

化隆县山地风能资源评估

李 明

海东市气象局, 青海 海东

收稿日期: 2026年7月6日; 录用日期: 2026年7月30日; 发布日期: 2026年8月17日

摘 要

根据化隆县现有自动气象观测站,选取山地有自动气象观测站的站点分别为德恒隆乡德一村气象观测站、沙连堡乡政府气象观测站、阿什努乡阿二村气象观测站。利用2023年3月至2025年2月自动气象站测风数据、气压数据、气温数据,根据GB/T 18710-2002风电场风能资源评估方法进行风能的评估,结果表明:德恒隆乡德一村、沙连堡乡政府、阿什努乡阿二村年平均风功率密度在 $11.5\sim 18.7\text{ w/m}^2$,三站点风功率密度等级为1级。德恒隆乡德一村、沙连堡乡政府2023~2024年四季、全年主导风向均为ESE,风向高度集中。阿什努乡阿二村2023年春夏主ESE、秋冬主WNW,全年主WNW;2024年春夏秋主ESE、冬季主WNW,全年主ESE,ESE风向相对集中。三站点全年有效风速时数在3000 h以下,频率在35%以下,可发电小时数低。

关键词

风能资源, 山地, 风功率密度, 有效风速小时数

Wind Energy Resource Assessment of Mountainous Areas in Hualong County

Ming Li

Hualong County Meteorological Bureau, Haidong Qinghai

Received: July 6, 2026; accepted: July 30, 2026; published: August 17, 2026

Abstract

Based on the existing automatic meteorological observation stations in Hualong County, three mountainous stations equipped with automatic meteorological equipment were selected, namely Deyi Village Meteorological Station of Dehenglong Township, Shalianbao Township Government

Meteorological Station, and A'er Village Meteorological Station of Ashinu Township. Wind, air pressure and temperature data recorded by the automatic weather stations from March 2023 to February 2025 were adopted for wind energy assessment in accordance with the Methods of Wind Farm Wind Energy Resource Assessment (GB/T 18710-2002). The results show that the annual average wind power density ranges from 11.5 W/m² to 18.7 W/m² across the three sites, all classified as Grade 1 in wind power density rating. Deyi Village (Dehenglong Township) and Shalianbao Township Government Station feature ESE as the prevailing wind direction in all four seasons and annually during 2023~2024, with highly concentrated wind directions. At A'er Village (Ashinu Township), ESE prevailed in spring and summer while WNW dominated autumn and winter in 2023, resulting in an annual prevailing direction of WNW. In 2024, ESE prevailed in spring, summer and autumn, and WNW in winter, with ESE as the annual prevailing wind direction and relatively concentrated occurrence. The annual effective wind speed hours at the three stations are less than 3000 hours, corresponding to a frequency below 35%, indicating low hours available for power generation.

Keywords

Wind Energy Resources, Mountainous Area, Wind Power Density, Effective Wind Speed Hours

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球对清洁能源需求的不断增长，风能作为一种清洁、可再生的能源，在能源结构转型中扮演着至关重要的角色。黄梅丽[1]等对广西山地风能资源开发利用可行性分析以大容山为例。田松涛[2]对高海拔区域复杂山地地形的风能资源进行了评估。王强[3]等对贵州山地地区风力发电技术发展进行了探讨。罗红磊[4]等以玉林天堂顶为例进行了山地风能资源评估。也有不同学者用不同的方法对风能资源进行了评估研究[5]-[9]。化隆县位于青海省东部黄土高原与青藏高原过渡地带，境内地形复杂多样，以山地为主，北部为拉脊山余脉——青沙山，地势由西北向东南倾斜，中南部多分布南北走向的山脉，地势复杂，山地起伏大，沟壑纵横，形成了众多独特的地形地貌，如高山峡谷、山脊等，这些复杂的地形对当地的风向风速分布产生了显著影响，具有丰富的风能资源开发潜力。准确评估化隆县山地风能资源，对于科学规划和合理开发当地风能，推动区域经济可持续发展、优化能源结构、促进生态环境保护具有重要意义。通过系统分析区域自动气象站采集的风向风速数据，能够为化隆县风能资源开发提供可靠的科学依据，助力风电项目的高效规划与建设。

2. 资料与方法

根据化隆县现有自动气象观测站，选取山地有自动气象站的站点分别为德恒隆乡德一村气象观测站(经度: 102°8'E、纬度: 35°58'N、海拔: 2908 m)、沙连堡乡政府气象观测站(经度: 102°6'E、纬度: 36°08'N、海拔: 2975 m)、阿什努乡阿二村气象观测站(经度: 102°12'E、纬度: 36°02'N、海拔: 2828 m)，三站点下垫面类型均为山地，三站点风杆高度均为 10 m。利用 2023 年 3 月至 2025 年 2 月自动气象站测风数据、气压数据、气温数据，依据 GB/T 18710-2002 风电场风能资源评估方法[10]，进行风能的评估测算。春夏秋冬四季分别取 3~5 月、6~8 月、9~11 月和 12 月~翌年 2 月。

3. 风能资源分析

3.1. 空气密度

德恒隆乡德一村月密度变化在 0.866~0.943 kg/m³ (图 1)、沙连堡乡政府月密度变化在 0.861~0.934 kg/m³ (图 2)、阿什努乡阿二村月密度变化在 0.867~0.945 kg/m³ (图 3); 由于空气具有热胀冷缩的特性, 因此在气温高的 7 月、8 月空气密度最小, 在气温低的 1 月、12 月空气密度最大。德恒隆乡德一村 2023 年、2024 年年平均空气密度分别为 0.901 kg/m³、0.900 kg/m³, 沙连堡乡政府 2023 年、2024 年年平均空气密度分别为 0.894 kg/m³、0.894 kg/m³, 阿什努乡阿二村 2023 年、2024 年年平均空气密度分别为 0.901 kg/m³、0.900 kg/m³。

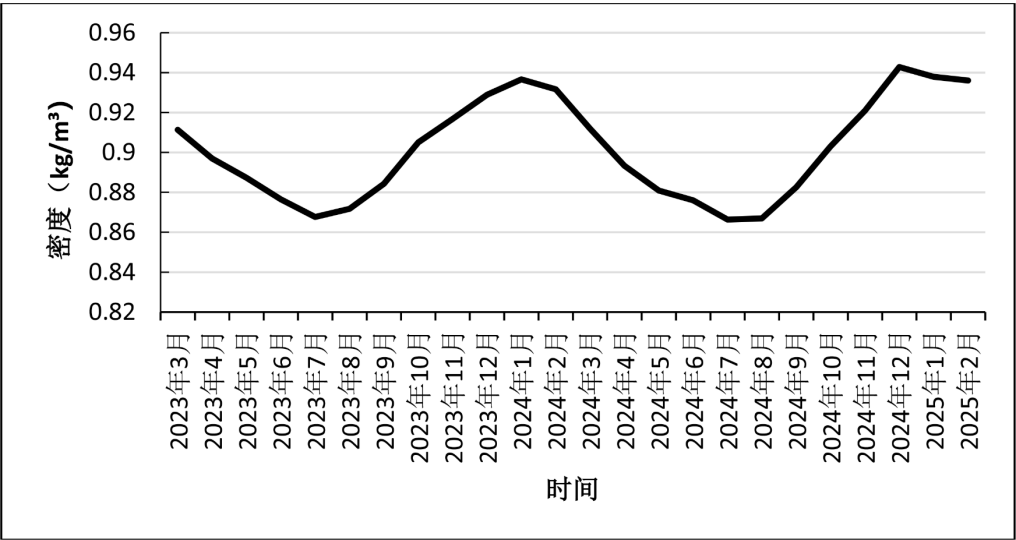


Figure 1. Monthly variation chart of density in Deyi village, Dehenglong township
图 1. 德恒隆乡德一村密度月变化图

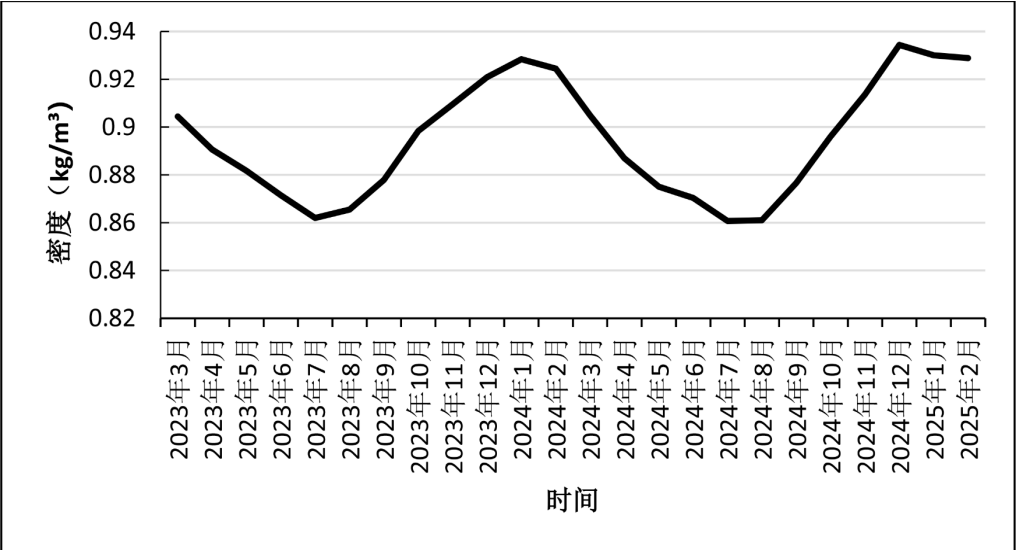


Figure 2. Monthly density variation map of Shalianbao township
图 2. 沙连堡乡政府密度月变化图

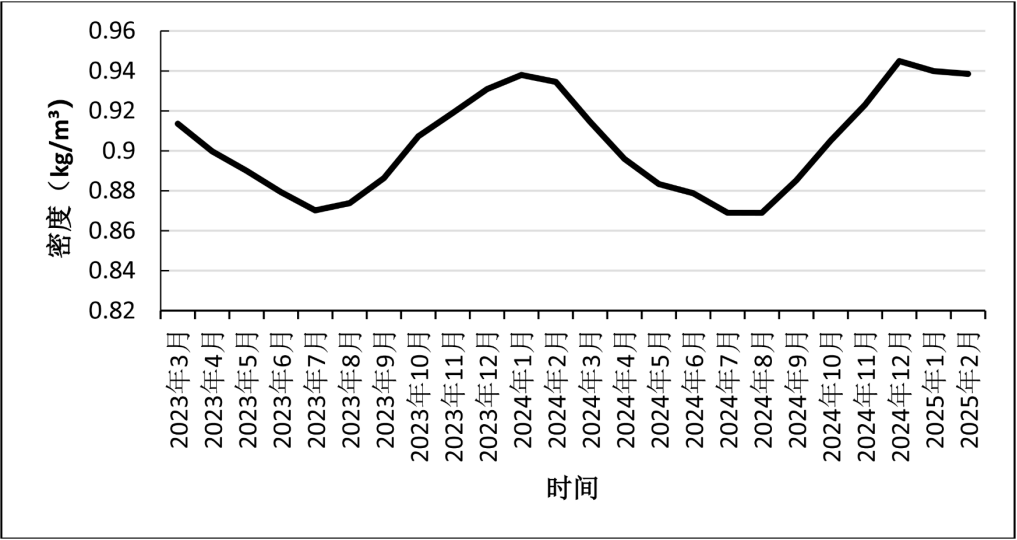


Figure 3. Monthly density variation graph, A'er Village, Ashinu township
图 3. 阿什努乡阿二村密度月变化图

3.2. 月、年风速风功率密度

2023 年 3 月到 2025 年 2 月德恒隆乡德一村各月平均风速在 2.0~3.1 m/s，风功率密度在 5.8~31.7 w/m² (图 4)，2023 年和 2024 年风功率密度分别为 13.4 w/m²、11.5 w/m²。沙连堡乡政府各月平均风速在 2.0~3.4 m/s，风功率密度在 7.2~43.0 w/m² (图 5)，2023 年和 2024 年风功率密度分别为 18.5 w/m²、14.1 w/m²。阿什努乡阿二村各月平均风速在 1.4~2.9 m/s，风功率密度在 3.3~42.7 w/m² (图 6)，2023 年和 2024 年风功率密度分别为 18.7 w/m²、13.5 w/m²。三乡镇风功率密度 ≤ 100 w/m²，风功率密度等级为 1 级。化隆地区春季与冬季冷空气活动频繁，山地裸坡摩擦力小、地势开阔，高空动量易下传，使得冬春季风速显著偏大；夏季区域受河谷暖湿气流控制，局地山谷风环流复杂，整体风速偏弱，形成冬大风、夏小风的季节规律。

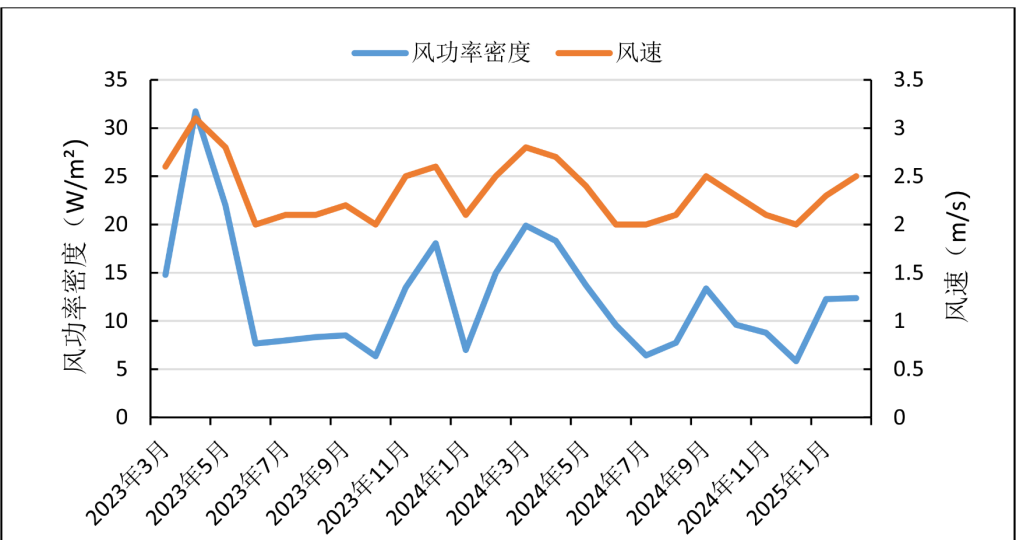


Figure 4. Monthly variation of wind speed and wind power density in Deyi village, Dehenglong township
图 4. 德恒隆乡德一村风速和风功率密度月变化图

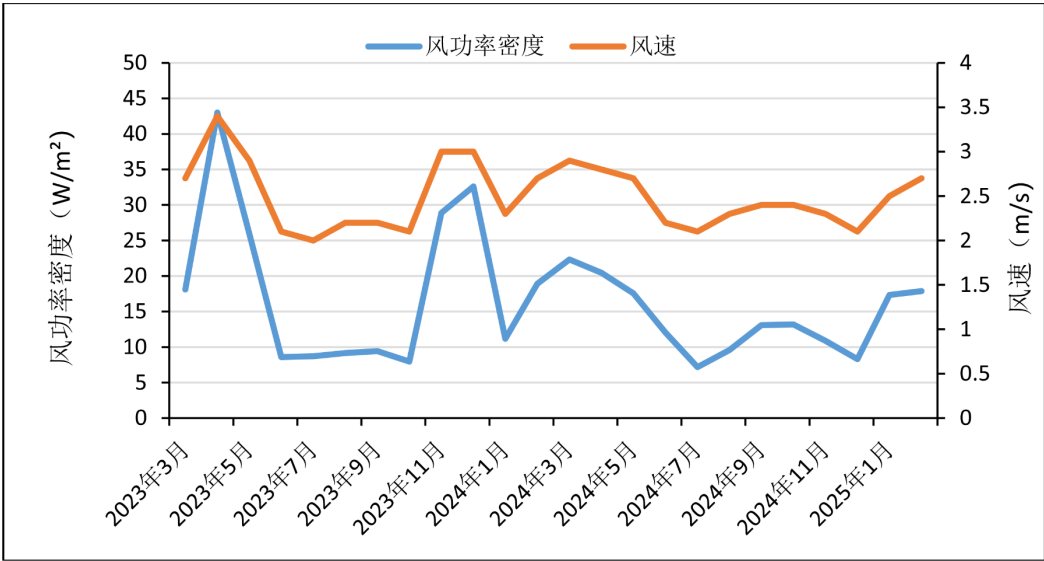


Figure 5. Monthly variation of wind speed and wind power density at Shalianbao township
图 5. 沙连堡乡政府风速和风功率密度月变化图

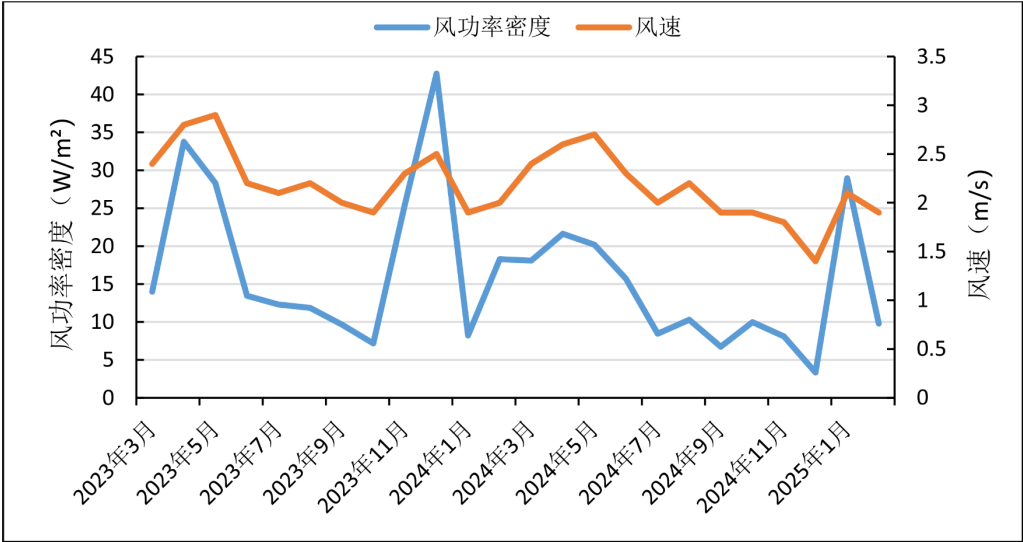


Figure 6. Monthly variation of wind speed and wind power density in A'er village, Ashinu township
图 6. 阿什努乡阿二村风速和风功率密度月变化图

3.3. 有效时数和频率统计

统计有效风速 3~25 m/s。2023 年德恒隆乡德一村有效时数 2199 h，频率 25%，沙连堡乡政府有效时数 2929 h，频率 33%，阿什努乡阿二村有效时数 2028 h，频率 23%。2024 年德恒隆乡德一村有效时数 2104 h，频率 24%，沙连堡乡政府有效时数 2669 h，频率 30%，阿什努乡阿二村有效时数 1773 h，频率 20%。有效实数较低，不利于发电。

3.4. 风向分布及频率特征

实践证明，在风速不变的情况下，风向的变化对风力机的发电效率有着重要作用，在风向较稳定、盛行风向较集中的地方，其发电效率将提高。从德恒隆乡德一村四季及全年风向玫瑰图(图 7~10)可以看

出, 风向较稳定和集中, 2023 年春夏秋冬的主导风向都为 ESE, ESE 方位的频率分别为 30.1%、27.8%、29.5%、24.3%。2024 年春夏秋冬的主导风向都为 ESE, ESE 方位的频率分别为 32.9%、32.4%、34.8%、32.7%。2024 年较 2023 年相比 ESE 方位的频率有所提高, 冬季最为明显。2023 年的主导风向为 ESE, ESE 方位的频率为 28.1%, 次主导风向为 WNW, WNW 方位的频率为 16.9%。2024 年的主导风向为 ESE, ESE 方位的频率为 33.2%, 次主导风向为 SE, SE 方位的频率为 17.7%。综合来看德计德恒隆乡德一村一年四季盛行 ESE 风, 主导风向较集中, 因此发电效率较高。

从沙连堡乡政府四季及全年风玫瑰图(图 11~14)可以看出, 风向较稳定和集中, 2023 年春夏秋冬的

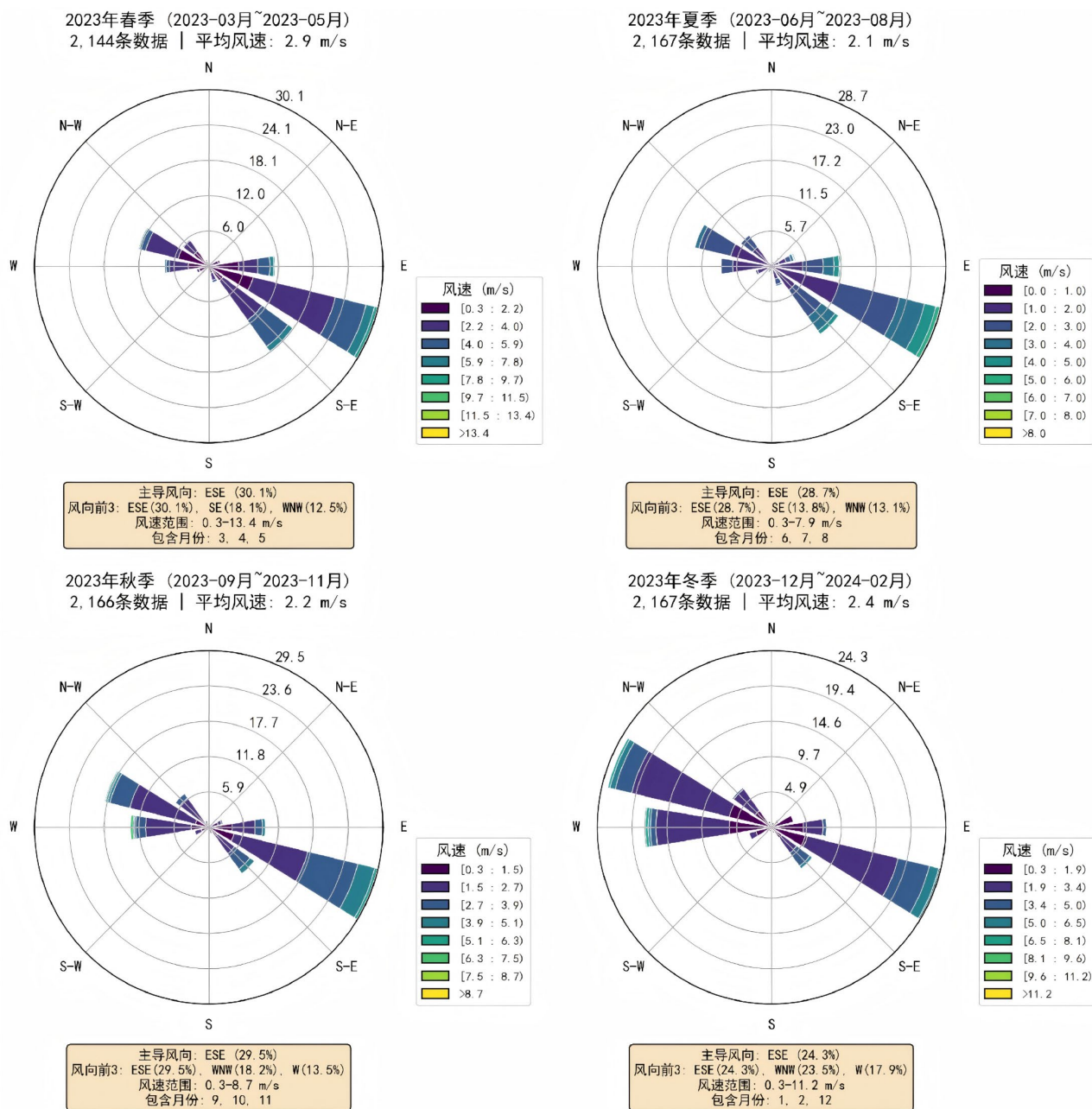


Figure 7. Four-season wind rose diagram of Deyi village, Dehenglong township, 2023

图 7. 2023 年德恒隆乡德一村四季风玫瑰图

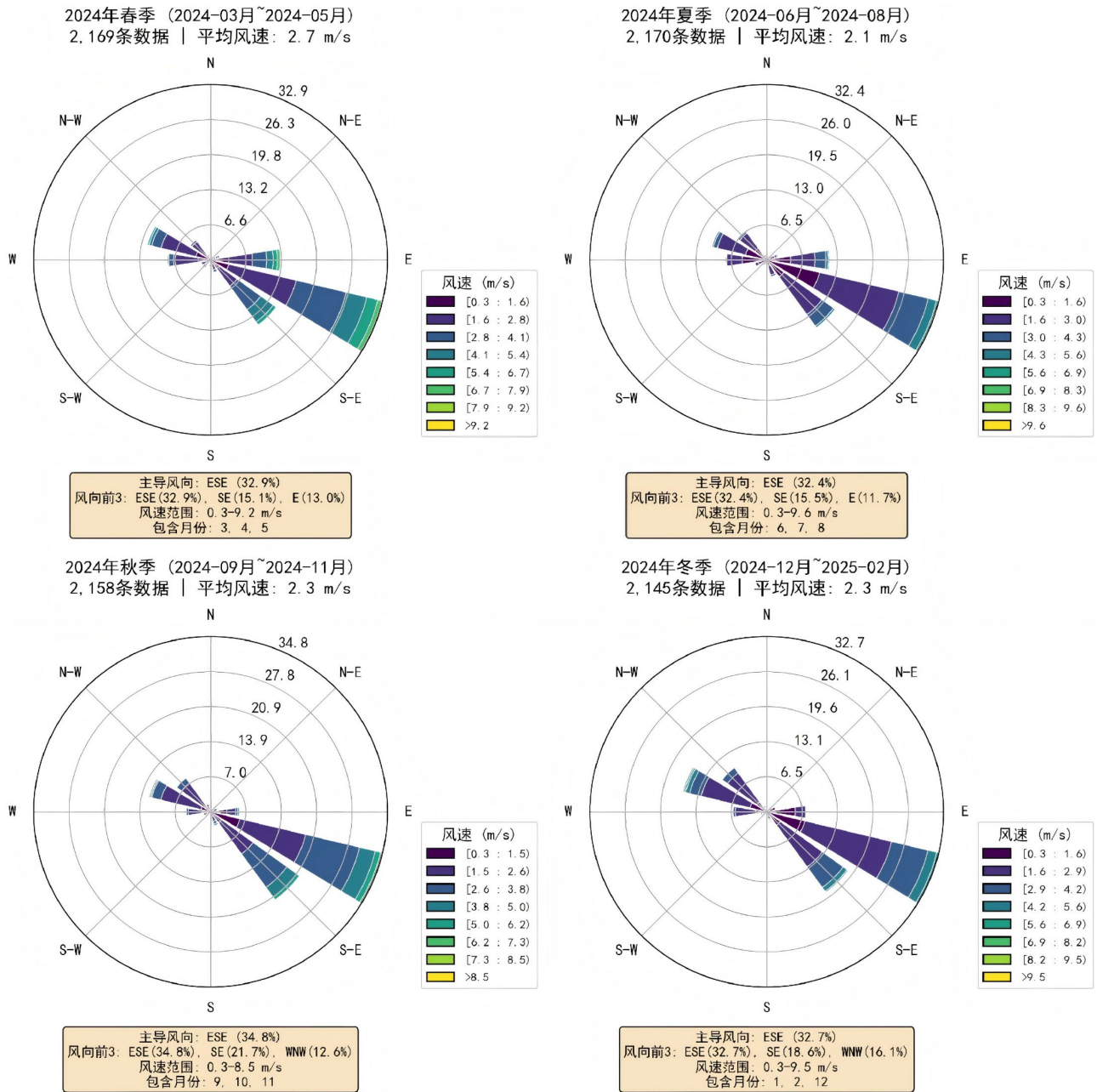


Figure 8. Four-season wind rose diagram of Deyi village, Dehenglong township, 2024
图 8. 2024 年德恒隆乡德一村四季风玫瑰图

主导风向都为 ESE, ESE 方位的频率分别为 30.0%、27.2%、19.7%、14.9%。2024 年春夏秋冬的主导风向都为 ESE, ESE 方位的频率分别为 28.6%、25.5%、25.9%、23.9%。2023 年的主导风向为 ESE, ESE 方位的频率为 22.9%, 次主导风向为 E, E 方位的频率为 11.2%。2024 年的主导风向为 ESE, ESE 方位的频率为 24.0%, 次主导风向为 SE, SE 方位的频率为 16.4%。综合来看沙连堡乡政府一年四季盛行 ESE 风, 主导风向较集中。

从阿什努乡阿二村四季及全年风玫瑰图(图 15~18)可以看出, 风向较稳定和集中, 2023 年春夏的主导风向为 ESE, ESE 方位的频率分别为 15.8%、14.5%, 秋冬的主导风向为 WNW, WNW 方位的频率分别

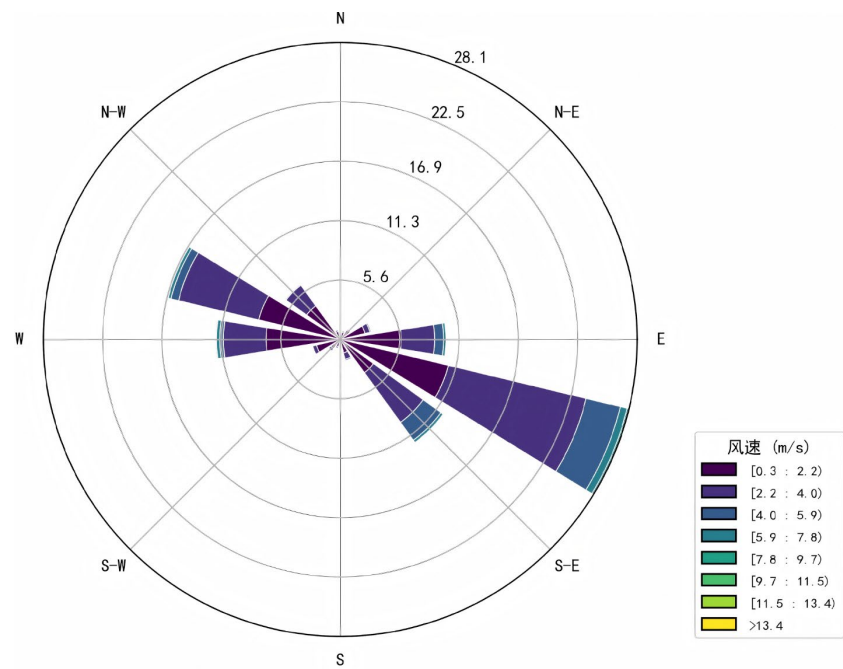


Figure 9. Annual wind rose diagram, Deyi village, Dehenglong township, 2023
图 9. 2023 年德恒隆乡德一村年风玫瑰图

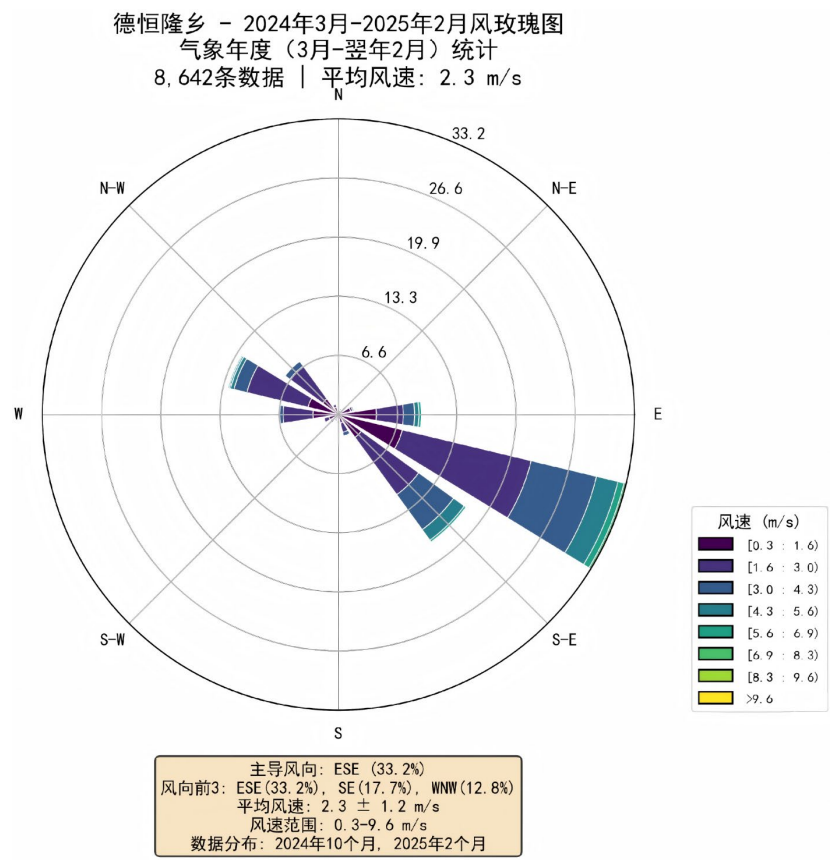


Figure 10. Annual wind rose diagram, Deyi village, Dehenglong township, 2024
图 10. 2024 年德恒隆乡德一村年风玫瑰图

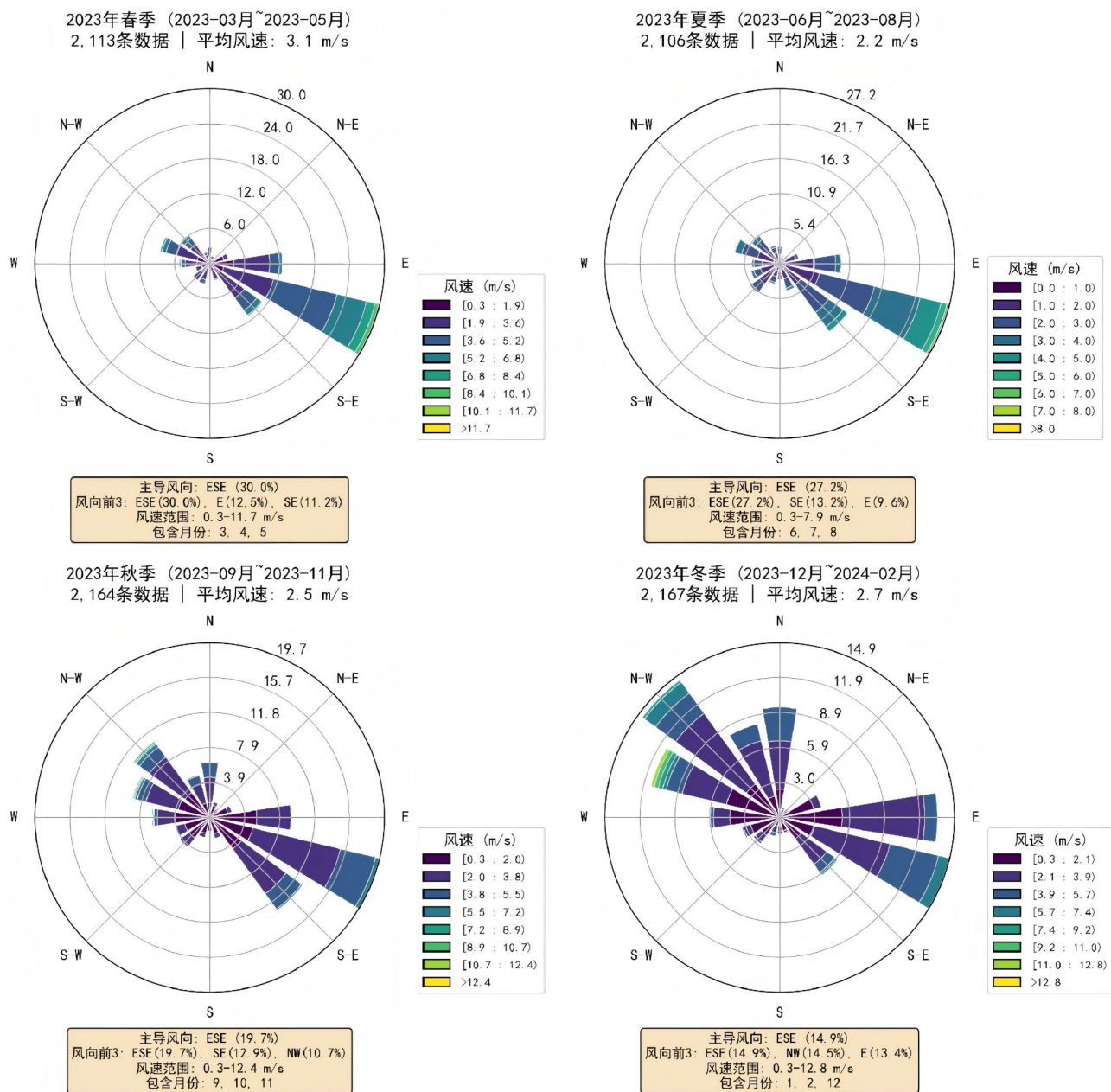


Figure 11. Four-season wind rose diagram, Shalianbao township, 2023

图 11. 2023 年沙连堡乡政府四季风玫瑰图

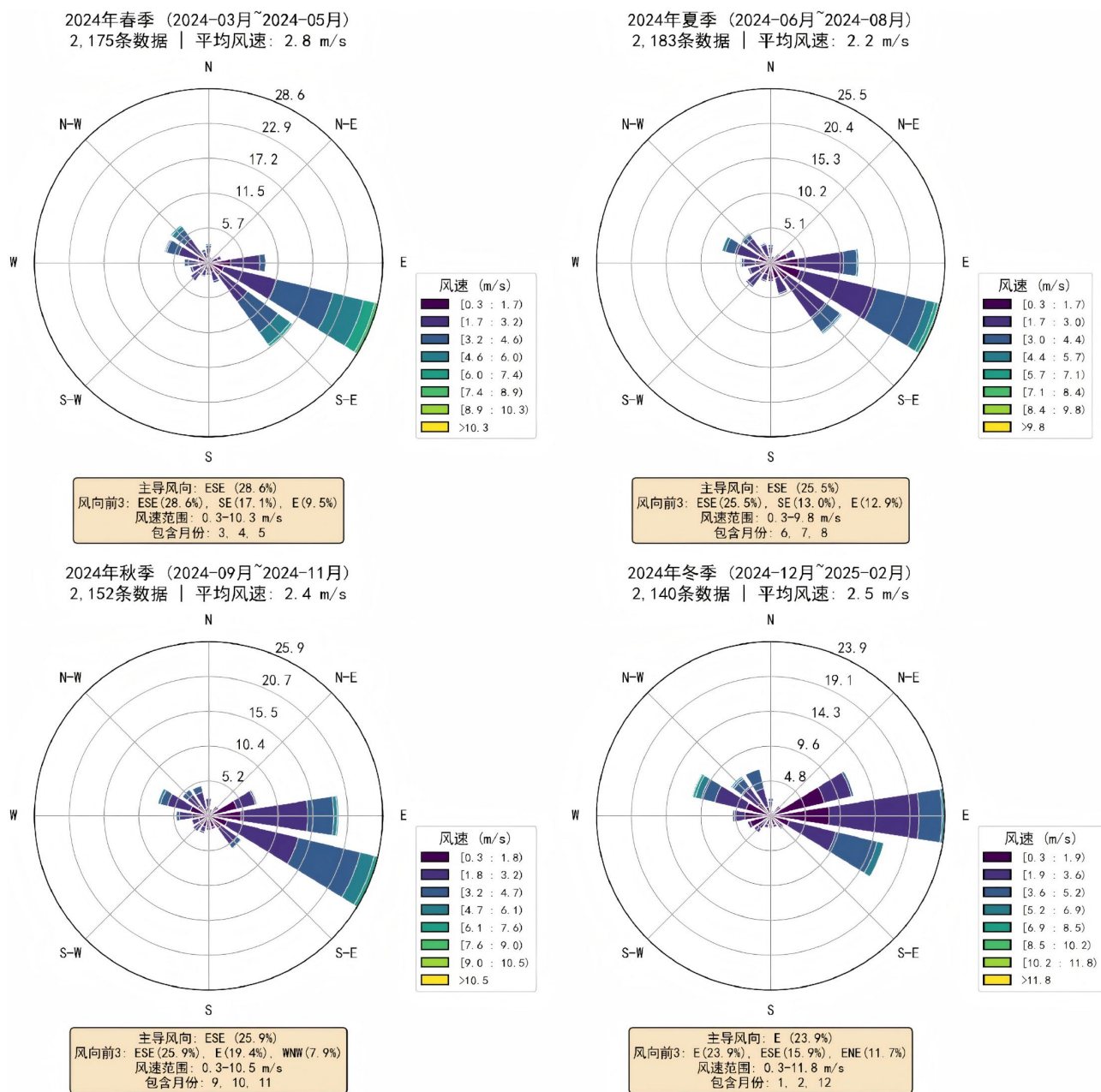


Figure 12. Four-season wind rose diagram, Shalianbao township, 2024

图 12. 2024 年沙连堡乡政府四季风玫瑰图

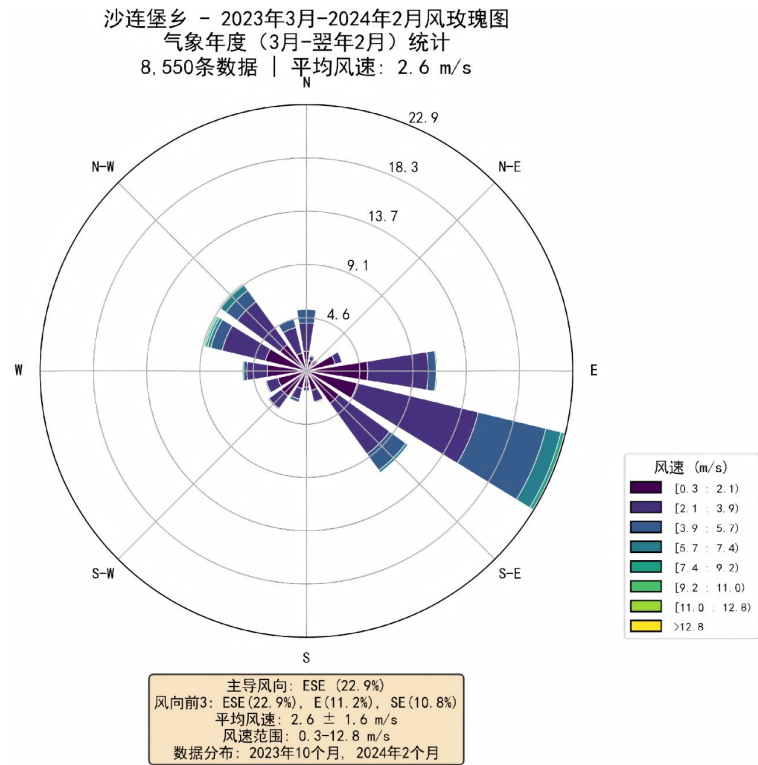


Figure 13. Annual wind rose diagram of Shalianbao township, 2023
图 13. 2023 年沙连堡乡政府年风玫瑰图

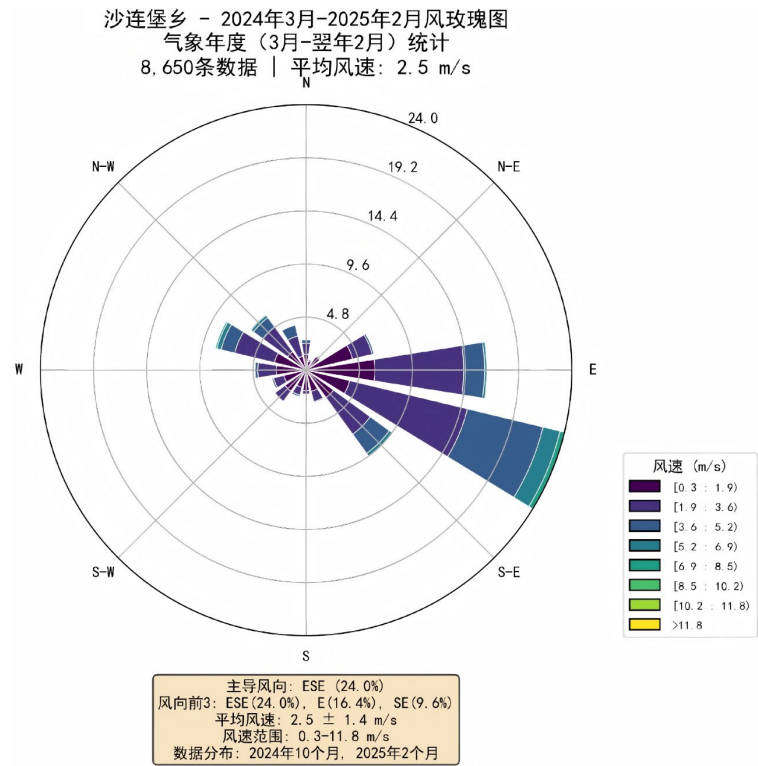


Figure 14. Annual wind rose diagram of Shalianbao township, 2024
图 14. 2024 年沙连堡乡政府年风玫瑰图

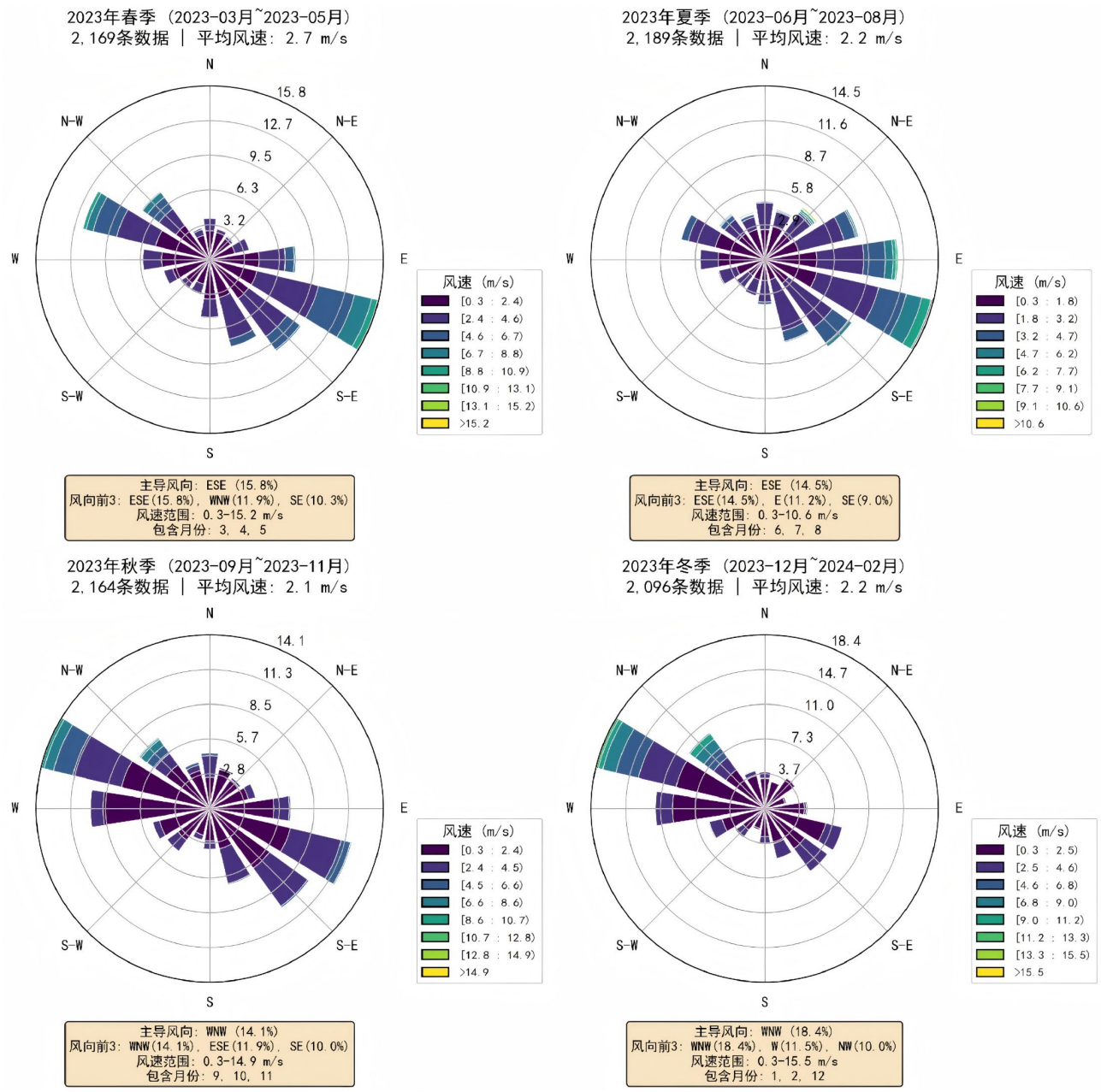


Figure 15. Four-season wind rose diagram of A'er village, Ashinu township, 2023

图 15. 2023 年阿什努乡阿二村四季风玫瑰图

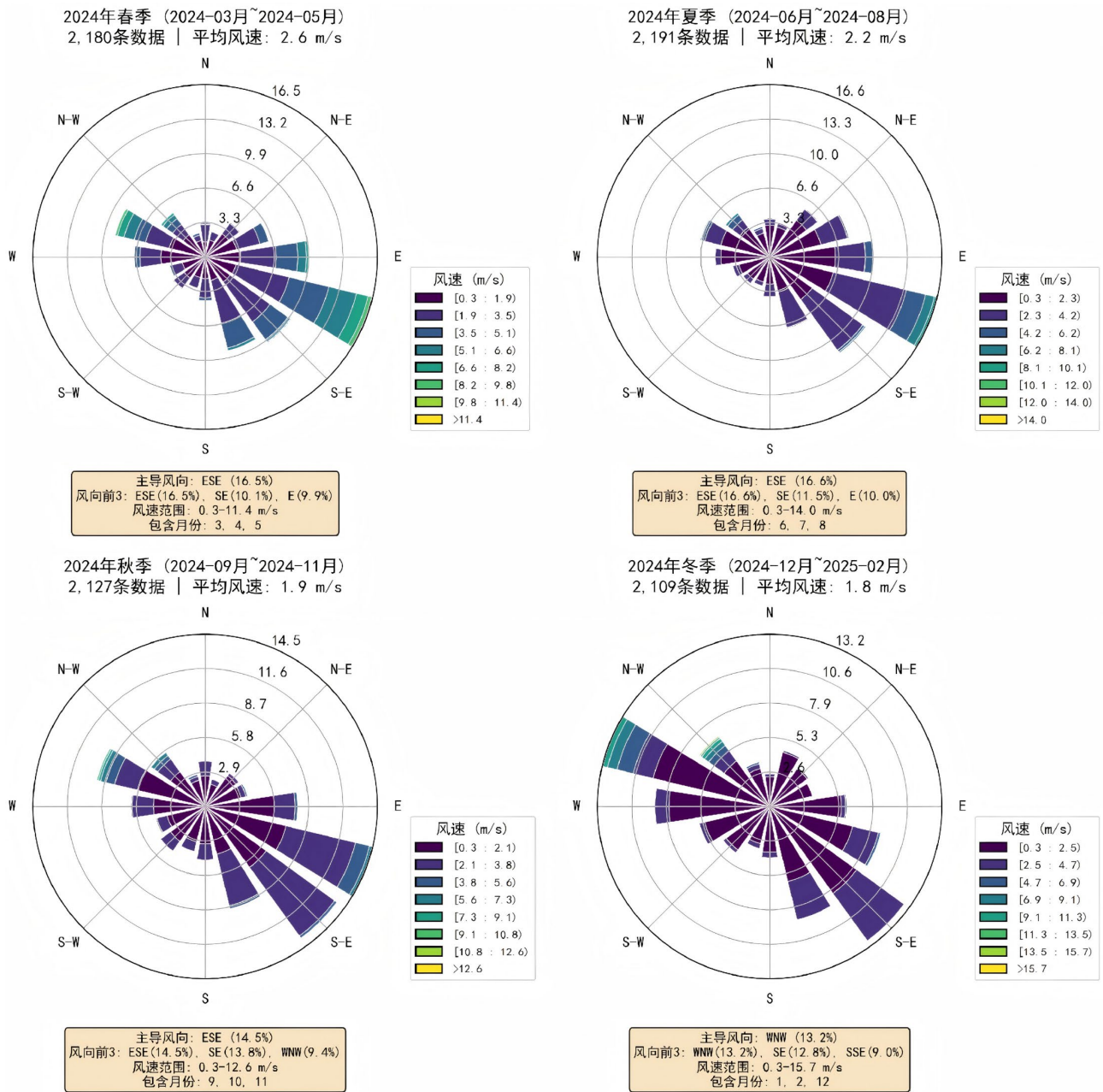


Figure 16. Four-season wind rose diagram of A'er village, Ashinu township, 2024

图 16. 2024 年阿什努乡阿二村四季风玫瑰图

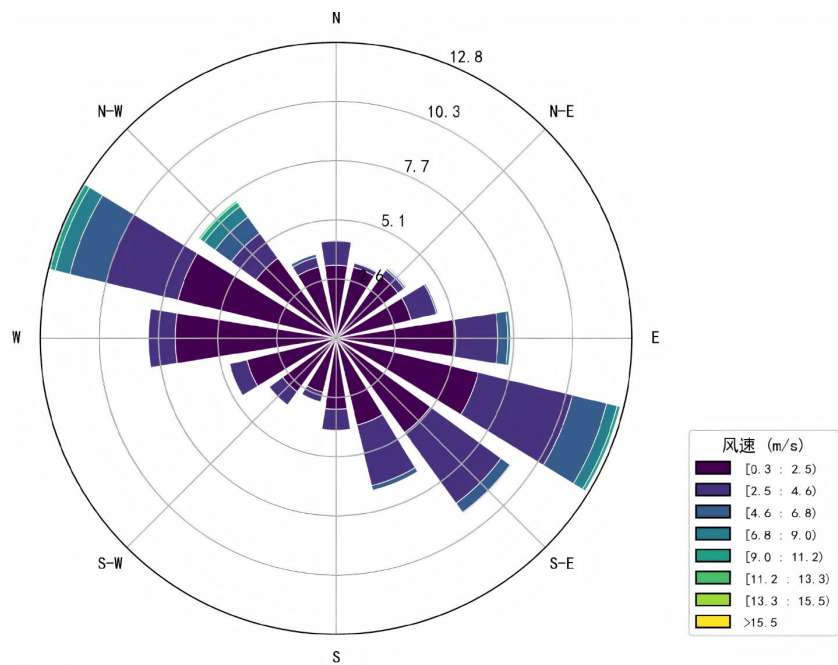


Figure 17. Annual wind rose diagram, A'er village, Ashinu township, 2023
图 17. 2023 年阿什努乡阿二村年风玫瑰图

化隆阿什努乡二村 - 2024年3月-2025年2月风玫瑰图
气象年度 (3月-翌年2月) 统计
8,607条数据 | 平均风速: 2.1 m/s

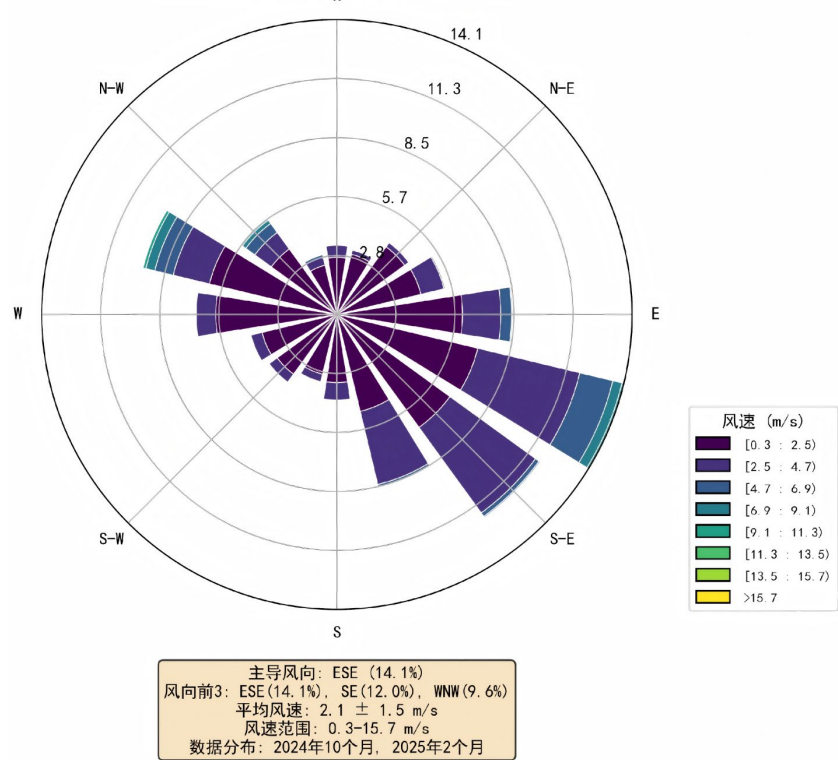


Figure 18. Annual wind rose diagram, A'er Village, Ashinu township, 202
图 18. 2024 年阿什努乡阿二村年风玫瑰图

为 14.1%、18.4%，春夏以偏东风为主，秋冬以偏西风为主。2024 年春夏秋的主导风向都为 ESE，ESE 方位的频率分别为 16.5%、16.6%、14.5%，冬季的主导风为 WNW，WNW 方位的频率为 13.2%。2023 年的主导风向为 WNW，WNW 方位的频率为 12.8%，次主导风向为 ESE，ESE 方位的频率为 12.7%。2024 年的主导风向为 ESE，ESE 方位的频率为 14.1%，次主导风向为 SE，SE 方位的频率为 12.0%。综合来看阿什努乡阿二村在 ESE 方位风向较集中。德恒隆、沙连堡乡处于东南沟谷喇叭口开口处，狭管效应造就常年 ESE 主导风向；阿什努乡山脊阻隔，冬春以 WNW 风为主，夏季东南风入境转为 ESE，风向季节更替明显。辖区内山地下垫面复杂，局地风场空间异质性突出，致使区域风功率密度偏低，有效风速利用时长不足。

4. 结论

(1) 德恒隆乡德一村月密度变化在 $0.866\sim0.943\text{ kg/m}^3$ 、沙连堡乡政府月密度变化在 $0.861\sim0.934\text{ kg/m}^3$ 、阿什努乡阿二村月密度变化在 $0.867\sim0.945\text{ kg/m}^3$ ；7 月、8 月空气密度最小，1 月、12 月空气密度最大。

(2) 三个站点风速和风功率密度月变化为 3 月、4 月、11 月、12 月大，6~9 月小，风速和风功率密度变化规律基本一致。2023 年德恒隆乡德一村、沙连堡乡政府、阿什努乡阿二村风功率密度分别为 13.4 w/m^2 、 18.5 w/m^2 、 18.7 w/m^2 。2024 年德恒隆乡德一村、沙连堡乡政府、阿什努乡阿二村风功率密度分别为 11.5 w/m^2 、 14.1 w/m^2 、 13.5 w/m^2 。依据 GB/T 18710-2002 风电场风能资源评估方法参考值风功率密度 $\leq 100\text{ w/m}^2$ ，风功率密度等级为 1 级。

(3) 2023 年德恒隆乡德一村有效时数 2199 h，频率 25%，沙连堡乡政府有效时数 2929 h，频率 33%，阿什努乡有效时数 2028 h，频率 23%。2024 年德恒隆乡德一村有效时数 2104 h，频率 24%，沙连堡乡政府有效时数 2669 h，频率 30%，阿什努乡阿二村有效时数 1773 h，频率 20%。

(4) 德恒隆乡德一村 2023~2024 年四季、全年主导风向均为 ESE，2023 年 ESE 全年频率 28.1%，2024 年升至 33.2% (冬季增幅显著)，风向高度集中。沙连堡乡政府同期四季主导风向均为 ESE，2023 年 ESE 全年频率 22.9%，2024 年为 24.0%，风向稳定集中。阿什努乡阿二村 2023 年春夏主 ESE、秋冬主 WNW，全年主 WNW；2024 年春夏秋主 ESE、冬季主 WNW，全年主 ESE，ESE 风向相对集中。

5. 讨论

1. 与国内典型山地风资源研究成果对比可知，青藏高原东部浅山沟壑区普遍存在风功率密度偏低、有效发电时长不足、风向受地形主导显著的特征。相较于青海环湖开阔台地、西部戈壁滩风能富集区，化隆县山地因地形遮蔽、沟壑交错、植被与裸地交错分布，地表摩擦力整体偏大，难以形成持续性大风环境，风能资源等级普遍为 1 级，开发条件远不及高原开阔平坦区域。

2. 本研究观测时段仅为 2023 年 3 月~2025 年 2 月，序列时长有限，未能完全反映区域多年气候波动对风能资源的影响，极端年份风资源特征未能充分体现。本次研究仅基于地面自动站观测数据，未开展风机轮毂高度(50m/70m/100m)高空风资源订正，无法精准反映风电开发实际高度层风能条件。基于现有气象站的评估结果可能无法完全代表整个区域的风能潜力，尤其是山脊等高风速区域，建议未来可采用测风塔或激光雷达等方式进行更具针对性的微观选址。

3. 结合本研究风资源评估结果，化隆县德恒隆乡、沙连堡乡、阿什努乡山地整体风能资源贫乏，规模化风电开发价值较低。建议当地能源规划可依托局地山谷风、季节性大风特征，试点布局分布式小微风力发电设施，配合农村光伏互补，服务乡村用电需求。

参考文献

[1] 黄梅丽, 史彩霞, 谭强敏, 等. 广西山地风能资源开发利用可行性分析——以大容山为例[J]. 成都信息工程学院

- 学报, 2007(2): 247-252.
- [2] 田松涛. 高海拔区域复杂山地地形的风能资源评估[J]. 电工技术, 2024(6): 49-54, 58.
 - [3] 王强, 张雪辉, 王星, 等. 贵州山地地区风力发电技术发展探讨及展望[J]. 科技和产业, 2021, 21(7): 253-259.
 - [4] 罗红磊, 何如, 周绍毅, 等. 广西山地风能资源评估——以玉林天堂顶为例[J]. 能源与节能, 2017(6): 81-83, 86.
 - [5] 史波, 胡彦君, 刘志强, 等. 基于双组分混合 Nakagami 模型的复杂地形风能评估[J]. 中国新技术新产品, 2026(4): 14-16.
 - [6] 龙海川, 袁令, 买小平, 等. 基于深度学习模型的 SAR 卫星融合海上风能资源评估[J]. 船舶工程, 2025, 47(S2): 20-27, 33.
 - [7] 李海波. 结合计算流体力学方法的山地风电场风能资源评估研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学(北京), 2016.
 - [8] 胡可欣. 基于 Copula 函数的复杂地形风资源评估研究[D]: [硕士学位论文]. 扬州: 扬州大学, 2025.
 - [9] 叶瑶, 袁熹, 王逸奇. 基于 WRF 模式的四川省凉山州地区风能资源可开发区域研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(2): 158-163.
 - [10] 全国能源基础与管理标准化技术委员会. GB/T 18710-2002 风电场风能资源评估方法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2002.