰富、地形简单的区域越来越少,同时也由于三北地区限电现象严重,越来越多的注意力转移到内陆山区。近年来随着低风速高塔筒风机技术、分布式风电技术等新技术的发展,大大拓展了风力发电的应用范围与前景。风资源相对丰富、地形复杂的山区已成为陆上风电开发的重点^[3]。

风力发电在提供清洁能源的同时亦带来了一定程度的水土流失和生态环境破坏问题^[4],特别是山地风电场,这种现象更为严重。水土流失是指由于自然或人为因素的影响、雨水不能就地消纳、顺势下流、冲刷土壤,造成水分和土壤同时流失的现象。主要原因是地面坡度大、土地利用不当、地面植被遭破坏、耕作技术不合理、土质松散、滥伐森林、过度放牧等。水土流失的危害主要表现在:土壤耕作层被侵蚀、破坏,使土地肥力日趋衰竭;淤塞河流、渠道、水库,降低水利工程效益,甚至导致水旱灾害发生,严重影响工农业生产;水土流失对山区农业生产及下游河道带来严重威胁。风电场内工程由于开挖、填埋等作业频繁,使原生地表的覆盖物和土壤结构遭受严重破坏,导致土壤抗蚀性降低,而且恢复难度大^[5],为水土流失及相关灾害的发生与发展创造了条件。依据《中华人民共和国水土保持法》的规定,在风电场建设过程中,水土保持方案应当与工程同时设计、同时施工、同时投产,遵循“三同时”制度。但在实际工作中,有的风电场追求尽早并网发电,并未遵循这一制度,造成风电场水土大量流失及生态破坏。

因此采取合理的水土保持措施,有效防治水土流失是十分有必要的,可保障风电场健康、稳定、持续发展^[6-8]。本文对山区风电场水土流失这一研究领域进行较为全面总结,从山区风电场水土流失的特点、影响风电场水土流失关键问题分析两方面入手对文献进行总结,意在探索该领域下一步的研究方向,指导科学、合理地开发山区风能资源。

1 山区风电场水土流失特点

在山地风电场建设期间,由于场内道路、升压站建设等活动频繁^[9-10],使地表土壤原来生长的植被遭受破坏,沙土、石块裸露,改变了土壤的理化性质,使得土地原有的紧密结构遭到破坏,在强降雨、大风等作用下水土流失急剧增加。总体来说,山区风电场水土流失有以下特点。

1.1 扰动多样性

在扰动方式方面,根据工程特点,山区风电场工程范围内,容易破坏原有地貌引发水土流失的部分有道路工程、发电机组区、升压站、输电线路等^[11-12]。

陈俊松等^[13]统计了云南某山地风电场项目水土保持分区面积及所占比例(表1),其中,以风电场进场及场内道路占地面积最大,其破坏原有地貌也最多,其次为弃渣场区和风机机组区。

表1 云南某风电项目水土保持分区面积及所占比例
Table 1 Area and proportion of soil and water conservation in a wind power project in Yunnan Province

排序	区域名称	占地面积/hm ²	占比/%
1	道路工程	37.56	59.73
2	弃渣场区	13.15	20.91
3	风机机组区	8.7	13.84
4	施工生产生活区	1.57	2.5
5	升压站	0.96	1.53
6	集电线路	0.94	1.49

王蔚^[14]以湖南九泽水风电场为例,分析了施工期间各区域水土流失量(表2)。场内交通设施导致水土流失量最多,风机基础及弃渣场区导致水土流失也占比较多。

表2 湖南九泽水风电项目施工期水土流失量分析
Table 2 Analysis of soil and water Loss during the construction period of Jiuzze Water Wind Power Project in Hunan

排序	区域名称	土壤侵蚀背景值/(t/(km ² ·a))	侵蚀模数/(t/(km ² ·a))	预测流失量/t
1	交通设施区	2500	26400	7193
2	风机基础区	1550	16500	825
3	弃渣场区	1450	28600	434
4	集电线路区	2300	9900	270
5	施工生产生活区	1300	17600	72
6	表土堆存场区	1250	17600	21

孟宪华^[15]以辽宁省康平县大富山风电场为例,分析了项目工程占地及影响区域(表3)。

表3 辽宁省康平县大富山风电场工程影响区面积
Table 3 Area affected by Dafushan Wind Field Project, Kangping County, Liaoning Province

排序	区域名称	影响面积/hm ²
1	道路工程	20.56
2	临时施工场地	19.10
3	发电机组区	5.97
4	升压站	0.52
5	输电线路	0.32

尹武君等^[16]以四川西南部某山区风电场为例,预测水土流失最多的是检修、施工道路占地及影响区,其次是吊装场地(发电机组区域)。

因此,山地风电场区域内水土流失以道路工程、发电机组区挖、填等扰动作业频繁为主,是水土流失防治的重点地段。集电线路、升压站和临时生活区地

区扰动作业范围及频次较小,为水土流失防治的次要地段。

1.2 时空分布不均性

在空间上,由于具备高质量的风能资源是风电建设场地最基本的条件,一般也只有在山脊及山脊线两侧才能满足要求,一般沿山脊线进行布置,所开发的风电场区域所占用的土地一般不是完整的一个坡面或者山头,占地面积大^[17],具有地域不完整性,由施工造成的水土流失在空间上分布不均。总体来说,在风机布设的山脊及进场道路两侧水土流失严重,山谷等地较轻。

在时间方面,风电场建设引起的水土流失主要发生在工程建设施工期^[18-19]。施工期所造成的水土流失具有突发性,在整个流失过程中水土流失有时轻微,有时非常剧烈^[20]。水土流失剧烈阶段主要发生在每年中的降雨集中期^[21]。特别是处于我国亚热带季风气候区的南方丘陵山区,年平均降雨量大,雨季集中。时段集中、强度大的降雨是造成水土流失的主要驱动因子^[22]。孟宪华^[15]通过在风电场布设固定和临时监测点,进行水土流失监测。监测结果显示侵蚀量较大的时段为每年的5—9月,此段为该地区的主要降雨时段,降雨冲刷下垫面,极易产生水土流失。刘强^[23]通过测钎法与降尘缸法对五凌鄯善风电场进行了5个月(2014年3—8月)的水土流失强度侵蚀监测。经监测发现,监测区水土流失状况与原地貌相比,有较明显的变化,反映出施工过程扰动、破坏了原来地表结构,增加了水土流失量,水土流失在各月呈现明显的变化不均的特征(图1)。

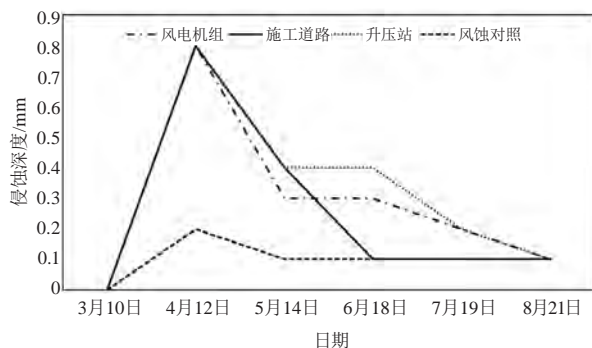


图1 风力侵蚀深度月变化^[23]

Fig. 1 Monthly variation in wind erosion depth^[23]

由于风电工程建设工期短,水土流失形成快^[24],主要流失时段主要集中在施工期^[25]。以云南大理某风电场水土保持监测结果来看^[26],整个项目的监测时段为准备期1个月,施工期1年,自然恢复期1年。监测结果显示,项目在整个建设过程中施工准备期、施工

期、自然恢复期,分别占到总水土流失量的比例为6.84%、83.96%、9.18%。魏宏^[27]通过将风电场划分为6个预测单元,预测了施工期及自然恢复期可能造成水土流失面积,结果发现,施工期新增水土流失量占新增总量的55.22%。因此,施工期产生的水土流失量大,是产生水土流失的重点时期,必须做好水土流失防治工作。

2 影响风电场水土流失关键问题分析

2.1 降雨的影响

2.1.1 降水对边坡稳定性影响

受风电场交通设施及风电机组开挖的影响,原有边坡地貌被部分或完全改变。受边坡的植被完整性、工程地质条件、岩土体性质、偶发的地震、周期性的降雨过程、地表水汇集和已有加固措施等因素的综合影响^[28],边坡变形的发展会变的非常复杂。

贾洪彪等^[29]研究了非饱和边坡在降雨作用下的稳定性。在短期强降水情况下,设计降水历时2 d,计算时长7 d,降水强度分别为40、60、100 mm/d。各种工况均为0~2 d为降水时间,3~7 d为无雨状态,短期降水作用后滑坡稳定性变化情况如图2所示。

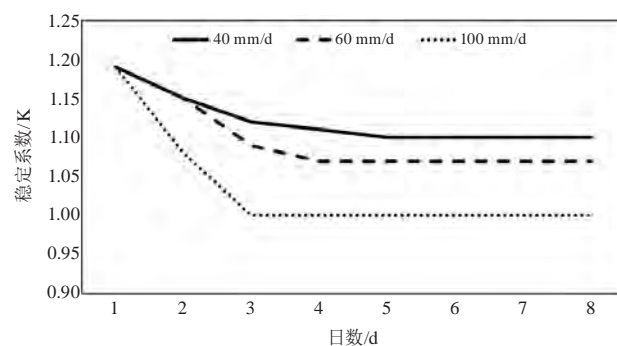


图2 短期降水作用后滑坡稳定性变化情况^[29]

Fig. 2 Changes of landslide stability after short-term precipitation^[29]

持续性降水情况下,分别设置20、40、60、80、100 mm/d共5种降水强度,降水时长均为5 d,滑坡稳定性变化情况如图3所示。

研究表明,降水时长为2 d时,滑坡稳定性系数在降水期间急剧下降,降水后经历波动调整,最后以每天约0.01的趋势上升;降水持续时间为5 d时,滑坡稳定性系数在降水后期下降速度变缓甚至保持平稳状态。

颜斌等^[30]研究了黄土边坡在降雨条件下的稳定性。研究表明边坡的变形破坏与降水存在密切联系,降水入渗作用促进了边坡变形破坏向不利的一面发展。以铜川市为例,该区滑坡、崩塌发生频率与降水周期对应(图4)。

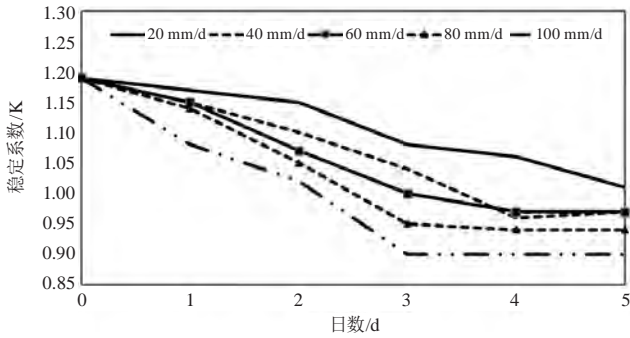


图3 持续降水作用下滑坡稳定性系数计算结果^[29]
Fig. 3 Calculated results of landslide stability coefficient under continuous precipitation^[29]

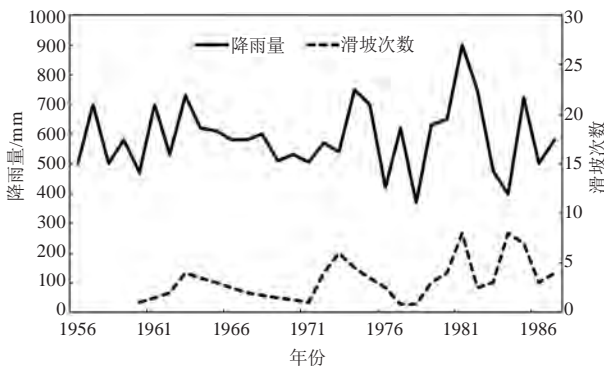


图4 铜川市区滑坡频率与降水关系^[30]
Fig. 4 Relationship between landslide frequency and precipitation in Tongchuan city^[30]

边坡安全系数 K 与土体含水量的关系如图5所示,安全系数 K 值随含水量增大而减小。

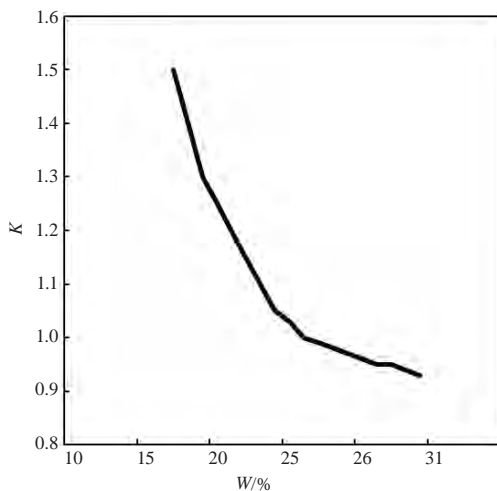


图5 坡体含水量与安全系数关系图^[30]
Fig. 5 Relationship between slope water content and safety factor^[30]

刘世波^[31]从两个阶段讨论了降水过程对边坡稳定性的影响:第一阶段,降水影响的主要是上层一定深度的土体,对边坡稳定性的影响主要是孔隙水压力的变化。在此阶段降水对边坡下滑力以及抗剪强度

影响是有限的。第二阶段是在持续降水条件下,经历时间长,渗流不断发展,对边坡内部岩土体产生较大影响。降水入渗对边坡稳定性的影响主要集中在此阶段。

2.1.2 降水对土壤侵蚀的影响

通过前面定性的分析得知,降雨是引发风电场水土流失的关键因子。至于降雨与土壤侵蚀程度之间的具体关系,需要进行定量分析。降雨侵蚀力是由降雨引起土壤侵蚀的潜在能力,也是表征降雨与径流对土壤侵蚀的影响,主要受雨量、雨强、雨型、降雨历时及频率的影响^[32]。研究并计算降雨侵蚀力,准确评估降雨对土壤侵蚀的影响,对风电场水土流失防治具有重要意义。

在降雨侵蚀力指标及模型建立方面,国外开展这方面研究较早。Wischmeier^[33]提出将次降雨总能量(E)与该次降雨 $I_{30\text{min}}$ (最大30 min雨强)的乘积 $R=EI_{30}$ 作为降雨侵蚀力指标;用Brown等^[34]建立了降雨侵蚀力公式,是一个幂函数公式,函数连续性好,物理意义明确。Richardson等^[35]利用日降水资料建立了日降雨模型,使得计算更为精确。

降雨侵蚀力计算模型也得到我国众多学者的验证。由于不同学者获取的降雨资料不同,许多学者在实际应用中对此模型进行了改进(表4)。

已有的模型中,大多以降雨量12 mm为侵蚀性降雨标准^[53-55]。但是,区域降雨侵蚀力模型的选择或确定需要结合当地的气候特征、降水特征、水土保持措施等进一步的深入研究后确定。

2.2 风电场水土流失强度预测

2.2.1 水土流失预测单元划分

根据风电场建设过程中不同功能区域,分为堆垫面(土质低堆垫面、土质高堆垫面)、开挖面(土质开挖面)、平台(升压站场地、道路路面)建设^[16, 56]。依照同一扰动类型的流失特点和流失强度基本一致、不同扰动类型的流失特点和流失强度明显不同的原则,有的研究人员在进行风电场水土流失强度预测时,分为4个预测单元进行:风机场地区、升压站地区、施工道路及直埋电缆用地区、施工及安装场地区^[57-58]。有的学者将预测单元划分为5个:施工道路、主厂区、风机区、施工生活区、弃渣区^[59-61]。也有的学者将预测单元划分为6个,即升压变电站、风机及箱式变压器、集电线路、道路工程、供电线路及施工生产生活区^[27]。

2.2.3 水土流失强度预测

风电场水土流失与环境条件密切相关。许多学

表4 部分学者提出的降雨侵蚀力计算模型
Table 4 Calculation model of rainfall erosion force proposed by some scholars

序号	模型	模型参数	来源
1	$R_c=0.1773P_tI_{10}$	P_t 为次降雨量 (mm); I_{10} 为次降雨的最大10 min雨强 (mm/h)	章文波等 ^[36]
2	$R_c = P_t I_{7.5}$	P_t 为次降雨量 (mm); $I_{7.5}$ 为次降雨最大7.5 min雨强 (mm/h)	Lal ^[37]
3	$R_c = 0.2088P_t^{1.732}$	P_t 为次降雨量 (mm)	郑海金等 ^[38]
4	$R_c = 0.2463P_t I_{30}$	P_t 为次降雨量 (mm); I_{30} 为次降雨的最大30 min雨强 (mm/h)	刘宝元等 ^[39]
5	$R_c = 0.0518P_t^2 + 2.5406P_t + 9.7323$	P_t 为次降雨量 (mm), 且 $p > 12.7$ mm	林金石等 ^[40]
6	$R_c = 0.344P_t I_{60}$	P_t 为次降雨量 (mm); I_{60} 为次降雨的最大60 min雨强 (mm/h)	顾璟冉等 ^[41]
7	$R_j = \alpha[1 + \eta \cos(2\pi f j + \omega)] \sum_{k=1}^N P_d^{\beta}$	R_j 为j月份降雨侵蚀力MJ·mm/(hm ² ·h·a); P_d 为日降雨量 (mm); P_0 为临界降雨量 (mm); N 为年降雨量超过临界降雨量的天数 (d); $\alpha, \beta, \eta, \omega, f$ 为模型参数	Yu等 ^[42]
8	$R_j = 0.184 \sum_{j=1}^k (P_d I_{10d})$	R_j 为半月降雨侵蚀力MJ·mm/(hm ² ·h·a); P_d 为≥12 mm的日降雨量 (mm); I_{10d} 为日10 min最大雨强 (mm/h); k 为半月内的天数 (d); j 为日序号	谢云等 ^[43]
9	$R_j = 0.0043 \left[\frac{\pi}{12} (j-1) \right] \sum_{k=1}^N P_d^{1.0}$ $P_d > P_0$	R_j 为j月份降雨侵蚀力; P_d 为日降雨量 (mm); P_0 为临界降雨量 (12.7 mm); N 为月内大于临界降雨量的天数 (d); j 为月序	郭新波等 ^[44]
10	$R_j = \alpha \sum_{j=1}^k (P_d)^{\beta}$	R_j 为半月的侵蚀力MJ·mm/(hm ² ·h); k 为半月时段内的日数 (d); P_d 为日雨量 (mm) ($P_d \geq 12$ mm); β 是模型参数; P_{d12} 为日雨量≥12mm的日平均雨量 (mm); P_{y12} 为日雨量≥12mm的年平均雨量 (mm)	章文波等 ^[45]
11	$R_d = 0.238P_d^{1.810}$	R_d 为日降雨侵蚀力; MJ·mm/(hm ² ·h); P_d 为日降雨量 (mm)	马良等 ^[46]
12	$R_j = 0.429 \left\{ 1 + 0.328 \sin \sin \left[\frac{\pi}{12} (j-1) \right] \right\} \sum_{k=1}^n P_d^{1.47}$	R_j 为j月份降雨侵蚀力MJ·mm/(hm ² ·h); P_d 为日降雨量 (mm); P_0 为临界降雨量 (12mm); N 为一个月内大于临界降雨量的天数 (d); j 为月序	史志华等 ^[47]
13	$R_d = 0.3522P_d (P_{60\min})_d$	R_d 为日降雨侵蚀力MJ·mm/(hm ² ·h); P_d 为日降雨量 (mm); ($P_{60\min})_d$ 为日最大60 min雨量 (mm)	Xie等 ^[48]
14	$R_y = 1.2157 \sum_{j=1}^{12} 10^{1.5 \log \frac{P_j^2}{P_y} - 0.8188}$	R_y 为年降雨侵蚀力; P_j 为第j月降雨量 (mm); P_y 为年降雨量 (mm)	马志尊 ^[49]
15	$R_y = \sum_{j=1}^{12} 0.0199 P_j^{1.5682}$	R_y 为年降雨侵蚀力; P_j 为各月大于20 mm月降雨量 (mm)	黄炎和等 ^[50]
16	$R_y = aF^b$ $F = \sum_{j=1}^{12} \left(\frac{P_j^2}{P_y} \right)$	R_y 为年降雨侵蚀力MJ·mm/(hm ² ·h·a), F 为修正Fournier指数; P_y 为年降水量 (mm); P_j 为第j月降水量 (mm); a, b 为模型参数	Renard等 ^[51]
17	$R_y = \sum_{j=1}^{12} 0.0125 P_j^{1.6296}$	R_y 为年降雨侵蚀力 (J/m ²); P_j 为第j月降雨量 (mm)	吴素业 ^[52]

者从影响水土流失的气象因子、植被因子及地形因子进行了研究分析。气象因子方面，主要研究包括，前文提到的利用降雨资料计算并分析了区域范围内降雨侵蚀力的情况；用水文数据分析了相关区域水沙时空变化特征^[62-63]；用降水资料分析了不同坡度、土地利用模式和降水变化的水土流失分异^[64]。植被因子是影响水土流失的主要因子。许多水土流失预测模型中，植被因子是其关键参数^[65-66]。在水土保持的研究中，Linda等^[67]、Jain等^[68]、钟红平等^[69]、郭金停等^[70]等采用NDVI指数作为植被因子指数。地形因子方面，已有的研究基本采用了两种定量评价区域尺度土壤侵蚀的指标。一种根据侵蚀地貌学理论拟订替代指标^[71]，间接表示坡度的陡缓。二是对基于DEM提取的坡度进行变换，能更为精确的反映地形的起伏情况。

对于风电工程中造成的水土流失量计算及预测，普遍参照《水土保持综合治理—效益计算方法》(GB/T 15774-2008)^[72]。结合规定，掌握的工程建设

对地表、植被的扰动情况，废弃物的组成、堆放位置和形式等情况^[73]，采用类比法结合数学模型法预测造成的水土流失量。

风电场不同区域水土流失量可按下面的公式计算^[74-75]：

$$W = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^3 F_i \times M_{ik} \times T_{ik} \quad (1)$$

新增土壤流失量按下式计算：

$$\Delta W = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^3 F_i \times \Delta M_{ik} \times T_{ik},$$

$$\Delta M_{ik} = \frac{(M_{ik} - M_{i0}) + |M_{ik} - M_{i0}|}{2} \quad (2)$$

式中， W 为扰动地表土壤流失量； ΔW 为扰动地表新增土壤流失量； n 为预测单元，1,2,3,...,n; k 为预测时段（1表示施工准备期，2表示施工期，3表示自然恢复期）； F_i 为第*i*个预测单元的面积 (km²)； M_{ik} 为扰动后不同预测单元不同时间段的土壤侵蚀模数 (t/(km²·a))； ΔM_{ik} 为不同单元各时段的土壤侵蚀模

数 ($t/(km^2 \cdot a)$)； M_{i0} 为扰动前不同预测单元不同时段
的土壤侵蚀模数 ($t/(km^2 \cdot a)$)； T_{ik} 为预测时段。

通过对风电场水土流失量的预测，对建设过程中可能产生的水土流失及危害，对治理的重点防治时段、防治措施、水土保持监测等提供依据，采取有效地治理措施，减少水土流失。

2.2.2 土壤侵蚀模数的确定

作为风电场水土流失强度预测公式的重要因子，需要对风电场区域扰动前后的土壤侵蚀模数进行确定。土壤侵蚀模数是指单位时段内单位水平投影面积上的土壤侵蚀总量。土壤侵蚀模数包括施工扰动前（原生）土壤侵蚀模数、施工过程中的土壤侵蚀模数和施工扰动后（恢复期）土壤侵蚀模数^[56]。

对施工扰动前土壤侵蚀模数的确定，多是根据对研究区水土保持规划、水土流失现状等资料，以及对开发区域内未受干扰区域水土流失情况的调查，按照《土壤侵蚀分类分级标准》（SL190-2007）^[76]风蚀强度分级表，确定各预测单元施工前的原始土壤侵蚀强度，获得各区域的土壤侵蚀模数本底值。工程建设期和扰动后土壤侵蚀模数采用类比工程法确定土壤模数。

也有学者通过对土壤流失量进行直接监测，获得更为精确的土壤侵蚀模数。王文涛^[77]通过测钎法在风电场各区域内按原地貌、施工期、扰动后布设监测点，监测土壤流失量；王继增等^[78]在开发项目中综合采用了标桩法、径流小区法、侵蚀沟量测法、人工模拟降雨法对施工过程中的不同单元的土壤侵蚀模数进行了监测。欧阳力等^[79]针对不同扰动单元的流失特点，对不同地表扰动类型，分别采用标桩法、侵蚀沟样方测量法、简易径流小区法以及人工模拟降雨方法进行多点位、多频次的监测，经综合分析得出不同扰动类型的侵蚀强度；王利军^[80]通过沟槽法、测钎法测量了内蒙古某风电场的土壤侵蚀模数。

3 结论与讨论

本文回顾了山区风电场水土流失特点、影响风电场水土流失关键因子等方面的相关研究成果，并对其进行了总结，主要结论如下：

1) 山区风电场水土流失具有地域不完整性及扰动多样性的特点，道路施工区、风电机组建设区是水土流失的重点区域；水土流失呈现时空分布不均性特点，水土流失时段主要集中在施工期，且水土流失剧烈阶段主要发生在每年中的降雨集中期

2) 降雨是影响风电场水土流失的最关键因子，滑坡稳定性系数在降水期间急剧下降，降水入渗作用

促进了边坡变形破坏向不利的一面发展，容易引起水土流失及边坡不稳；降雨侵蚀力指标与降雨量及雨强有关，按照获取气象资料的不同，目前主要采用月降雨量及日降雨量来分别估算降雨侵蚀力

3) 在进行山区风电场水土流失强度预测时，将整个预测区域划分为4~6个单元，确定各预测单元工程扰动前、施工期、扰动后的土壤侵蚀模数，采用类比法结合数学模型法预测造成的水土流失量。

由于内陆风电场大部建在山区，而山区气候复杂多变，局地小气候特征明显。降雨、气温等气象因子不具有规律性，需要综合考虑气象、地理、土壤、植被等多种因素，开展风电场水土流失风险综合区划，科学、合理的开发山区风能资源。

参考文献

- [1] 智研咨询集团. 2019—2025年中国风力发电行业市场运营模式分析及发展趋势预测报告. 中国产业信息网, 2018, 10: 5.
- [2] 北极星电力网新闻中心. 2018年中国风力发电、太阳能发电等行业概况和市场前景分析. <http://news.bjx.com.cn/html/20180601/902518.shtml>.
- [3] 张华, 刘志远, 朱晓玲. 山地风电场微观选址复核的研究. 现代电力, 2014, 31(4): 19-23.
- [4] 梁改革, 郝连安, 徐洪霞, 等. 山地风电场工程水土保持与生态景观设计初探. 中国水土保持, 2016, 12: 37-39.
- [5] 柴亚凡, 周波, 罗进选, 等. 河西走廊风电场道路建设探讨. 中国水土保持, 2018, 7: 41-43.
- [6] 贾志军, 李江华. 沿海地区风电场项目水土保持措施设计初探. 河北水利, 2017, 12: 28-29.
- [7] 高圭, 刘伟民, 李君, 等. 宁夏南部山区生态修复工程建设初探. 水土保持科技情报, 2004, 6: 40-41.
- [8] 张立存, 黄成杰, 应恩宇. 江西省山地风电场项目水土保持工作存在的问题. 中国水土保持, 2018, 5: 12-13.
- [9] 岳红琴. 宁夏丘陵区风电场建设水土流失特征分析及对策研究. 水土保持应用技术, 2014, 2: 34-36.
- [10] 彭波. 广西陆上风电场开发存在的环境问题及对策研究. 环境科学与管理, 2016, 2: 46-49.
- [11] 董宇航. 桂东普洛风电场工程水土保持影响分析及防治措施. 湖南水利水电, 2018, 3: 46-48.
- [12] 钱怡伶. 湖南山地风电场开发对区域环境的影响及生态恢复措施研究. 中国资源综合利用, 2018, 4: 117-119.
- [13] 陈俊松, 文毅. 山地风电场水土流失特点及防治对策. 亚热带水土保持, 2016, 28(4): 51-53.
- [14] 王蔚. 南方山地风电场水土流失特点及其防治措施体系研究: 以九泽水风电场工程为例. 长沙: 湖南农业大学硕士学位论文, 2014.
- [15] 孟宪华. 风电场工程水土流失规律及其防治技术研究. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 2010.
- [16] 尹武君, 王健, 陈金龙. 四川西南部山区风电场工程水土流失预测浅析. 四川环境, 2014, 33(3): 113-119.
- [17] 王恒威. 云南省风电场建设中水土保持设施验收问题与对策. 中国高新科技, 2018, 1: 88-90.
- [18] 李程碑. 南方红壤丘陵区风电场项目水土保持措施布局解析. 中国人口·资源与环境, 2017, 27(5): 58-60.
- [19] 唐琦. 湖南省山区风电场项目水土保持重点防治区防治措施探讨. 湖南水利水电, 2016, 4: 86-88.
- [20] 荀辉. 风电场工程水土流失特点及防治措施. 南昌: 南昌大学硕士学位论文, 2017.
- [21] 万剑尘, 蒋娟, 周春波, 等. 环鄱阳湖风沙区风电场工程水土保持措施及建议: 以老爷庙风电场为例. 江西水利科技, 2015, 41 (8): 302-305.
- [22] 聂文波, 张利洁, 熊卫平, 等. 山区风电场边坡水土流失防治措施研究. 土工基础, 2017, 31(5): 572-575.

- [23] 刘强. 风电场水土保持监测浅析: 以五凌都善风电场一期工程为例. 亚热带水土保持, 2015, 27(3): 67-70.
- [24] 范修其, 郑春明. 重点工程建设水土流失防护初探. 浙江水利科技, 2001, 4: 16-17.
- [25] 温林子. 山地风电场弃渣场选址与设计探讨. 水力发电, 2018, 7: 100-102.
- [26] 陈俊松, 文毅. 山地风电场水土流失特点及防治对策. 亚热带水土保持, 2016, 28(4): 51-53.
- [27] 魏宏. 100 MW 风电项目水土流失量预测. 内蒙古水利, 2016, 11: 37-38.
- [28] 万保华, 赵毅鑫, 王宁, 等. 地震和降水对边坡稳定性的影响. 世界地震工程, 2015, 31, 4: 165-169.
- [29] 贾洪彪, 徐勇, 许琦, 等. 降水作用下非饱和土边坡稳定性研究. 人民黄河, 2016, 38(6): 141-144.
- [30] 颜斌, 倪万魁, 刘海松. 黄土边坡降水入渗规律及其稳定性研究. 水文地质工程地质, 2009, 3: 77-81.
- [31] 刘世波. 降雨入渗条件下红粘土边坡稳定性研究. 青岛: 青岛理工大学硕士学位论文, 2014.
- [32] 刘灵. 全球气候变化背景下江西省降雨侵蚀力研究. 江西农业大学硕士学位论文, 2013.
- [33] Wischmeier W H. A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation. Soil Science Society of America Journal, 1959, 23(3): 246-249.
- [34] [34]Brown L C, Foster G R. Storm erosivity using idealized intensity distributions. Trans.ASAE, 1987(30): 379-386.
- [35] Richardson C W, Foster G R, Wright D A. Estimation of erosion index from daily rainfall amount. Transactions American Society of Agricultural Engineers, 1983, 26: 153-157.
- [36] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究. 地理科学, 2002, 22(6): 705-711.
- [37] Lal R. Soil erosion on Alfisols in Western Nigeria (III): effects of rainfall characteristics. Geoderma, 1976, 16(5): 389-401.
- [38] 郑海金, 杨洁, 左长清, 等. 红壤坡地侵蚀性降雨及降雨动能分析. 水土保持研究, 2009, 16(3): 30-33.
- [39] 刘宝元, 毕小刚, 符素华, 等. 北京土壤流失方程. 北京: 科学出版社, 2010.
- [40] 林金石, 张黎明, 于东升, 等. 我国南方地区降雨侵蚀力特征及简易算法研究: 以江西省鹰潭地区为例. 水土保持通报, 2011, 31(2): 112-116.
- [41] 顾璟冉, 张兴奇, 顾礼彬, 等. 黔西高原地区降雨侵蚀力的简易算法. 水土保持通报, 2016, 36(2): 204-208.
- [42] Yu B, Rosewell C J. An assessment of a daily rainfall erosivity model for New South Wales. Australian Journal of Soil Research, 1996, 34(1): 139-152.
- [43] [43]谢云, 章文波, 刘宝元. 用日雨量和雨强计算降雨侵蚀力. 水土保持通报, 2001, 21(6): 53-56.
- [44] 郭新波, 王兆骞, 张如良. 浙江红壤区降雨侵蚀力季节分布与日雨量模型研究. 水土保持学报, 2001, 15(3): 35-37.
- [45] 章文波, 谢云, 刘宝元. 用雨量和雨强计算次降雨侵蚀力. 地理研究, 2002, 21(3): 384-390.
- [46] 马良, 左长清, 邱国玉. 赣北红壤坡地侵蚀性降雨的特征分析. 水土保持通报, 2010, 30(1): 74-79.
- [47] 史志华, 郭国先, 曾之俊, 等. 武汉降雨侵蚀力特征与日降雨侵蚀力模型研究. 中国水土保持, 2006(1): 22-24.
- [48] Xie Y, Yin S Q, Liu B Y, et al. Models for estimating daily rainfall erosivity in China. Journal of Hydrology, 2016, 535: 547-558.
- [49] 马志尊. 应用卫星影像估算通用土壤流失方程各因子值方法的探讨. 中国水土保持, 1989(3): 26-29.
- [50] 黄炎和, 卢程隆, 郑添发, 等. 闽东南降雨侵蚀力指标 R 值的研究. 水土保持学报, 1992, 6(4): 1-5.
- [51] Renard K G, Freimund J R. Using monthly precipitation data to estimate the R-factor in the revised USLE. Journal of Hydrology, 1994, 157(1/4): 287-306.
- [52] 吴素业. 安徽大别山区降雨侵蚀力简化算法与时空分布规律. 中国水土保持, 1994(4): 12-13.
- [53] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究. 地理科学, 2002, 22(6): 705-711.
- [54] 刘斌涛, 陶和平, 宋春风, 等. 1960—2009年中国降雨侵蚀力的时空变化趋势. 地理研究, 2013, 32(2): 245-256.
- [55] 赖成光, 陈晓宏, 王兆礼, 等. 珠江流域1960—2012年降雨侵蚀力时空变化特征. 农业工程学报, 2015, 31(8): 159-167.
- [56] 魏志军. 利川安家坝风电场工程水土保持措施设计. 杨凌: 西北农林科技大学硕士学位论文, 2014.
- [57] 詹凌晏. 福建省平潭青峰风电场工程水土流失监测. 亚热带水土保持, 2015, 27(1): 65-67.
- [58] 邓香平, 王敬斌, 应恩宇. 江西屏山风电场工程水土流失预测及分析. 南昌工程学院学报, 2014, 33(4): 67-70.
- [59] 陈艳梅, 宋玲玲. 河北省坝上生态脆弱区风电场建设施工期水土流失预测. 安徽农业科学, 2006, 34(19): 5001-5002.
- [60] 王彦龙. 某风电场水土流失特点及防治措施. 黑龙江水利科技, 2012, 40(3): 258-259.
- [61] 苏明娟, 陈子平, 王超, 等. 广东省山区风电项目水土保持方案编制浅析. 亚热带水土保持, 2018, 30(2): 53-55.
- [62] 王万忠, 焦菊英. 黄土高原侵蚀产沙强度的时空变化特征. 地理学报, 2002, 57(2): 210-217.
- [63] 王万忠, 焦菊英, 马丽梅, 等. 黄土高原不同侵蚀类型区侵蚀产沙强度变化及其治理目标. 水土保持通报, 2012, 32(5): 1-7.
- [64] 黄志霖, 傅伯杰, 陈利顶. 黄土丘陵区不同坡度、土地利用类型与降水变化的水土流失分异. 中国水土保持科学, 2005, 3(4): 11-18.
- [65] 幸定武, 高建恩. WEPP在黄土高原坡面径流调控中的适用性研究. 人民黄河, 2008, 30(4): 66-67.
- [66] 陈燕红, 潘文斌, 蔡莞颖. 基于RUSLE的流域土壤侵蚀敏感性评价: 以福建省吉溪流域为例. 山地学报, 2007, 25(4): 490-496.
- [67] Cyr L, Ferdinand B, Alain P. Vegetation indices derived from remote sensing for an estimation of soil protection against water erosion. Ecological Modelling, 1995, 79: 277-285.
- [68] Jain S K, Goel M K. Assessing the vulnerability to soil erosion of the Ukai Dam catchments using remote sensing and GIS. International Association of Scientific Hydrology, 2002, 47(1): 31-40.
- [69] 钟红平, 王宏志. 2007—2016年湖北省归一化植被指数时空变化特征分析. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2018, 52(4): 582-588.
- [70] 郭金停, 胡远满, 熊在平, 等. 中国东北多年冻土区植被生长季NDVI时空变化及其对气候变化的响应. 应用生态学报, 2017, 28(8): 2413-2422.
- [71] 刘新华, 杨勤科, 李锐. 中国地形起伏度的提取及在水土流失定量评价中应用. 水土保持通报, 2001, 21(1): 57-59.
- [72] 水利部水土保持司, 等. 水土保持综合治理一效益计算方法 (GB/T 15774-2008). 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [73] 李亚斐. 浅谈国电新疆托里玛依塔斯风电四期项目水土流失预测. 中国水运, 2015, 15(9): 163-164.
- [74] 陈玮, 史玉柱, 刘刚, 等. 湖北省49.5MW风电场水土流失分析及保持方案研究. 绿色科技, 2014, 1: 9-11.
- [75] 刘明瑶. 中广核阜新万德号风电场工程水土保持研究. 长春: 吉林大学硕士学位论文, 2015.
- [76] 中华人民共和国水利部. 土壤侵蚀分类分级标准. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [77] 王文涛. 对甘肃河西风电场项目土壤流失量监测的探讨. 农业科技与信息, 2014, 13: 46-48.
- [78] 王继增, 邓岚, 郭新波. 开发建设项目水土保持中土壤侵蚀模数监测方法探讨: 以“东深供水改造工程水土保持监测”项目为例. 水土保持研究, 2006, 13(1): 21-23.
- [79] 欧阳力, 严尔梅. 风电场建设过程中的水土保持监测方法. 水土保持应用技术, 2010, 5: 37-39.
- [80] 王利军. 浅谈风电场建设过程中水土流失监测方法的应用. 内蒙古水利, 2016, 12: 34-35.